



Revue AE&S 13-1 Eau, sol et changement climatique : quelles implications pour les agronomes et les pédologues ? - juin 2023

Revue à comité de lecture et en accès libre éditée par l'Association Française d'Agronomie sous le numéro ISSN 1775-4240. Plus d'informations www.agronomie.asso.fr/aes

L'AFA est une association à but non lucratif qui publie des travaux en accès libre.

Pour soutenir cette démarche, faites connaître AE&S, adhérez à l'association et faites adhérer votre organisme et vos collègues !



Estimation du réservoir en eau du sol utilisable par les cultures : enjeux, avancées méthodologiques, perspectives

Olivier Scheurer* et Alain Bouthier**

*UniLassalle, retraité

**Arvalis-Institut du végétal, retraité

Contact auteurs : o.scheurer@orange.fr

Résumé

Dans la perspective du changement climatique, les enjeux de l'estimation du réservoir en eau du sol utilisable par les cultures (RU) se situent dans le recours accru à des outils d'aide à la décision ou de simulation du fonctionnement du système sol-plante-atmosphère, pour une grande diversité d'usages, de la parcelle au territoire. Dans ce contexte, plusieurs avancées méthodologiques ont récemment été proposées pour l'estimation du RU¹: i) un modèle de calcul du RU améliorant la prise en compte du système sol-enracinement, ii) plusieurs méthodes pour estimer chaque paramètre de ce modèle, iii) des références sur l'incertitude associée à chaque méthode. Les méthodes basées sur des mesures et observations locales peuvent être remplacées par défaut par le recours à des fonctions de pédotransfert ou à des référentiels régionaux. Ces avancées devraient réduire l'incertitude des estimations du RU pour une plus grande diversité d'utilisateurs et de situations. Des actions sont proposées pour accompagner leur transfert.

Mots clés : RU, changement climatique, modèles de culture, fonctions de pédotransfert, enracinement, incertitude d'estimation

Abstract

In the perspective of climate change, the challenges of estimating the crop available soil water content (AWC) lie in the increased and diversified use of decision support tools or crop models simulating the soil-plant-atmosphere system, from the plot to the territory level. In this context, several methodological advances have been proposed for estimating the AWC: i) a AWC calculation model taking better account of the soil-rooting system, ii) a set of methods to estimate each parameter of this model, iii) uncertainty ranges associated to these methods. Methods based on local measurements and observations may be replaced by default by using pedotransfert functions or regional soil references databases. These advances should reduce the uncertainty of AWC estimates for a wider diversity of users and situations. Actions for supporting their transfer are proposed.

Keywords: AWC, climate change, crop models, pedotransfert functions, estimate uncertainty

¹ Bouthier A., Scheurer O., Seger M., Lagacherie P., Beaudoin N., Deschamps T., Sauter J., Fort JL., Cousin I., Réservoir en eau du sol utilisable par les cultures, éditions Arvalis, 2022

Introduction

Les sols jouent un rôle important dans les écosystèmes en assurant de multiples fonctions et en contribuant à de nombreux services écosystémiques. Parmi ces fonctions, celle de réservoir pour le stockage de l'eau est essentielle pour la production de biomasse et la protection des ressources en eau souterraine. Pour cette fonction, la taille du Réservoir en eau Utilisable par les cultures (RU), défini par la quantité d'eau maximale que le sol peut retenir et restituer aux plantes, joue un rôle majeur.

Le RU est très variable d'un sol à l'autre -de moins de 50 à plus de 250 mm- et cette variabilité peut être importante même au sein d'une parcelle agricole. Sa caractérisation est primordiale pour comprendre les interactions complexes entre l'agriculture et son environnement, à tous les niveaux, de la parcelle au territoire. En particulier, le RU est un paramètre majeur dans les modèles de culture qui décrivent les flux journaliers d'eau, de carbone et d'azote dans le système sol-plante-atmosphère, en relation avec le climat et les pratiques culturales au niveau d'une unité spatiale homogène. Il constitue aussi une donnée d'entrée de nombreux outils d'aide à la décision (OAD) et outils d'évaluation agri-environnementale (OEAE) à l'usage des agriculteurs ou/et des agronomes qui les accompagnent.

La variable RU n'est en général pas renseignée dans les bases de données spatialisées sur les sols, en particulier dans les Référentiels Régionaux Pédologiques qui constituent la principale source d'information nationale² dans ce domaine. A défaut de mesures locales caractérisant le RU de leur unité spatiale de travail, difficiles à mettre en œuvre, les utilisateurs ont en général recours à divers modèles d'estimation du RU (fonctions de pédotransfert) à partir des propriétés renseignées dans la base de données-sol régionale³. Par simplification, ils peuvent aussi rattacher leur sol à un référentiel constitué par un nombre limité de cas-types régionaux dont le RU est connu. Ces méthodes se traduisent par un accroissement de l'incertitude sur la valeur estimée du RU.

C'est dans ce contexte que l'ouvrage collectif « Réservoir en eau du sol utilisable par les cultures »⁴ a été publié en 2022 avec le soutien du RMT Sols et territoires dans le cadre de son axe thématique « Valorisation des données sol ». Ce document de près de cent pages est un guide méthodologique, rédigé par des agronomes et des pédologues, chercheurs ou ingénieurs de la recherche-développement, proches des utilisateurs finaux⁵. Il fait le point sur l'état des connaissances et des méthodes et propose une nouvelle approche pour l'estimation du RU à l'échelle locale (du profil de sol au petit territoire), applicable dans une large gamme de situations agropédoclimatiques françaises, en fonction des données disponibles (voir Encadré 1). Les auteurs se sont largement appuyés sur les résultats du projet RUEdesSOLS⁶ (ANR 2015-2019), mais aussi sur des travaux plus anciens parfois non publiés, notamment pour ce qui est de la prise en compte de l'enracinement. Dans une première partie, cet article examinera les enjeux de l'estimation du RU pour les agronomes dans la perspective du changement climatique selon ses deux composantes (adaptation et atténuation), à travers la diversité des usages d'OAD, d'OEAE ou de modèles de culture. Les principales avancées méthodologiques exposées dans le guide seront ensuite présentées, puis discutées en fonction de ces usages pour dégager les limites des méthodes préconisées et les actions à mener pour favoriser leur transfert auprès des utilisateurs.

