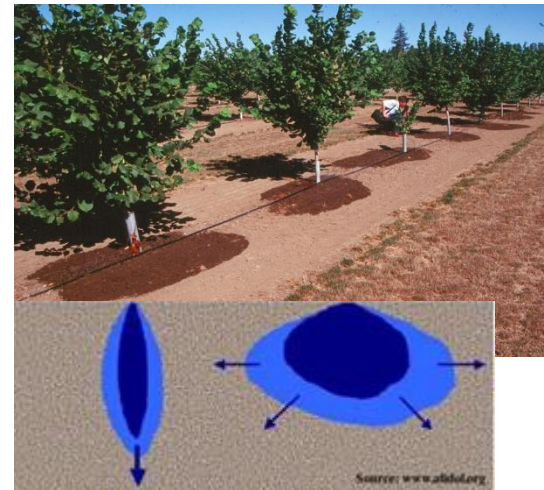
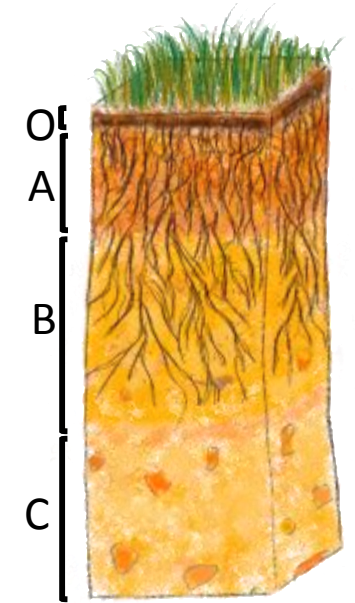
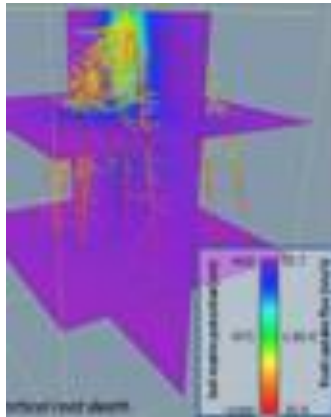


Le régime hydrique des sols: à l'intersection du climat et du vivant

Claude Doussan

UMR EMMAH - Avignon



Au programme

Cycle de l'eau et grands flux : Eau bleue/verte et l'homme

L'eau dans le sol: bases

2 grandes approches: Une vision globale réservoir; une vision « mécaniste » du transfert

Notion de potentiel hydrique, rétention, conductivité hydraulique

Le bilan hydrique

Le problème des écoulements préférentiels

Illustration des approches sur le prélèvement hydrique

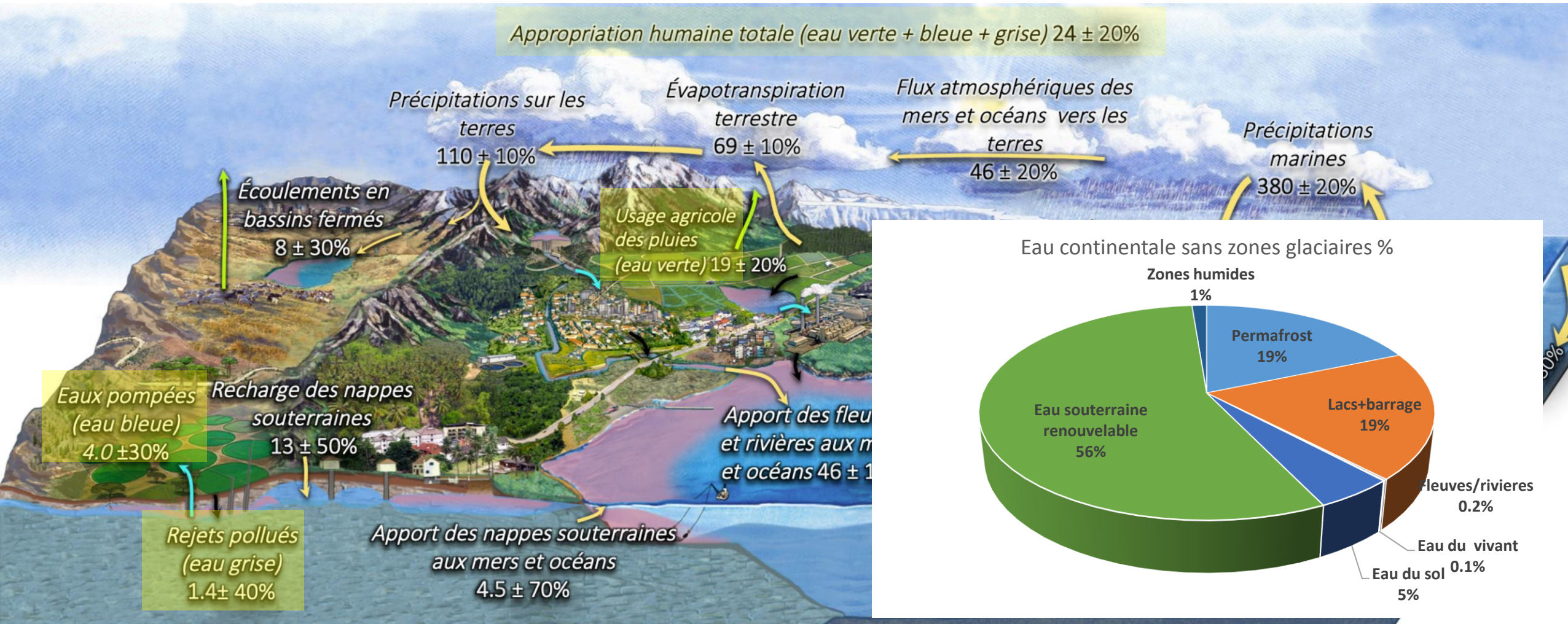
Les propriétés de transfert et rétention des sols peuvent évoluer dans le temps !

Etat hydrique des sols: mesures au champ

Hétérogénéité physique du sol et variabilité

1/ Cycle de l'eau et grands flux : Eau bleue/verte et l'homme

Valeurs en milliers de km³/an, ± incertitude en %

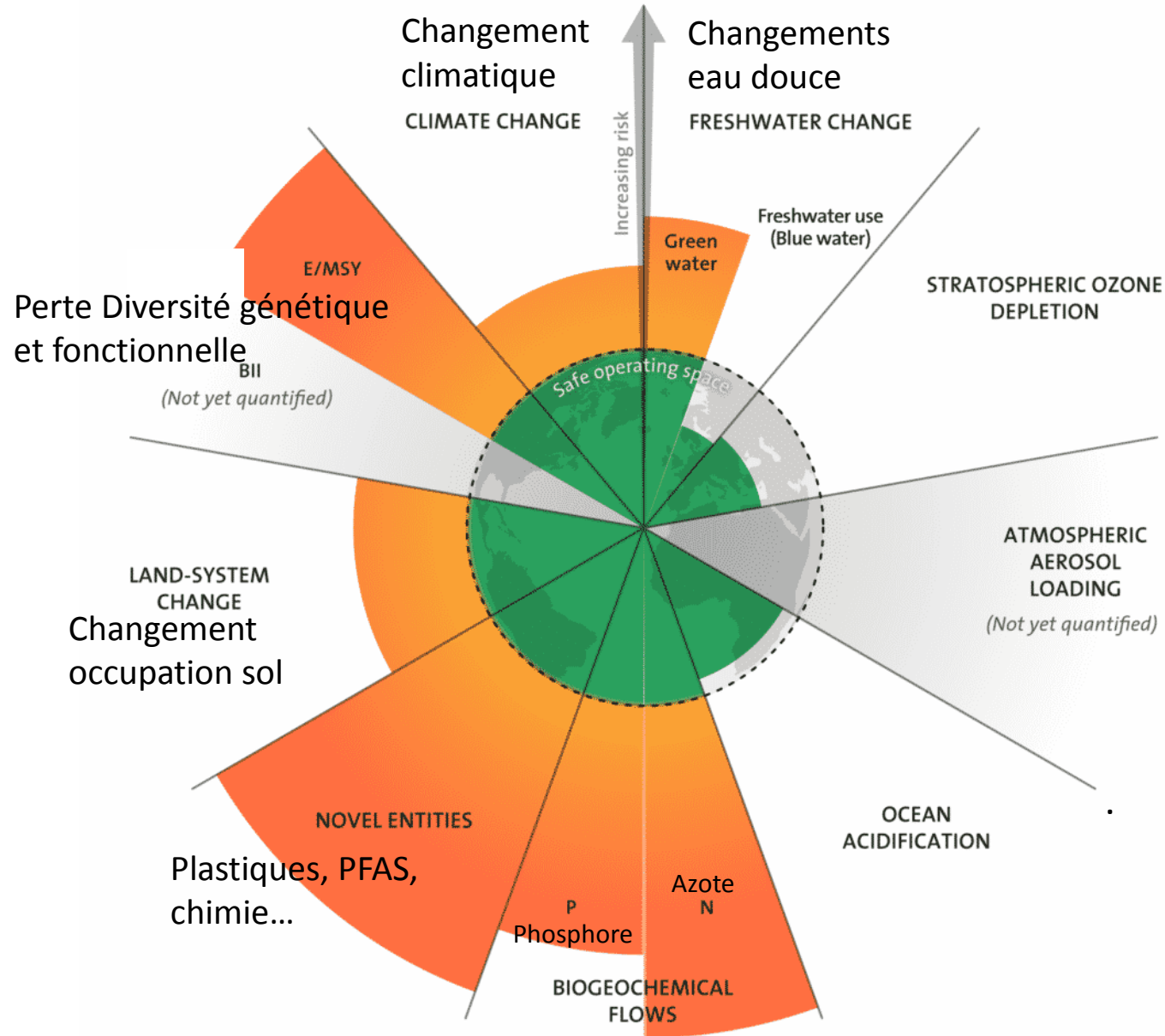


Appropriation humaine représentée par l'utilisation d'eau verte , bleue  et grise 

Abbott B.W. et al., Corner D., 2019, Nature Geoscience

- ➔ Utilisation Eau par l'homme ~ 1/4 des précipitations ; ~ 1/2 de l'eau circulant dans les rivières du monde entier !!
- ~ 70% utilisé pour l'agriculture - Une partie du cycle continental « détourné » de fonction par activité humaine...

1/ Cycle de l'eau : Dépassement partiel de la limite planétaire portant sur l'eau douce



- Eau verte (=eau du sol) mondiale hors de sa zone de variabilité historique naturelle
- Sol anormalement sec ou trop humides de plus en plus courants
- Ex. Amazonie dont des parties sèchent => savanne
- Déforestation, changement utilisation terres

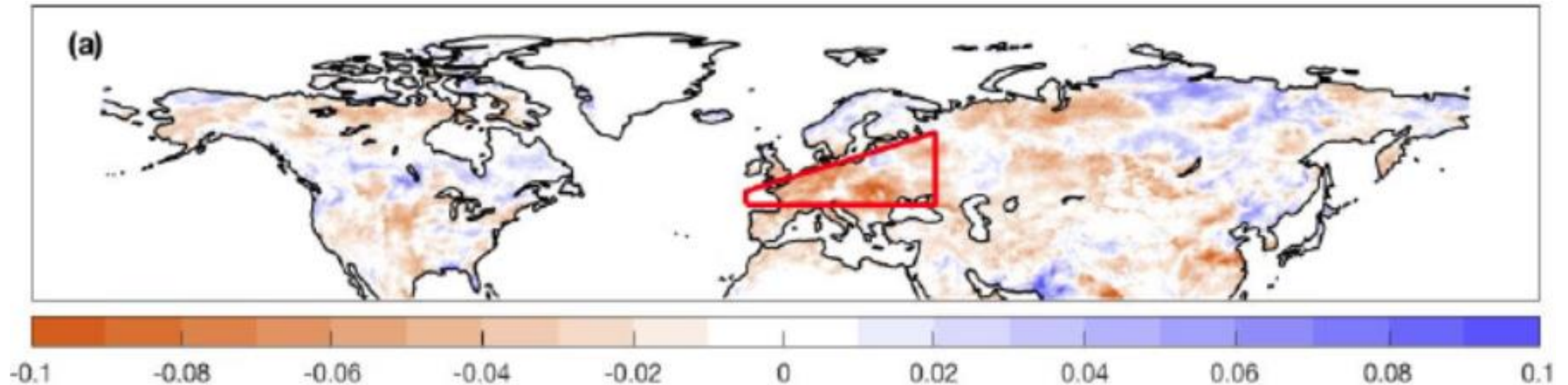


Exemple déforestation en Amazonie, au Brésil.
© AMANDA PEROBELLI / REUTERS

1/ Cycle de l'eau : Dépassement partiel de la limite planétaire portant sur l'eau douce

Sécheresse mondiale 2022

Anomalie de teneur en eau du sol dans la zone racinaire sur Juin, Juillet, Aout 2022



Anomalie teneur en eau (m^3/m^3) [plus rouge = moins d'eau que moyenne]

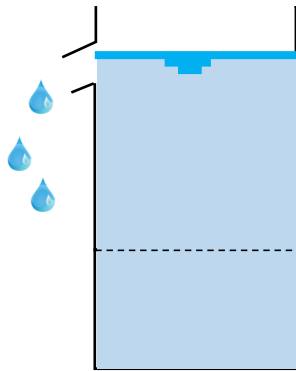
- Peut arriver maintenant 1 fois tous les 20 ans dans climat actuel
- La forte augmentation température serait le facteur principal de cette augmentation sècheresse

2/ Concepts de base sur l'eau dans le sol

2 grands types de conceptualisations de l'eau dans le sol (en quantité, variations et transferts)

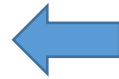
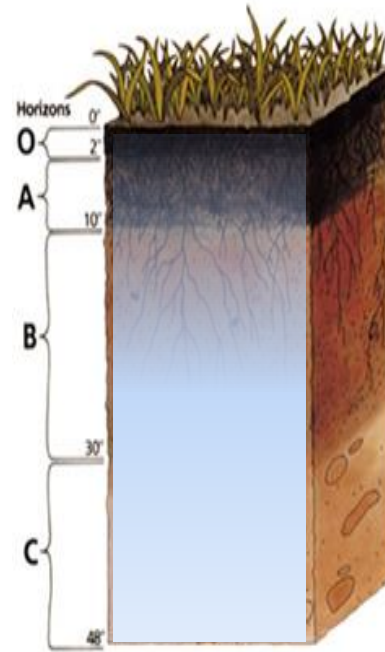
Une approche analogique « réservoir »

- Axée sur la quantité d'eau
- Représentation « simple »
- Néglige des processus



Une approche mécaniste +/- physique

- Axée sur la représentation des transferts
- Assez complexe mais plus complète
- Paramétrisation ?

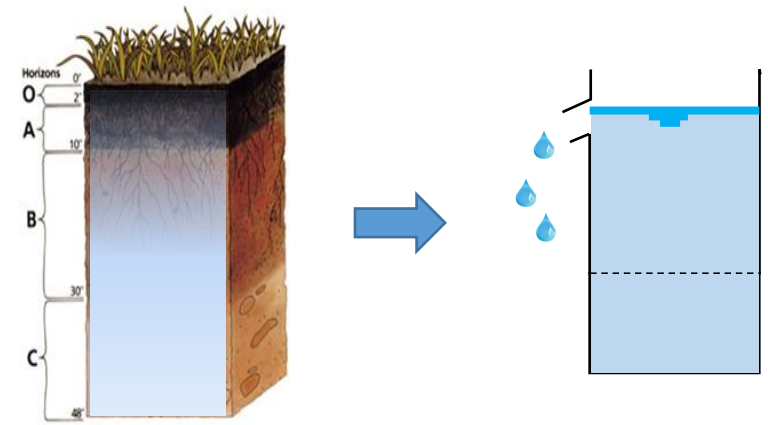


$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \text{div}(K(\theta) \vec{\text{grad}} H)$$

2/ Concepts de base sur l'eau dans le sol

L'approche « réservoir »

Fondée sur des quantités d'eau, des stocks hydriques ...



