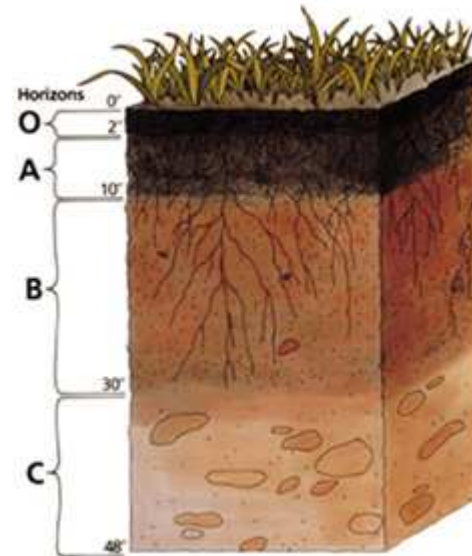
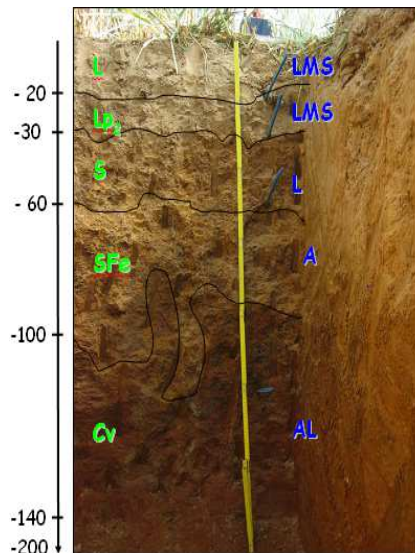
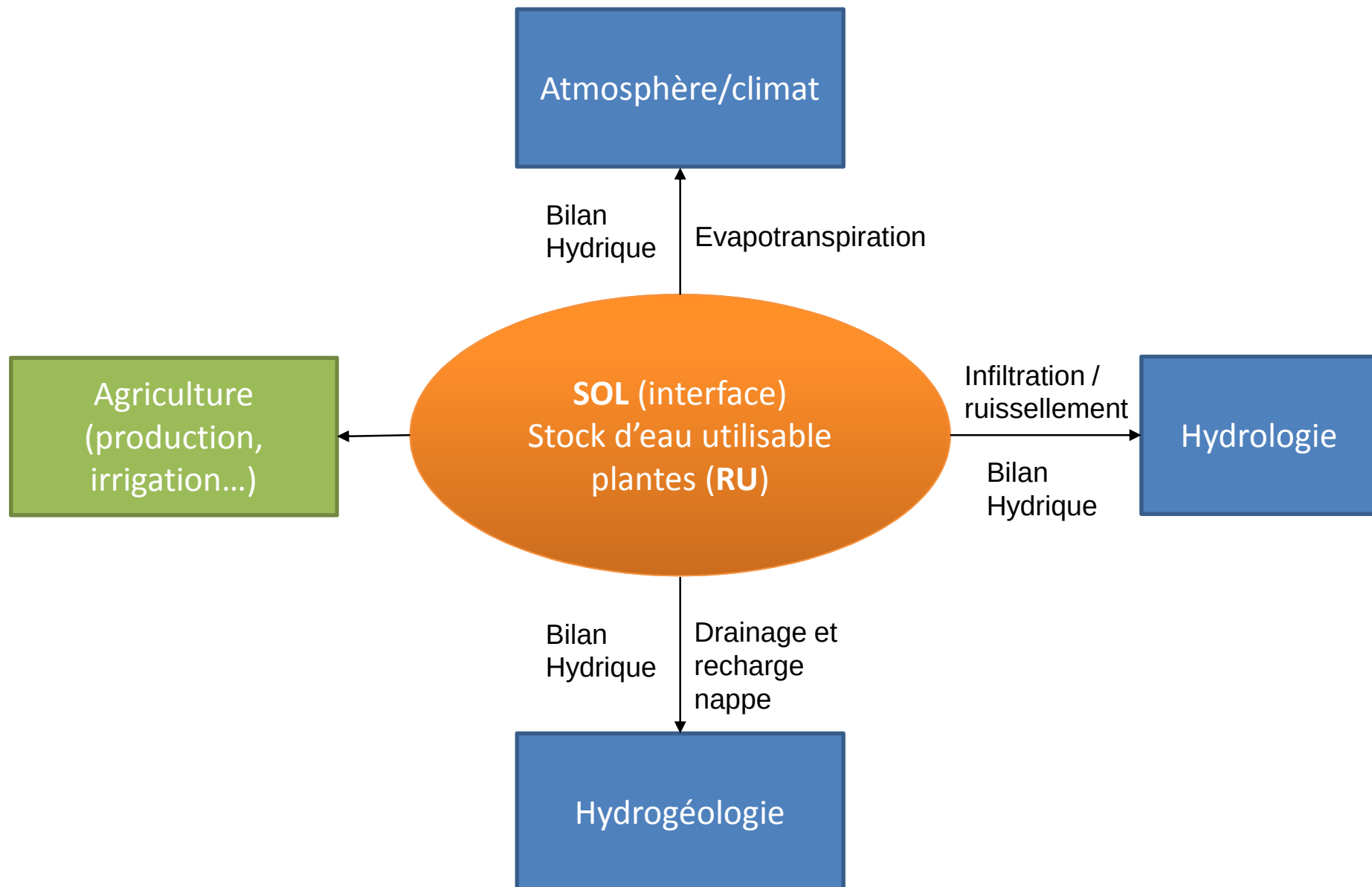


La Réserve Utile

Concepts, controverses, outils



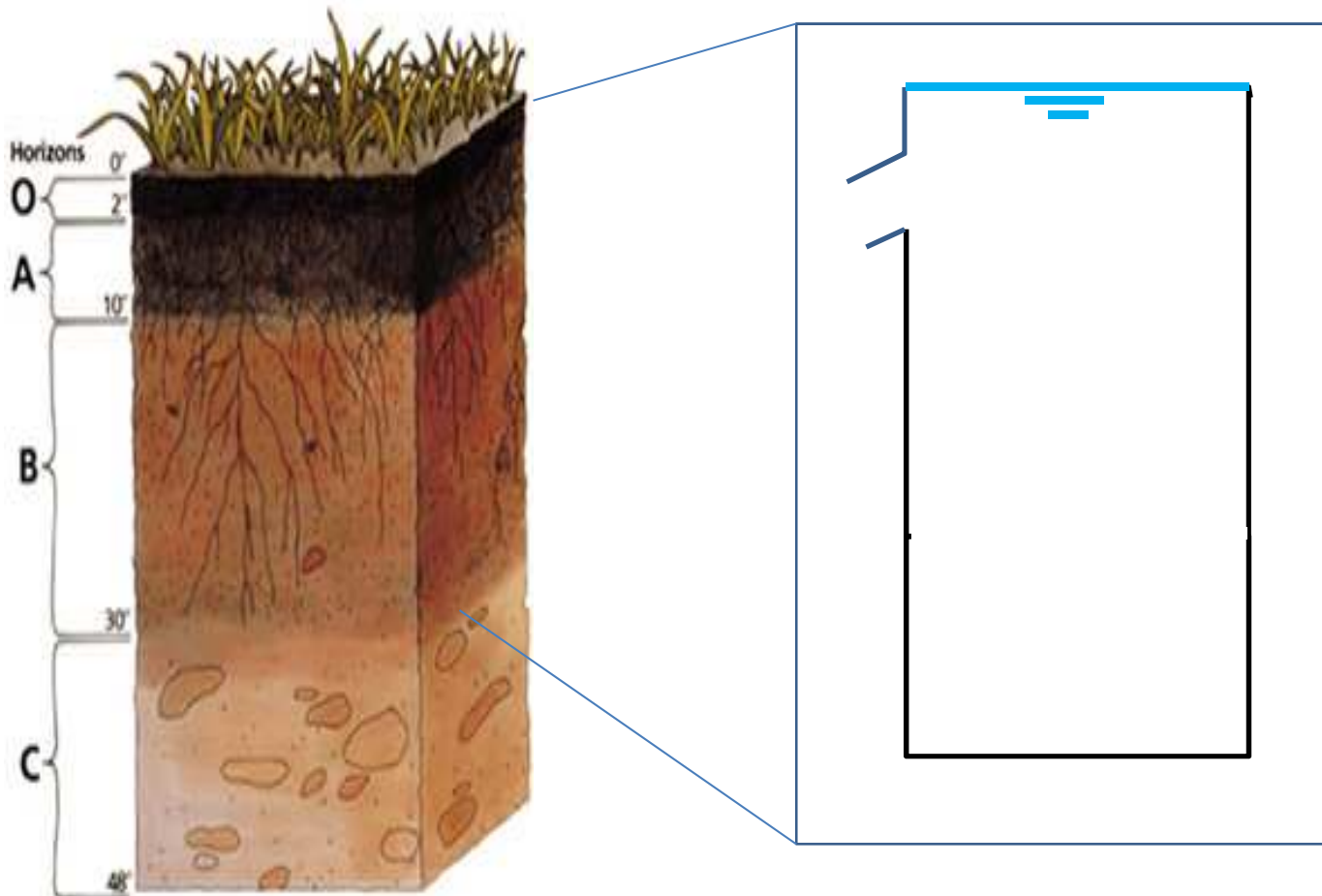
La Réserve Utile: un concept très utilisé



La Réserve Utile: un concept simple ... en apparence

RU : Quantité d'eau maximale que le sol peut contenir, mobilisable par les plantes pour leur alimentation hydrique et transpiration sur du long terme.

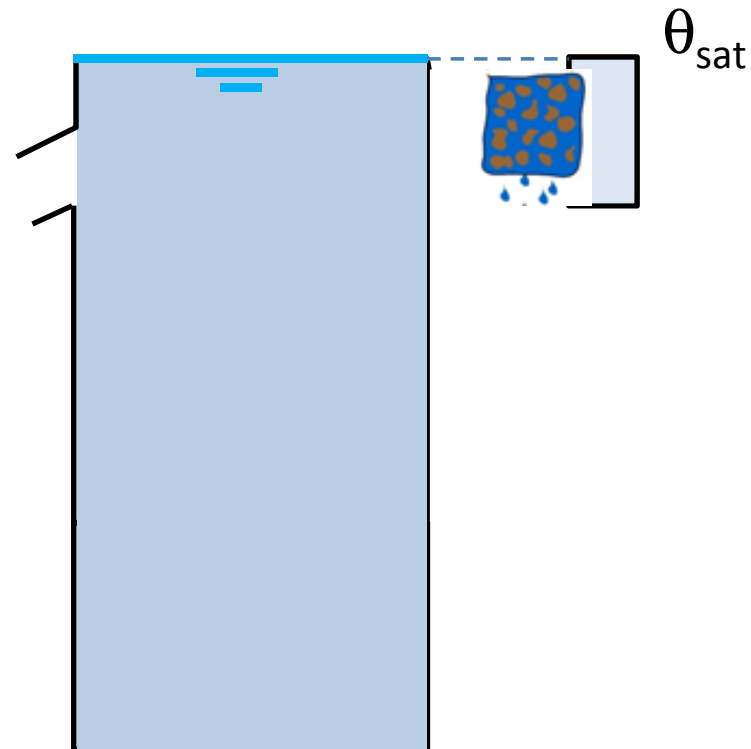
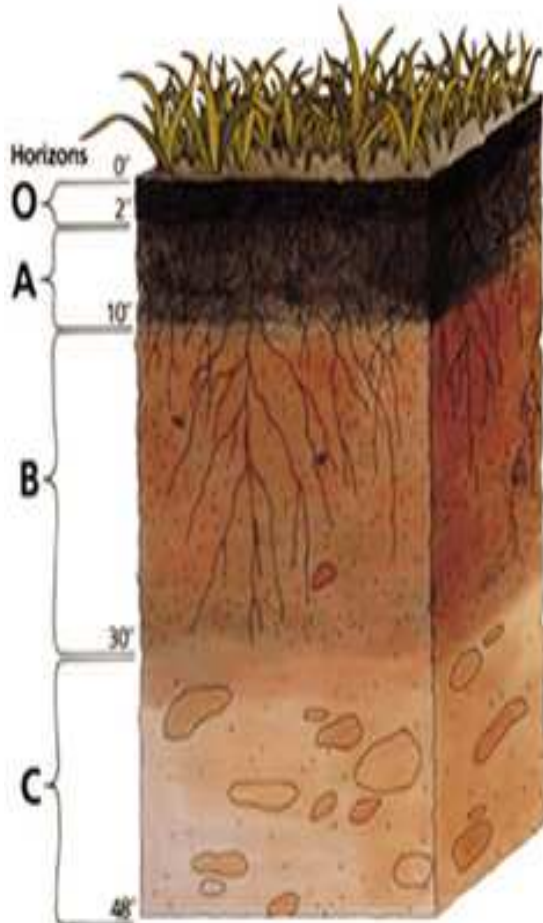
Sol = réservoir d'eau dans lequel puisent les racines allant jusqu'à la profondeur racinaire



La Réserve Utile: un concept simple ... en apparence

RU : Quantité d'eau maximale que le sol peut contenir, mobilisable par les plantes pour leur alimentation hydrique et transpiration sur du long terme.