² France métropolitaine

³ Cette approche a souvent été mise œuvre dans des applications cartographiques (Richer de Forges *et al.*, 2017) ou pour caractériser les sols dans des typologies agronomiques régionales.

⁴ Bouthier A., Scheurer O., Seger M., Lagacherie P., Beaudoin N., Deschamps T., Sauter J., Fort JL., Cousin I., Réservoir en eau du sol utilisable par les cultures, éditions Arvalis, 2022. (hal-03906315)

⁵ Dans la suite de l'article, l'ouvrage sera désigné par l'appellation « le guide ».

⁶ <https://www6.inrae.fr/rue-des-sols/>

Encadré 1 :
Sommaire de l'ouvrage « Réservoir en eau du sol utilisable par les cultures – Guide d'estimation »

Introduction

- 1 - Quantifier la quantité d'eau disponible pour les plantes à différentes échelles de l'agrégat au profil
 - 2 - Les états de l'eau dans le sol et les valeurs caractéristiques de l'Humidité Utile Maximale (HUM)
 - 3 - De l'eau utile dans les éléments grossiers – Evaluation du RUM dans les horizons caillouteux
 - 4 - Des classes et des fonctions de pédotransfert pour estimer le Réservoir en Eau Utilisable Maximal
 - 5 - Racines et extraction d'eau
 - 6 - Utilisation de données de cultures pour estimer le RU
 - 7 - Méthodes d'estimation du réservoir utilisable selon les données locales disponibles
 - 8 - Spatialisation à l'échelle de la parcelle et de petits territoires
 - 9 - Associer une incertitude à l'estimation du RUM ou du RU
 - 10 - Modes opératoires pour mesurer les paramètres du RU
- Références bibliographiques

Estimer le RU, pour quels objectifs face au changement climatique ?

S'adapter aux conséquences du changement climatique

Pour la production agricole de la plupart des régions françaises le changement climatique en cours se traduit par une augmentation des déficits hydriques printaniers et estivaux en fréquence et en intensité. Ainsi, l'amélioration de la robustesse des systèmes de culture face à ces déficits hydriques accrus devient un enjeu de premier plan dans de nombreuses régions de France.

Le recours à l'irrigation constitue un premier moyen de mieux faire face au déficit hydrique, mais son développement se heurte à un accroissement de la tension sur la ressource en eau dans les bassins versants. Ainsi le volume d'eau d'irrigation peut devenir limitant par rapport aux besoins. Il en résulte la nécessité d'adapter la conduite des systèmes de culture dans ses dimensions stratégique (choix d'assolement et d'affectation de la ressource en eau, en fonction de la diversité des sols) et tactique (pilotage de l'irrigation au niveau parcellaire ou intra-parcellaire). Il en résulte aussi la nécessité d'une gestion concertée de la ressource à l'échelle des bassins versants hydrologiques en tension vis-à-vis de la ressource en eau. Pour éclairer leurs choix tactiques et stratégiques dans ces systèmes irrigués, les différents acteurs concernés (les agriculteurs, leurs conseillers, les gestionnaires de ressource en eau) ont recours à des outils d'aide à la décision (OAD) basés sur le calcul de bilans hydriques au cours d'une période donnée (saison d'irrigation, cycle cultural...), dans lesquels la connaissance du RU est primordiale. Différents types d'OAD sont utilisés selon l'échelle spatiale et le niveau de décision (stratégique ou tactique) :

- pilotage tactique de l'irrigation. C'est sur ce créneau que le plus grand nombre d'OAD (IRRELIS, Netirrig, Optirrig, ...) sont proposés aux agriculteurs irrigants, qui peuvent les utiliser seuls ou avec l'appui de leur conseiller technique (Wittling et Ruelle, 2022). Ce type d'outil, basé sur un calcul de bilan hydrique et qui fonctionne à l'échelle de la parcelle ou d'un îlot de parcelles irriguées dans un même tour d'eau, permet de fournir en temps réel, l'état de remplissage du RU et de donner un conseil d'irrigation.

- aide au choix stratégique à l'échelle de l'exploitation agricole. L'objectif de ces OAD, utilisés avant la campagne d'irrigation, est d'aider au choix d'assolement et à la répartition d'une ressource en eau d'irrigation limitante, sur les parcelles ou îlots de parcelles de la sole irriguée, en fonction des sols (caractérisés par leur RU). Les différentes stratégies d'assolement (part des cultures irriguées) et d'irrigation (plus ou moins rationnée) proposées, sont confrontées à des scénarios climatiques et économiques. On peut citer l'outil ASALEE développé par ARVALIS

(version actualisée de l'outil Lora) mis à la disposition d'organismes (chambres d'agriculture, coopératives...) pour réaliser des études sur des exploitations irrigantes.

