

Quelques éléments et point de vue sur les interactions sol/plante/climat et l'eau

Claude Doussan et Annette Bérard

UMR EMMAH – INRAE/AU - Avignon



Rencontres RED 2024 - Avignon

UMR EMMAH – INRAE/AU



Concepts de base : base du fonctionnement des végétaux

Les végétaux se **nourrissent et grandissent** avec :

Lumière + CO₂ + Eau + éléments minéraux



Processus

**Photosynthèse
(autotrophie)**

**Transpiration
(Flux d'eau plante)**

Rôle

Production de carbone
(sucres) pour croissance
et énergie

« Pompe » :

- Apport d'eau et hydratation tissus
(métabolisme)
- Apports éléments minéraux

« Climatisation » :
refroidissement feuillage
par évaporation

Acteurs

Atmosphère et feuilles

Sol et système racinaire

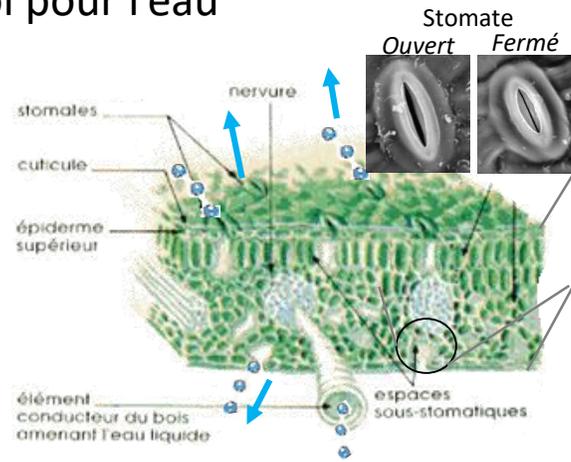
Dilemme de la plante

fixer du **CO₂** ↔ Perdre de l'**Eau**

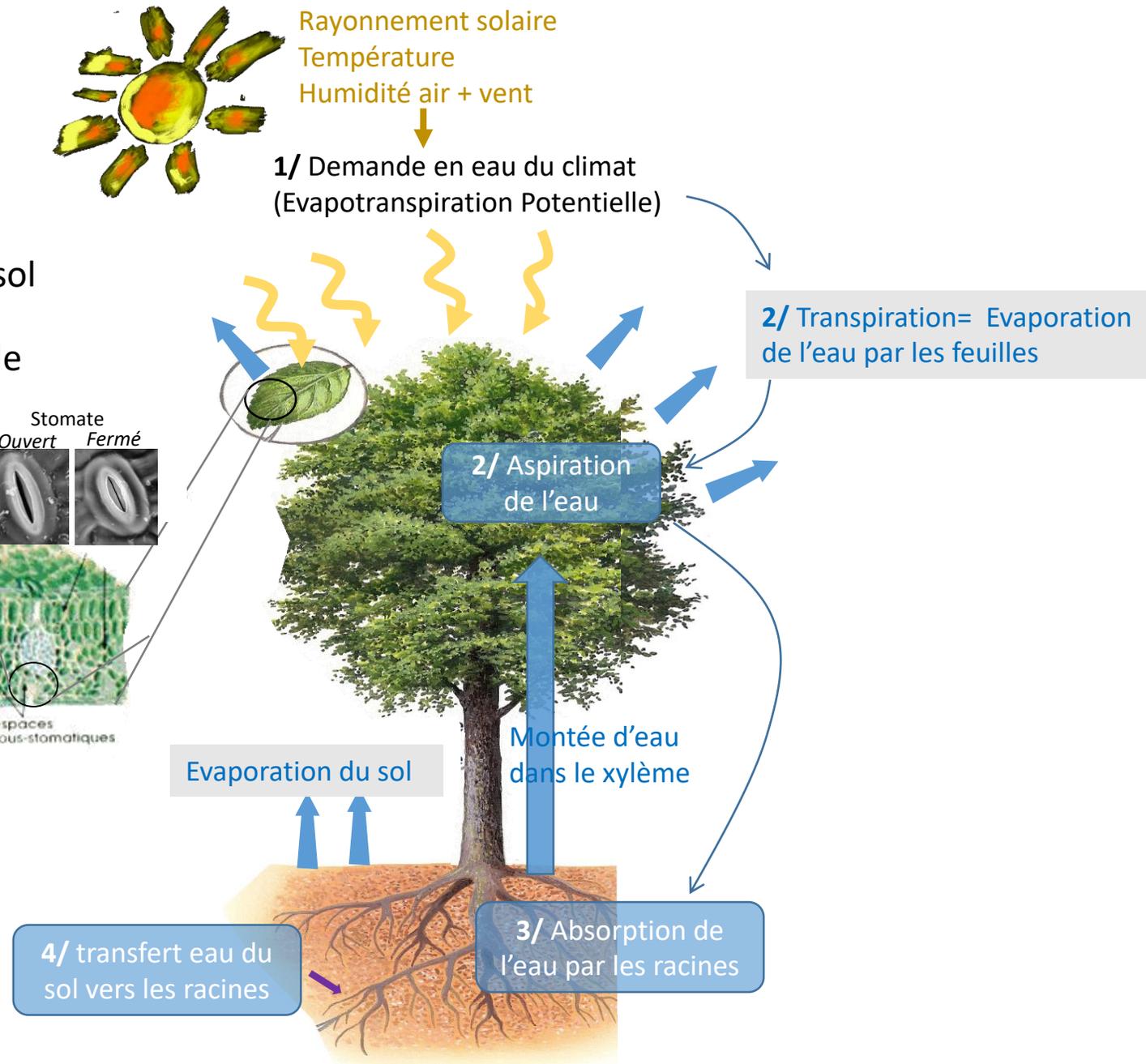
Concepts de base : la transpiration

La transpiration:

- ↳ Un processus se déroulant de l'atmosphère vers le sol
- ↳ Résultant de la confrontation entre une demande de l'atmosphère et une offre du sol pour l'eau



- ↳ Transpiration = processus passif mais activement régulé
→ Stomates (H₂O / CO₂)
- ↳ Evapotranspiration = Transpiration + Evaporation du sol



Concepts de base : la transpiration

La transpiration:

- ↳ Un processus se déroulant de l'atmosphère vers le sol
- ↳ Résultant de la confrontation entre une demande de l'atmosphère et une offre du sol pour l'eau