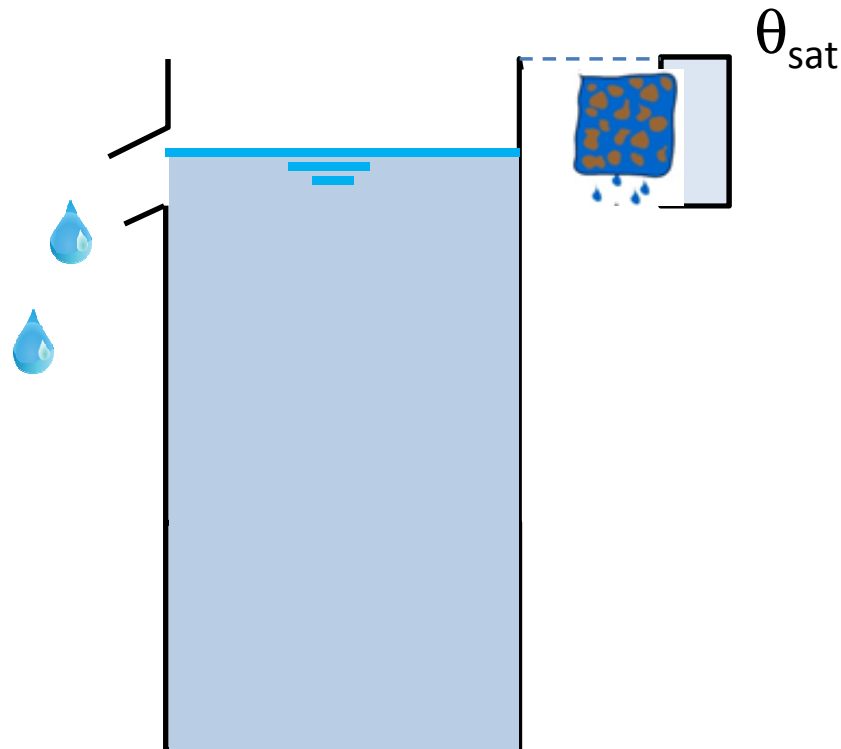
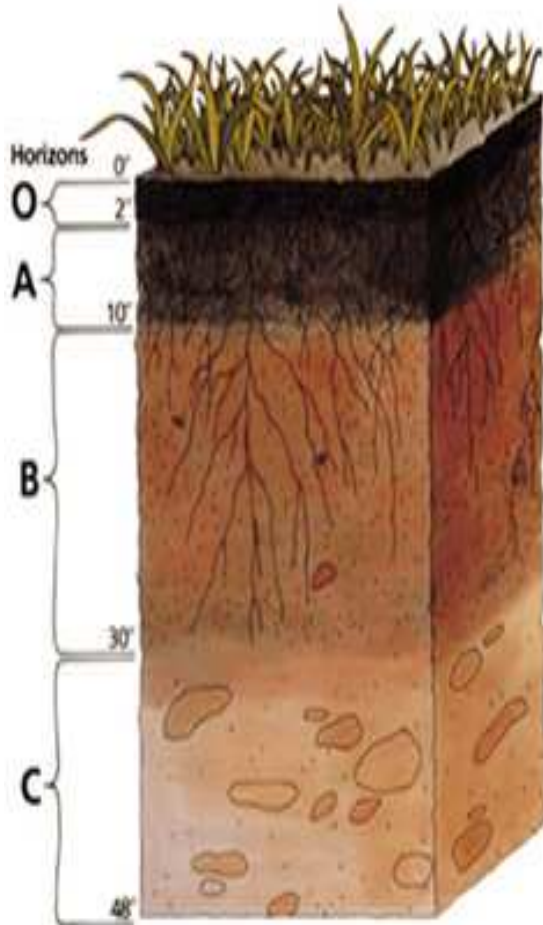
Sol = réservoir d'eau dans lequel puisent les racines allant jusqu'à la profondeur racinaire



La Réserve Utile: un concept simple ... en apparence

RU : Quantité d'eau maximale que le sol peut contenir, mobilisable par les plantes pour leur alimentation hydrique et transpiration sur du long terme.

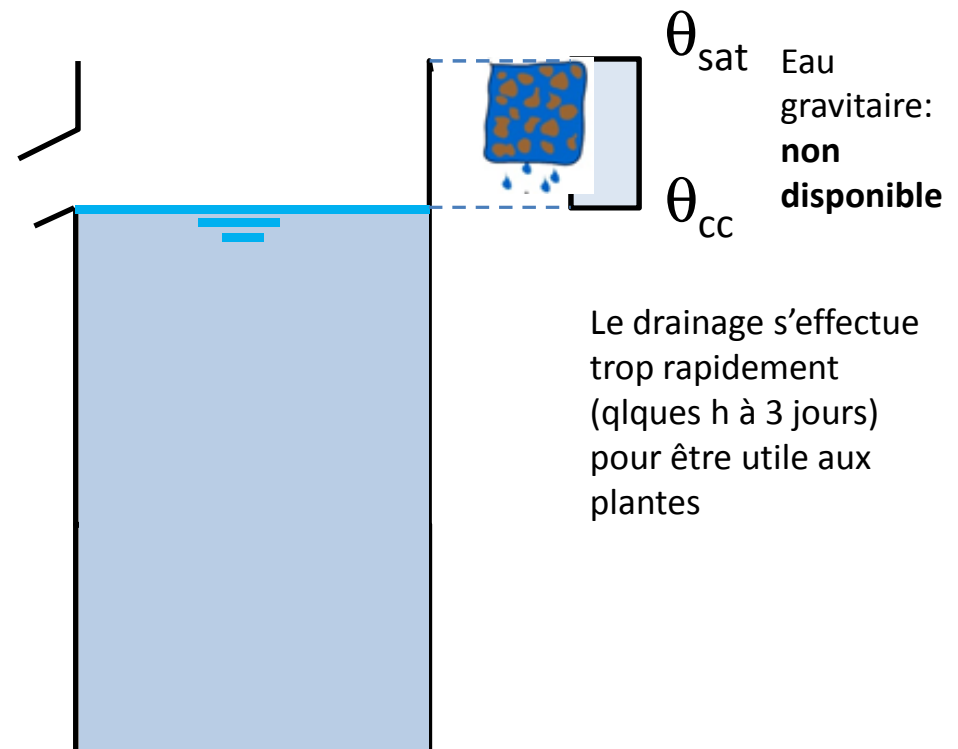
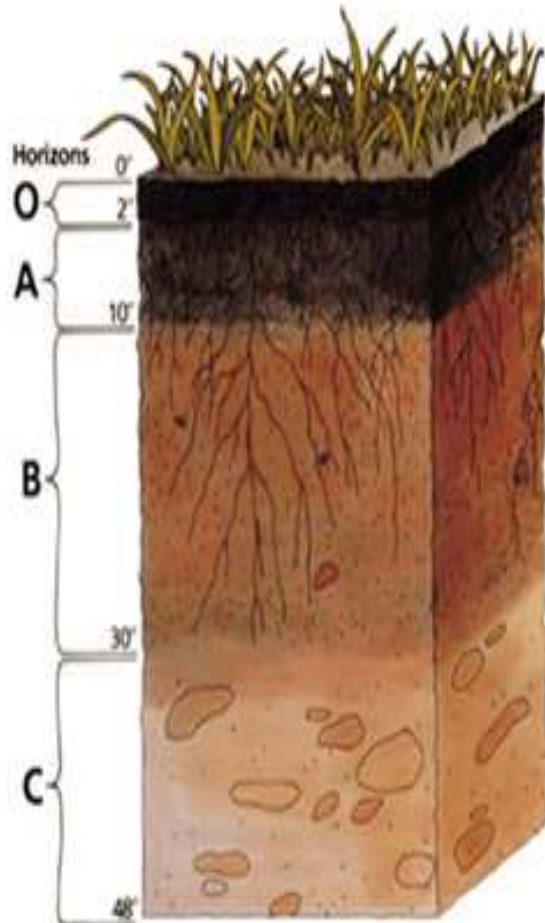
Sol = réservoir d'eau dans lequel puisent les racines allant jusqu'à la profondeur racinaire



La Réserve Utile: un concept simple ... en apparence

RU : Quantité d'eau maximale que le sol peut contenir, mobilisable par les plantes pour leur alimentation hydrique et transpiration sur du long terme.

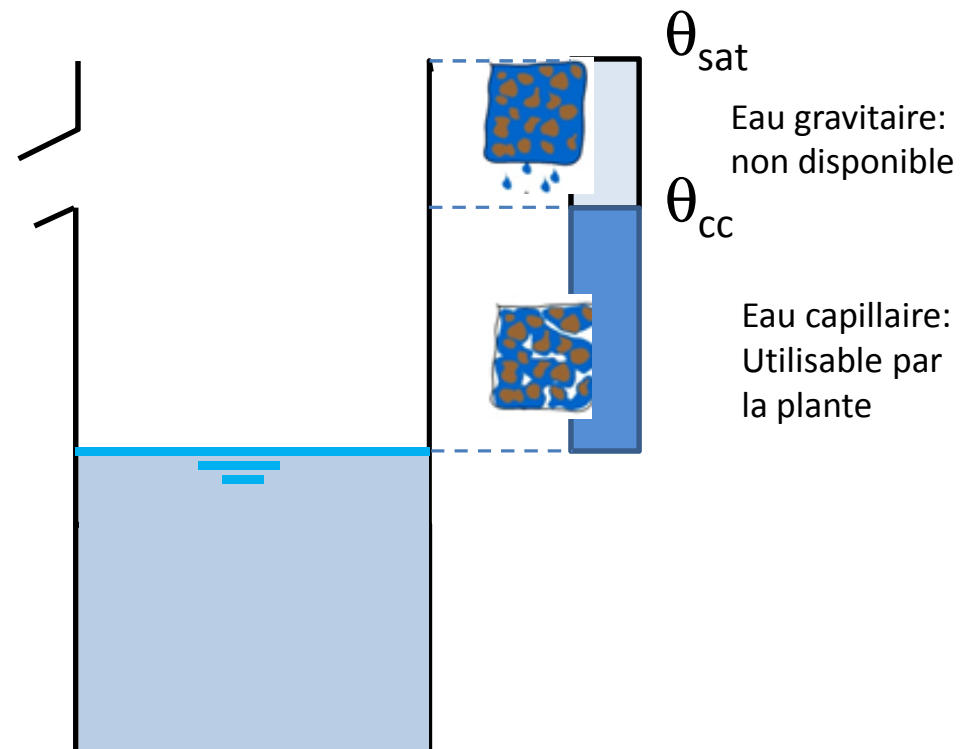
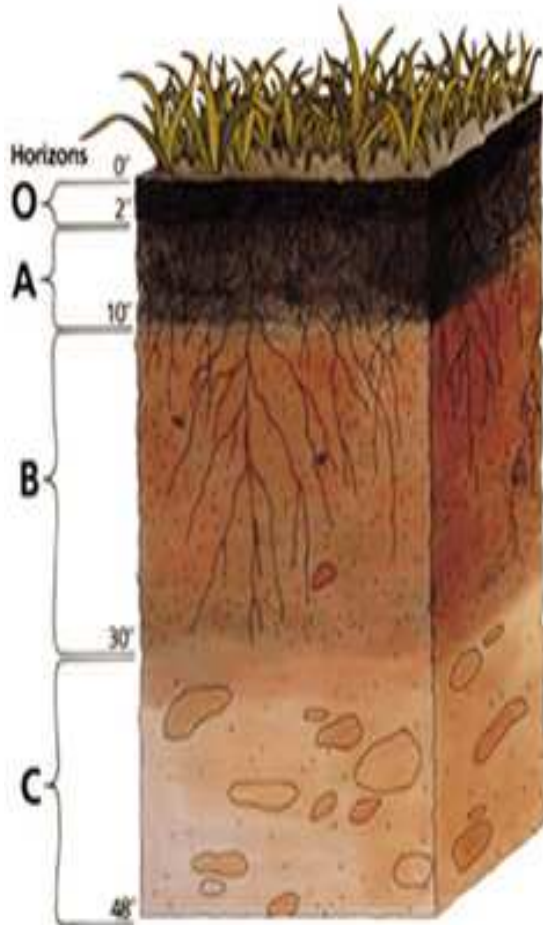
Sol = réservoir d'eau dans lequel puisent les racines allant jusqu'à la profondeur racinaire



La Réserve Utile: un concept simple ... en apparence

RU : Quantité d'eau maximale que le sol peut contenir, mobilisable par les plantes pour leur alimentation hydrique et transpiration sur du long terme.

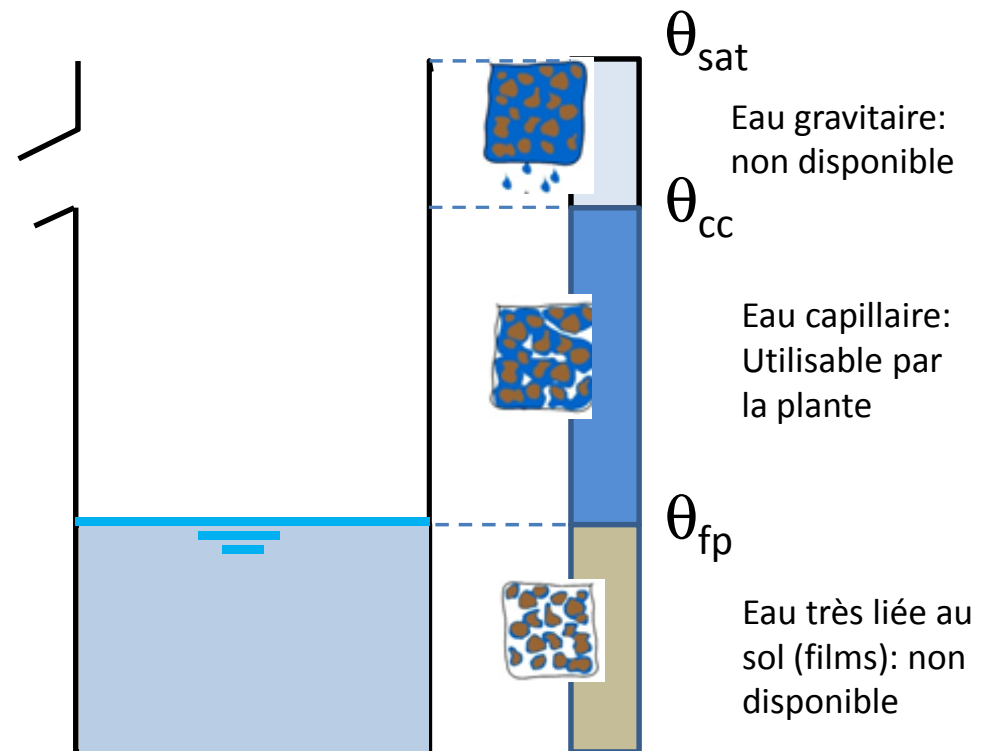
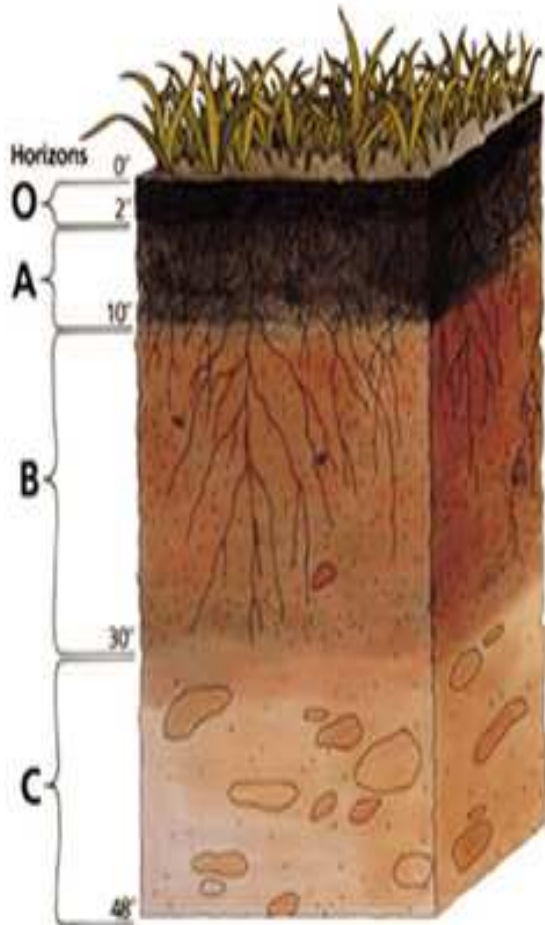
Sol = réservoir d'eau dans lequel puisent les racines allant jusqu'à la profondeur racinaire



La Réserve Utile: un concept simple ... en apparence

RU : Quantité d'eau maximale que le sol peut contenir, mobilisable par les plantes pour leur alimentation hydrique et transpiration sur du long terme.