Relation teneur en eau volumique / pondérale

Teneur en eau volumique

$$\theta = \frac{V_{eau}}{V_{sol}} \quad (\text{cm}^3/\text{cm}^3)$$

Teneur en eau pondérale
(ou massique)

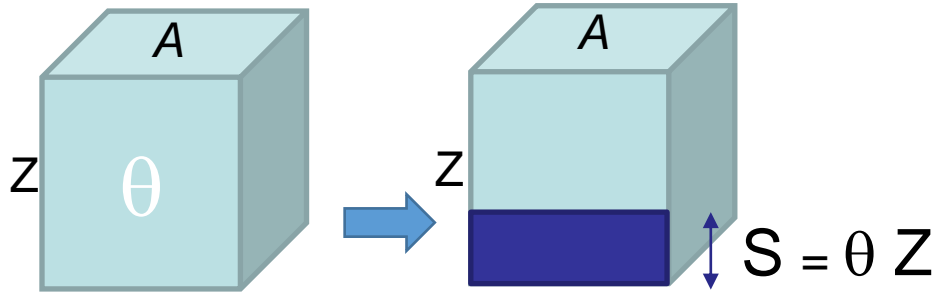
$$W = \frac{M_{eau}}{M_{sol_sec}} \quad (\text{g/g})$$

$$\theta = \rho_d \cdot W$$

$$\rho_d = \frac{M_{sol_sec}}{V_{sol}} \quad \text{Masse volumique sol sec (g/cm}^3\text{)}$$

Stock d'eau (S) sur une profondeur Z de sol (= volume d'eau sur profondeur Z par unité de surface)

$$S = \theta \cdot Z \quad (\text{mm d'eau})$$

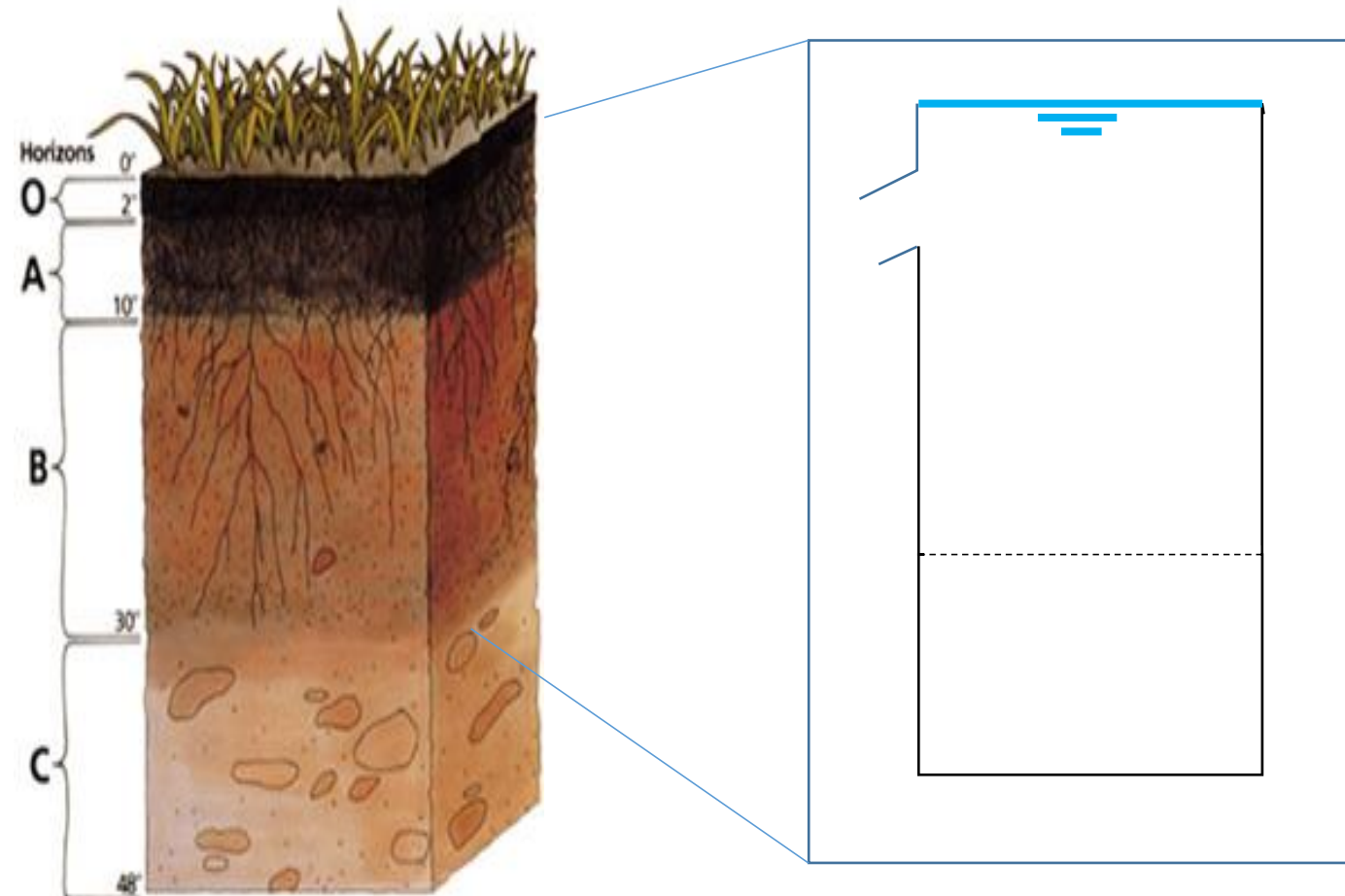


2/ Concepts de base sur l'eau dans le sol

L'approche « réservoir »: Application au Réservoir en eau Utilisable par les cultures (RU)

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

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

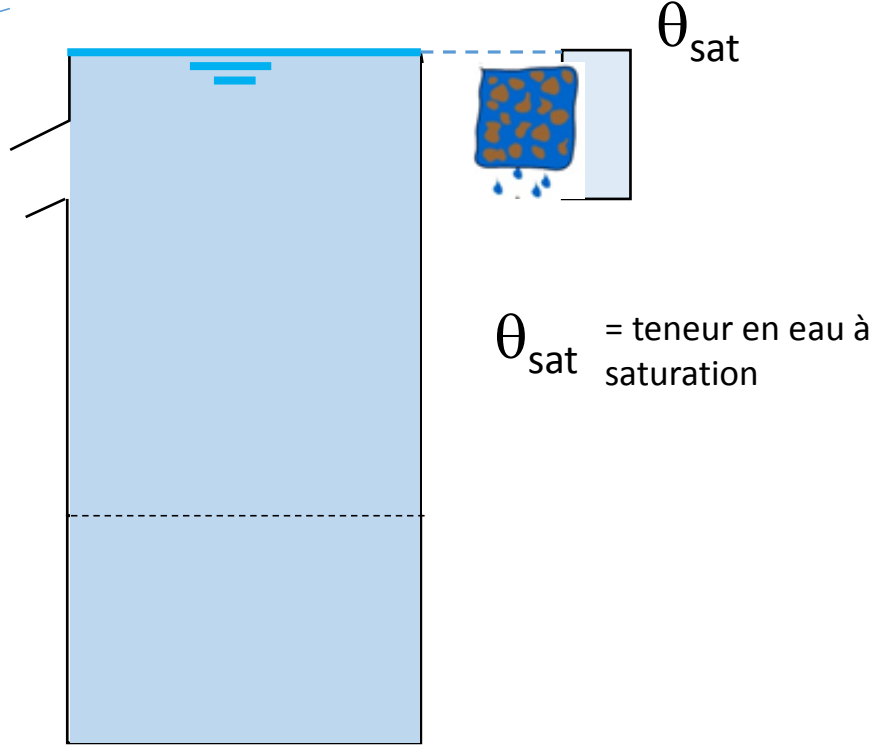
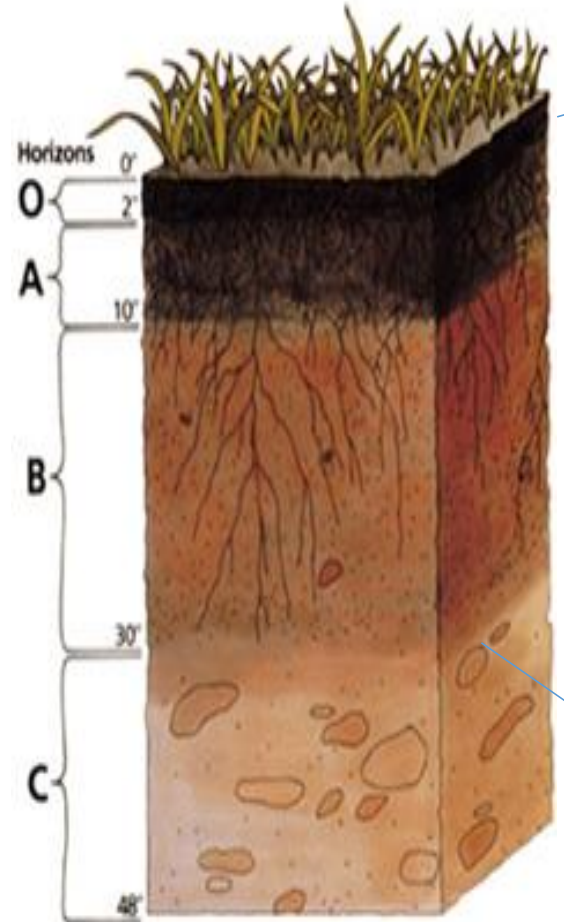


2/ Concepts de base sur l'eau dans le sol

L'approche « réservoir »: Application au Réservoir en eau Utilisable par les cultures (RU)

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

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

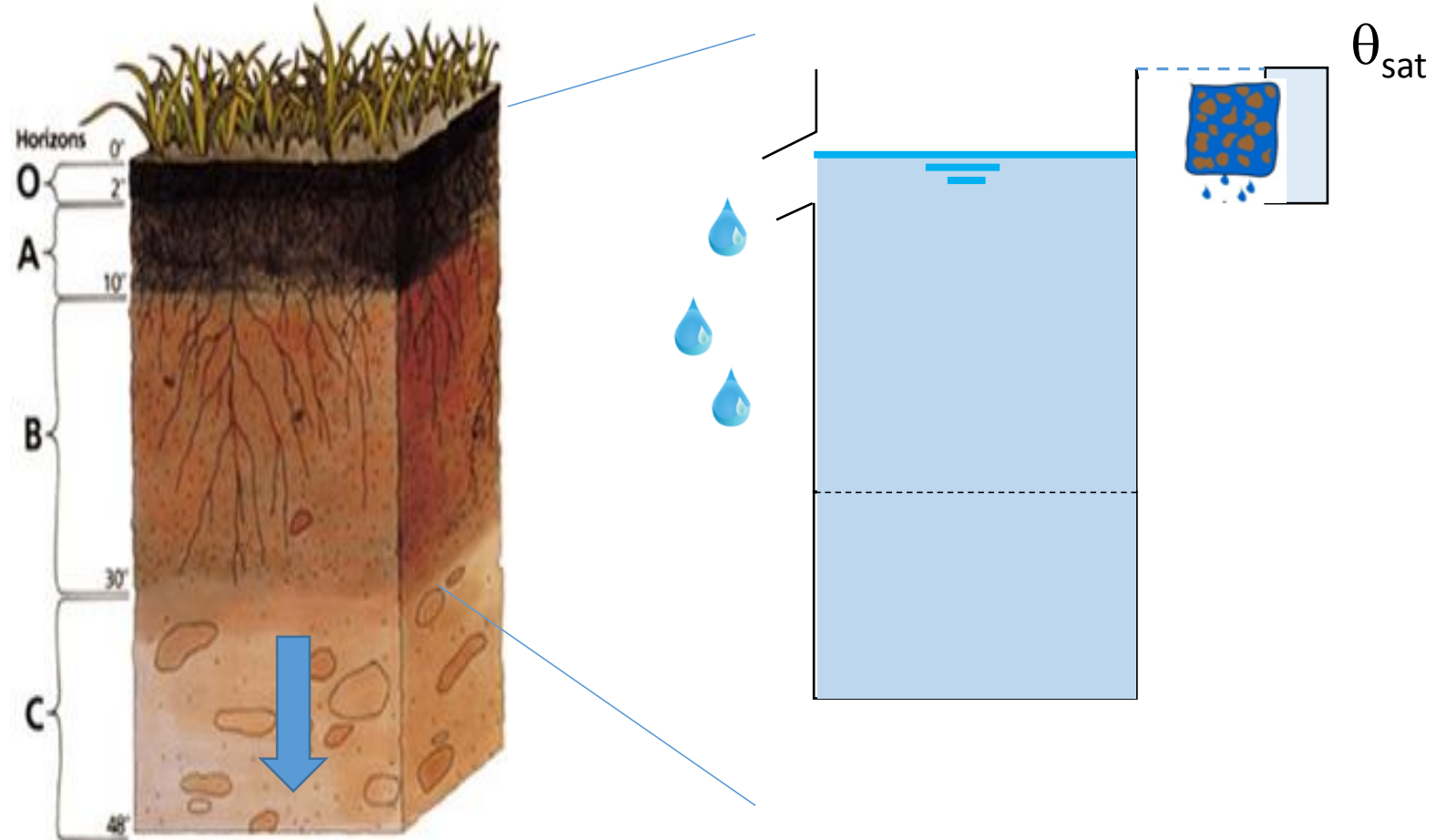


2/ Concepts de base sur l'eau dans le sol

L'approche « réservoir »: Application au Réservoir en eau Utilisable par les cultures (RU)

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

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

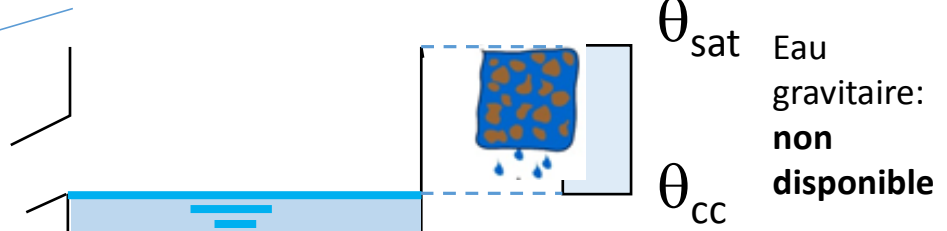
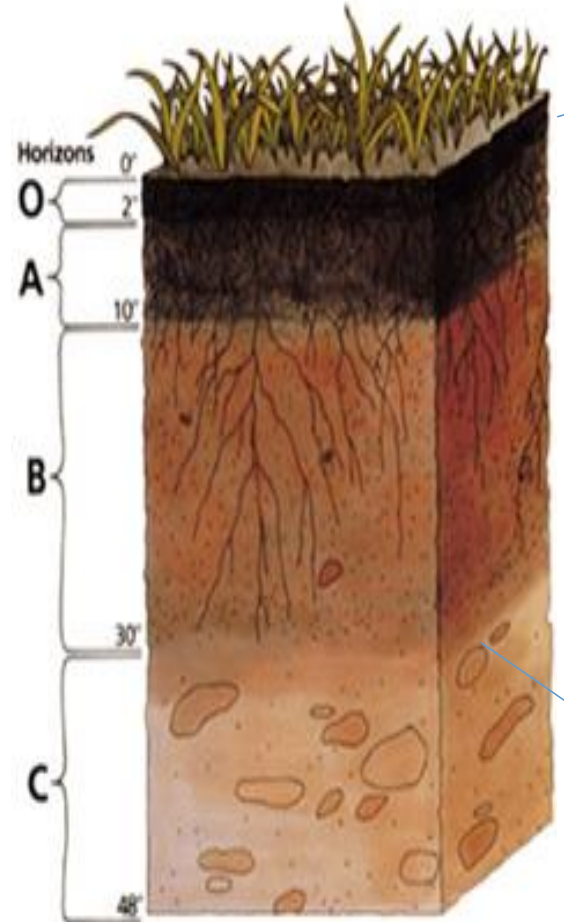


2/ Concepts de base sur l'eau dans le sol

L'approche « réservoir »: Application au Réservoir en eau Utilisable par les cultures (RU)

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

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



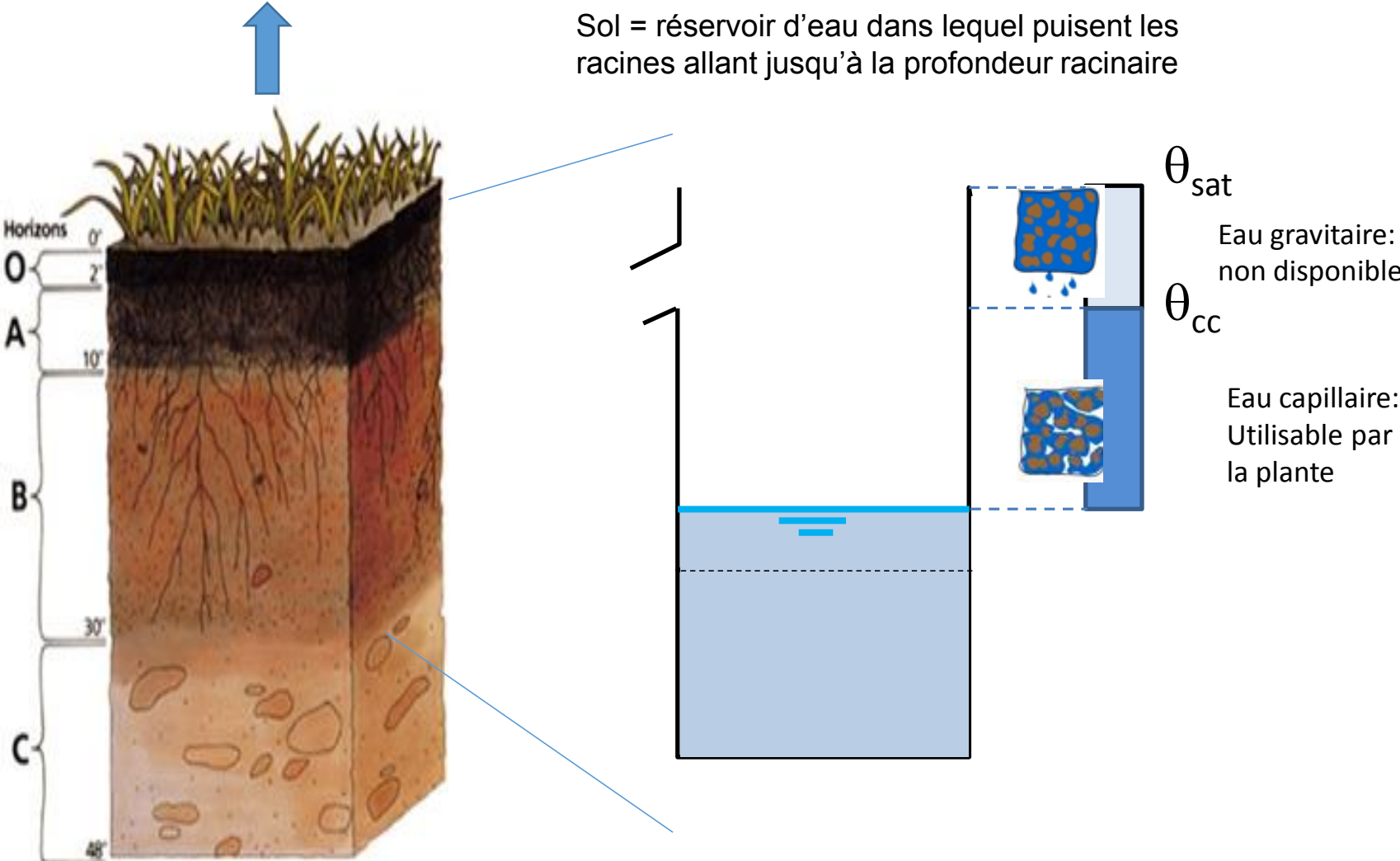
Le drainage s'effectue trop rapidement (qlques h à 3 jours) pour être utile aux plantes

θ_{cc} = teneur en eau à capacité au champ

Concepts de base : Disponibilité de l'eau du sol pour la transpiration

La vision classique: La Réserve Utile (RU) ou Réservoir en Eau Utilisable par les cultures