- aide à la gestion collective de la ressource en eau par les Organismes Uniques⁷, à l'échelle de bassins versants hydrologiques. L'outil SIMULTEAU développé dans le cadre d'un projet CASDAR (2015-2018) porté par ARVALIS et s'appuyant sur la plateforme MAELIA⁸ mis au point par l'INRA (Thérond *et al.*, 2014) permet de tester des stratégies de gestion de l'eau à l'échelle d'un bassin versant hydrologique. MAELIA 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. Les variables de sortie donnent des informations agronomiques sur les différentes parcelles agricoles (rendements, dates des opérations techniques, volume d'eau drainé ...) ainsi que des renseignements pertinents du point de vue des gestionnaires de l'eau (nombre de jours de restriction, volumes prélevés par l'agriculture, niveau des barrages...).

Mais la part de la SAU irriguée à l'échelle de la France reste et restera très minoritaire (de l'ordre de 15 %) par rapport à celle de la SAU en culture pluviale. Les systèmes de culture doivent donc évoluer dans le sens d'une plus grande robustesse face aux déficits hydriques. Celle-ci met en jeu des choix de successions culturales et d'itinéraires techniques permettant de mieux tolérer et/ou d'esquiver les déficits hydriques, tels que le choix d'espèces ou de variétés peu sensibles et de dates de semis précoces dans les situations les plus à risque. La connaissance du RU au niveau de l'exploitation agricole est alors nécessaire pour identifier ces situations en fonction du contexte climatique et de son évolution.

Réduire les émissions de GES pour contribuer à l'atténuation du changement climatique :

Dans le contexte plus global de la transition agroécologique, la nécessaire reconception des systèmes de culture (irrigués comme pluviaux) doit prendre en compte l'objectif d'atténuation du changement climatique, à travers la réduction des émissions de GES et le stockage de carbone dans les sols. Cette évolution passe en particulier par un travail du sol réduit, une couverture végétale plus longue et une diminution du recours aux fertilisants azotés de synthèse, se traduisant notamment par la diversification des espèces cultivées (légumineuses, cultures intermédiaires) et de leur assemblage (cultures associées, semis sous couvert).

Pour les agronomes, la conception et l'évaluation de systèmes de culture mieux adaptés à la sécheresse avec un impact réduit sur les émissions de GES et stockant du carbone fait largement appel aux modèles de culture. Ces modèles prennent en compte les effets du climat, des propriétés du sol, des itinéraires techniques et des caractéristiques écophysologiques des cultures, sur des variables de sortie traduisant l'état des cultures (phénologie, accumulation de biomasse, rendement en biomasse totale et récoltable) et plusieurs impacts de l'agrosystème sur l'environnement (évapotranspiration, transferts hydriques et de solutés vers eaux de surface et souterraines, stockage de carbone dans le sol, ...). Ces outils permettent de réaliser des simulations annuelles ou pluriannuelles du fonctionnement des agrosystèmes sous différents scénarios climatiques et techniques (itinéraires techniques) pour évaluer des risques pour les agriculteurs (limitation du rendement voire de la marge brute, ...) et des impacts environnementaux à différents niveaux d'échelle.

Le simulateur multicultures STICS (Brisson *et al.*, 2009) constitue le modèle de référence français, conçu par INRAE en partenariat avec des organismes de recherche-développement (Instituts techniques, Agrotransfert Picardie et Poitou-Charentes-). D'autres modèles de culture fonctionnant globalement sur les mêmes principes ont été mis au point par différents organismes pour leurs usages propres. Citons : CHN d'Arvalis et AqYield de l'UMR AGIR, intégré dans MAELIA

⁷ Un organisme unique -de gestion collective- (OUGC) est une structure qui a en charge la gestion et la répartition des volumes d'eau prélevés à usage agricole sur un territoire déterminé.

⁸ Multi-Agents for Environmental norms Impact Assessment (<http://maelia-platform.inra.fr/>)

(multi-cultures), SAFY du CESBIO (blé et couverts intermédiaires), SUNFLO d'INRAE et Terre Inovia (tournesol). Ils se différencient par leur degré de complexité, en relation avec le nombre de données d'entrée à renseigner et la diversité des variables de sortie obtenues. Dans tous les cas, les paramètres nécessaires à un calcul du RU sont des variables d'entrée obligatoires.

D'autres modèles comptant le RU parmi leurs variables d'entrée sont également utilisés, à des fins de diagnostic ou d'évaluation des systèmes de culture, pour estimer leurs émissions d'azote dans l'eau et l'atmosphère ou leur bilan de GES. C'est respectivement le cas des outils SYST'N et ABC'Terre (Delesalle *et al.*, 2019). Dans le calculateur de la méthode ABC'Terre⁹, le RU est un prédictor du rendement moyen ; il permet d'estimer un niveau probable de fertilisation azotée pour en déduire les émissions de GES liées à l'usage d'engrais N. L'outil SYST'N¹⁰ utilise le RU comme variable d'entrée pour l'estimation des pertes d'azote nitrique par lixiviation.

La capacité de ces modèles à réaliser des expérimentations virtuelles en grand nombre peut aussi être utilisée pour produire des références dans une large gamme de situations agronomiques. Celles-ci peuvent ensuite alimenter des OAD plus simples, adaptés à l'usage des agriculteurs et de leurs conseillers.

Au-delà de l'évaluation des systèmes de culture, la nécessité d'un pilotage plus économe de la fertilisation azotée devrait augmenter le recours aux OAD conçus pour mieux évaluer la fourniture du sol (MERCIT¹¹, Azofert, ...), dans lesquels le RU est aussi une variable d'entrée (indicateur de sensibilité à la lixiviation).

Diversité des usages, des utilisateurs et des besoins pour l'estimation du RU

Usages et utilisateurs

Le RU constitue une variable d'entrée dans des outils très divers et pour des usages variés : pilotage annuel des cultures, aide à la décision stratégique à l'échelle de l'exploitation, production de références régionales (au niveau de l'itinéraire technique ou du système de culture) sur des cas-types de combinaisons sol x culture ou sol x système de culture¹², aide à la décision (diagnostic, évaluation de scénarios) sur l'ensemble d'un territoire¹³, souvent dans des démarches multi-acteurs.

