

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

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 FPT 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 ($T_{e;}$)	89
Détermination des profondeurs z_{maxC} et z_{limC} caractéristiques de l'enracinement des cultures annuelles	93
 Références bibliographiques	 96

ISBN n° 978-2-8179-0397-2 - Ref: 3972 - Prix: 28 €

Dépôt légal septembre 2022

Impression :

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.

01

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

© Nicole Cornec

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.

02

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	10 000	100	5.0	100 000
1 000 000	100 000	1 000	6.0	1 000 000
1 000 000	1 000 000	10 000	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