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

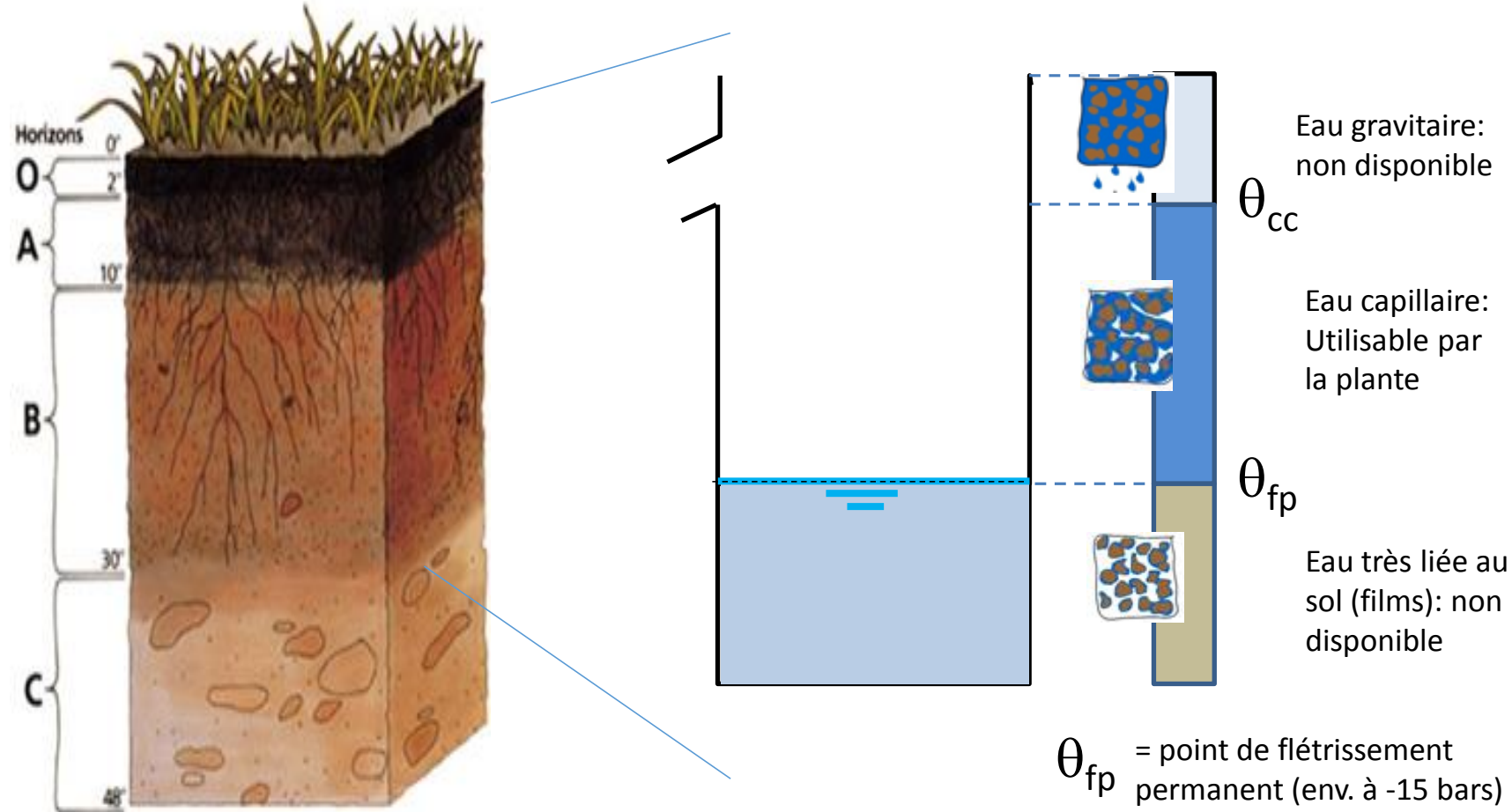


2/ Concepts de base sur l'eau dans le sol

L'approche « réservoir »: Application au Réservoir en eau Utilisable par les cultures (RU)

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

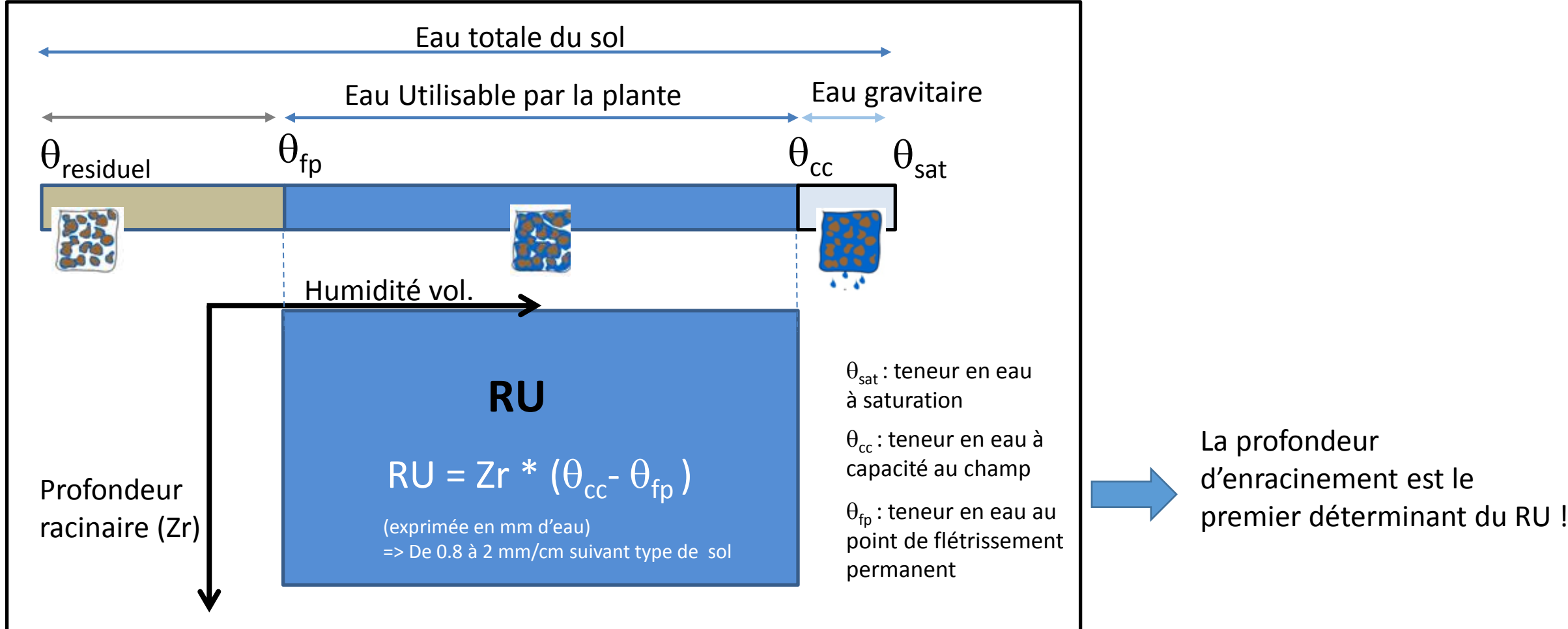
Sol = réservoir d'eau dans lequel puisent les racines allant jusqu'à la profondeur racinaire



2/ Concepts de base sur l'eau dans le sol

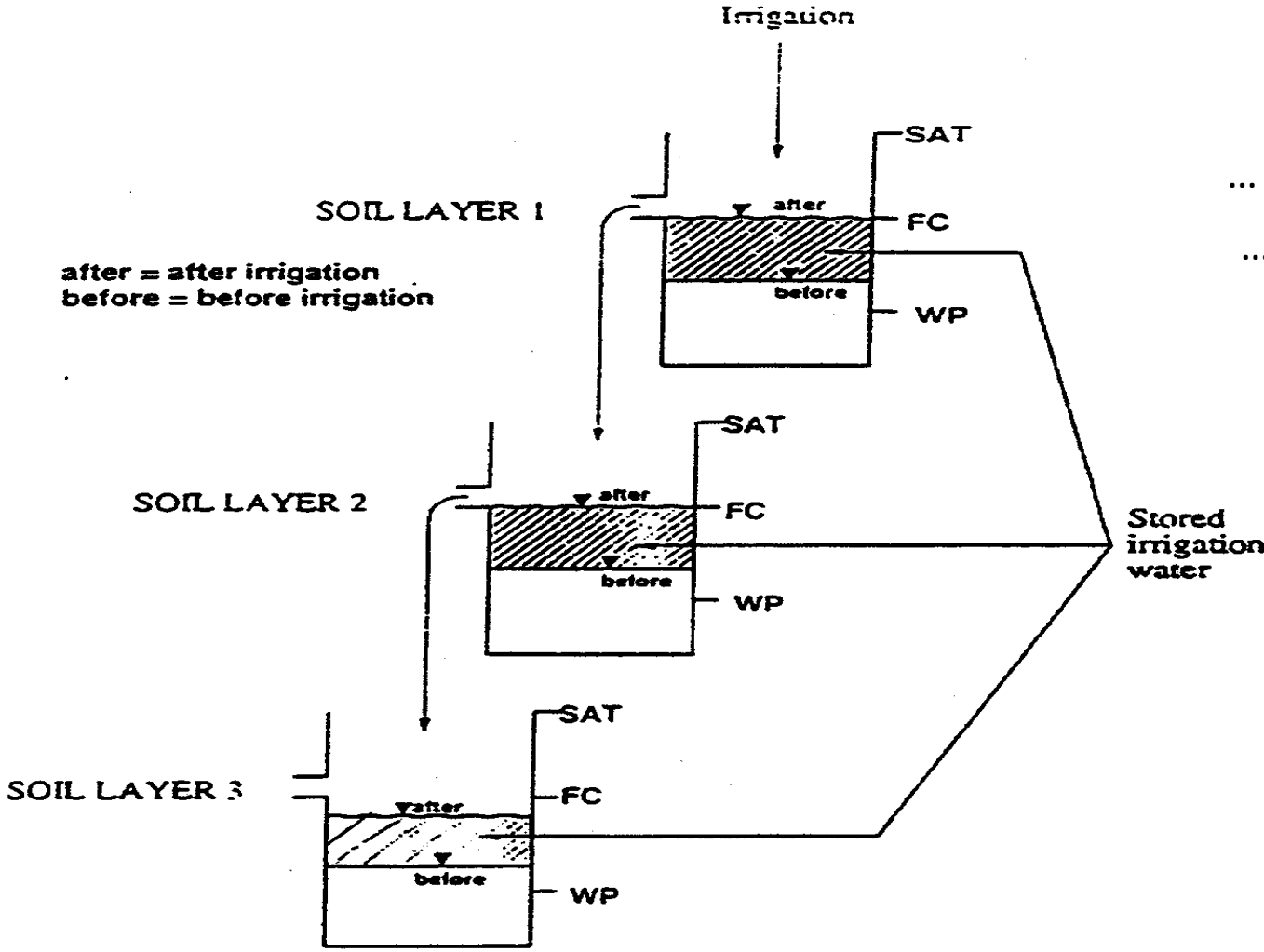
L'approche « réservoir »: Application au Réservoir en eau Utilisable par les cultures (RU)

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



2/ Concepts de base sur l'eau dans le sol

L'approche « réservoir »: pour l'irrigation, le drainage et la recharge des nappes...



... Calcul de bilans d'eau au cours du temps
... Vision 1D vertical descendant essentiellement !

2/ Concepts de base sur l'eau dans le sol

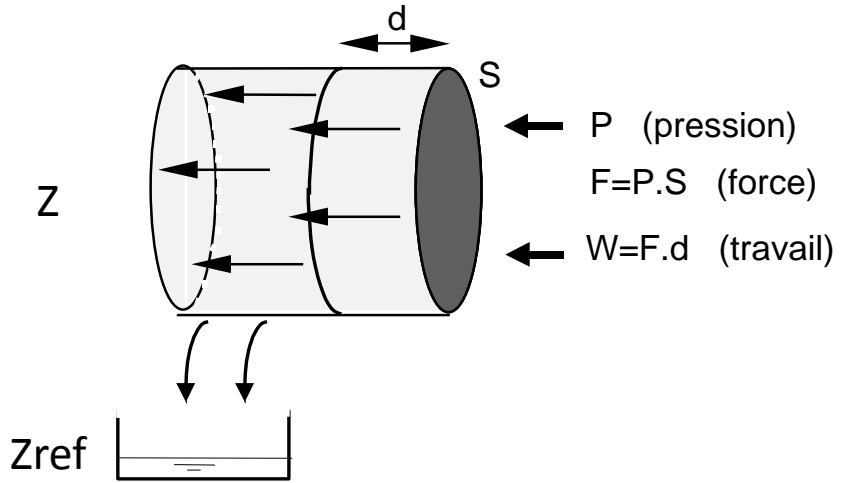
L'approche mécaniste des transferts d'eau dans le sol

Approche réservoir =stocks => pas de vraie dynamique des transferts et problèmes pour écoulements en sols hétérogènes, processus de remontée d'eau vers la surface...

En plus d'une variable quantitative (Teneur en eau volumique – θ), nécessité d'une variable « d'état énergétique de l'eau » dans le sol rassemblant l'effet des forces auxquelles l'eau est soumise dans le sol

↳ Potentiel hydrique total de l'eau du sol H_{tot} (J/kg mais aussi Pression bar ou charge hydraulique m CE)

H_{tot} = Energie a fournir pour extraire l'eau du sol et l'amener à un état standard de référence (eau pure, altitude donnée, T° cste...)



$H_{tot} = \Sigma$ des différents champs de force agissant sur énergie interne de l'eau

$$H_{tot} = h_{matriciel} + h_{gravitaire} + h_{osmotique} + \dots$$

↓ Approximation pour un sol « simple »

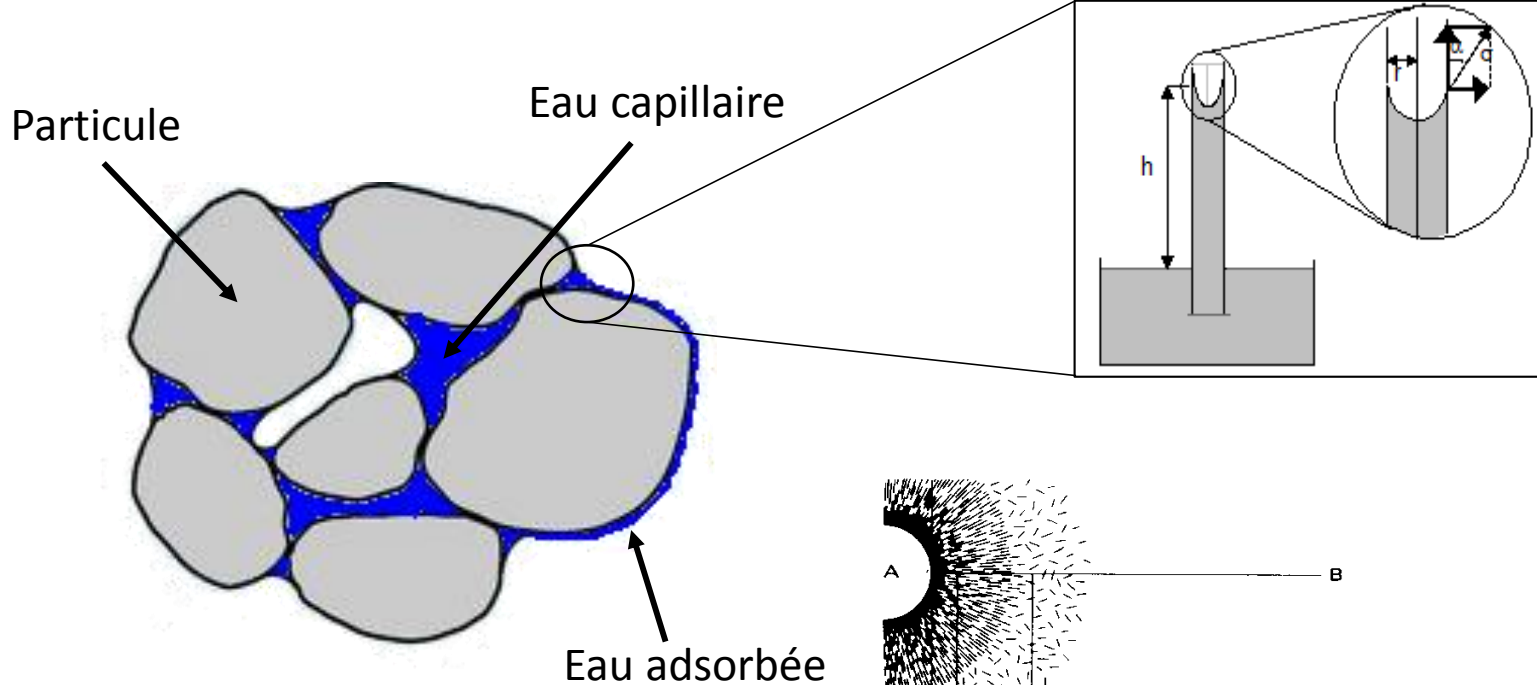
$$H_{tot} = h_{matriciel} + z$$

(H, h exprimés en m CE, Z= altitude)

2/ Concepts de base sur l'eau dans le sol

● **Potentiel matriciel:** Ensemble des forces liées aux interactions air, eau, solide:

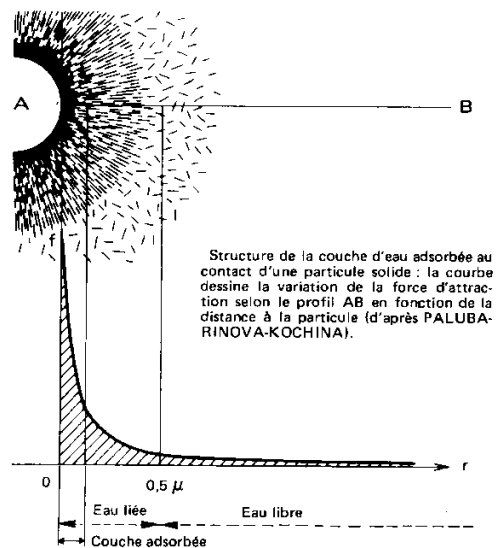
↳ Phénomène d'interface (tension superficielle) et de mouillabilité = Capillarité + Adsorption eau



Ex. : Ascension capillaire (loi de Jurin)

$$h = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \alpha}{(\rho_{H_2O} - \rho_{air}) \cdot g \cdot r} \approx \frac{0.15}{r} \text{ avec } r \text{ en cm}$$

Diamètre du pore (µm)	290.08	29.01	8.79	2.90	0.29	0.19	0.03
Pression équivalente (bars)	-0.01	-0.1	-0.33	-1	-10	-15	-100
Potentiel matriciel (J/kg)	-1	-10	-33	-100	-1000	-1500	-10000



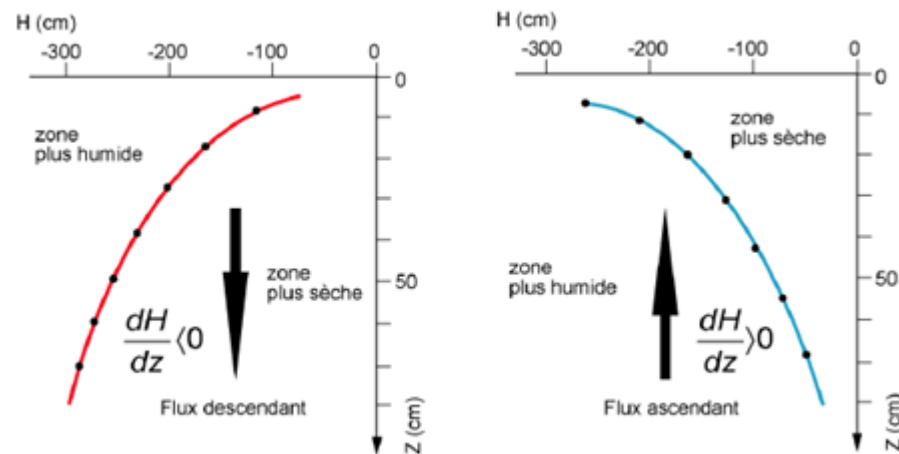
NB: **h est négatif.** il faut fournir de l'énergie pour revenir à l'état de référence.