Les utilisateurs sont aussi très divers : agriculteurs et agronomes accompagnant les agriculteurs (principalement pour les OAD), chercheurs et organismes de R&D, enseignement-supérieur agronomique. Ainsi, les utilisateurs d'un simulateur de culture complexe tel que STICS s'étendent au-delà du domaine de la recherche : instituts techniques, Agrotransfert (partenaires historiques), Chambre régionale d'agriculture, enseignement supérieur agronomique (notamment dans le cadre de projets étudiants tutorés, avec un commanditaire externe¹⁴).

La diversité des variables de sortie des modèles est mobilisable pour de l'évaluation multicritères. De ce fait, les parties prenantes potentiellement concernées par les résultats sont variées ; elles peuvent dépasser le cercle des utilisateurs et s'étendre aux collectivités et aux services de l'état impliqués dans la gestion des territoires et des ressources ou à des acteurs économiques.

Besoins pour l'estimation du RU

Les trois aspects suivants sont à considérer pour identifier la diversité des besoins.

➤ ⁹ <http://www.agro-transfert-rt.org/abcterre/calcul-abcterre/>

➤ ¹⁰ <http://www.rmt-fertilisationenvironnement.org/moodle/course/view.php?id=8>

¹¹ <https://methode-merci.fr>

➤ ¹² Voir par exemple : Rakotovololona *et al.*, 2017 ; Minette *et al.*, 2019.

➤ ¹³ Voir par exemple : Chambre d'agriculture du Grand Est, 2022

➤ ¹⁴ Voir par exemple : Marraccini *et al.*, 2020

i) Le détail avec lequel l'utilisateur doit renseigner les données d'entrée pour l'estimation du RU, qui varie suivant le type d'outil :

- le RU peut être renseigné globalement sur l'ensemble du profil, sans distinction des horizons, sur la profondeur considérée comme exploitable par les racines. C'est le cas d'OAD en général basés sur un modèle utilisant des classes de RU comme indicateurs d'autres variables d'intérêt : sensibilité du sol à la lixiviation de N ou rendement moyen par exemple.

- le RU doit au contraire être décrit pour chacun des horizons colonisés, par leur épaisseur, leur charge en éléments grossiers et leurs deux humidités caractéristiques (HCC et HPFP¹⁵), et par la profondeur maximale de sol exploitable par les racines. C'est en général le cas des modèles de culture dès lors qu'ils intègrent un bilan hydrique journalier. Dans certains outils (Aqyield, SYST'N) les humidités caractéristiques des horizons sont cependant estimées simplement à partir de la texture renseignée par l'utilisateur (une fonction de pédotransfert est intégrée dans l'outil).

Dans STICS, trois paramètres caractéristiques de l'allure du profil de densité racinaire de la culture (en l'absence de contrainte) doivent en plus être renseignés pour rendre compte de la décroissance du taux d'exploitation du réservoir en eau vers la profondeur.

ii) Le niveau d'incertitude acceptable pour l'estimation du RU.

Sa définition n'est pas simple car elle suppose d'une part d'avoir défini l'incertitude acceptable pour les variables de sortie du modèle et d'autre part de savoir estimer la propagation de l'incertitude sur le RU vers les variables de sortie. Concernant les rendements simulés, cette propagation de l'incertitude d'estimation du RU est d'autant plus forte que le RU est faible et que la durée d'exposition de la culture au déficit hydrique est longue (Constantin *et al.*, 2019).

Il est cependant certain que ce niveau d'incertitude doit être minimal dans les outils de pilotage annuel de l'irrigation avec lesquels on cherche à optimiser la gestion d'une ressource limitée à l'aide de l'évaluation journalière de l'état de remplissage du RU.

iii) Le nombre de situations (sol x culture) à caractériser par un utilisateur pour un usage donné.

Ce nombre est déterminant pour le choix d'une méthode d'estimation du RU (ou des données d'entrée nécessaires à son calcul). De ce point de vue, on peut distinguer deux grands cas d'usage :

- pour les OAD à destination des agriculteurs (accompagnés par leur conseiller), appliqués au niveau de la parcelle ou de l'exploitation, le nombre de situations à caractériser est faible ; l'estimation du RU par des mesures locales est donc envisageable et souvent souhaitable (pilotage de l'irrigation par exemple) pour réduire l'incertitude ;

- pour la production de références régionales ou l'aide à la décision multi-acteurs sur un territoire, ce nombre est en général élevé voire très élevé car l'exhaustivité est souvent requise ; l'estimation du RU par des mesures locales n'est pas envisageable et le rattachement des sols à un référentiel régional est incontournable.

➤ ¹⁵ HCC= humidité à la capacité au champ ; HPFP= humidité au point de flétrissement permanent

De la « Réserve utile » au Réservoir en eau du sol utilisable par les cultures

Le modèle d'estimation du RU proposé par les auteurs du guide intègre plus de paramètres que dans l'ancienne « Réserve utile ». Il vise ainsi à mieux prendre en compte les propriétés hydriques et structurales de chaque horizon ainsi que les spécificités de l'espèce cultivée à travers les caractéristiques de son système racinaire.