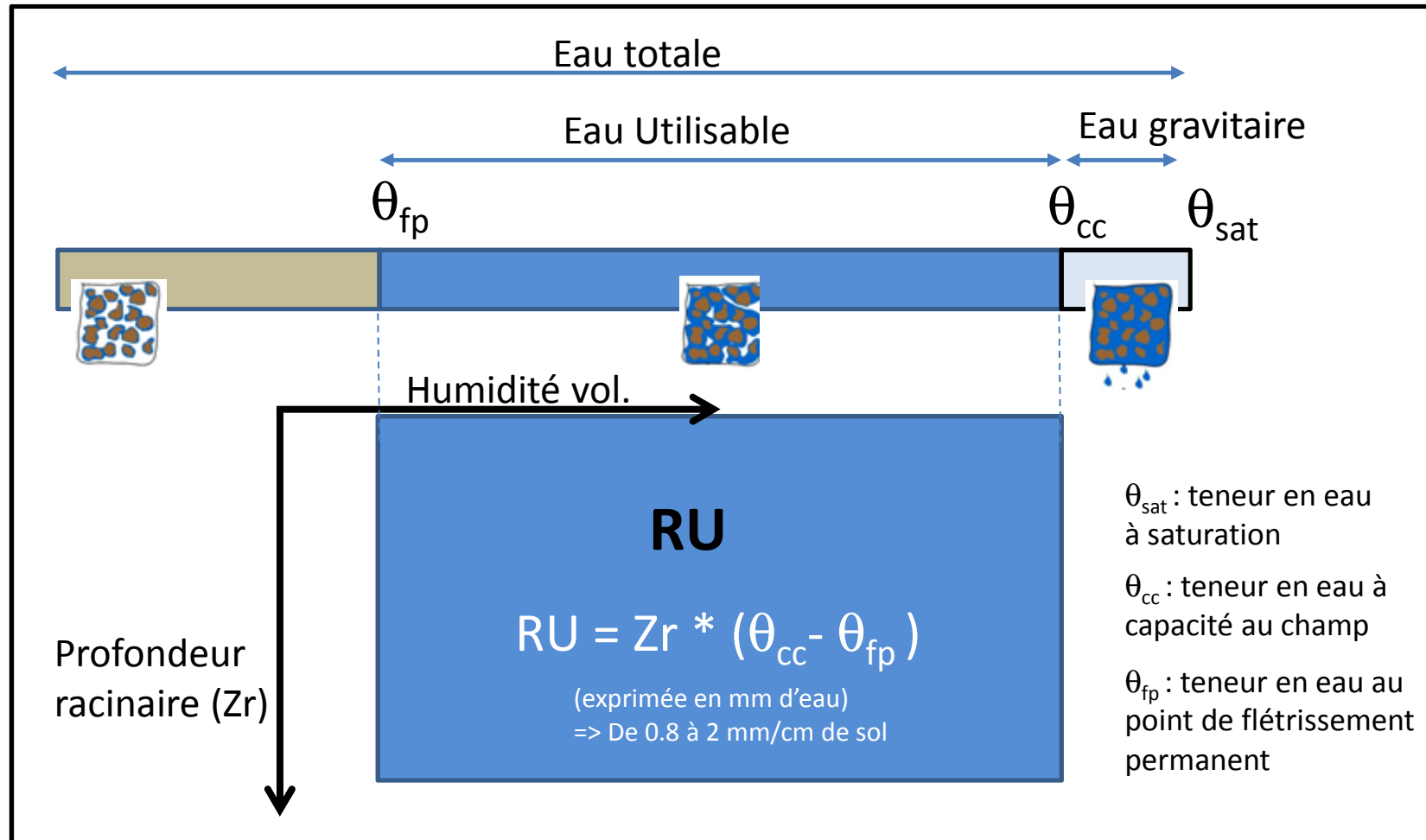
Sol = réservoir d'eau dans lequel puisent les racines allant jusqu'à la profondeur racinaire



Vision 1D verticale des transferts et processus
et pas de flux d'eau à la base

La Réserve Utile: un concept simple ... en apparence

RU : Quantité d'eau maximale que le sol peut contenir, mobilisable par les plantes pour leur alimentation hydrique et transpiration sur du long terme.



La Réserve Utile: un concept ancien ...

C'est un concept ancien sur l'eau: quelle est la quantité d'eau accessible aux plantes avant symptômes marqués de déficit hydrique (Briggs et Shantz, 1912 ; Veihmeyer et Hendrickson, 1927) - souvent des écophysiologistes qui sont à l'origine des études: point de flétrissement permanent.

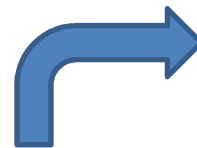
THE WILTING COEFFICIENT AND ITS INDIRECT DETERMINATION¹

LYMAN J. BRIGGS AND H. L. SHANTZ

Botanical Gazette, 53, 1912



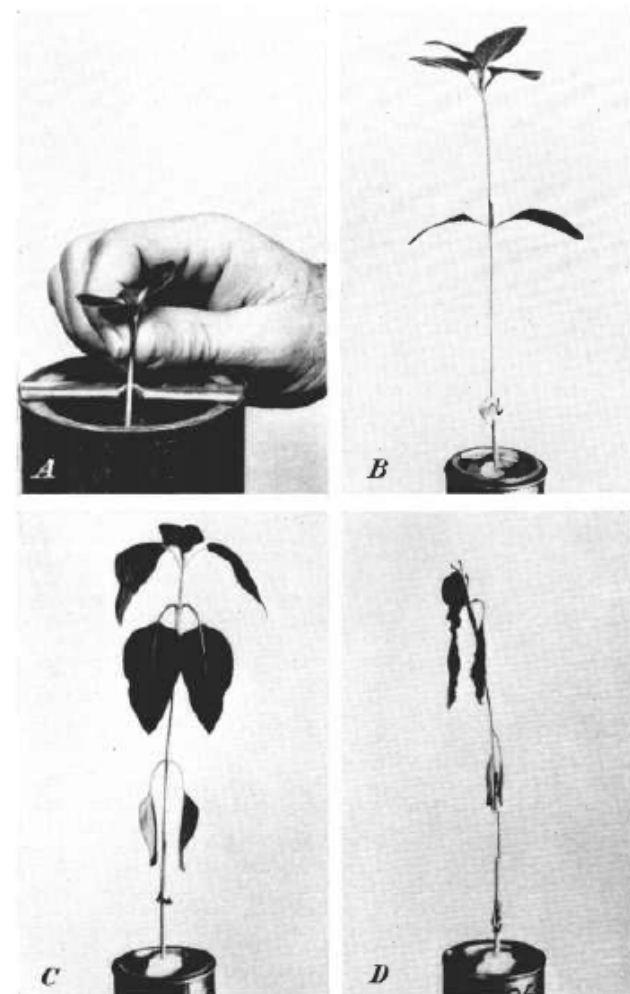
$$\theta_{fp} = \theta_{eq} / 1,84 \quad (\theta_{eq}: \text{centrifugation à } 1000 \text{ g})$$



RANGE OF SOIL-MOISTURE PERCENTAGES THROUGH WHICH PLANTS UNDERGO PERMANENT WILTING IN SOME SOILS FROM SEMIARID IRRIGATED AREAS¹

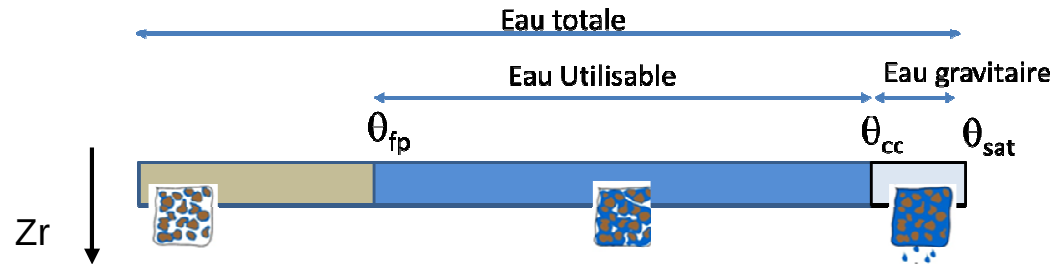
BY J. R. FURR, *physiologist*, and J. O. REEVE, formerly *junior irrigation engineer*,
Division of Fruit and Vegetable Crops and Diseases, U.S. Department of Agriculture

Journal of Agricultural Research, 5, 1945



La Réserve Utile: un concept simple ...

Quelques Définitions



Capacité au champ (θ_{cc}) : Teneur en eau du sol après que l'eau « excédentaire » se soit évacuée par gravité et que le drainage soit « négligeable » (2-3 jours après une pluie).

Point de flétrissement permanent (θ_{fp}) : Teneur en eau du sol à partir de laquelle la plante ne peut plus récupérer du flétrissement même après passage dans une atmosphère humide (définition biologique, historique).

Zr : min(profondeur d'enracinement ou profondeur de sol sans obstacle à l'enracinement)



La RU est un concept qui mixe des aspects sol (θ_{cc}), d'interaction sol-plante (θ_{fp}) et typiquement plante (Zr)



Visions pouvant être différentes suivant les communautés

Pédologie/hydrologie
Agronomie
Ecophysiologie/Écologie

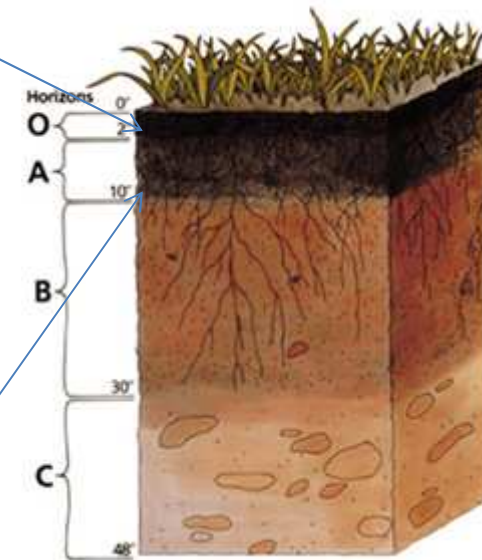
La Réserve Utile... Vue coté sol

Une définition pour des horizons de sol aux propriétés texturales/structurales différentes

- *Par horizon de sol*

$$RU_i = ei * DA_i * (H_{CCi} - H_{PFPi}) * \frac{100 - Ci}{100}$$

- *Ru : Réserve utile de l'horizon en mm*
- *e : épaisseur de l'horizon en mm*
- *DA : masse volumique sèche ($g.cm^{-3}$)*
- *H_{CC} : humidité pondérale à la capacité au champ ($g.g^{-1}$)*
- *H_{PFP} : humidité au point de flétrissement ($g.g^{-1}$)*
- *C : pourcentage volumique d'éléments grossiers => RU cailloux = 0 !??*



- *Ru max totale*

$$RU = \sum_i RU_i \quad \Rightarrow \quad \text{C'est une RU maximale sur enracinement max. ou prof. sol}$$

La Réserve Utile... Vue coté sol ... Un concept pas si simple

➔ Une définition par horizons de sol aux propriétés texturales/structurales différentes

Au premier ordre, $\theta_{cc} = f(\text{structure sol})$ tandis que $\theta_{fp} = f(\text{texture sol})$

➔ Un questionnement sur les propriétés physique/constitution du sol:

Des questions toujours d'actualité sur θ_{cc} : Propriété dépendant de la dynamique de l'eau (flux) et du temps ! Ce n'est pas une propriété intrinsèque du sol => différentes méthodes d'estimation.

↳ Au champ:

- Suivi du ressuyage après pluie ou irrigation abondante (quels temps, ~2j...)
- Suivi des teneur en eau hivernales (périodes stables)
- Submersion d'une zone et suivi stock hydrique, drainage interne sur 48h



Mais ce drainage nécessite l'absence :

- d'horizon imperméable,
- de nappe superficielle (<2 m),
- drainage non vertical et flux latéraux

La Réserve Utile... Vue coté sol ... Un concept pas si simple

➔ Une définition par horizons de sol aux propriétés texturales/structurales différentes

Au premier ordre, $\theta_{cc} = f(\text{structure sol})$ tandis que $\theta_{fp} = f(\text{texture sol})$

➔ Un questionnement sur les propriétés physique/constitution du sol:

Des questions toujours d'actualité sur θ_{cc} : Propriété dépendant de la dynamique de l'eau (flux) et du temps ! Ce n'est pas une propriété intrinsèque du sol => différentes méthodes d'estimation :

↳ Au champ:

- Suivi du ressuyage après pluie ou irrigation abondante (quels temps...)
- Suivi des teneur en eau hivernales (2-3 jours après pluies)
- Submersion d'une zone et suivi stock hydrique, drainage interne sur 48h

↳ En laboratoire :

- Mesure en presses Richards de θ pour un potentiel hydrique donné:
- θ_{cc} à $\psi = -33$ kPa classiquement (*Colman, 1947*), mais... d'autres valeurs possibles suivant textures: $\psi = -10$ kPa (*Bruand et al., 2004*), diffère selon pays.