2/ Concepts de base sur l'eau dans le sol

L'approche mécaniste des transferts d'eau dans le sol

Intérêts du potentiel hydrique

- Quand il y a mouvement d'eau, l'eau se déplace des H_{tot} forts vers les H_{tot} faibles
- S'il n'y a pas de mouvement, $H_{\text{tot}} = \text{constante}$ dans l'espace

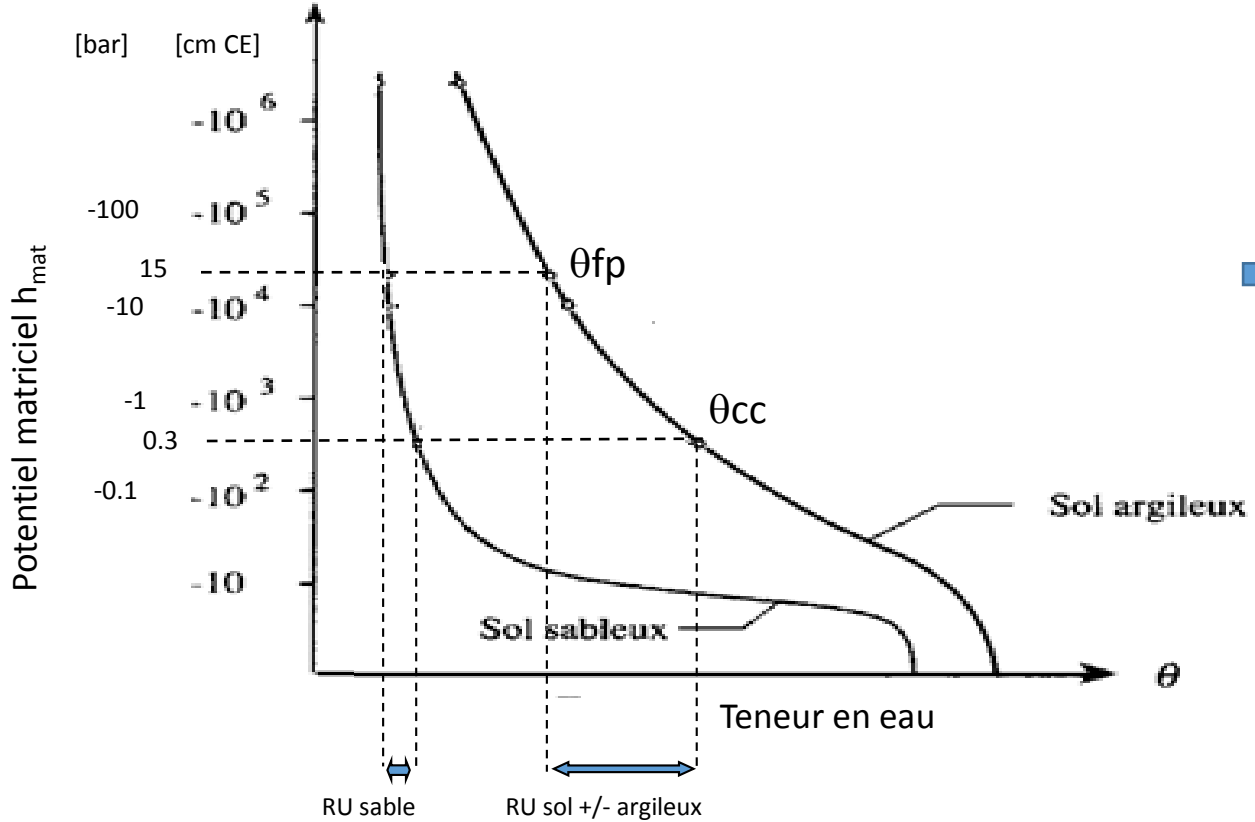


- La variation de H avec la distance (dH/dZ) est le « moteur » de l'écoulement

2/ Concepts de base sur l'eau dans le sol

L'approche mécaniste des transferts d'eau dans le sol

Relation entre teneur en eau et potentiel matriciel = courbe de rétention



- Plus un sol est sec plus il retient l'eau
- Détermine comment le sol stocke / libère de l'eau...
- Détermine l'eau utilisable par la plante ...

2/ Concepts de base sur l'eau dans le sol

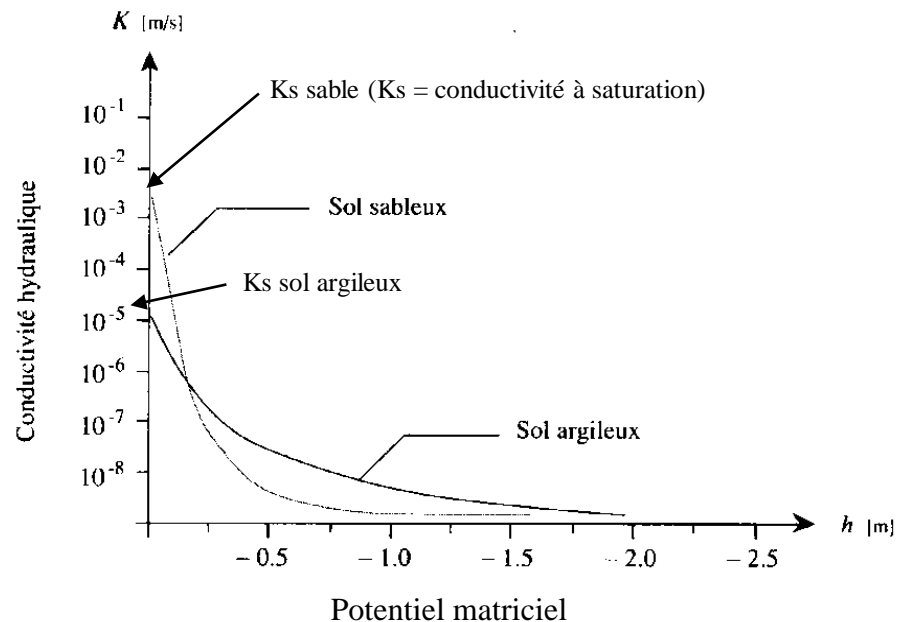
L'approche mécaniste des transferts d'eau dans le sol

Flux d'eau dans le sol: la loi de Darcy et la conductivité hydraulique du sol

Le flux d'eau (q) est proportionnel au gradient de potentiel hydrique total, mais dépend du potentiel matriciel (ou teneur en eau)

$$q = -K(h_{mat}) \frac{dH_{tot}}{dz} \approx -K(\widehat{h_{mat}}) \frac{\Delta H_{tot}}{\Delta z} \quad (\text{En 1D vertical})$$

$K(h_{mat})$ = courbe de conductivité hydraulique = difficulté pour l'eau à passer dans le réseau poral +/- rempli d'air.



- Variations extrêmement fortes en s'éloignant de la saturation ! => dépend de la structure du sol, puis texture
- Plus le sol sèche, moins il conduit l'eau... => influence sur prélèvement d'eau par les racines

2/ Concepts de base sur l'eau dans le sol

L'approche mécaniste des transferts d'eau dans le sol

Ecoulement Transitoire en phase liquide dans le sol : Equation de Darcy-Richards

Combinaison de la conservation de la masse et de la loi de Darcy



Equation de Darcy-Richards

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\theta) \frac{\partial (h_{mat} + z)}{\partial z} \right) + S$$

Variation de stock
eau / temps

Variation de flux
d'eau / espace

Terme source/puits (eg
prélèvement racines)

Hypothèses:

- Sol horizontal, non-déformable, isotherme
- Conductivité isotrope
- Eau et sol incompressibles
- Equilibre de pressions entre porosités

- Comportement continu et cohérent du transfert hydrique dans le sol
- Mais... complexe à résoudre, comprendre
- ➔ Pas évident de mesurer/paramétrer rétention et conductivité hydraulique (=propriétés hydrauliques du sol)
- Ne représente que le comportement diffusif de l'écoulement +/- lent

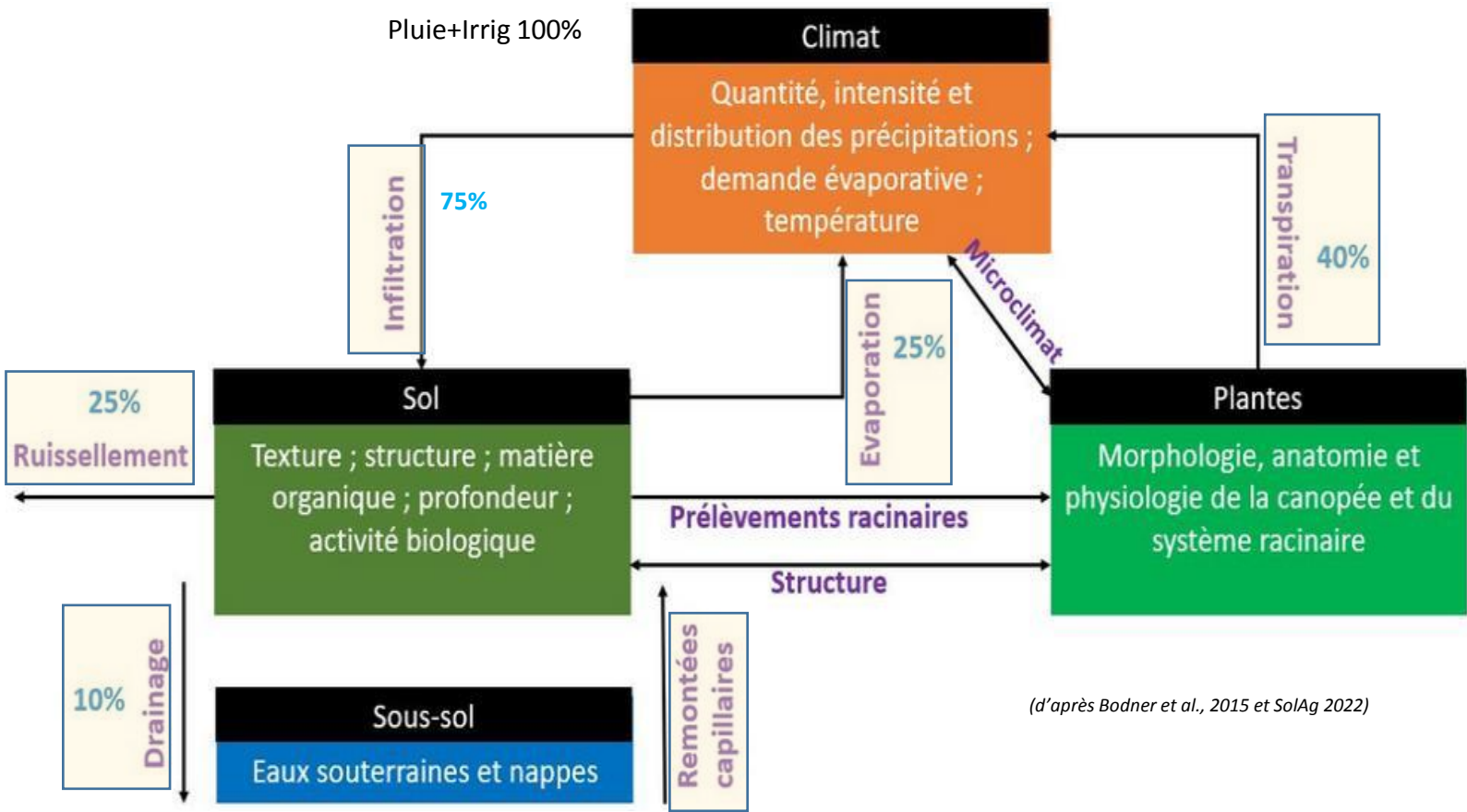
Solutions : surtout numérique (cf. SolVirtuel, Hydrus) + qlques analytiques

Extensions: couplage avec chaleur et vapeur d'eau, avec les solutés, le prélèvement racinaire, les déformations du sol ...

2/ Concepts de base sur l'eau dans le sol

Bilan hydrique et cycle de l'eau au champ

Flux d'eau dans une parcelle agricole



(d'après Bodner et al., 2015 et SolAg 2022)

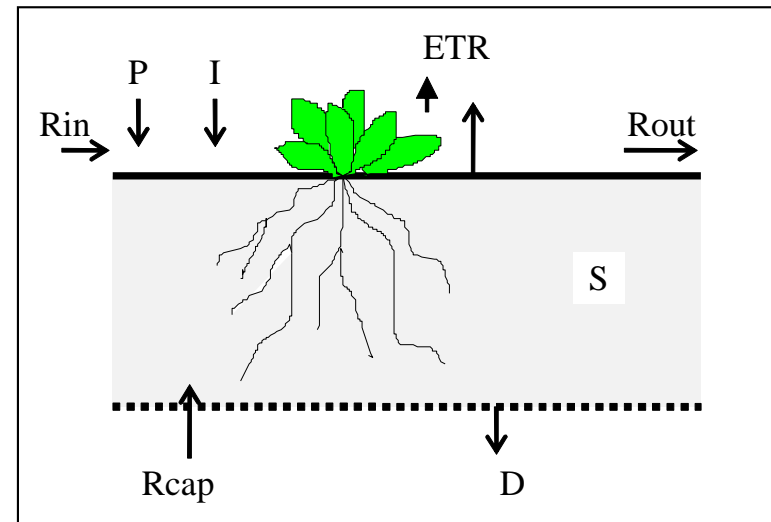


Toute action modifiant les propriétés (hydrauliques) du sol ont une influence sur les flux => pratiques, plantes...

2/ Concepts de base sur l'eau dans le sol

Bilan hydrique et cycle de l'eau au champ

Bilan hydrique d'un sol (ou d'un bassin versant...)



Pendant un temps t , la variation de stock d'eau est égale à la somme des flux entrants – sortants...

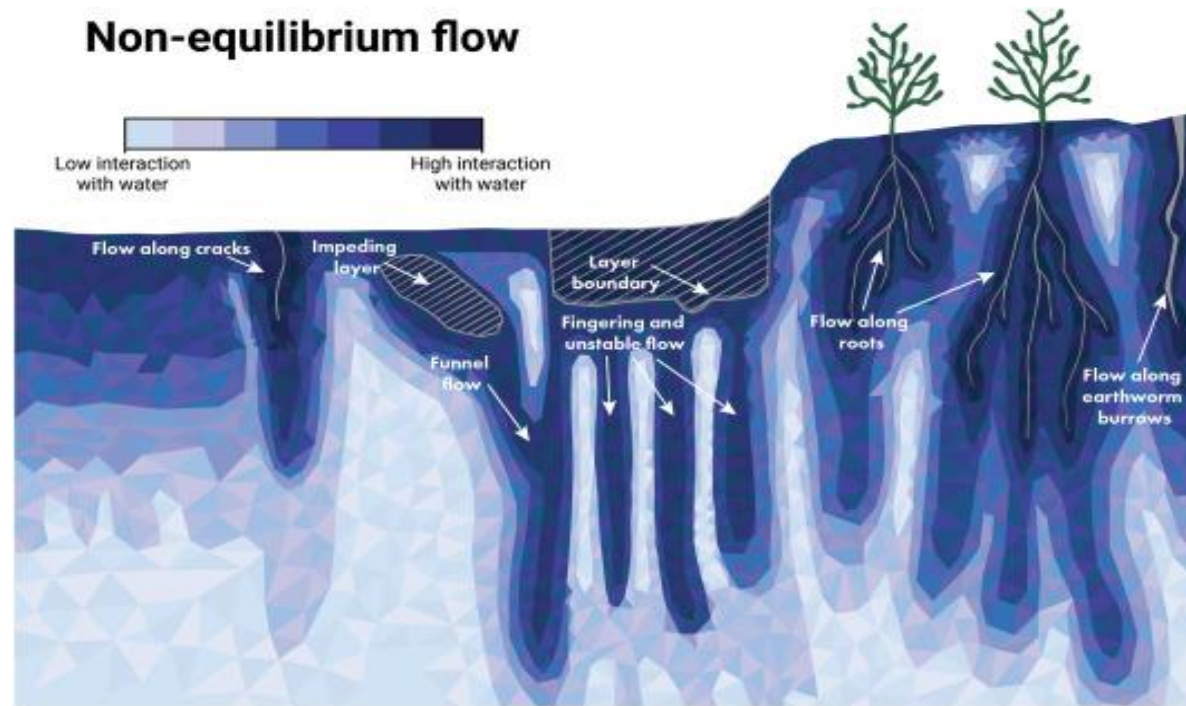
$$\Delta S = (P + I) - ETR + (R_{cap} - D) + (R_{in} - R_{out})$$

Estimation d'un des termes du bilan (Drainage ou Remontées capillaires ou $R_{cap}-D$) connaissant entrees/sorties et variation de stock

2/ Concepts de base sur l'eau dans le sol

Le problème des écoulements préférentiels...

En cas d'apports d'eau importants, un comportement hydrique du sol différent du comportement classique « diffusif » se met en place : activation de la macroporosité, instabilité => écoulement rapides vers la profondeur dans une petite partie du sol



(Francklin et al., 2021, SBB)

- Ecoulements liés à l'hétérogénéité : structure (eg macropores) ou propriétés sol (eg mouillabilité)
- Création de zone interagissant en profondeur plus fréquente avec l'eau apportée (ie pas que la surface)
- Ces structures hydriques hétérogènes peuvent perdurer dans le temps => effet sur biologie/réactivité/transport sol
- Mais difficile à mesurer, appréhender modéliser, prévoir.....