Dans une première étape, ce modèle procède à l'estimation du RUM, Réservoir Utilisable Maximal (correspondant à l'appellation ancienne de « Réserve utile »), basée sur l'estimation de l'Humidité Utile Maximale ($HUM_i = HCC_i - HPFP_i$) de chaque horizon présent sur la profondeur identifiée comme colonisée par les racines (Baize, 2000).

$$RUM_i \text{ (en mm)} = HUM_i \text{ (en \% volumique ou mm/dm)} * e_i \text{ (en dm)}$$

pour un horizon i d'épaisseur e_i

$$\text{avec } HUM_i = (wCC_i - wPFP_i) * MVA_i$$

wCC_i et $wPFP_i$ = valeurs de HCC_i et $HPFP_i$ en % pondéral

MVA_i = masse volumique apparente en $kg.dm^{-3}$

Pour améliorer l'estimation de HUM_i , wCC_i et $wPFP_i$ sont estimés en intégrant non seulement des propriétés texturales, mais aussi des propriétés structurales de l'horizon. On prend ainsi en compte le fait qu'à texture identique, une structure plus compacte (MVA élevée) présente en général une capacité de stockage de l'eau pondérale plus faible. De plus, la contribution des éléments grossiers est prise en compte lorsque ces derniers sont suffisamment poreux pour stocker de l'eau utilisable. Dans ce cas, on estime séparément l' HUM de la terre fine et celle des éléments grossiers.

Dans une seconde étape, pour définir le réservoir exploitable par les racines, le modèle intègre le taux d'exploitation effectif (Te en %) de l'humidité utilisable maximale de chaque horizon ; ce taux décroît avec la profondeur en suivant la diminution de la densité racinaire (figure 1).

$$RU_i = RUM_i * Te_i / 100$$

pour un horizon i

Deux profondeurs-seuils peuvent être utilisées pour caractériser la décroissance du Te dans un sol : $zlim$, profondeur en deçà de laquelle l'enracinement est suffisamment dense pour assurer un Te de 100 % et $zmax$, profondeur maximale d'enracinement au-delà de laquelle on admet que Te est égal à 0 %.

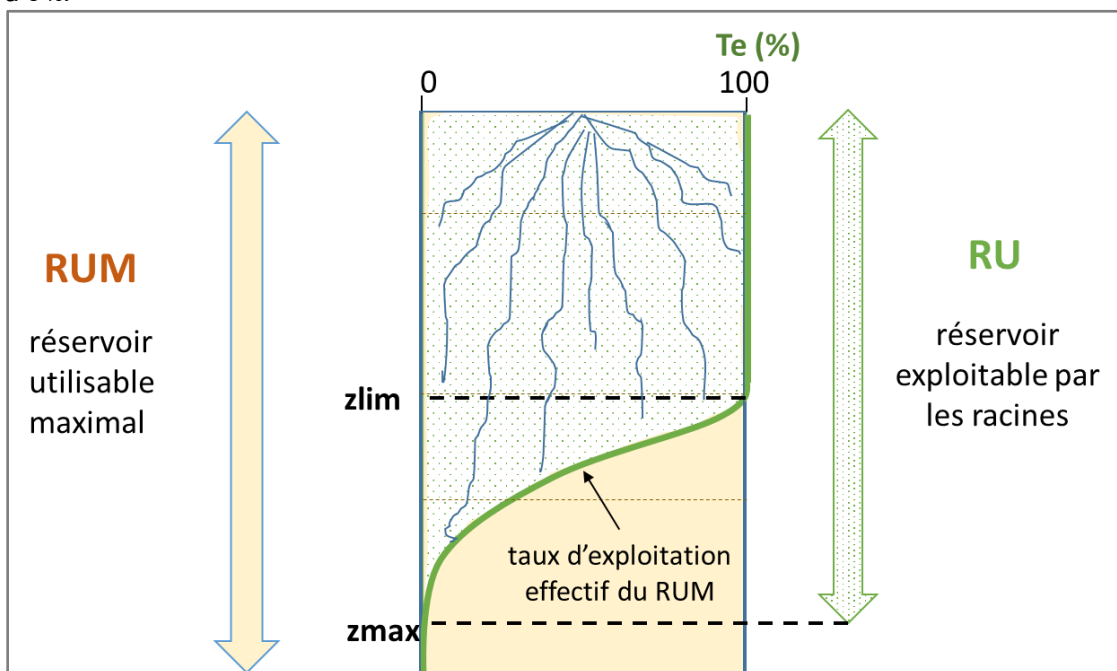


Figure 1 : Relation entre RUM, RU et les variables $zlim$ et $zmax$

Dans les sols profonds sans obstacle à l'enracinement, ces profondeurs-seuils (appelées respectivement z_{limC} et z_{maxC}) varient en fonction de l'espèce (voire de la variété) comme illustré dans le tableau 1. Dans les autres cas, z_{lim} et z_{max} , et plus globalement les valeurs des Te_i , dépendent à la fois de la culture, à travers les propriétés de son système racinaire, et du sol, à travers les propriétés de ses horizons. On distingue notamment des obstacles absolus et des obstacles relatifs à l'enracinement ; bien que colonisables, ces derniers limitent la densité et la profondeur maximale d'enracinement, donc les valeurs de Te et de z_{max} .

Tableau 1 : Valeurs estimées de z_{limC} et z_{maxC} (en cm) pour quelques espèces de grande culture, d'après différentes sources bibliographiques

Espèce	z_{maxC}	z_{limC}	n (*)
blé tendre d'hiver	160-200	80-120	4
orge d'hiver	200	125	1
colza d'hiver	160-180	100-110	3
betterave sucrière	220-240	100-110	4
pomme de terre (selon précocité)	90-150	50-70	6
maïs	175	75-90	3
pois de printemps	100	65-80	4
tournesol	175-300	90-120	4

(*) n = nombre de références bibliographiques exploitées

Le calcul du RU pour un horizon donné repose finalement sur l'estimation de trois groupes de paramètres caractérisant respectivement, la terre fine, les éléments grossiers et l'enracinement de la culture, à compléter par l'épaisseur (e_i) de cet horizon (Encadré 2).