Ordre de grandeur du flux de transpiration dans les plantes

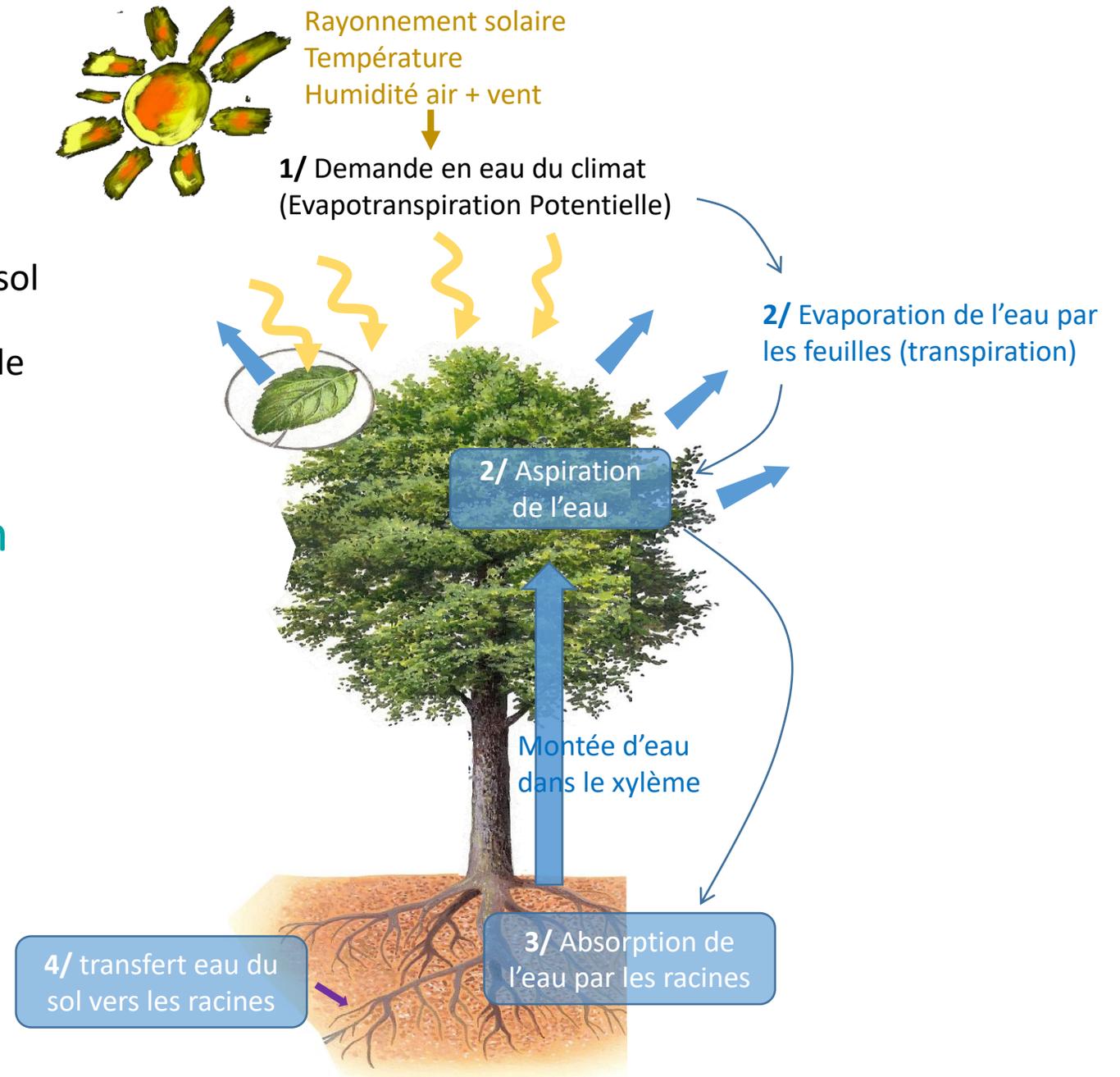
Pour une plante individuelle :

Herbacées : 0.5 -2 l/jour - Arbres : 30 - 300 l/jour

Pour un peuplement/cultures de plantes

De ~1 mm/jour à 7 mm/jour

NB: 1 mm = 1 litre eau/m²



Concepts de base : Efficience d'utilisation de l'eau par les plantes – Relation Eau - Production

Dilemme de la plante

fixer du CO₂ ↔ Perdre de l'Eau



Efficience d'utilisation de l'eau (EF_{eau})

= quantité de biomasse produite par unité de quantité d'eau consommée par culture

$$EF_{eau} = I_r * B / (E + T)$$
$$= I_r * (B/T) * (1 + E/T)$$

Génétique/Physiologie
=f(stress)

Couvert + Pratiques
=f(stress)

Génétique/Physiologie + Pratiques
=f(stress)

I_r = indice de récolte [-]

B = Qté de biomasse [kg/m²]