Presses Richards (© UR Sols, INRA Orléans)

La Réserve Utile... Vue coté sol ... Un concept pas si simple

➔ Une définition par horizons de sol aux propriétés texturales/structurales différentes

Au premier ordre, $\theta_{cc} = f(\text{structure sol})$ tandis que $\theta_{fp} = f(\text{texture sol})$

➔ Un questionnement sur les propriétés physique/constitution du sol:

Des questions toujours d'actualité sur θ_{cc} : Propriété dépendant de la dynamique de l'eau (flux) et du temps ! Ce n'est pas une propriété intrinsèque du sol => différentes méthodes d'estimation :

↳ Au champ:

- Suivi du ressuyage après pluie ou irrigation abondante (quels temps...)
- Suivi des teneur en eau hivernales (2-3 jours après pluies)
- Submersion d'une zone et suivi stock hydrique, drainage interne sur 48h

↳ En laboratoire :

- Mesure en presses Richards de θ éch. non perturbés pour un potentiel hydrique donné:
- θ_{cc} à $\psi = -33$ kPa classiquement (*Colman, 1947*), mais... d'autres valeurs possibles suivant textures: $\psi = -10$ kPa (*Bruand et al., 2004*), diffère selon pays.

↳ Objectiver ces valeurs sur des bases physiques:

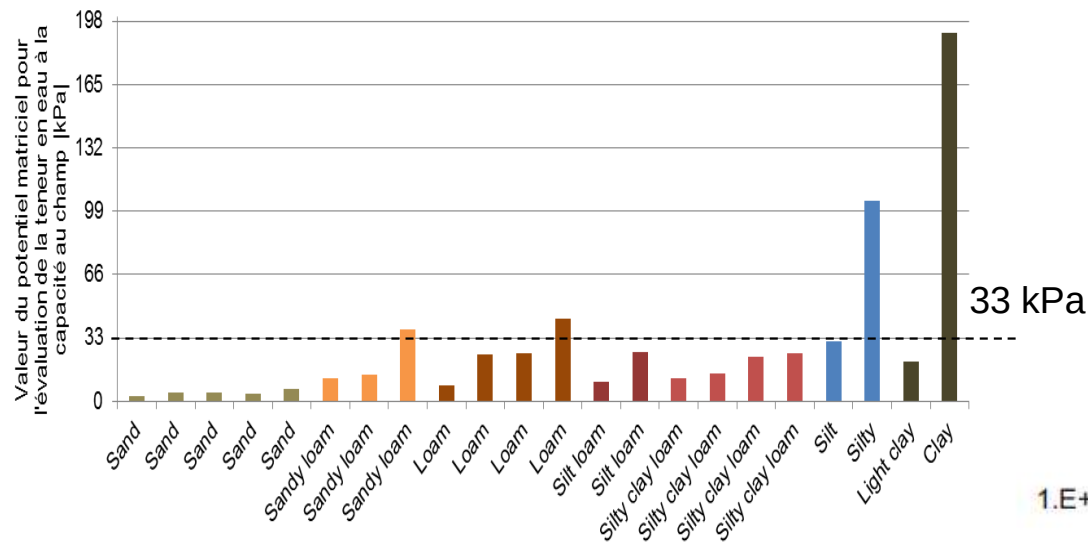
- raisonner sur un flux (par ex. $q_{fc} = 0.05$ mm/j) $\theta_{fc} = \left(\frac{q_{fc}}{K_s} \right)^{1/n}$ (*Nachabe, 1998*)
- Drainage limité quand continuité capillaire rompue (*Assouline et Or, 2014*)

=> Un potentiel hydrique limite $\psi_{fc} = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{n-1}{n} \right)^{(1-2n)/n}$ et des temps variables...

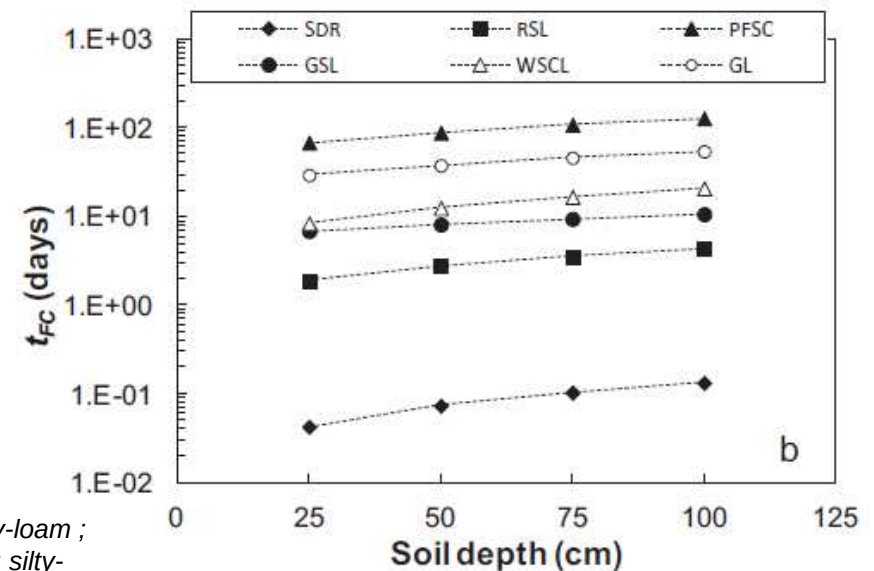
La Réserve Utile... Vue coté sol ... Un concept pas si simple

Valeur du potentiel matriciel pour estimer CC d'après Assouline et Or (2014):

$$\psi_{FC} = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{n-1}{n} \right)^{(1-2n)/n}$$



Temps pour atteindre l'état de capacité au champ pour des sols de textures variées (Assouline et Or , 2014)



RSL : sandy-loam ; GSL : sandy-loam ;
PFSC : silty-clay-loam ; WSCL : silty-clay-loam ; GL : loam

La Réserve Utile... Vue coté sol ... Un concept pas si simple

➔ Une définition par horizons de sol aux propriétés texturales/structurales différentes

Au premier ordre, $\theta_{cc} = f(\text{structure sol})$ tandis que $\theta_{fp} = f(\text{texture sol})$

➔ Un questionnement sur les propriétés physique/constitution du sol:

Des questions toujours d'actualité sur θ_{cc} : Propriété dépendant de la dynamique de l'eau (flux) et du temps ! Ce n'est pas une propriété intrinsèque du sol => différentes méthodes d'estimation :

↳ Au champ:

- Suivi du ressuyage après pluie ou irrigation abondante (quels temps...)
- Suivi des teneur en eau hivernales (2-3 jours après pluies)
- Submersion d'une zone et suivi stock hydrique, drainage interne sur 48h

↳ En laboratoire :

- Mesure en presses Richards de θ éch. non perturbés pour un potentiel hydrique donné:
- θ_{cc} à $\psi = -33$ kPa classiquement (*Colman, 1947*), mais... d'autres valeurs possibles suivant textures: $\psi = -10$ kPa (*Bruand et al., 2004*), diffère selon pays.

↳ Objectiver ces valeurs sur des bases physiques:

.... Mais nécessité de connaître/mesurer les propriétés hydrodynamiques des sols !

La Réserve Utile... Vue coté sol ... Un concept pas si simple

➔ Une définition par horizons de sol aux propriétés texturales/structurales différentes
Au premier ordre, $\theta_{cc} = f(\text{structure sol})$ tandis que $\theta_{fp} = f(\text{texture sol})$

➔ Un questionnement sur les propriétés physique/constitution du sol:

Des questions toujours d'actualité sur θ_{cc} : Propriété dépendant de la dynamique de l'eau et du temps ! Ce n'est pas une propriété intrinsèque du sol => différentes méthodes d'estimation.

Questionnement moins fort sur θ_{fp} , mais des également des problèmes d'estimation:

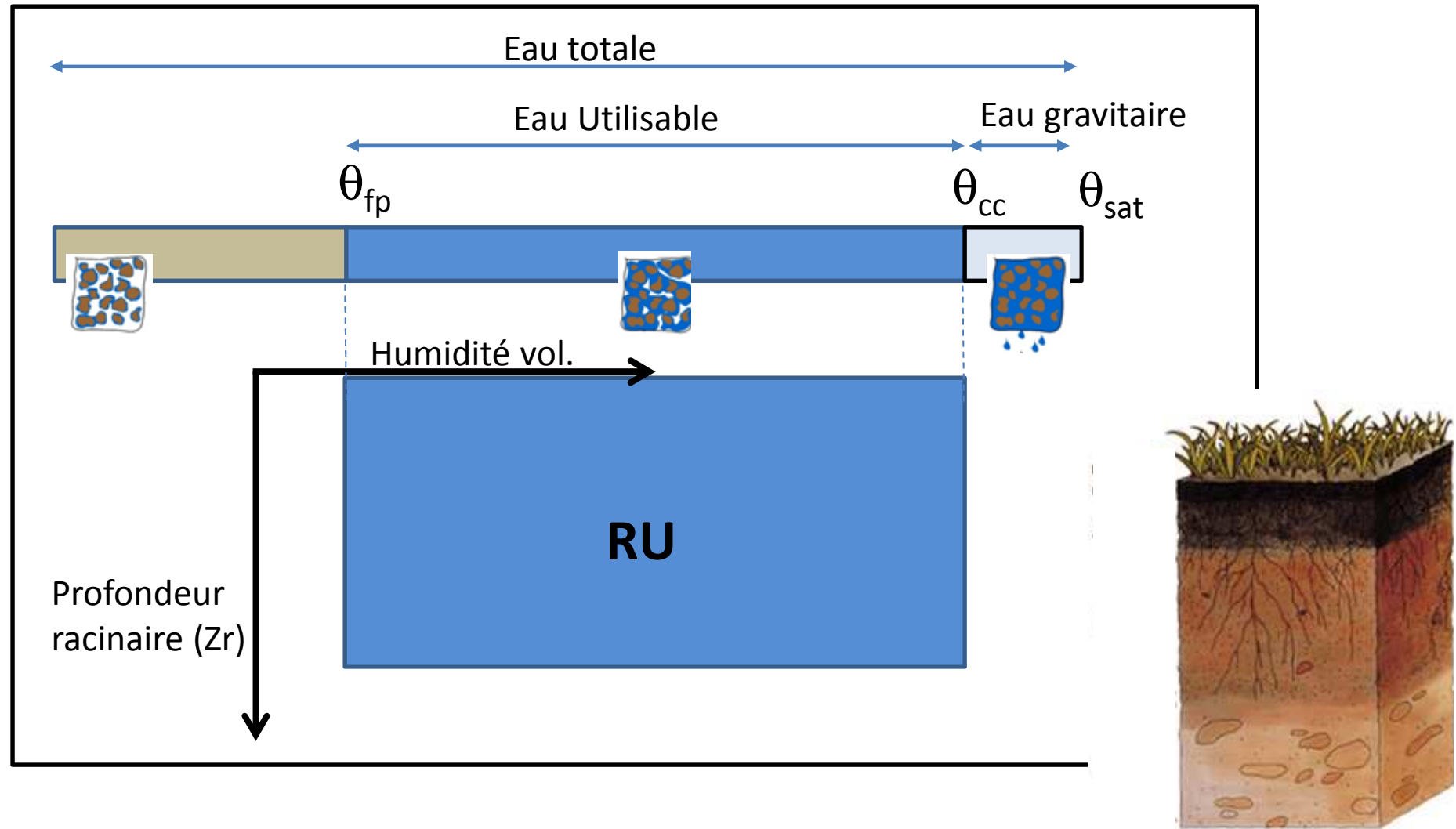
Définition biologique, historique => mesure sur Sol au labo : $\theta_{fp} = f(\psi_{-15 \text{ bars}})$,
mesure en presse Richards (*Richards et Weaver, 1943*)

- Plus simple ! Mais ...
- Pas toujours en accord avec mesures la mesure bio
- Pas toujours cohérent entre type de métrologie: Presse Richards et Psychometrie (*Montoani et al., 2014*)
- Problème temps d'équilibre, mais aussi de réseau « non percolant » du sol (*Czyz et Dexter, 2012*) en presse Richards

Mesure au champ : Plus petite teneur en eau mesurée après que plantes aient arrêté +/- de prélever et soient sur point de se dessécher ou en dormance (*Ratliff et al, 1983*)..... Cohérence variable avec mesure en laboratoire !

La Réserve Utile... Vue coté Plante/Agronomie

Quelle est la disponibilité pour la plante de l'eau dans le sol et dans la RU ?