Encadré 2 : Les paramètres à estimer pour le calcul du RU d'un horizon

Horizon sans éléments grossiers: 5 paramètres

$$RU_i = (wCC_{tf} - wPFP_{tf}) * MVA_{tf} * e_i * Te_i / 100$$

Horizon avec éléments grossiers: 9 paramètres

$$RU_i = ([(wCC_{tf} - wPFP_{tf}) * MVA_{tf} * (100 - EG) / 100] + [(wCC_{eg} - wPFP_{eg}) * MVA_{eg} * EG / 100]) * e_i * Te_i / 100$$

terre fine

éléments grossiers

enracinement

Avec :

wCC = humidité pondérale à la capacité au champ

$wPFP$ = humidité pondérale au point de flétrissement permanent

MVA = masse volumique apparente

EG = pourcentage volumique des éléments grossiers

e_i = épaisseur de l'horizon

Te_i = taux d'exploitation effectif moyen du RUM de l'horizon

et

- tf = paramètre estimé sur la terre fine

- eg = paramètre estimé sur éléments grossiers

Des méthodes de référence et des méthodes alternatives pour estimer les différents paramètres du RU

Pour l'estimation de chacun de ces paramètres, le guide présente une méthode de référence basée sur des observations et prélèvements à effectuer au niveau d'une fosse pédologique, complétés par des mesures au laboratoire. Ces méthodes de référence sont précises mais très exigeantes en moyens à mobiliser : temps passé, savoir-faire pour la mise en œuvre des protocoles, coûts de creusement de la fosse et d'analyses en laboratoire. Par exemple, les prélèvements nécessaires à l'estimation de w_{CCtf} et w_{PFPTf} doivent être effectués sans remanier la structure de l'horizon (photo 1) et le Te_i est estimé à partir de la cartographie de l'enracinement sur un plan vertical à travers une grille à mailles de 2 cm x 2 cm (photo 2). Ainsi, pour un sol comportant quatre horizons, l'ensemble des opérations de terrain nécessite environ une journée à deux personnes (dont un pédologue), ce temps pouvant être doublé si le sol est caillouteux. Les coûts additionnels (laboratoire, fosse) sont de l'ordre de 1600 euros.



Photo 1 (Inrae) Prélèvement d'échantillon non remanié sur fosse pédologique pour l'estimation de w_{CCtf} et w_{PFPTf} au laboratoire



Photo 2 (Arvalis) Cartographie de l'enracinement pour l'estimation des Te_i

Pour chaque groupe de paramètres, différentes méthodes alternatives sont proposées au choix de l'utilisateur en fonction des moyens dont il dispose. Elles sont moins exigeantes, mais augmentent l'incertitude sur la valeur estimée du RU.

L'humidité utile maximale de la terre fine d'un horizon peut ainsi être estimée globalement à l'aide de fonctions de pédotransfert à partir de sa classe texturale ou de sa composition granulométrique et, si possible, d'une valeur estimée de sa MVA_{tf} . La caractérisation du sol et l'échantillonnage des horizons à la tarière peuvent alors suffire, moyennant l'estimation de la MVA par rattachement du sol à un référentiel pédologique.

De même, l'humidité utile maximale des éléments grossiers peut être déduite de leur MVA_{eg} estimée ou mesurée. Cependant, le pourcentage volumique des éléments grossiers (EG) ne peut être correctement évalué sans le creusement d'une fosse, pour l'estimation visuelle de leur part surfacique dans chaque horizon.

Pour ce qui concerne l'enracinement, des règles sont proposées pour prédire les profondeurs-seuils z_{lim} et z_{max} en fonction de la culture (z_{limC} et z_{maxC}) et de la profondeur d'apparition d'horizons obstacles relatifs ou absolus. Celles-ci s'appuient notamment sur un modèle simple de prévision de z_{max} en fonction de la profondeur d'un horizon-obstacle relatif (z_{hr}) :

$$z_{max} = a * z_{hr} + b$$

Les Te_i sont ensuite calculés par interpolation linéaire entre z_{lim} (100 %) et z_{max} (0 %). Là encore, la caractérisation du sol à la tarière ou sur fosse reste souhaitable pour repérer et qualifier les horizons obstacles.

Le guide propose finalement un ensemble de méthodes qu'il est possible de combiner selon ses

moyens et ses objectifs, en réduisant plus ou moins la part des paramètres acquis par des mesures et observations locales (sur fosse ou sondage) au profit de l'usage de fonctions de pédotransfert et du recours à des référentiels régionaux.

Afin d'aider l'utilisateur dans ses choix, des références sur l'incertitude associée à chaque méthode sont données ; elles sont utilisables pour apprécier l'incertitude associée à la valeur estimée du RU. Le guide donne quelques exemples illustrant la propagation de cette incertitude sur des variables de sortie de modèles de culture (rendement) à différents niveaux d'échelle.

Les apports du guide

Les avancées méthodologiques présentées dans le guide permettent en premier lieu de corriger les défauts de certaines pratiques courantes pour l'estimation du RU :

- dans les sols profonds, la profondeur de calcul est souvent limitée par convention à 120 cm, avec un taux d'exploitation de 100 % dans tous les horizons (cela conduit souvent à une sous-estimation) ;
- dans les sols caillouteux, le volume des éléments grossiers est systématiquement déduit, en considérant toujours HUMeg comme négligeable, hormis dans le cas particulier des sols de craie (cela conduit à une sous-estimation si les éléments grossiers sont poreux) ;
- en général, la notion d'obstacle relatif n'est pas prise en compte pour définir la profondeur maximale d'enracinement (cela conduit suivant les cas à une sur-estimation ou à une sous-estimation).