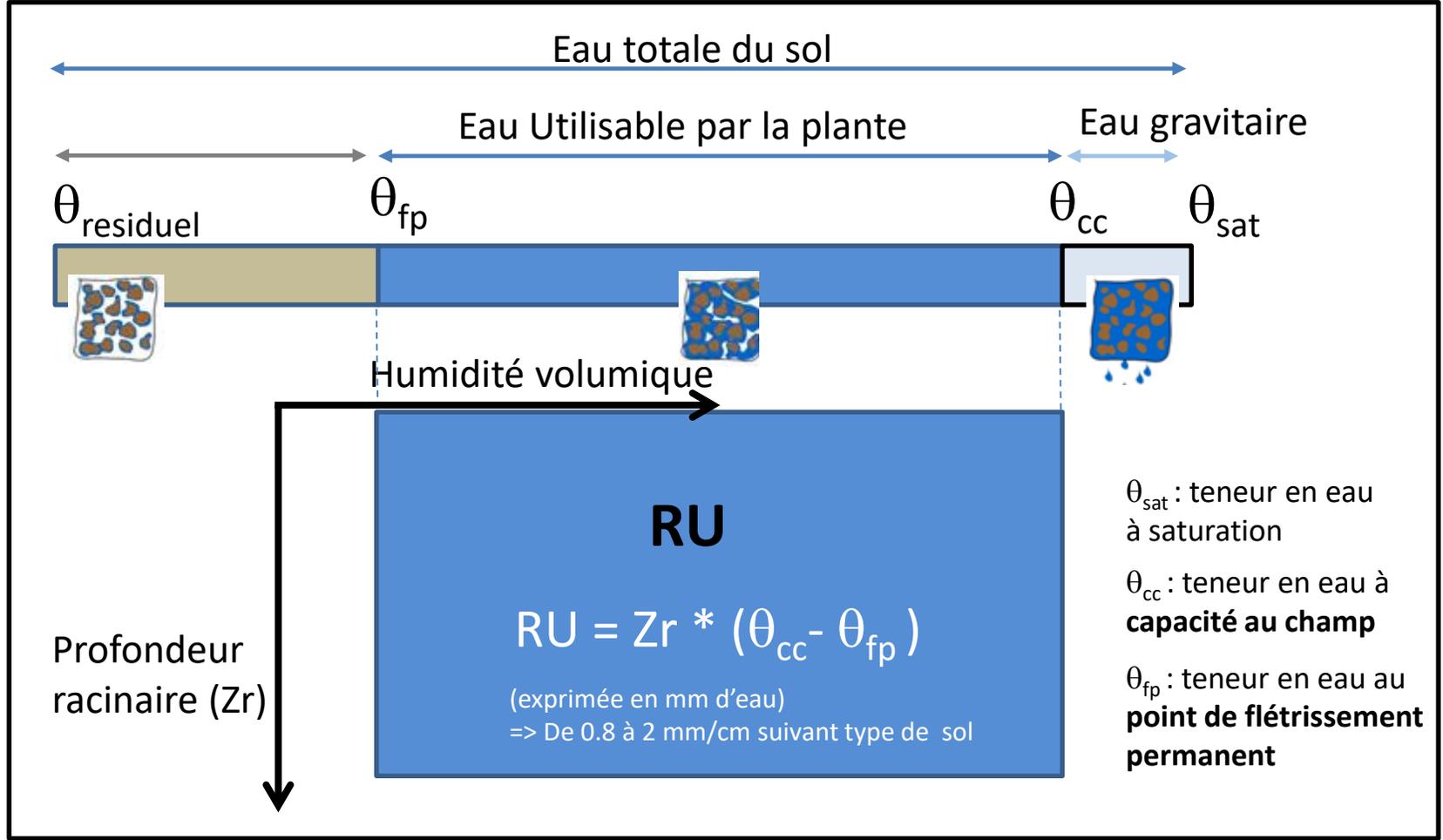
E = Evaporation sol [mm]

T = Transpiration plante [mm]

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.