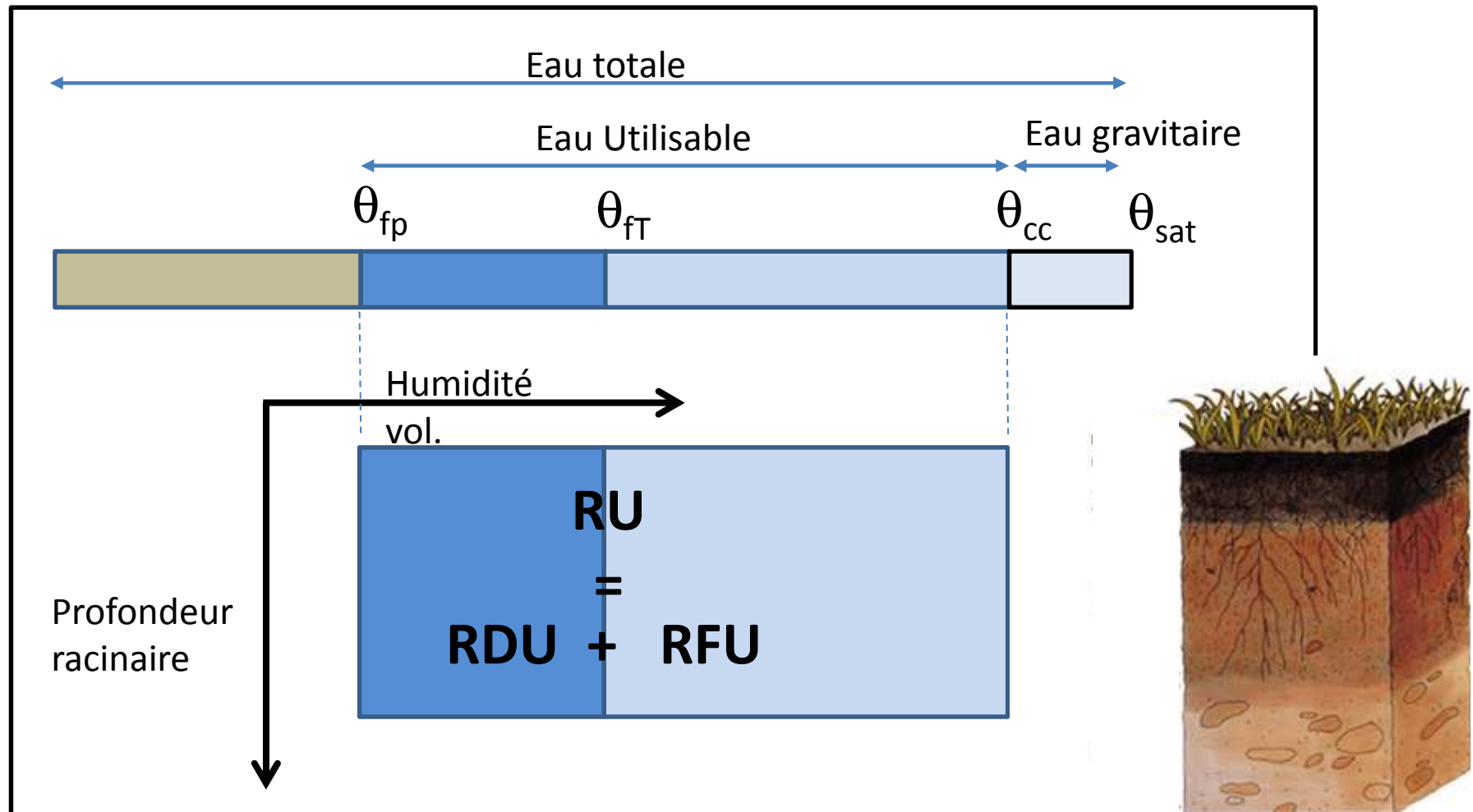


La Réserve Utile... Vue coté Plante/Agronomie

Quelle est la disponibilité pour la plante de l'eau dans le sol et dans la RU ?

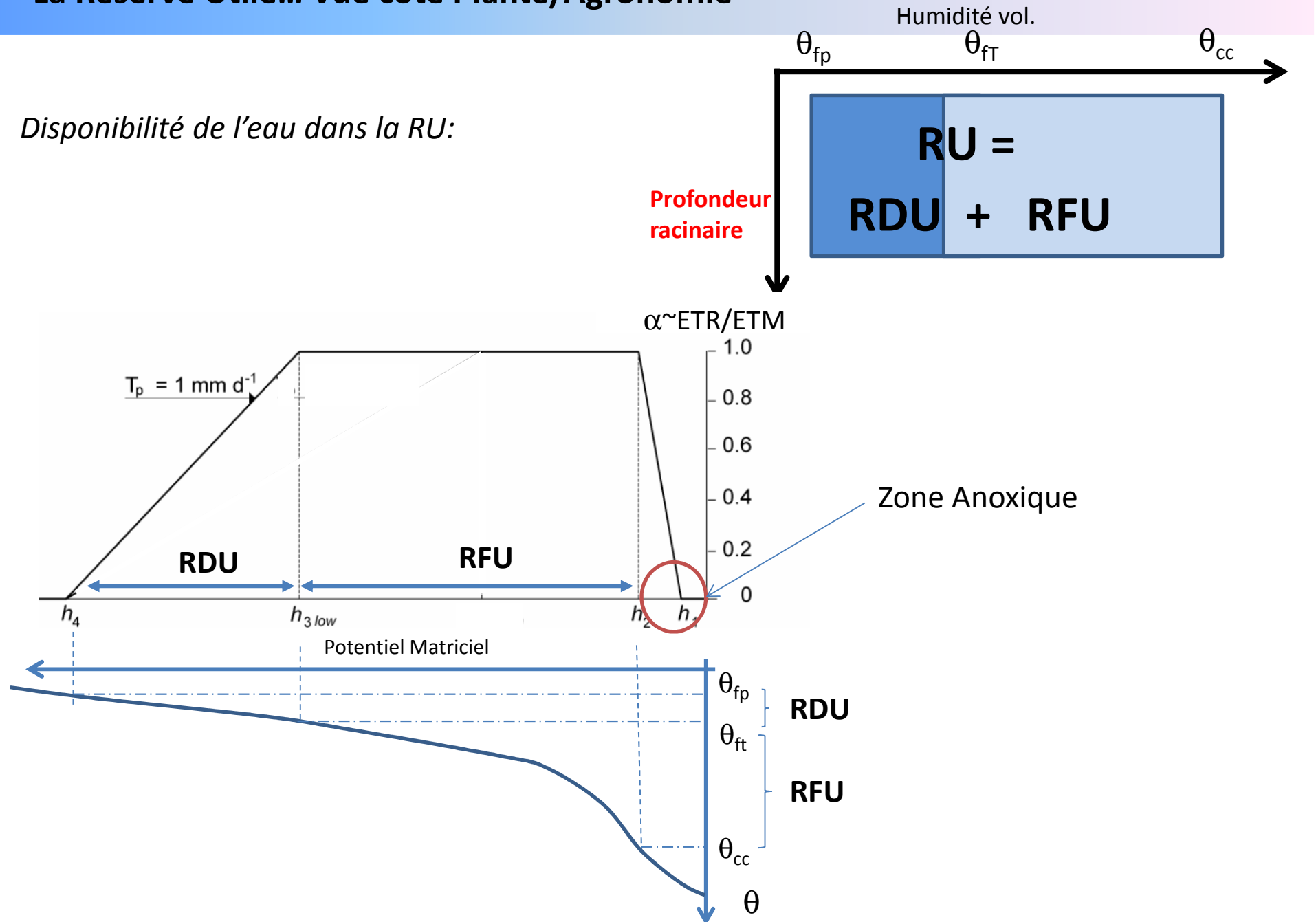
RU = Réserve *facilement* utilisable + Réserve *difficilement* Utilisable

=> θ_{ft} : Flétrissement *Temporaire*



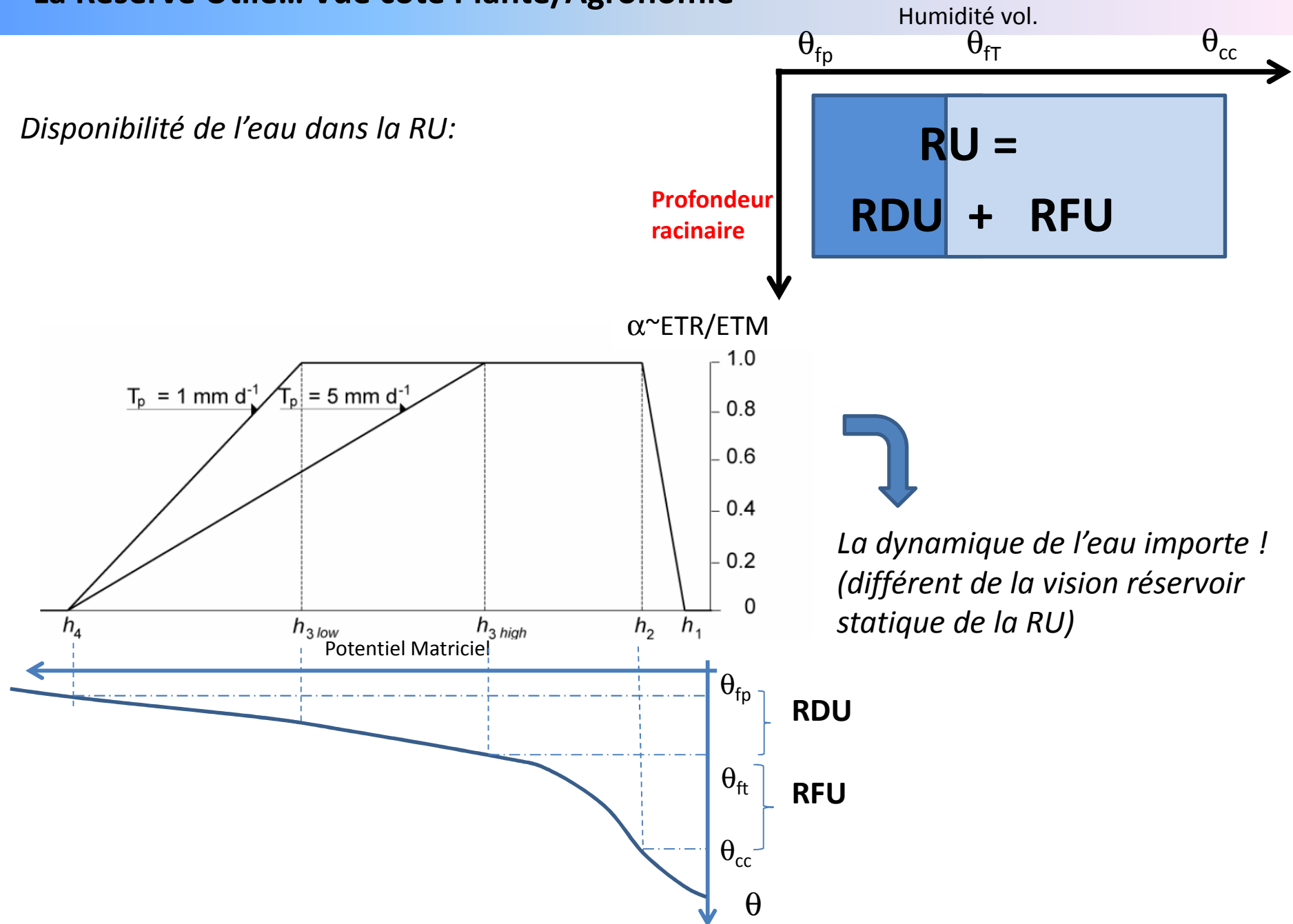
La Réserve Utile... Vue coté Plante/Agronomie

Disponibilité de l'eau dans la RU:



La Réserve Utile... Vue coté Plante/Agronomie

Disponibilité de l'eau dans la RU:



La Réserve Utile... Vue coté Plante/Agronomie

La dynamique de l'eau importe:

Distribution des racines dans le sol
=> *architecture racinaire*

Profondeur
racinaire

Humidité vol.

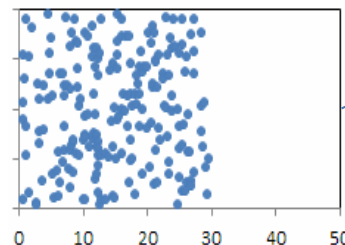
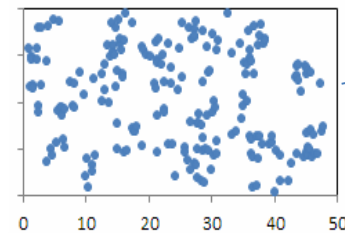
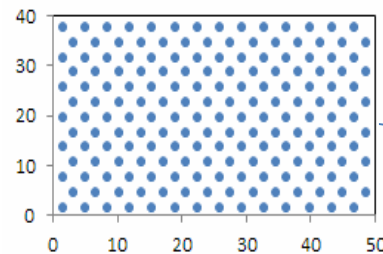
θ_{fp}

θ_{fT}

θ_{cc}

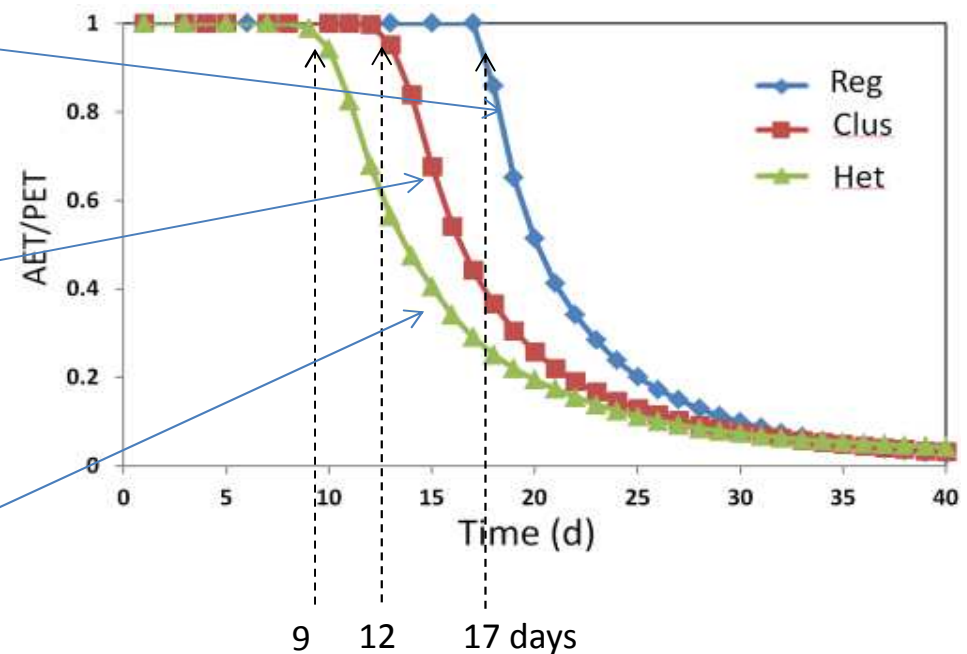
$$RU = RDU + RFU$$

*Cartographie d'impacts
racinaires horizontale*



- Sol Argileux
- RU~40mm
- Profondeur: 40cm
- Même densité racinaire

Transpiration relative au cours du temps



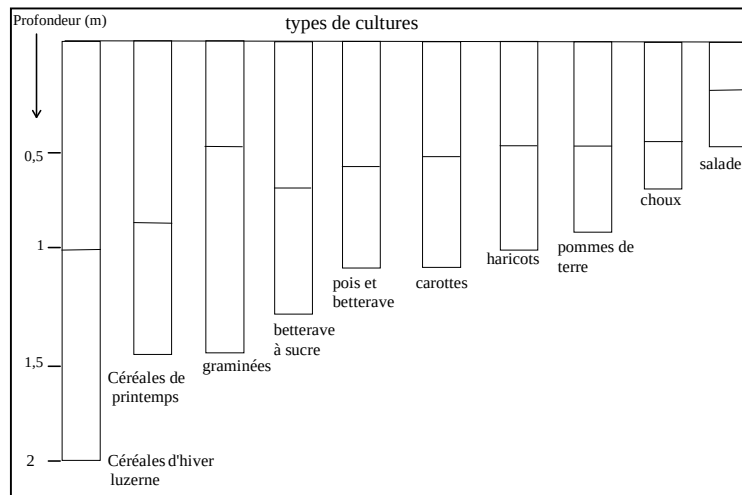
La Réserve Utile... Vue coté Plante/Agronomie

Ou sont les racines ??