3/ Un aperçu sur le prélèvement hydrique

Continuum sol-plante-plante-atmosphère

Eau = milieu liquide continu du sol aux feuilles en passant par les vaisseaux de la plante



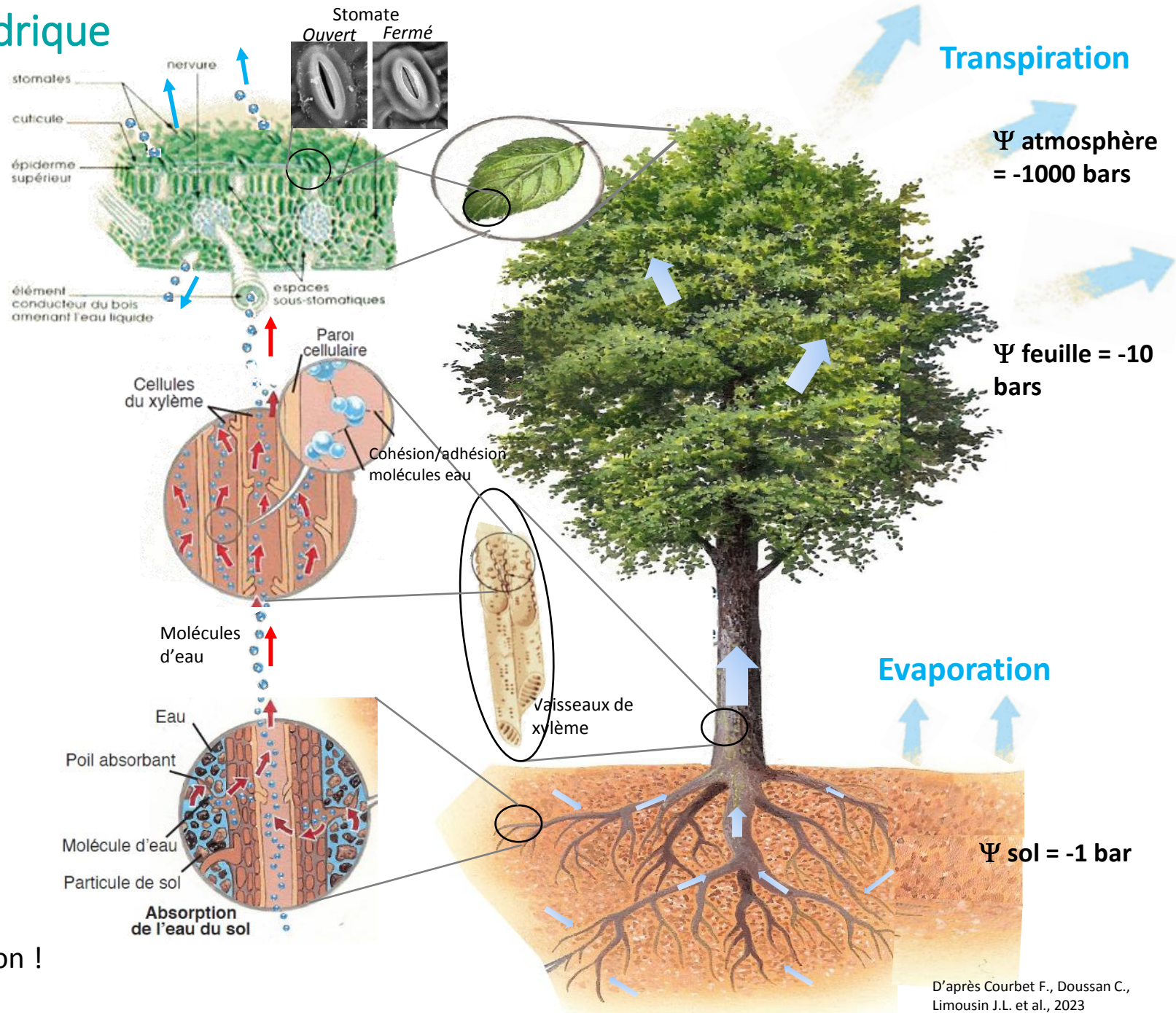
Théorie de la tension- cohésion (Dixon, 1896...)



L'eau est sous « tension » : le potentiel hydrique (ou succion Ψ) décroît du sol aux feuilles => Moteur de la transpiration

Transpiration = processus passif mais activement régulé → Stomates (H2O / CO2)

Evapotranspiration = Transpiration + Evaporation !



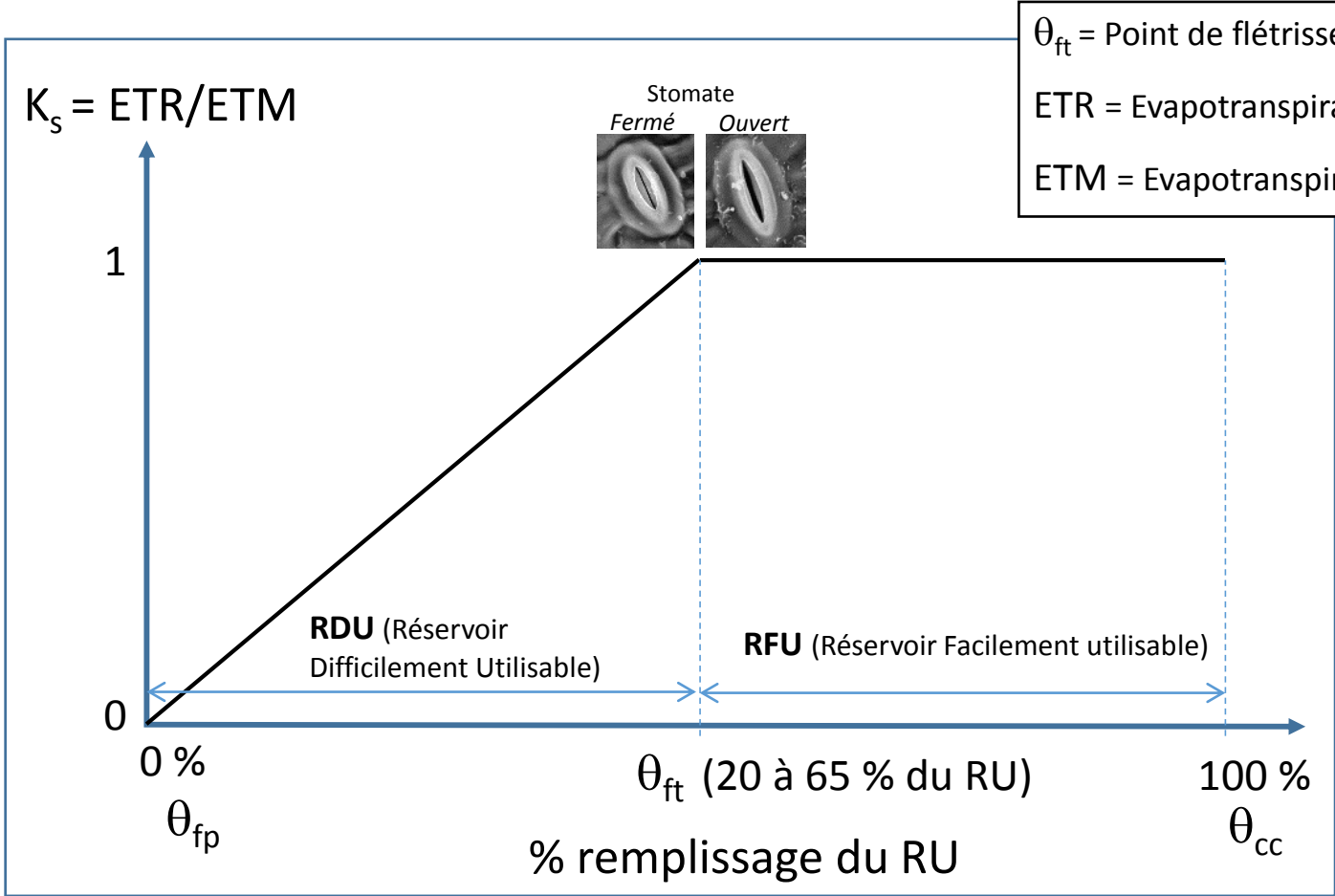
D'après Courbet F., Doussan C., Limousin J.L. et al., 2023

3/ Un aperçu sur le prélèvement hydrique

L'approche « réservoir »: Application au Réservoir en eau Utilisable par les cultures (RU)

La notion de RU n'est pas suffisante car l'eau n'est pas disponible de la même façon lors son utilisation par la plante !

$RU = RFU + RDU = \text{Réservoir Facilement Utilisable} + \text{Réservoir Difficilement Utilisable}$



Relation entre points caractéristiques du RU et milieu/culture/pratiques

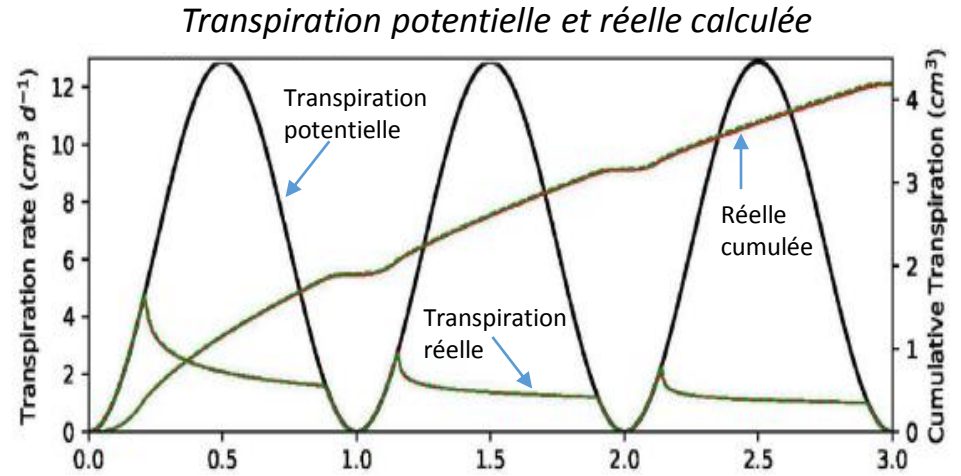
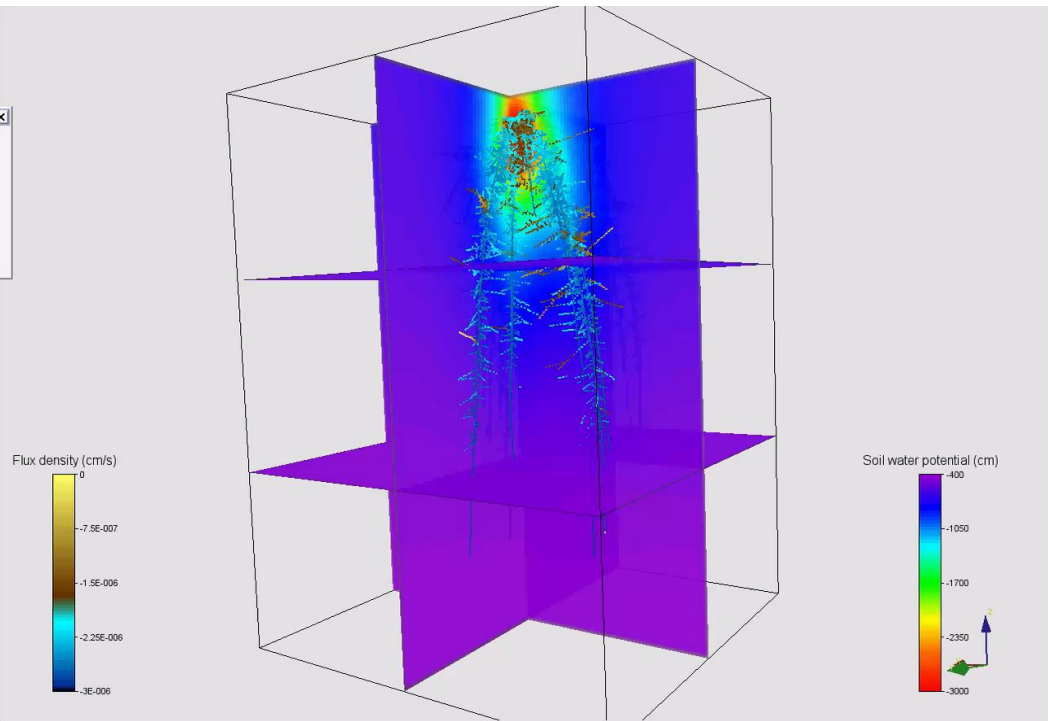
θ_{cc}	θ_{ft}	θ_{fp}	Prof. racines
Type sol ++ Pratiques ++ Plantes +	Climat (ETP) ++ Type sol ++ Plantes ++ Pratiques ++	Type sol ++ Pratiques + Plantes +(+)	Prof. Sol +++ Pratiques ++ Plantes ++

↳ Pas vraiment de plante ici (à part θ_{ft}) ...

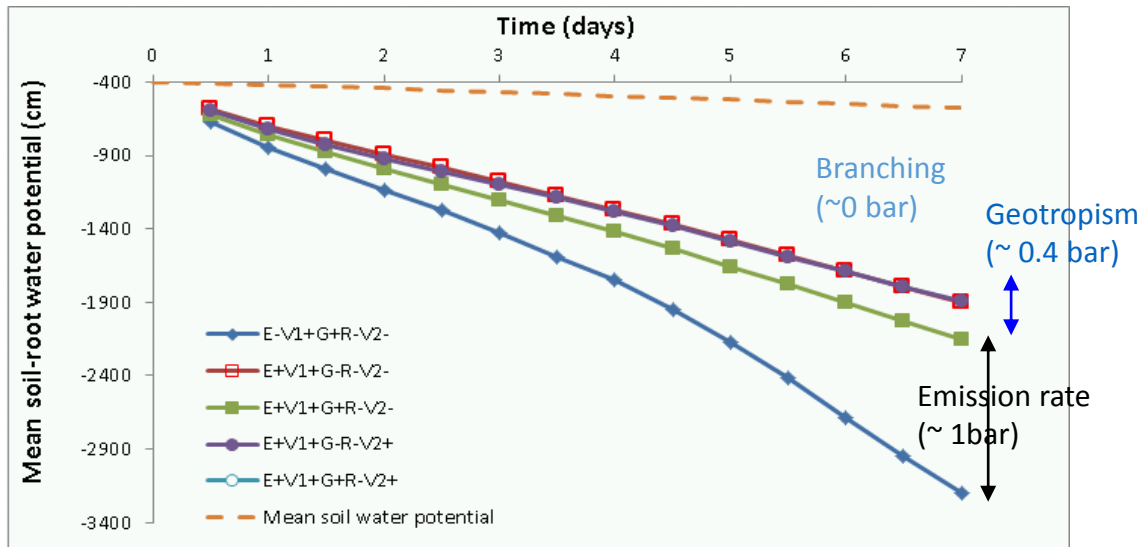
3/ Un aperçu sur le prélèvement hydrique

L'approche mécaniste des transferts d'eau dans le sol => vers une analyse des facteurs limitants des interactions sol-plante

Modèles structure fonctions du système racinaire



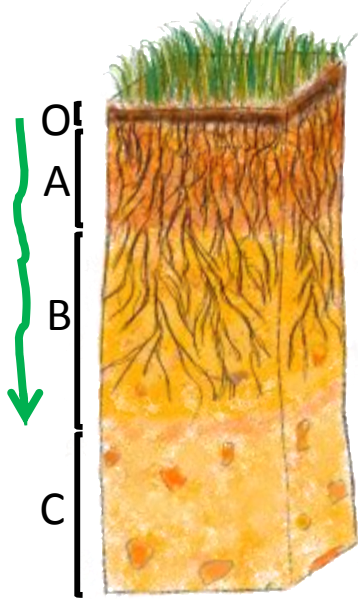
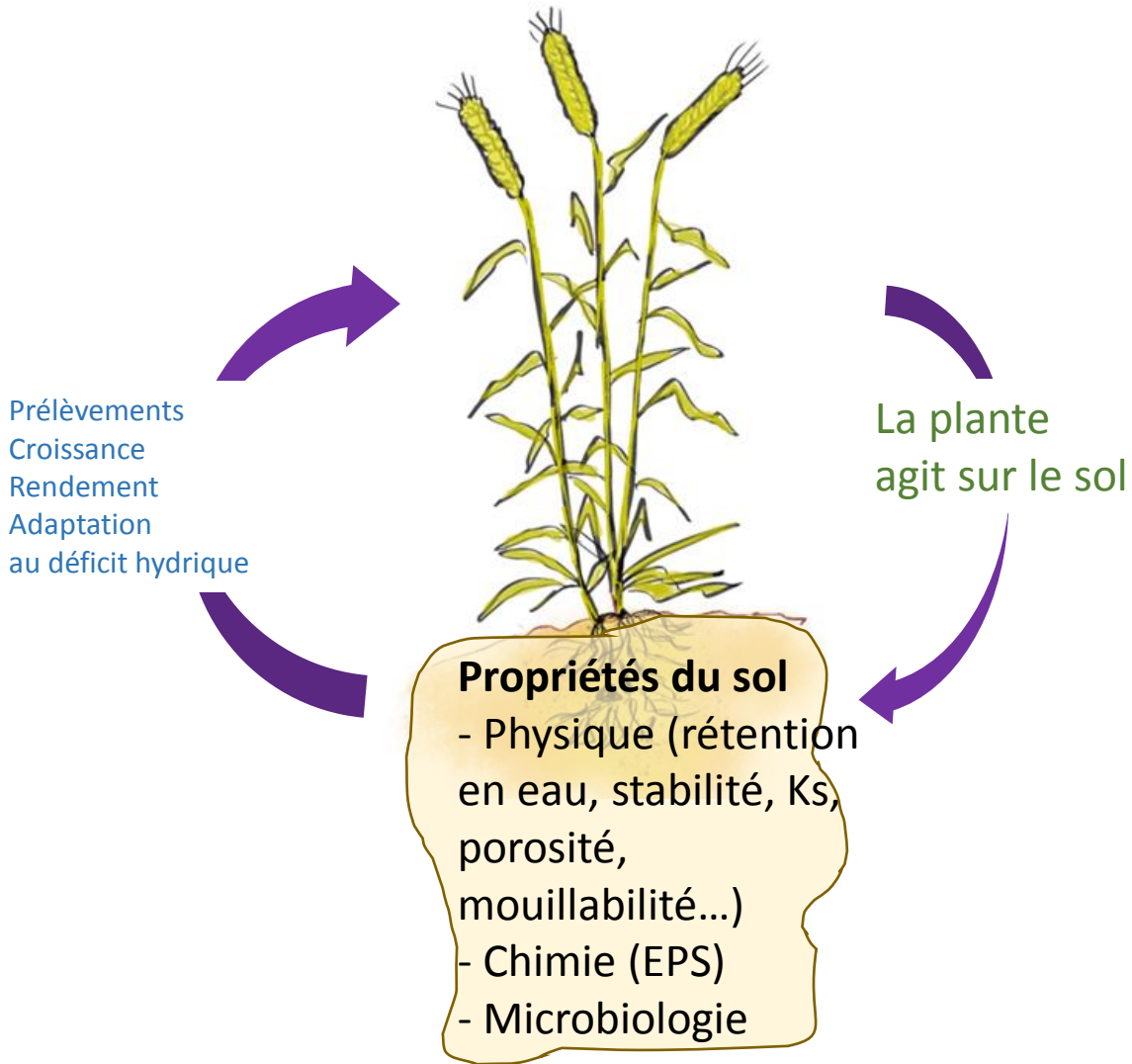
Water potential at soil-root interface



- Permet de décortiquer les effets sol, les effets plantes et les interactions.
- Met en évidence de effets à petite échelle de transfert sol-racine.