Plus généralement, dans la perspective des usages évoqués plus haut, les méthodes de mesure et d'observation locales proposées permettent une estimation plus juste du RU, avec une incertitude réduite. Néanmoins, en raison de leur lourdeur, elles ne seront probablement mises en œuvre que par un nombre limité d'acteurs, dans un nombre limité de situations (sol x culture).

En revanche, les méthodes alternatives proposées pour les différents paramètres du RU autorisent des solutions mixtes, basées sur des observations de terrain couplées à des fonctions de pédotransfert, à choisir en fonction des données disponibles, voire au rattachement à un référentiel régional pour les paramètres les plus difficiles à mesurer; leur application restera cependant exigeante en moyens dans les sols caillouteux dans lesquels les observations et prélèvements à la tarière ne sont pas possibles. Ces solutions devraient contribuer à réduire l'incertitude des estimations du RU, tout en étant accessibles à une plus grande diversité d'acteurs, couvrant ainsi un grand nombre de situations.

Enfin, l'intégration des Te_i dans le modèle d'estimation du RU ouvre la possibilité, pour un sol donné, de différencier le RU en fonction des propriétés du système racinaire des espèces cultivées. Cette avancée devrait permettre de mieux évaluer les effets de stratégies de diversification des cultures avec les outils non paramétrables pour l'enracinement (hormis la profondeur maximale). De plus, pour caractériser l'enracinement de la culture en l'absence d'obstacle, les variables $zlimC$ et $zmaxC$ ont un statut analogue à celui des trois paramètres utilisés dans STICS. Ainsi, la prise en compte des Te_i estimés à partir de ces deux variables et des propriétés des horizons tendrait à rendre l'estimation du RU plus cohérente avec le modèle appliqué dans STICS. En revanche, les autres modèles ne prenant pas en compte la décroissance racinaire pourraient être amenés à évoluer dans ce sens.

Bien que le guide s'adresse explicitement à des utilisateurs cherchant à estimer le RU dans des sols de grandes cultures ou de prairies, ses avancées méthodologiques sont en grande partie applicables au cas des cultures pérennes ou des forêts ; les modalités d'estimation des Te_i devront toutefois être adaptées aux spécificités de l'enracinement de ces espèces.

Les suites à donner

Le transfert de ces avancées méthodologiques auprès des utilisateurs doit être accompagné. Plusieurs actions apparaissent nécessaires au-delà de la diffusion du guide.

Enrichir les référentiels pédologiques régionaux pour l'application des méthodes alternatives :

Pour la majorité des usages et des utilisateurs, le recours aux méthodes alternatives (basées partiellement au moins sur des règles et fonctions de pédotransfert) sera indispensable, en raison des moyens disponibles pour des mesures locales souvent limités et/ou du nombre élevé de situations à caractériser. Cela concerne autant les agriculteurs utilisateurs d'OAD au niveau parcellaire que les utilisateurs d'applications territoriales nécessitant l'exhaustivité.

Pour faciliter l'application de ces méthodes, les bases de données des inventaires typologiques régionaux (RRP ou Typterres¹⁶) peuvent être exploitées et enrichies pour donner accès à certaines variables d'intérêt, pour tous les types de sols identifiés sur le territoire, selon trois axes :

- interpréter les propriétés des horizons de chaque type de sol en termes d'obstacle relatif ou absolu vis-à-vis de l'enracinement. Pour ce faire, il faudra vraisemblablement mobiliser l'expertise pédologique régionale, jusqu'à élaborer des règles de pédotransfert ;
- proposer une valeur estimée de MVA_{tf} par horizon en appliquant une démarche similaire ;
- caractériser les propriétés des différents types d'éléments grossiers vis-à-vis du stockage de l'eau (notamment les EG non sédimentaires), en réalisant au besoin des mesures de MVA_{eg} .

Dans les cas d'usage d'OAD à la parcelle, le recours à un référentiel régional pour estimer certains paramètres du RU suppose l'existence d'un mode d'identification fiable du type de sol concerné. C'est l'objectif des typologies agronomiques Typterres qui sont accompagnées d'une clé d'identification des types de sol basée sur des critères facilement accessibles à un utilisateur non-spécialiste.

Améliorer les performances des méthodes alternatives

Les fonctions de pédotransfert proposées pour estimer l'humidité utile maximale d'un horizon ou ses bornes HCC et HPFP pourraient être améliorées, par enrichissement de la base de données source à l'échelle nationale (base GENARVOVIA) ou/et par la mise au point de fonctions de pédotransfert spécifiques à des contextes particuliers (par exemple : sols à teneur élevée en MO en Bretagne). Cela nécessite de poursuivre la mutualisation des données déjà engagée.

Le pourcentage volumique des éléments grossiers d'un horizon est souvent obtenu directement par l'estimation visuelle de la proportion surfacique des éléments grossiers dans cet horizon, observé sur fosse. Ce procédé donne en général une estimation biaisée, même s'il est mis en œuvre par un observateur expérimenté. Il serait donc souhaitable d'acquérir de nouvelles références pour produire un modèle permettant de corriger ce biais.

Les règles et modèles établis pour estimer les paramètres de l'enracinement (z_{max} , z_{lim} , Te_i) reposent sur un nombre de références encore faible¹⁷, en particulier pour le modèle $z_{max} = f(z_{hr})$ établi pour un nombre limité de types de sol. L'acquisition de ce type de référence doit donc être poursuivie en réalisant des cartes racinaires et des suivis de profils hydriques dans une plus large gamme de situations, bien caractérisées au niveau pédologique, afin de consolider cette méthode. De même, les références sur z_{limC} et Z_{maxC} ne portent que sur 20 cultures, parfois sur la base d'un nombre réduit de sources bibliographiques par culture. La recherche bibliographique doit donc être élargie pour affiner ces références et enrichir le référentiel par de nouvelles cultures (notamment cultures à cycle court et associations de cultures).