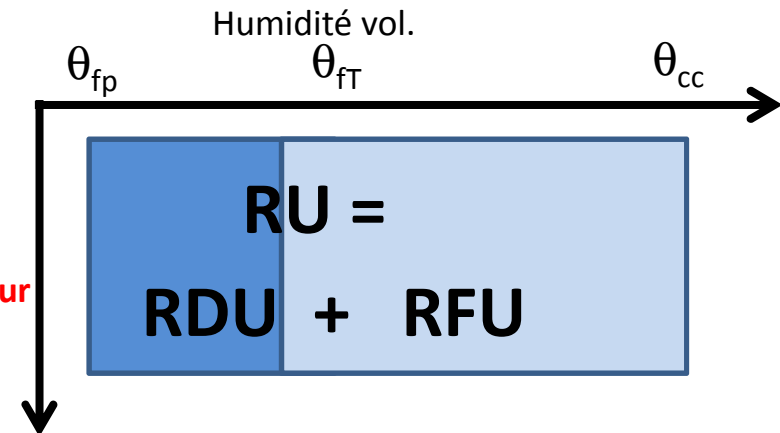
La profondeur racinaire (géométrie) :

1/ Variable suivant :

- les espèces



Profondeur
racinaire



- le sol et les obstacles à l'enracinement en sous sol:
 - Obstacles physique (compaction, couches caillouteuses, indurées, température...)
 - Obstacles chimiques (acidité, anaérobiose, excès CaCO_3 ou éléments toxiques...)

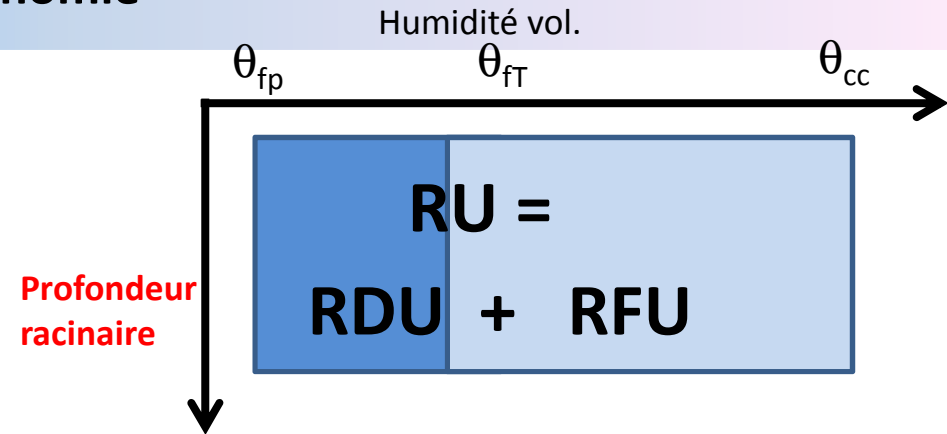
La Réserve Utile... Vue coté Plante/Agronomie

Où sont les racines ??

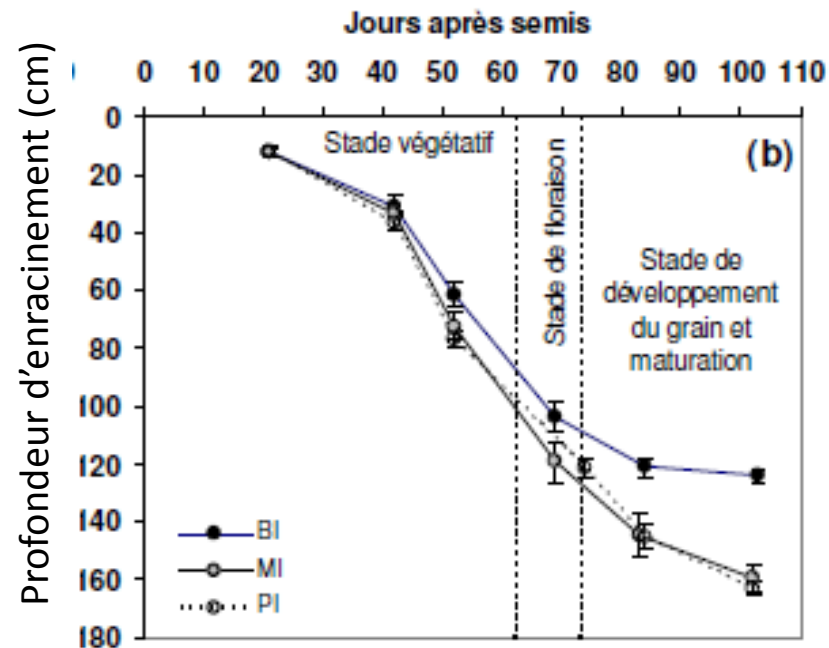
La profondeur racinaire (géométrie) :

2/ Variable dans la temps

$$Z_{root} = Z_{r0} + \alpha t \quad ??$$



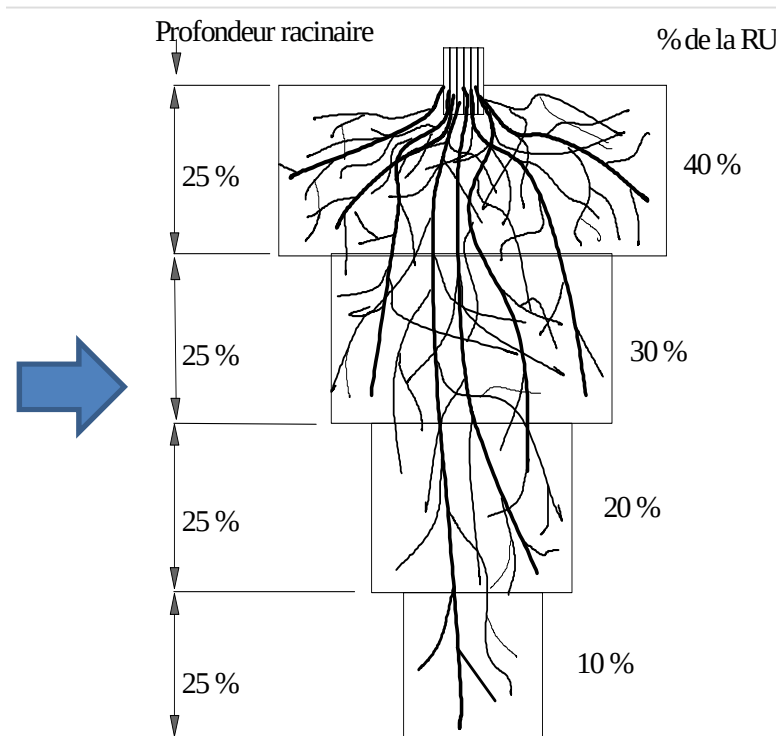
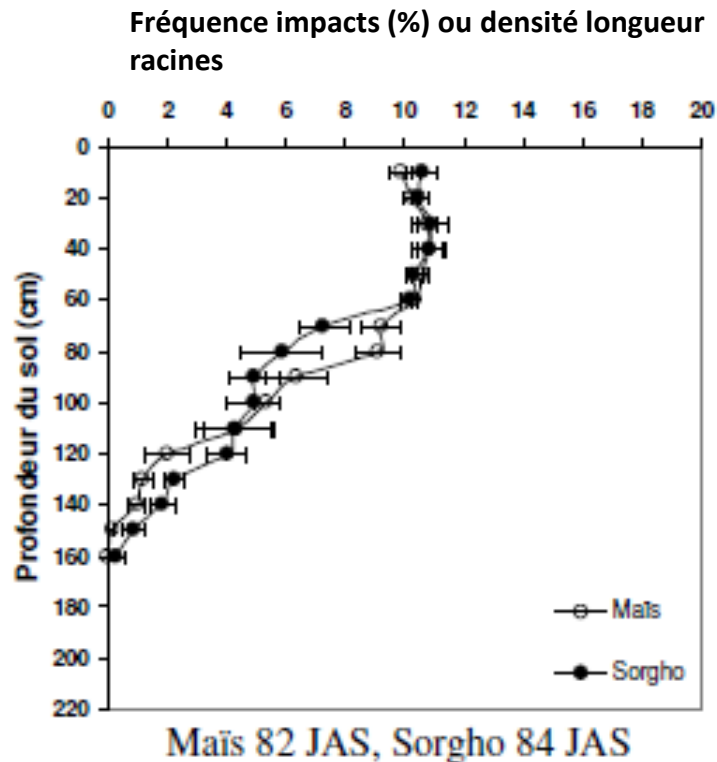
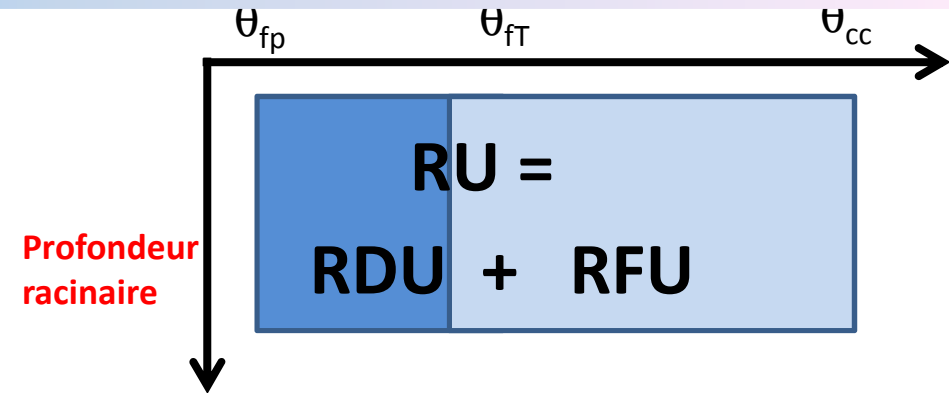
*Profondeur d'enracinement du sorgho avec le temps
(profondeur avec 95% des racines)*



La Réserve Utile... Vue coté Plante/Agronomie

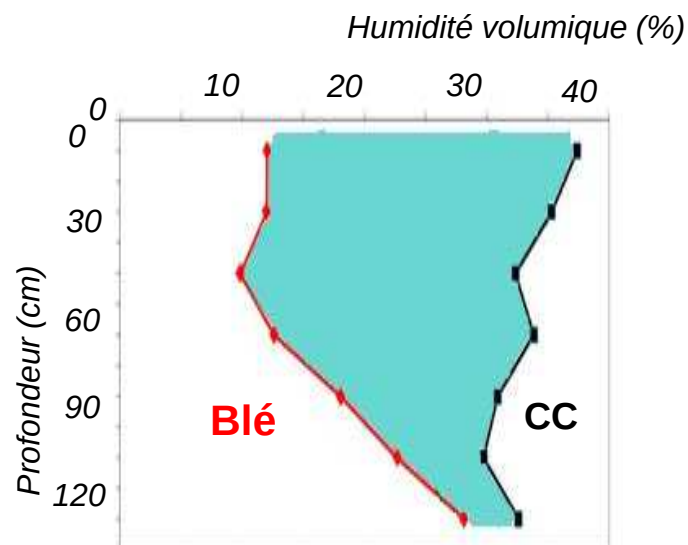
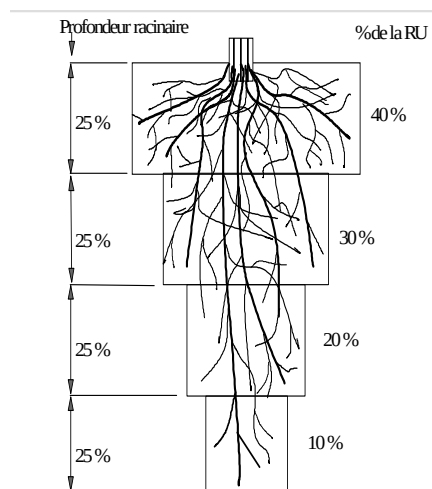
Ou sont les racines ??