4/ Les propriétés de transfert et rétention des sols peuvent évoluer dans le temps !

La plante et le sol interagissent dans la rhizosphère

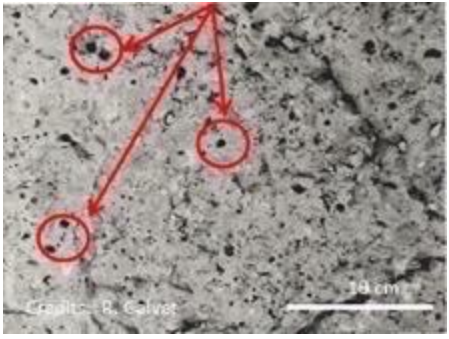


Actions indirectes
→ « effet rhizosphère »
rhizodéposition: C

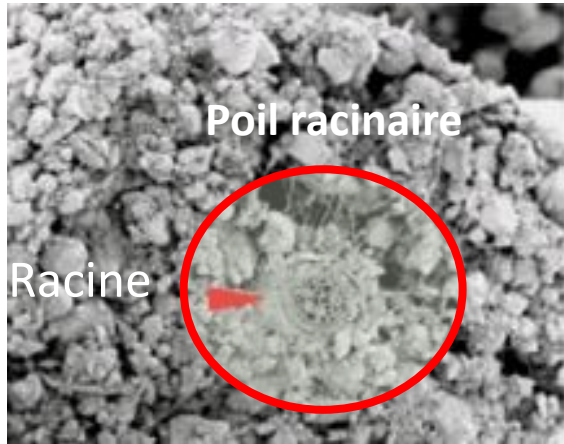


Actions directes

Création/bouchage pores



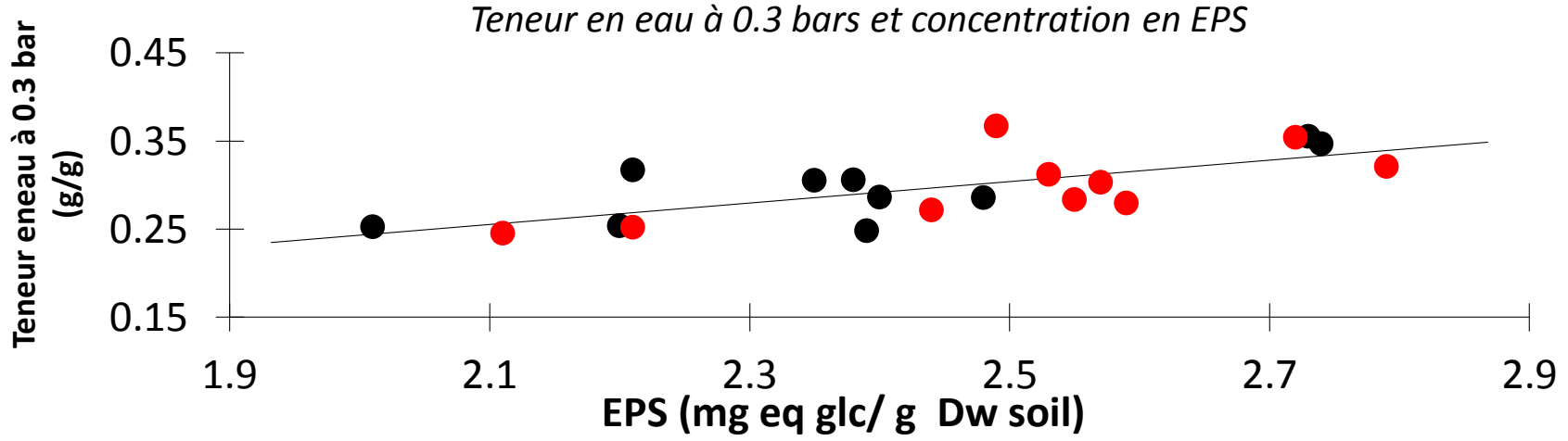
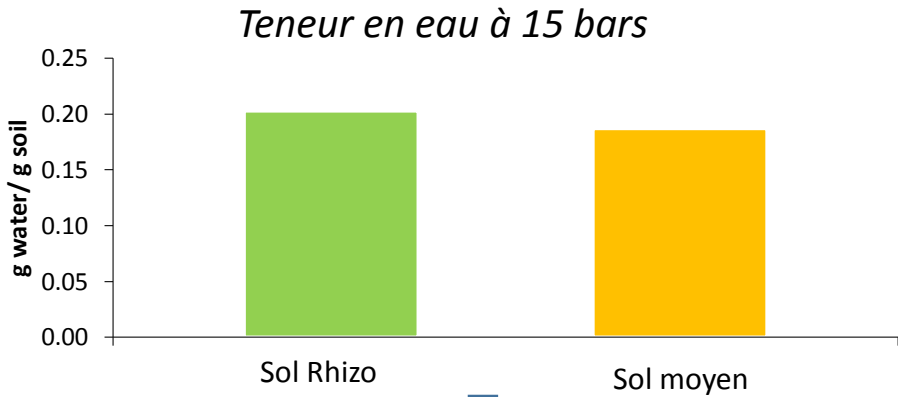
Architecture racinaire



4/ Les propriétés de transfert et rétention des sols peuvent évoluer dans le temps !

La plante et le sol interagissent dans la rhizosphère

Effets locaux : au champ, le sol de la rhizosphère du maïs a des propriétés hydriques différents du sol moyen en lien avec les EPS

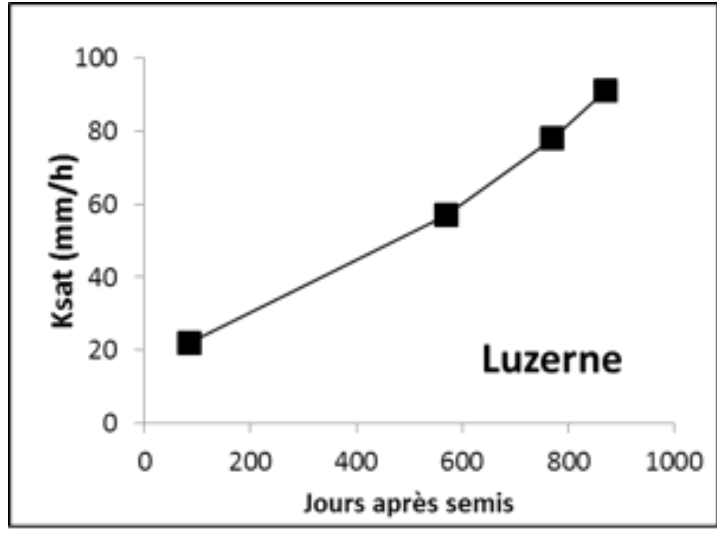


4/ Les propriétés de transfert et rétention des sols peuvent évoluer dans le temps !

La plante et le sol interagissent dans la rhizosphère

Effets global du système racinaire (+...)

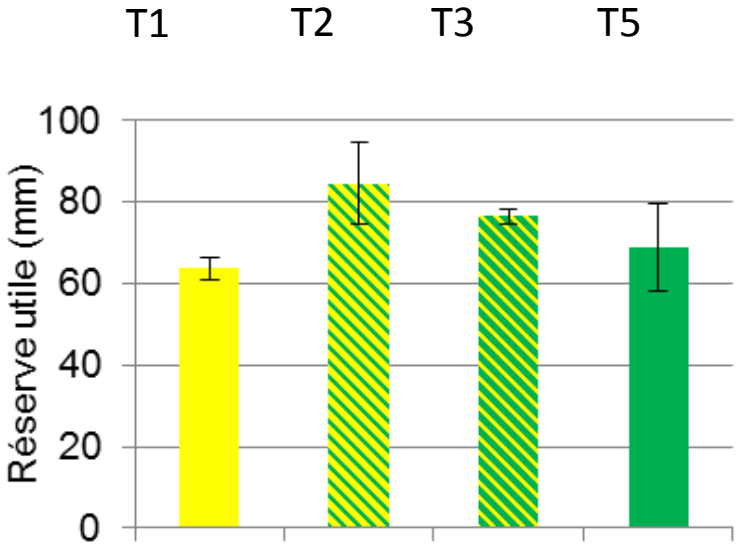
Effet sur la conductivité hydraulique ~ saturation (infiltrabilité)



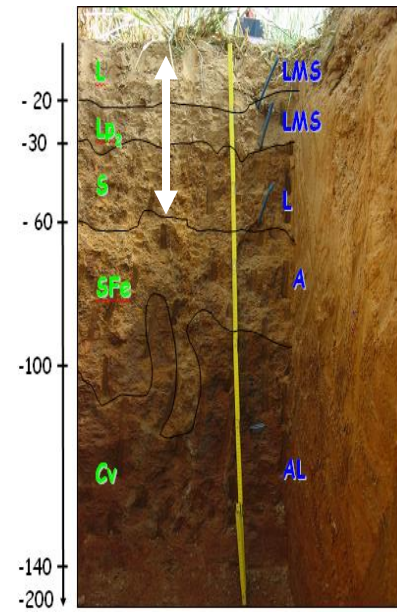
(D'après Meek et al., 1992, SSSAJ)

Effet sur la rétention (Réservoir Utilisable)

Rotations prairies / céréales



Evolution de la Réserve Utile dans les deux premiers horizons du sol

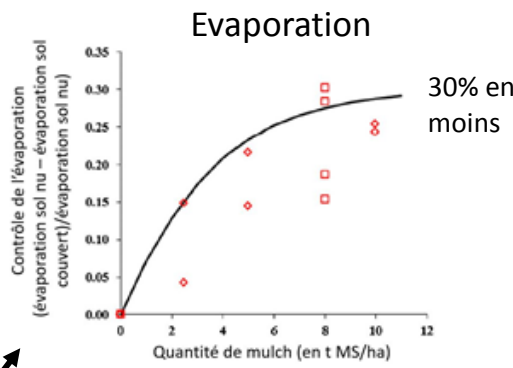
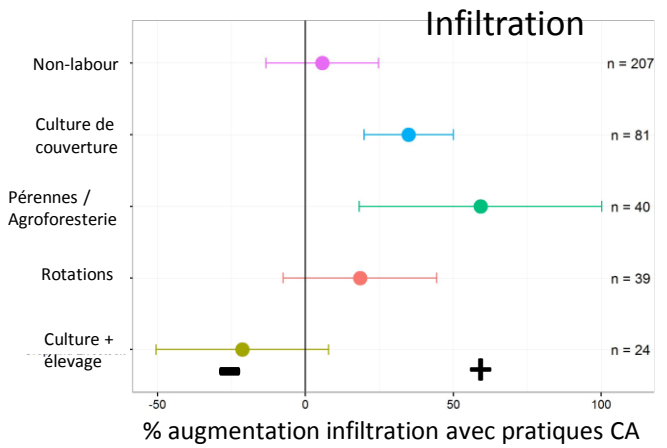


- Les successions culturales modifient, à *moyen terme*, la réserve en eau utile des sols

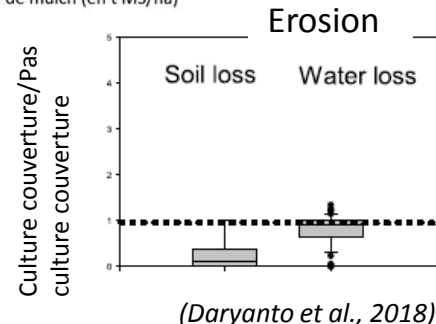
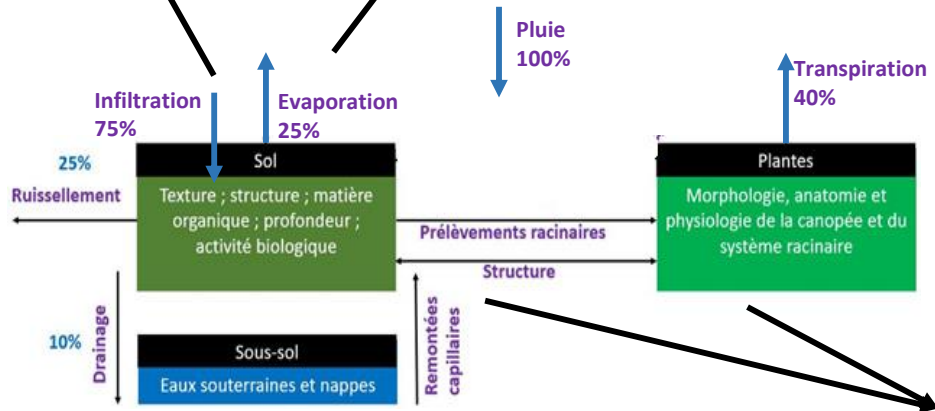
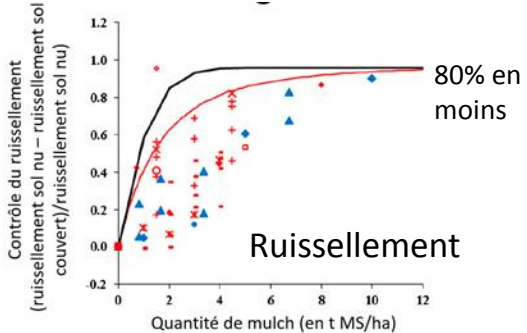
4/ Les propriétés de transfert et rétention des sols peuvent évoluer dans le temps !

Les pratiques influent cette évolution (propriétés sol et flux d'eau)

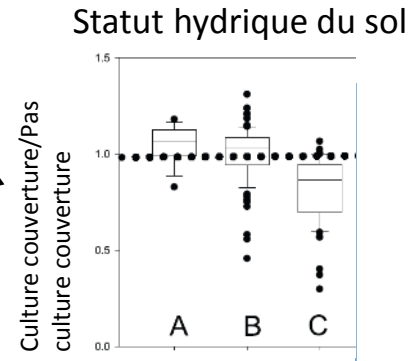
- En agriculture de conservation, plus d'eau rentre dans le sol (infiltration) et moins est perdue (évaporation sol, ruissellement)



(Ravanaivoson et al., 2016)



(Daryanto et al., 2018)



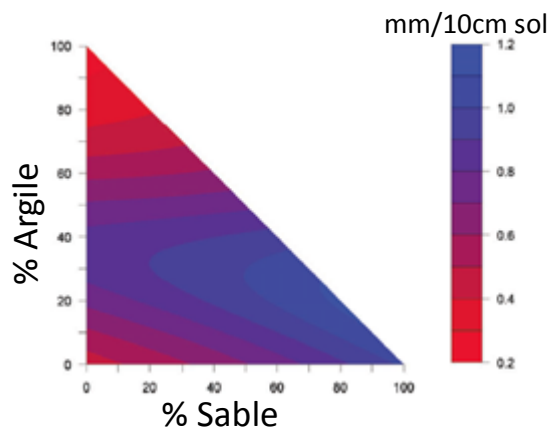
(Daryanto et al., 2018)
A: 0-10cm, B: 0-60cm, C: > 60cm –prof. sol

4/ Les propriétés de transfert et rétention des sols peuvent évoluer dans le temps !

L'augmentation du stock de C dans le sol n'améliore pas forcément la rétention de l'eau et le RU

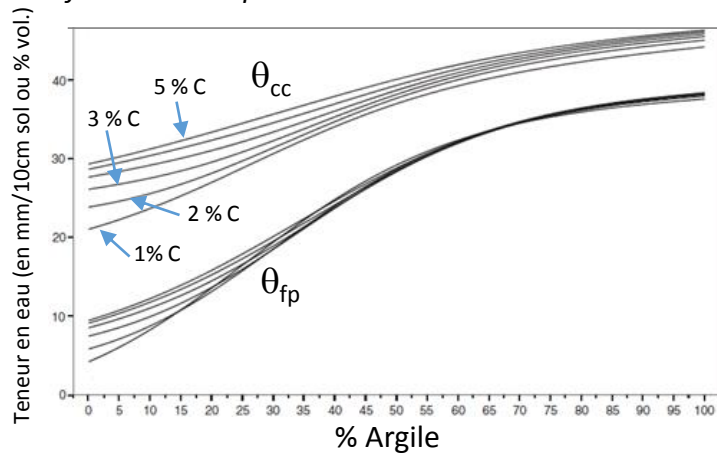
Vision classique : \nearrow Carbone sol \rightarrow \nearrow Rétention en eau et du RU.... Mais pas si évident / controverse actuelle

Gain de RU pour 10 cm de sol avec une augmentation de 1% en C sol (0.5 à 1.5%)



(Misnay, Mcbratney 2018)

Variation de la capacité au champ et du point de flétrissement permanent avec le %C sol et le % d'argile

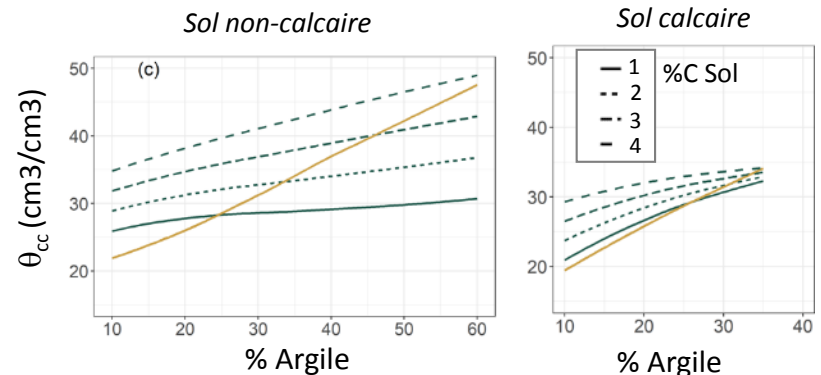


Effet du %C sur CC et PFP !
 \rightarrow
+ d'effet sur sol grossier

Effet moyen de \nearrow 1 %C Sol : 1.4-1.9 mm/10cm sol
 \downarrow
Si scénario réaliste d'augmentation de 0.1 %C /an par pratique alors augmentation RU de \sim 0.2 mm/10 cm sol pour un sol grossier (0-15 cm) \rightarrow Faible !