Parmi ces voies d'amélioration, les deux dernières sont prioritaires, car les paramètres de l'enracinement sont les plus difficiles à mesurer et l'incertitude associée à leur estimation sans observation locale est très élevée (de l'ordre de 30 %), avec un fort impact sur l'incertitude globale d'estimation du RU.

➤ ¹⁶ Typterres : typologies agronomiques régionales en cours de déploiement sur le territoire national. (<https://sols-et-territoires.org/produits-du-rmt/typterres>)

➤ ¹⁷ règles et modèles établis grâce à la valorisation de travaux anciens, parfois non publiés, notamment de mémoires issus de la formation Relance Agronomique (1983-1995)

Faciliter le calcul du RU et de ses paramètres

L'usage de règles et fonctions de pédotransfert pour estimer les différents paramètres allège les opérations de terrain mais complexifie le calcul du RU. Il serait donc utile de développer d'une application informatique pour effectuer ce calcul en fonction des données disponibles sur les horizons et la culture concernés. Avec l'aide de statisticiens, cette application devra intégrer le calcul de l'incertitude associée à l'estimation du RU en fonction des méthodes utilisées pour l'acquisition des paramètres. En amont de cette étape, le choix de la méthode d'estimation de chaque paramètre gagnerait à être éclairé en quantifiant sur des exemples concrets les effets comparés de l'incertitude associée à chaque méthode sur la valeur du RU.

Conclusion :

Ces travaux à engager pour accompagner la diffusion du guide sont autant de chantiers où la collaboration entre pédologues et agronomes sera indispensable. Celle-ci sera d'autant plus efficace qu'elle pourra s'appuyer sur les typologies agronomiques Typterras, conçues à cet effet pour organiser la production et la diffusion de références agronomiques en fonction de la diversité des sols d'un territoire et pour faciliter l'accès aux données d'entrée-sol requises par les OAD, OEAE ou modèles à finalité agri-environnementale. Cette collaboration prolongerait ainsi celle qui a été mobilisée pour la conception et la rédaction du guide.

Références bibliographiques

- Baize D., 2000. *Guide des analyses en pédologie* – 2^{ème} édition. Versailles : Editions INRA-Quae, 257 p.
- Brisson N., Launay M., Mary B., Beaudoin N., 2009. *Conceptual basis, formalization and parametrization of the STICS crop model*. Versailles: Editions Quae, coll. Update, 304 p.
- 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
- Delesalle M., Scheurer O., Martin P., Saby N., Eglin T., Duparque A., 2019. ABC'Terre : Integrating soil organic carbon variation into cropping systems greenhouse gases balance at a territorial scale. Poster - *Conférence Sécurité alimentaire et changement climatique : l'initiative 4 pour 1000, un nouveau défi concret pour le sol*. Symposium INRA. 18-20 Juin 2019, Poitiers. ([hal-02437617](https://hal.inrae.fr/hal-02437617))
- Chambre d'agriculture du Grand Est, 2022. *La modélisation au service de l'accompagnement des agriculteurs méthaniseurs : regards croisés sur les apports de MAELIA*. Webinaire du PEI Partage –24 Février 2022. <https://www.youtube.com/watch?v=9xJxdp77o2o>
- Marraccini E., Ayerdi-Gotor A., Scheurer O., Leclercq C., 2020. An innovative land suitability method to assess the potential for the introduction of a new crop at a regional level. *Agronomy* 10(3):330
- Minette S., Constantin J., Véricel G., Fort J.L., 2019. Méthode d'Estimation des Restitutions par les Cultures Intermédiaires - Acquis et Perspectives – Communication - 14^{ème} Rencontres Comifer-Gemas – 20-21 Novembre 2019, Dijon.
- Rakotovololona L., Strullu L., Chlébowski F., Léonard J., Ronceux A. et al. , 2017. Modélisation de scénarios de gestion de l'azote en systèmes de grandes cultures biologiques dans le cadre d'une démarche participative. Poster - *Colloque Grandes cultures bio- ITAB* - 22 Novembre 2017, Lyon. http://www.itab.asso.fr/downloads/colloque-GC-2017/coll-gcbio-22nov17_poster_scenarios-gestion-n_inra.pdf
- Richer de Forges A., Laroche B., Chenu J.P., Bertouy B., Lehmann S., Cousin I., 2017. Applications cartographiques à partir de données en format DONESOL. Communication - *Atelier RU - RMT Sols et territoires* – 19 Juin 2017, Orléans. <https://sols-et-territoires.org/fileadmin/user>

[upload/documents/Produits_RMT/atelier_RU_2017/9-Applications-carto-RU-DoneSol_ARICHERDEFORGES.pdf](#)

Therond O., Sibertin-Blanc C., Lardy R., Gaudou B., Balestrat M., et al., 2014. Integrated modelling of social-ecological systems: the MAELIA high-resolution multi-agent platform to deal with water scarcity problems. *7th. International Congress on Environmental Modelling and Software*, June 2014, San Diego, California, USA. 2386 p. ([hal-02742949v2](#))

Wittling C. & Ruelle P. (coord.), 2022. *Guide pratique de l'irrigation* (4e éd.). Versailles, Éditions Quæ, 352 p.



Les articles sont publiés sous la licence Creative Commons 2.0. La citation ou la reproduction de tout article doit mentionner son titre, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue AE&S et de son URL, ainsi que la date de publication.