*3/ Distribution des racines dans le sol
=> profondeur*

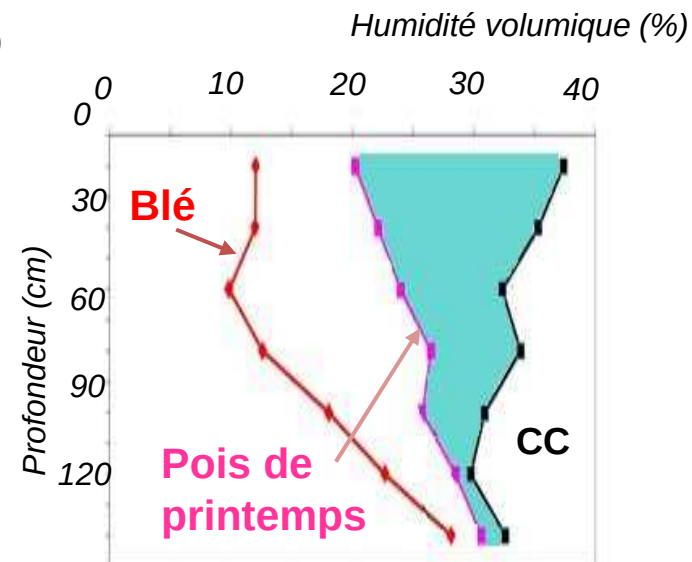


Exemple d'effet lié à l'enracinement: Réserve Utilisable de différentes espèces cultivées, mesurées sur un même type de sol

Effet profondeur et densité d'enracinement



Effet espèce/architecture racinaire



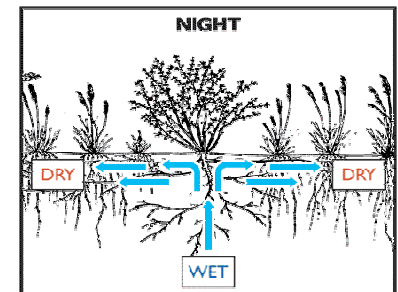
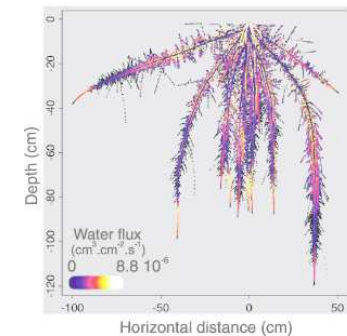
Donnée: ARVALIS (le magneraud)

Espèce	Réserve utilisable (mm)
Blé (semis 17 octobre)	200
Orge de printemps (semis 4 février)	170
Maïs grain (semis 6 avril)	150
Pois de printemps (semis 9 février)	95
Féverole de printemps (semis 9 février)	95

La Réserve Utile... Vue coté Plante/Agronomie

Mais également un questionnement sur le fonctionnement plante et l'interaction avec le sol:

- θ_{fp} n'est pas forcément -15 bars => Résistance/tolérance/évitement de la sécheresse des espèces : jusque -30 bars (blé), -30 à -50 bars (pins ,chênes,buis), jusqu'à -163 bars (*artemesia herba alba*)... En lien avec limite embolisme xylème (résistance cavitation)
- Le Prélèvement dans la RU peut dépendre d'autres facteurs pour la plante:
 - physiologie (aquaporines) et l'âge/type des racines qui influe leur conductance hydrique et l'activité des racines (variabilité du fonctionnement racinaire)
 - Solutés dans le sol et potentiel osmotique (additif ou multiplicatif avec stress eau)
 - L'« hydraulic lift » : ascenseur hydraulique = échanges d'entre couches à travers le système racinaire
 - Les exsudats racinaires (mucilages, tensio-actifs...)



La Réserve Utile... Vue coté Plante/Agronomie

Mais également un questionnement sur le fonctionnement plante et l'interaction avec le sol:

- Exemple d'effet Biologique sol-plante: la rhizosphère (mucilages, exopolysaccharides racinaires, bactériens....) => modification rétention de l'eau



La Réserve Utile... Une caractéristique stable dans le temps ?

Variation temporelle à petite échelle (plutôt le PFP) : rhizosphère, système racinaire (effet Matière Organique)

=> Temps = cycle de culture

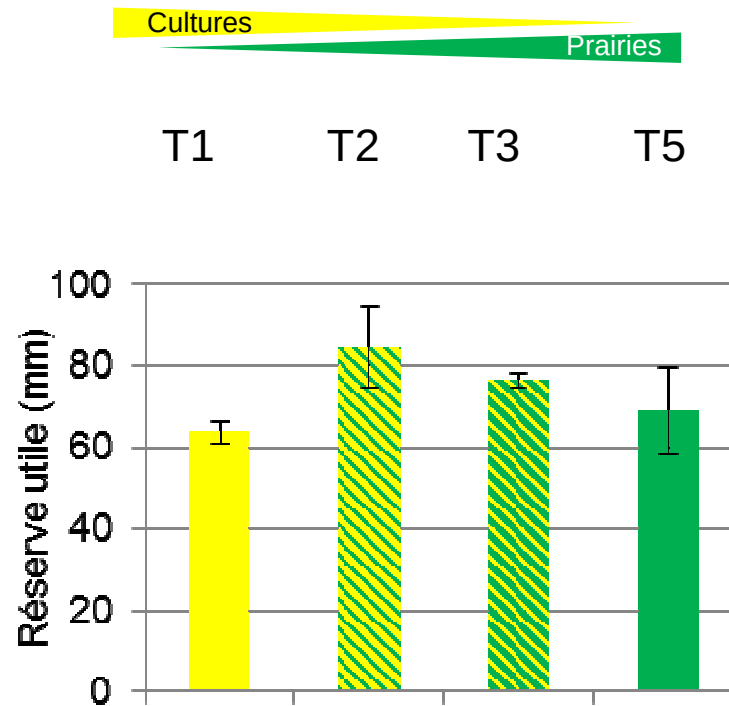
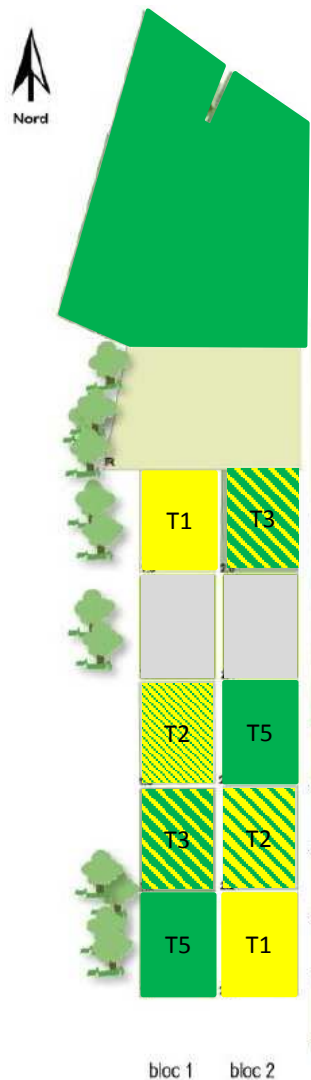


Variation avec l'utilisation du sol : système de culture, transition naturel/cultivé (effet structure, plutôt la CC)

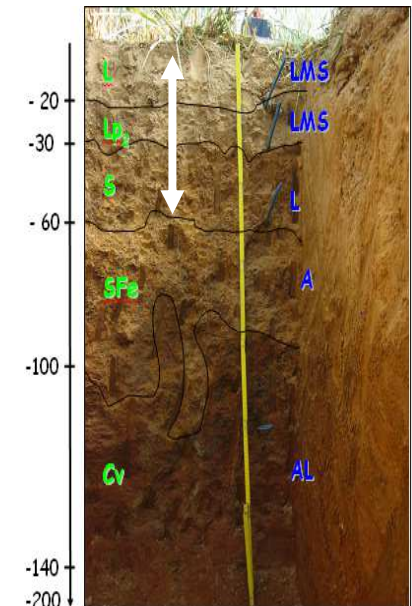
=> Temps = 5- 15 ans

La Réserve Utile... Une caractéristique stable dans le temps : Exemple

Caractérisation des sols du SOERE de LUSIGNAN



Evolution de la Réserve Utile dans les deux premiers horizons du sol
(Cousin, Doussan, 2016)

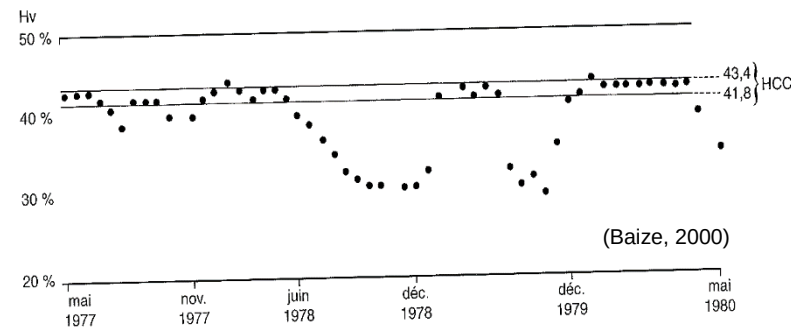
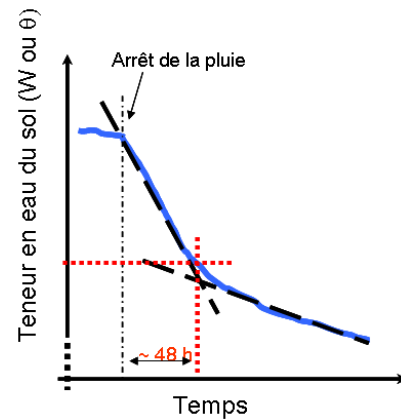


Les successions culturales modifient, à *moyen terme*, la réserve en eau utile des sols

L'estimation de la Réserve Utile

Des approches directes (ponctuelles) :

Au champ : Suivi de profil hydrique pour déterminer θ_{cc} (ou θ_{fp})



Au Laboratoire: Fosses pédologiques + prélèvements + Mesures de teneur en eau des échantillons de sol prélevés (remanié/non-remanié) porté à différents potentiels matriciels

θ_{cc} : Pas de valeur de potentiel universellement acceptée => -0.05 bar (UK), -0.1 bar (F, Au), -0.33 bar (F,USA) + dépendance texture/MO

θ_{fp} : en général potentiel retenu= -15 bars



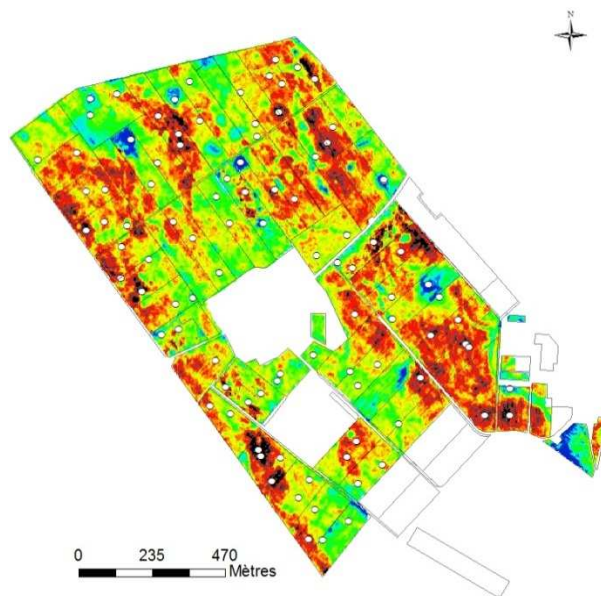
L'estimation de la Réserve Utile

Des approches indirectes (cartographie parcelle à région):

Géophysique / Télédétection, nouveaux outils :

Mise en évidence profondeur de sol, variabilité spatiale, imagerie humidité surface, biomasse, spectrométrie NIRS/UV/VIS...

Prospection
géophysique (électrique)

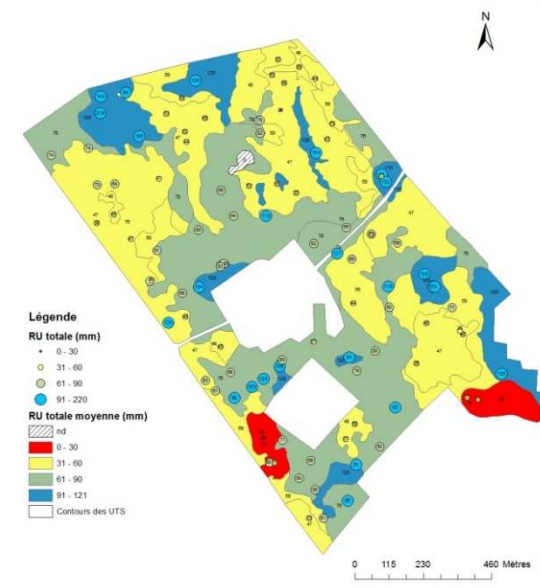


+

Prospection pédologique
(fosse, tarière, prélèvements,
mesures labo)



Carte de la RU - parcellaire



L'estimation de la Réserve Utile

Des approches indirectes (parcelle à région):

Géophysique / Télédétection, nouveaux outils :

Mise en évidence profondeur de sol, variabilité spatiale, imagerie humidité surface, biomasse, spectrométrie NIRS/UV/VIS ...

Outils embarqués : mesure in situ en continu en profondeur : Spectrométrie/ Da



L'estimation de la Réserve Utile

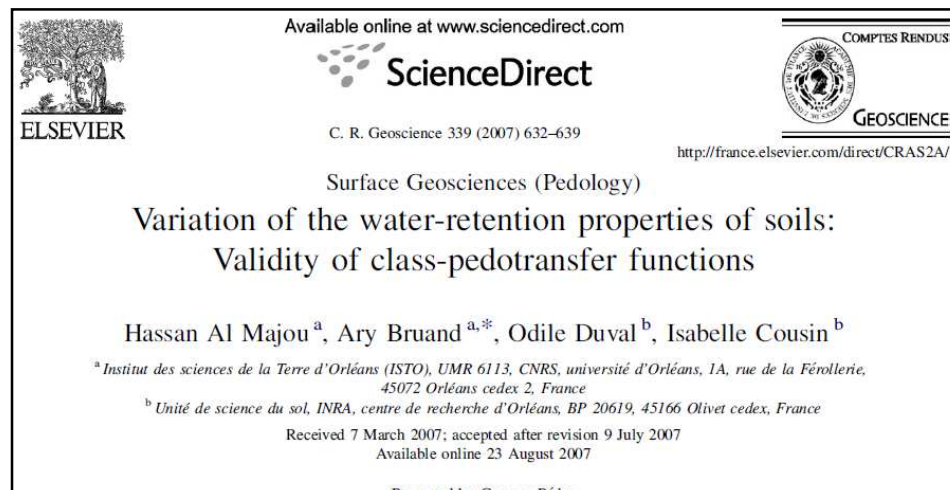
Des approches indirectes (parcelle à région):

Géophysique / Télédétection, nouveaux outils :

Mise en évidence profondeur de sol, variabilité spatiale, imagerie humidité surface, biomasse, spectrométrie NIRS/UV/VIS ...