Une différence et un effet marqué de %C sol en sol non calcaire, plus faible en sol calcaire...

Variation de la capacité au champ avec le %C sol et le % d'argile



(Bagnall et al., 2022)

Effet d'une augmentation de 1% de C sol, en mm/10cm sol

	θ_{cc}	θ_{fp}	RU
Sol Calcaire	2	0.5	1.5
Sol Non-Calcaire	4.1	1.2	3

5/ Etat hydrique des sols: mesures au champ

Techniques de références et traditionnelles : Teneur en eau



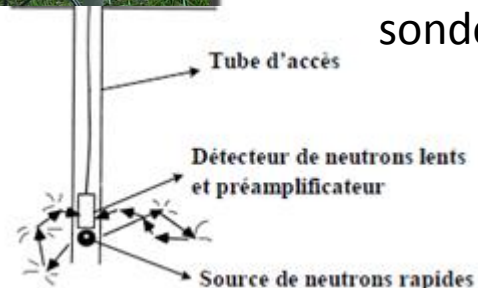
Gravimétrie:

- Prélèvement sol manuel tarière ou cylindre.
- mesure poids humide / sec à 105°C après 24h.
- **mesure de référence => Normalisée.**
- Nécessité mesure **masse volumique** si sol remanié par tarière.



Sonde Neutron:

- Source radioactive émettant des neutrons, sensible à H
- nécessité étalonnage gravimétrique suivant horizons.
- Volume mesure: R mesure ~20-30 cm. Précision: 0,01-0,02 m³/m³.
- Nécessite **Habilitation spécifique IRSN et contrôles** (~ 3 sondes dans INRA - Dept EA), difficulté import...



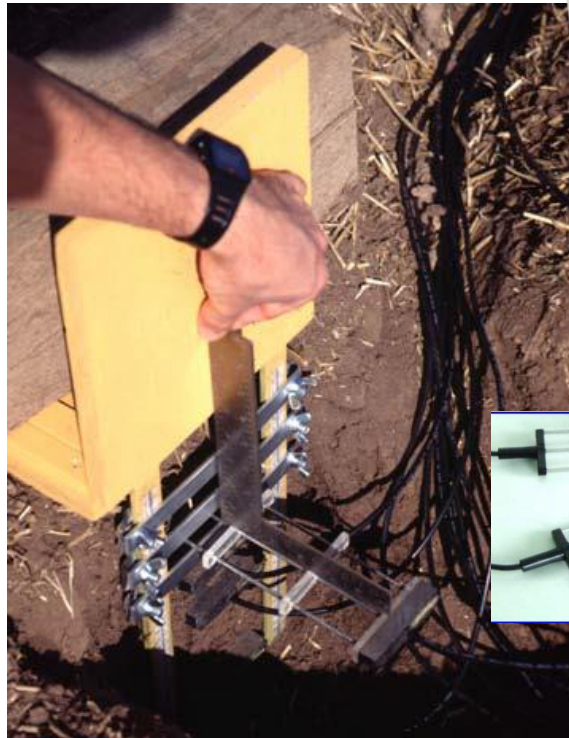
5/ Etat hydrique des sols: mesures au champ

Techniques en expansion

Teneur en eau : principes mesure

Méthodes temporelles (TDR = Time Domain Reflectometry):

Installation en fosse/surface



CS650 Campbell

TDR Trase



Imko Pico

Installation en tube



Imko Trime, profile

Itinérant en surface



Field scout TDR150

Installation directe dans le sol



GroPoint Profile

5/ Etat hydrique des sols: mesures au champ

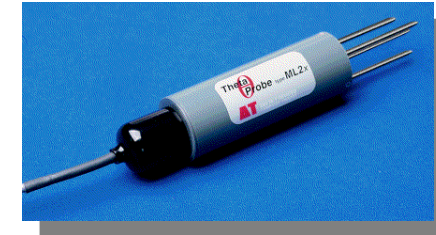
Techniques en expansion

Méthodes liées à l'aspect capacitif:

Hydra-Probe (Stevens Water monit)



Theta-Probe (Delta T)



Installation en fosse/surface

Decagon (EC-5, 10HS...)



Scout SM100



Installation en tube

Sentek Enviroscan



Theta-Probe (Delta T)



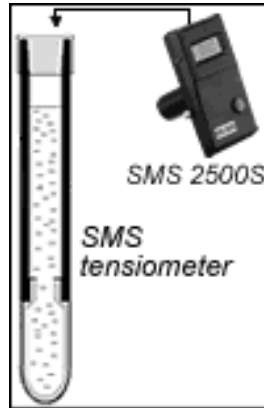
Delta-T PR2



Sentek Diviner

5/ Etat hydrique des sols: mesures au champ

Techniques de références et traditionnelles : Potentiel hydrique



Tensiomètre:

- bougie poreuse + eau dans tube fermé = équilibre pression eau du sol – eau du tube, mesuré par un manomètre
- gamme limitée : 0 à -0.7 bars et entretien « sensible »



5/ Etat hydrique des sols: mesures au champ

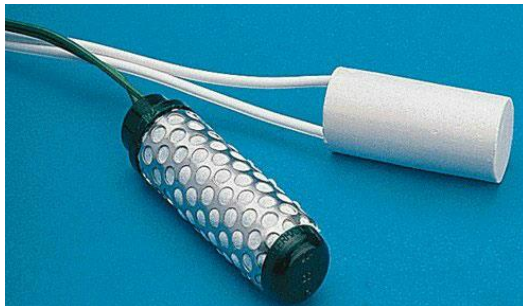
Techniques en expansion pour le potentiel hydrique

Méthodes suivi résistivité/permittivité milieu granulaire ou gypse

- Mesure **de la résistivité** (bloc gypse, watermark) **ou de la permittivité** (mesure capacitive) d'un milieu poreux connu en équilibre hydrique avec le sol.
- Etalonnage resistivité-potentiel hydrique pour précision
- Gammes variable : 0-1.5 bar (e.g. WaterMark); 1.5 - 6 bars (bloc gypse, capacitif) jusque 10-15bars (récent, capacitif MPS 9, décagon)

Mesure résistive

Watermark et bloc de gypse



Mesure capacitive

Equitensiometer (deltaT)



Mesure capacitive

MPS9 (Decagon) étalonné

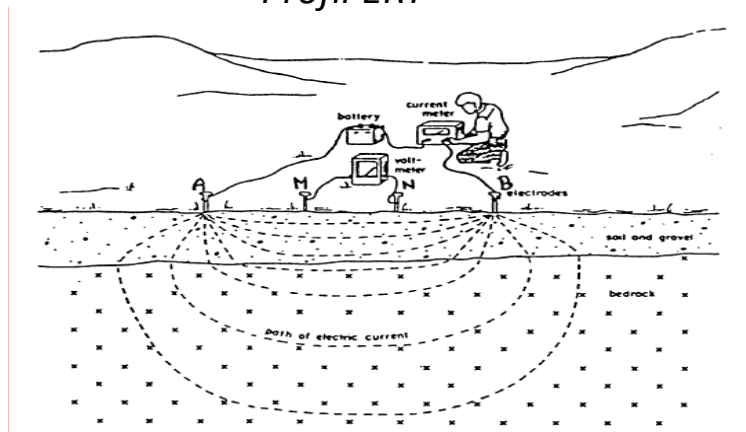


5/ Etat hydrique des sols: mesures au champ

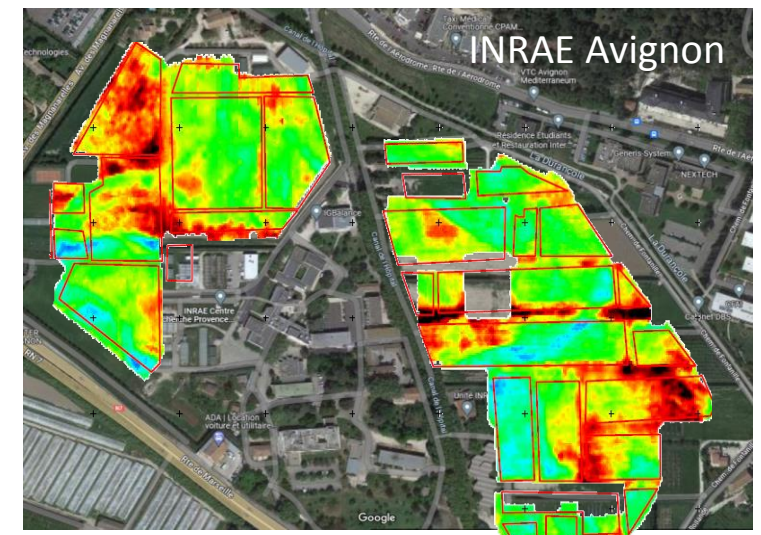
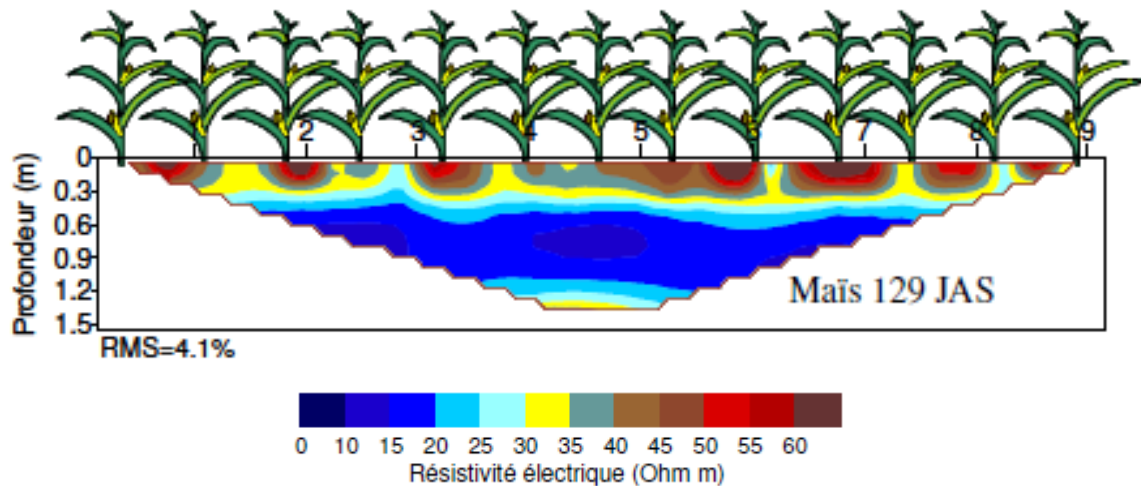
Vers l'imagerie : Méthodes issues de la géophysique => mesures à base de résistivité électrique (Tomographie de résistivité électrique) ou électromagnétique (Radar géologique=GPR, induction EM)

Exemple : **Tomographie Electrique** : Consiste à mesurer la **résistivité électrique du sol** (en injectant du courant et une mesurant une différence de potentiel) => Cartographie 2D du sol (surface ou profils) => reliable à humidité sol, profondeur sol, RU...

Profil ERT



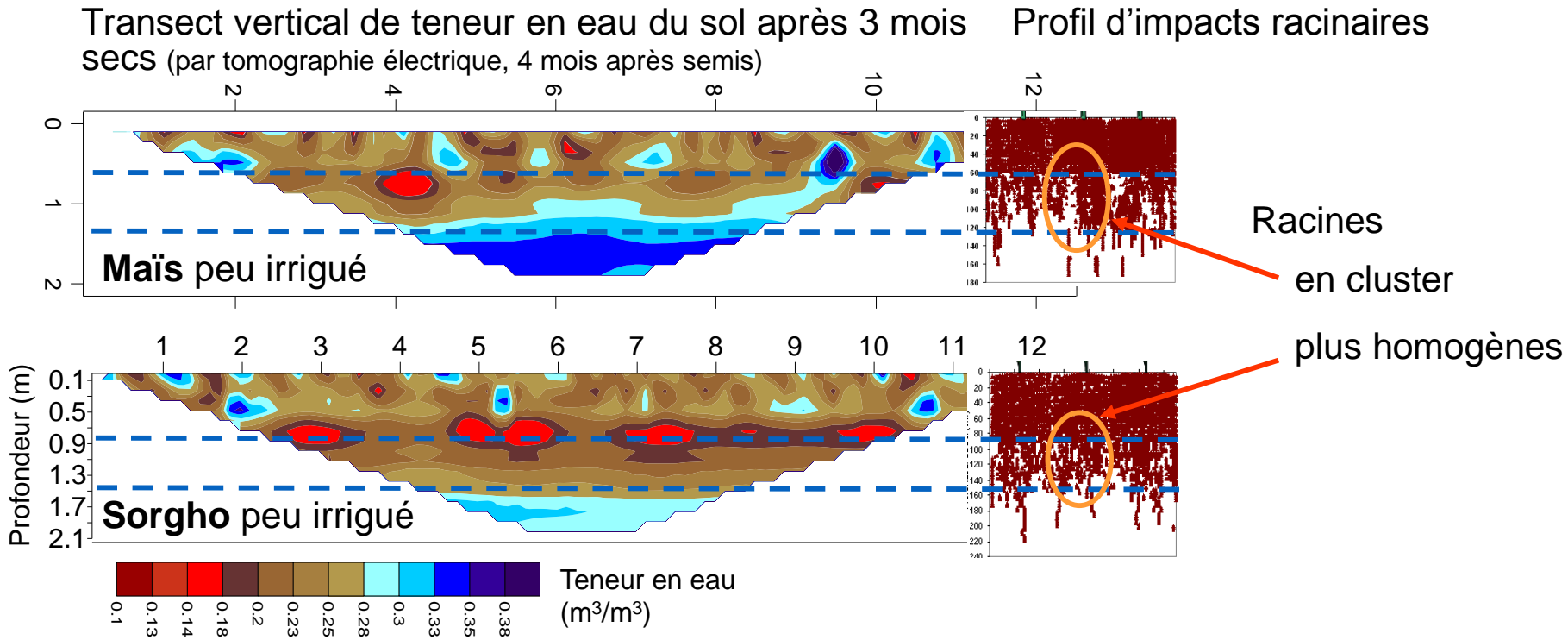
ERT cartographie



5/ Etat hydrique des sols: mesures au champ

Vers l'imagerie fonctionnelle : Utilisation de l'ERT pour etudier l'évolution de la distribution hétérogène de l'eau du sol

Exemple comparaison maïs-sorgho. La morphologie du système racinaire conditionne l'efficacité d'extraction de l'eau du sol

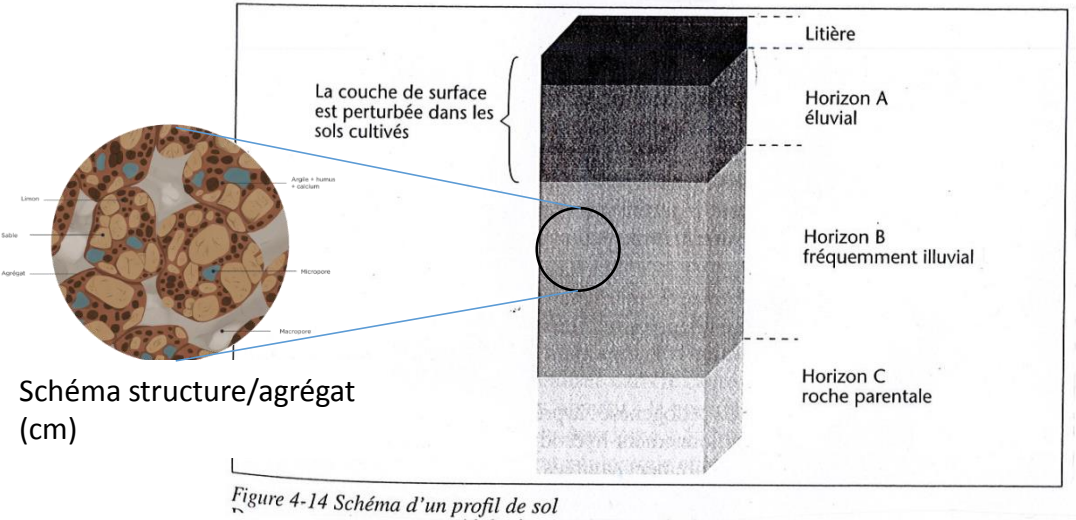


(Srayeddin, Doussan - unpub)

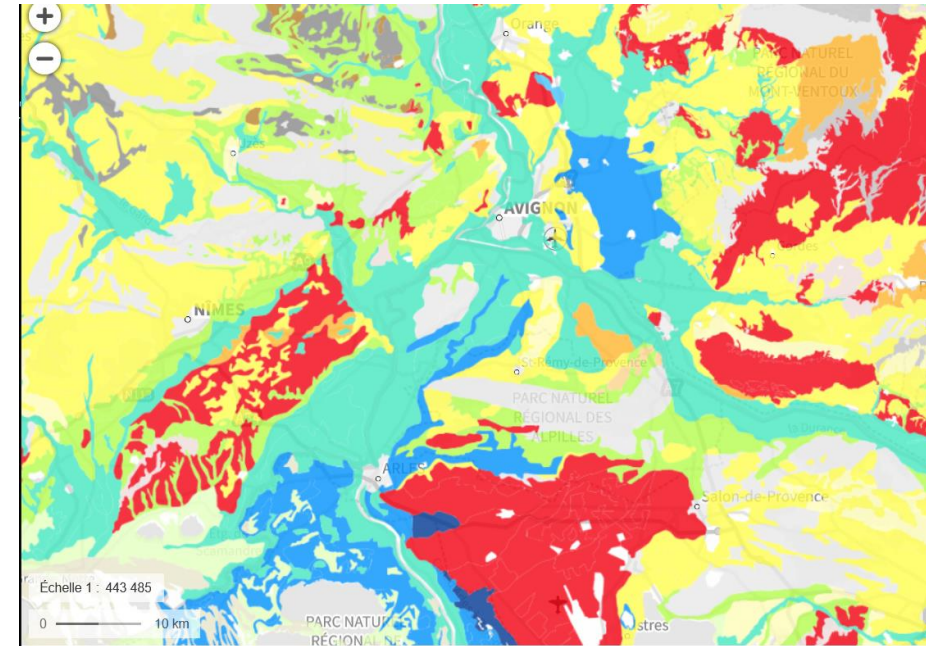
6/ Hétérogénéité physique du sol et variabilité

Le sol est un milieu à organisation variable à toutes les échelles par sa formation ... et son utilisation

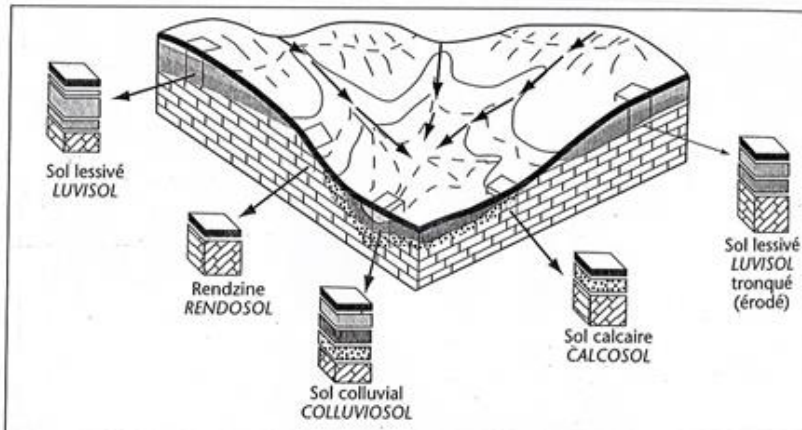
Différentiation verticale du sol (pédogénèse - m)



Distribution de principaux types de sol (échelle, région km)



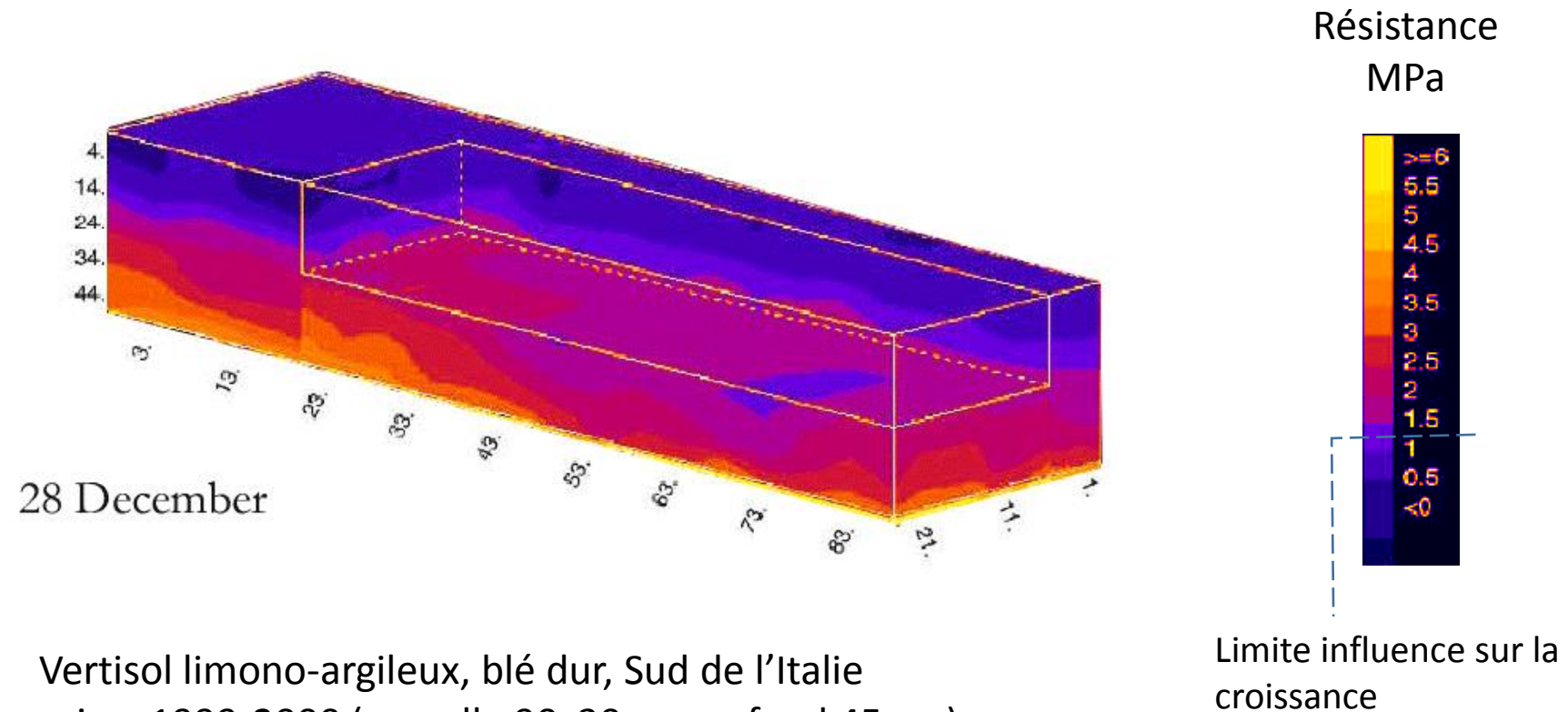
Distribution spatiale de types de sol : effet de la topographie (ha)



Les propriétés hydriques et hydrauliques du sol varient de la même façon + pratiques !

6/ Hétérogénéité physique du sol et variabilité

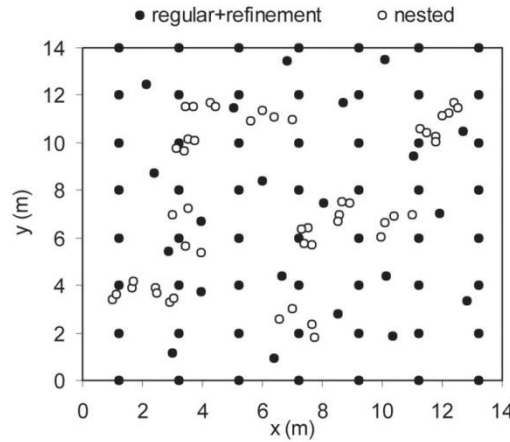
Exemple Variabilité spatio-temporelle de la **résistance à la penetration** : liée à teneur en eau..



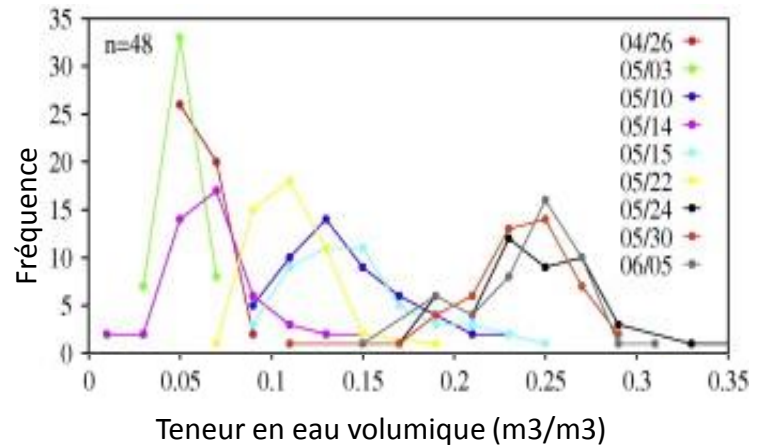
Hétérogénéité physique du sol

Variabilité spatio-temporelle de l'eau

- parcelle 14x14 m (0-5 cm),
- 48 à 76 points d'échantillonnage

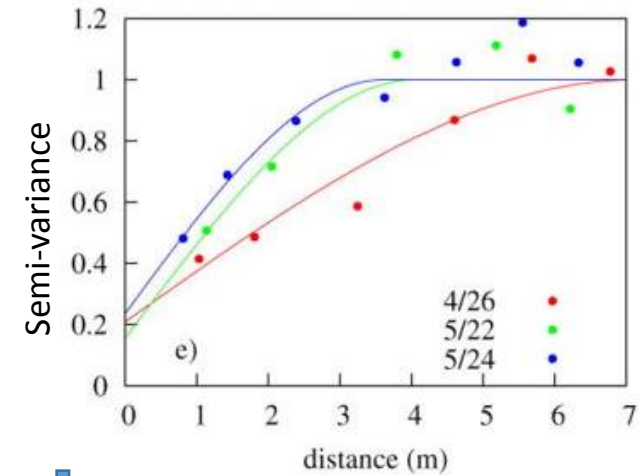


Distribution de la teneur en eau à différentes dates



↳ Coeff. Variation de 15 à 35%
Distribution normale... en général

Variogramme de la teneur en eau => corrélation spatiale

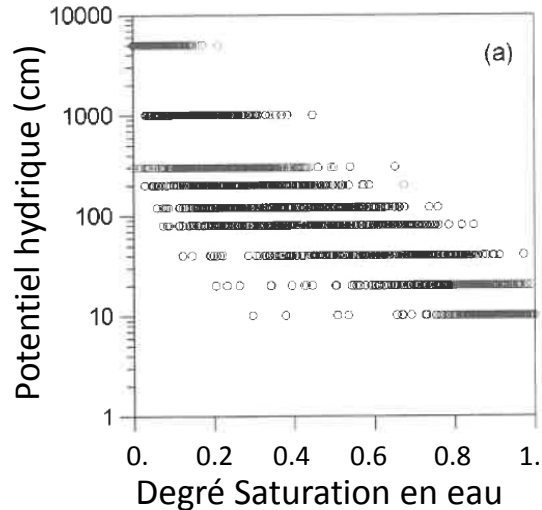


↳ Portée de 3 à 6 mètres

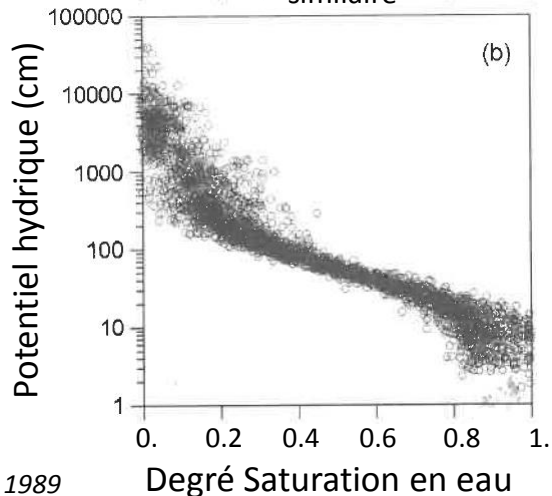
Hétérogénéité physique du sol

Variabilité spatio-temporelle des propriétés hydrauliques

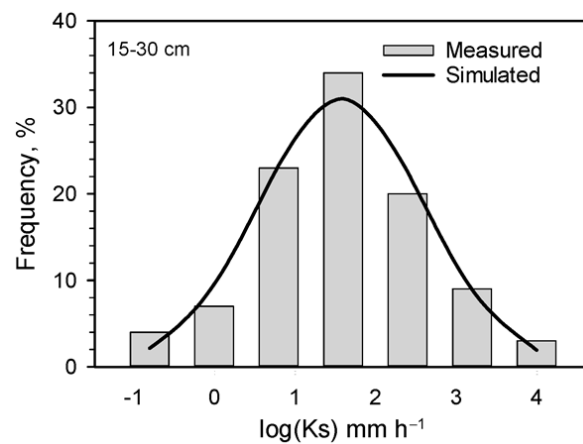
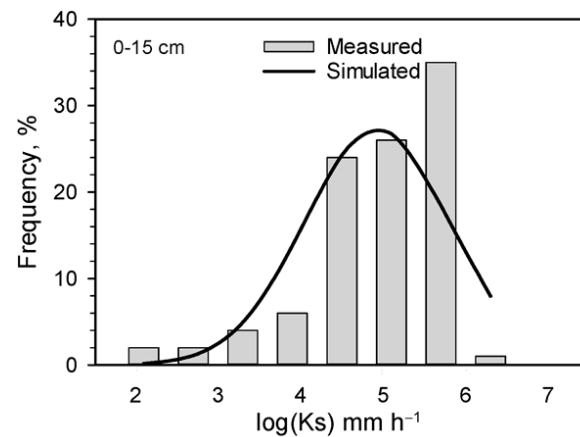
Rétention (échelle parcellaire, 9 prof.)



Normalisation milieu auto-similaire



Conductivité hydraulique (échelle parcellaire, 2 prof.)



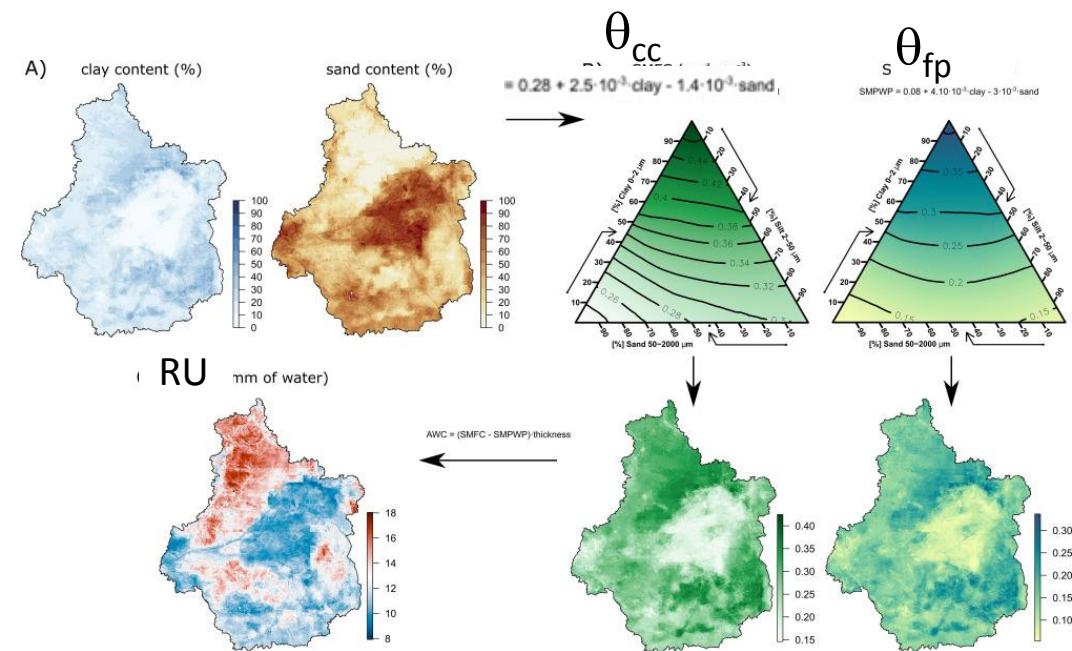
Distribution log-normale

Coeff. Var > 50% en général

N échantillons >90... Jabro et al. 2023

Un outil pour la détermination de propriétés hydrauliques du sol: **les fonctions de pédotransfert**

Utilisation de caractéristiques plus simples à mesurer (eg texture) dans des fonctions statiques => propriété d'intérêt (eg RU, Ks..)

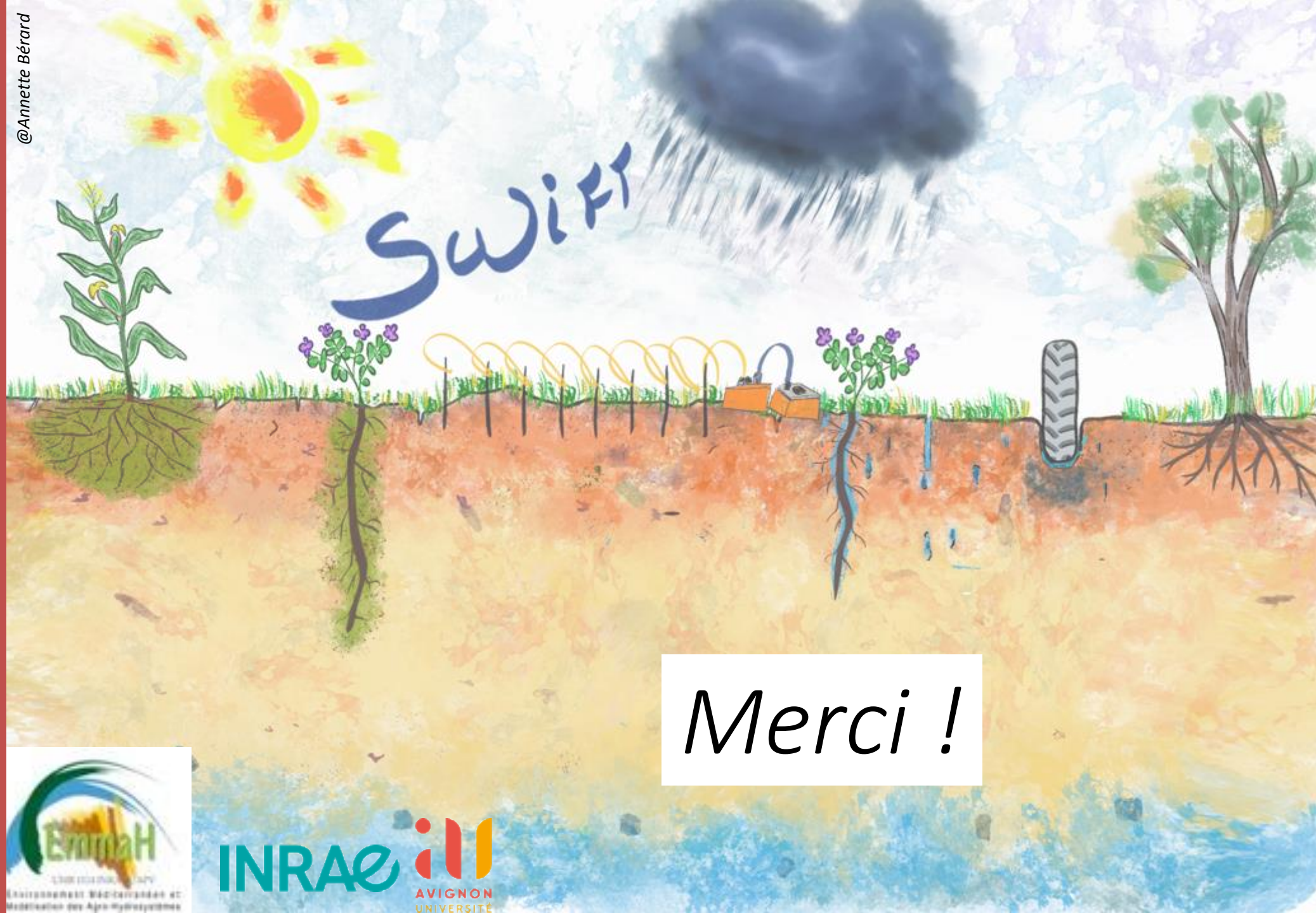
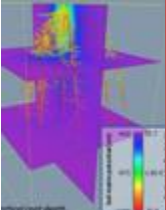


Dobarco et al., 2019

Ex.: spatialisation du RU avec PTF

Utile pour spatialiser... Attention, possibilités de fortes imprécisions...!

@Annette Bérard



Merci !