Etablissement de fonctions de pédo-transfert:

- Formulations semi-empiriques/statistique entre les paramètres désirés (θ_{cc} , θ_{fp}) et variables plus faciles à estimer du sol (texture, D_a , type horizon...)
- Nécessite une BDD de sols variés, mais dépendance des relations à cette base de donnée...
- Reste la problématique de profondeur du sol et enracinement.



L'estimation de la Réserve Utile

Des approches indirectes (parcelle à région):

Géophysique / Télédétection, nouveaux outils :

Mise en évidence profondeur de sol, variabilité spatiale, imagerie humidité surface, biomasse, , spectrométrie NIRS/UV/VIS ...

Etablissement de fonctions de pédo-transfert:

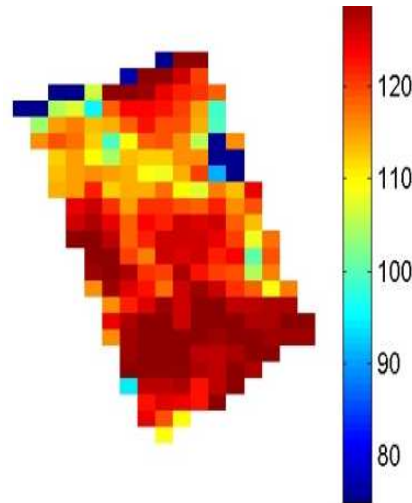
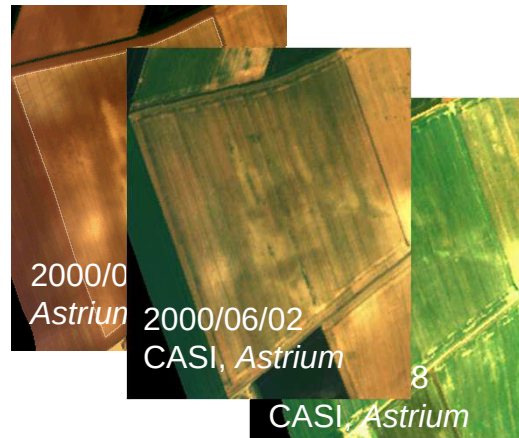
- Formulations semi-empiriques/statistique entre les paramètres désirés (θ_{cc} , θ_{fp}) et variables plus faciles à estimer du sol (texture, D_a , type horizon...)
- Nécessite une BDD de sols variés, mais dépendance des relations à cette base de donnée...
- Reste la problématique de profondeur du sol et enracinement.

Inversion de modèles:

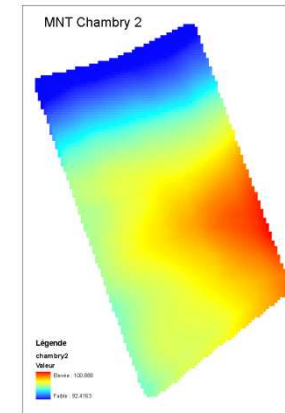
- Confrontation données modélisées – mesurées sur un suivi de la croissance de la végétation (télédétection) + autres variables si disponibles
- Ajustement au mieux de la RU (donnée fixe dans le temps) pour reproduire biomasse / LAI / évapotranspiration..
- => des modèles de culture +/- complexes, des données dans le temps + hypothèses / contraintes à priori...

Exemple d'applications de détermination RU : mesure directe et inverse + PTF

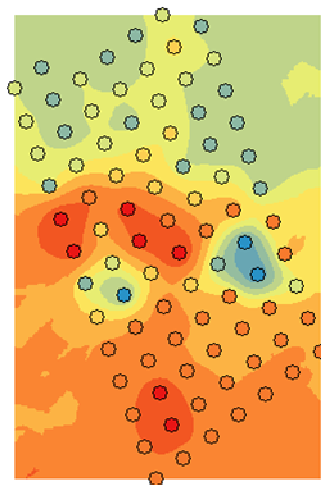
③ Carte Inversion blé 2001



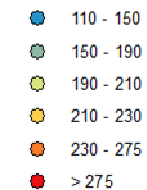
④ MNT



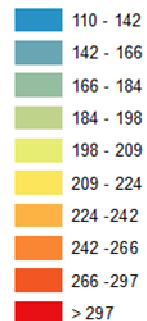
① Carte des sols + PTF locales à partir de mesures labo



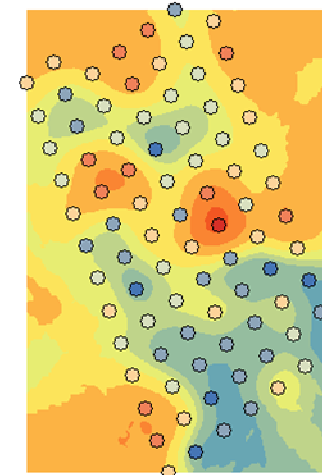
Ru_grille_ch2.Ruto



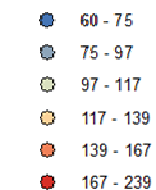
Kriging_RUtot



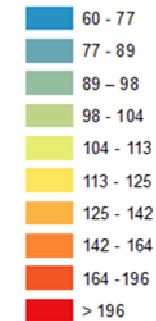
② Carte des sols + PTF locales + obstacle enracinement



calcRUobstarac / <Aucun:



Kriging_RU_obstarac



La Réserve Utile... Conclusion : Un concept Utile pas si simple

Nécessite un questionnement sur la détermination et propriété pédologiques et physique du sol, biologiques de la plante:

L'estimation *in situ* et le fonctionnement hydrique dépendent des propriétés des couches sous-jacentes(barrière capillaire ou peu perméable), nappe peu profonde et de la prise ou non en compte de l'hystérésis imbibition/drainage.

RU = vision 1D. Peut dépendre de l'intensité d'apports latéraux ou d'écoulements négligés: écoulements latéraux sur pente, remontées capillaires

L'estimation de RU dépend de l'hétérogénéité : taux de cailloux et leur participation hydrique, mélange zones denses/peu denses, +/- oxydées,

L'estimation de RU dépend de la distinction +/- claire des horizons et de la variabilité spatiale horizontale

Enracinement: profondeur, hétérogénéité de l'enracinement, obstacles physiques/chimiques...

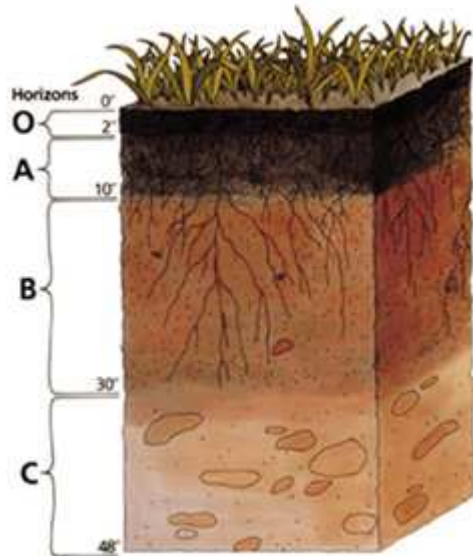
Des effets plantes à mieux prendre en compte: émergence de nouveaux concepts: Least Limiting Water Range => prenant en compte des contraintes au développement racinaire (anaérobiose, résistance à la pénétration...)



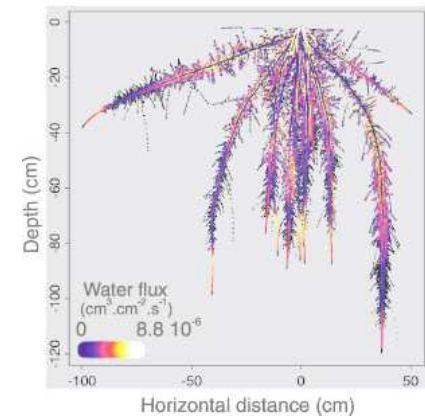
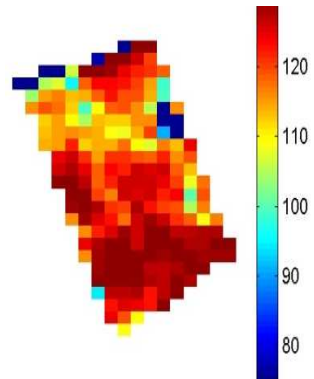
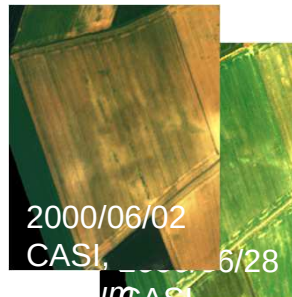
La Réserve Utile

The end

Merci pour votre attention

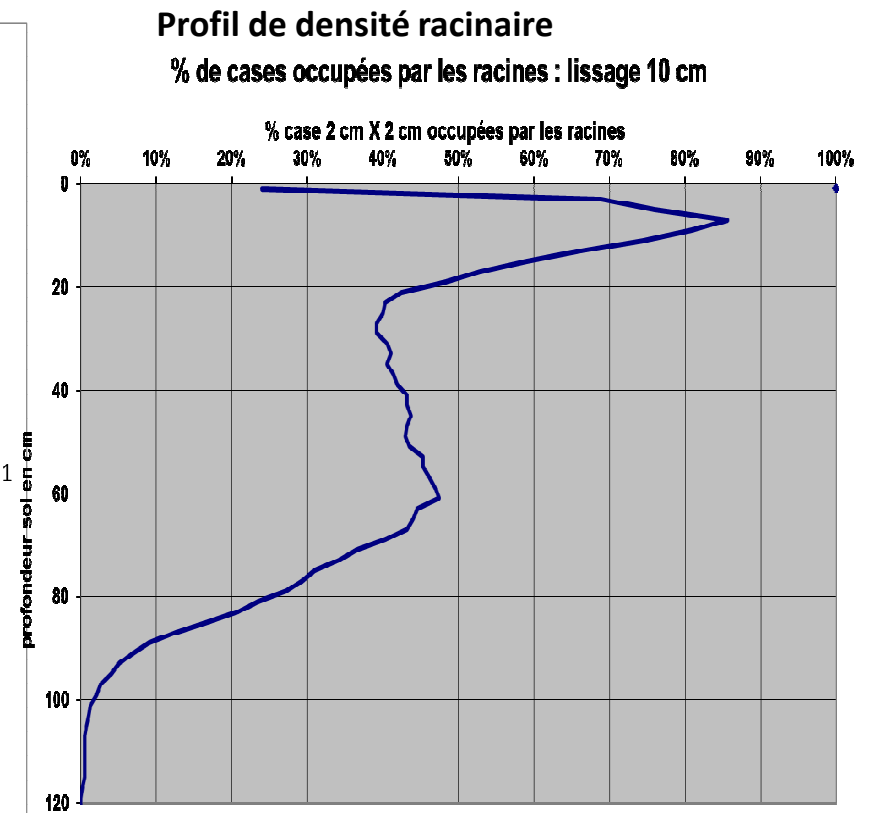
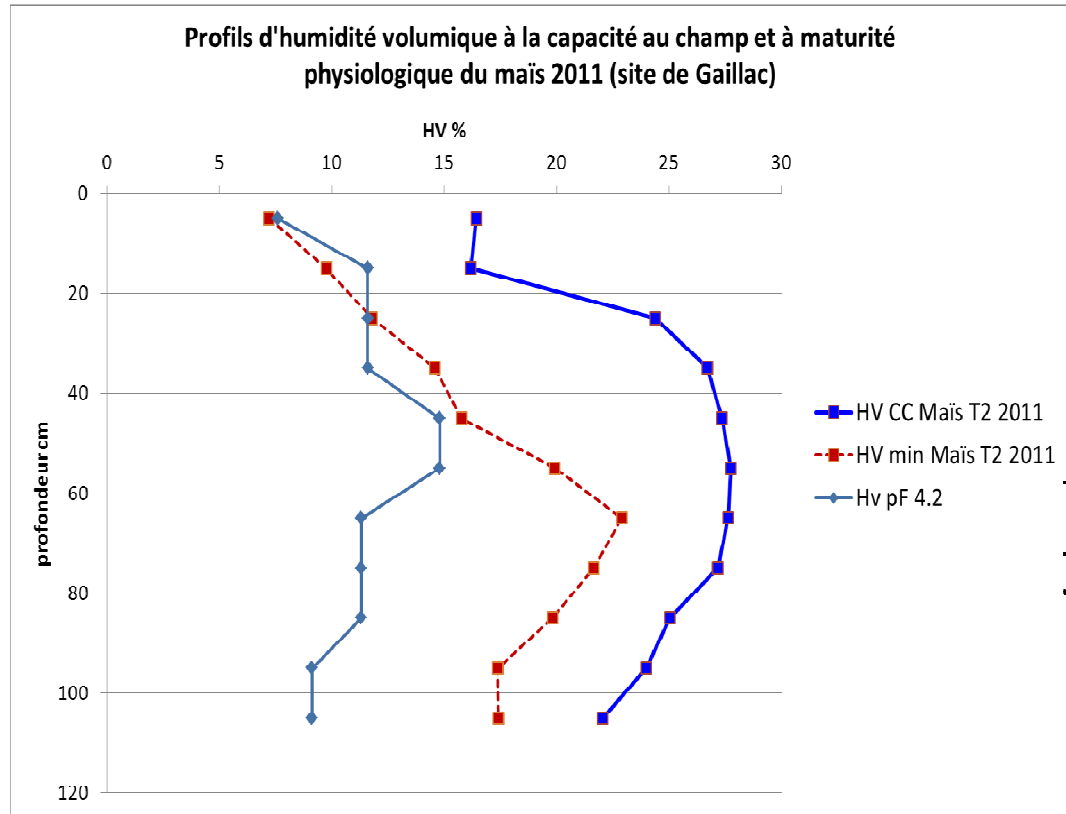


Carte Inversion blé
2001



Exemple d'applications de détermination RU : mesure directe

Exemple mesures profil hydrique / densité Racinaire Arvalis (Gaillac)



On atteint pas forcément le θ_{fp} même si déficit hydrique sévère ... Réserve Maximale Utilisée ?!