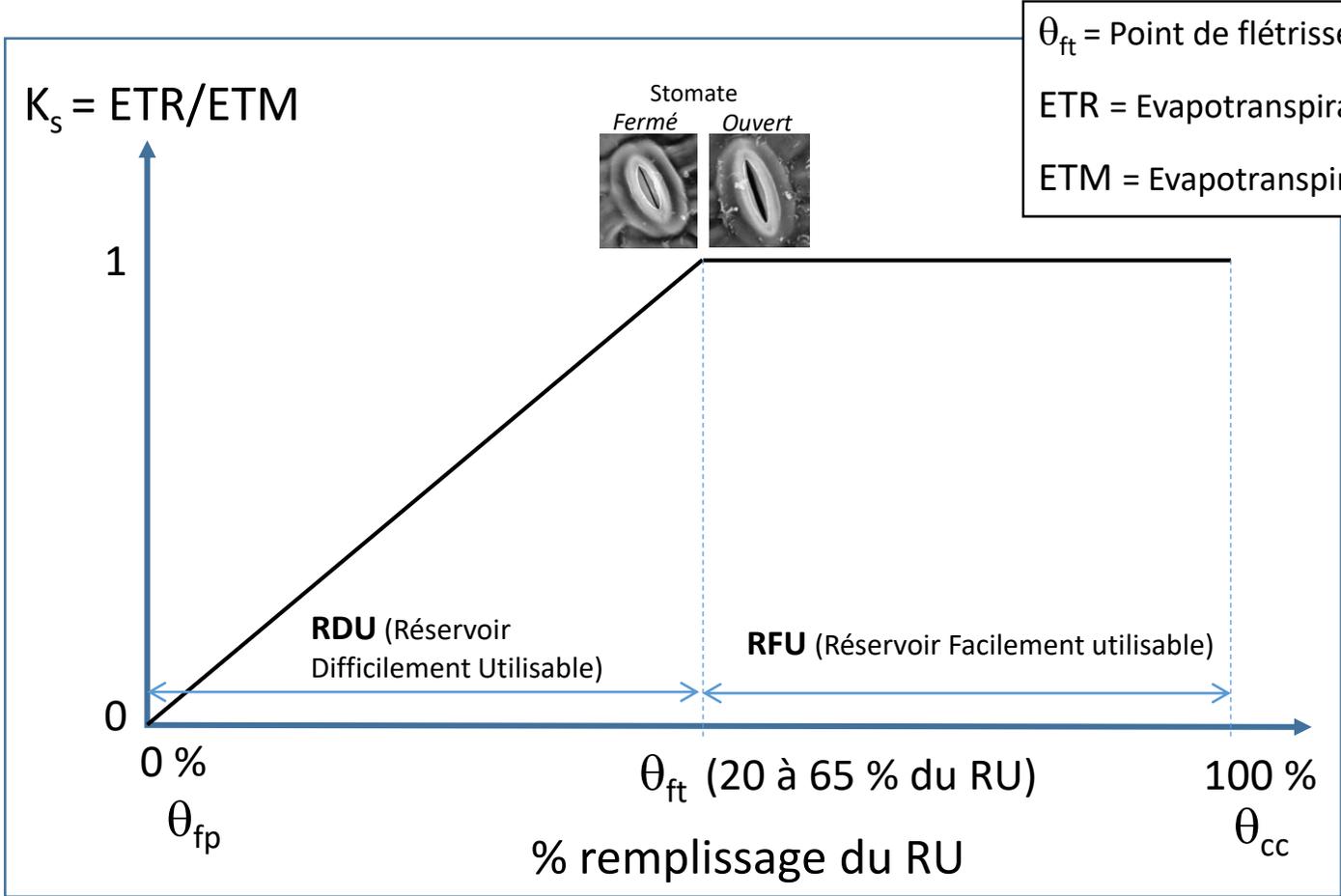
La profondeur d'enracinement est le premier déterminant du RU !

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

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 ++	Climat (ETP) ++	Type sol ++	Prof. Sol +++
Pratiques ++	Type sol ++	Pratiques +	Pratiques ++
Plantes +	Plantes ++	Plantes +(+)	Plantes ++
	Pratiques ++		

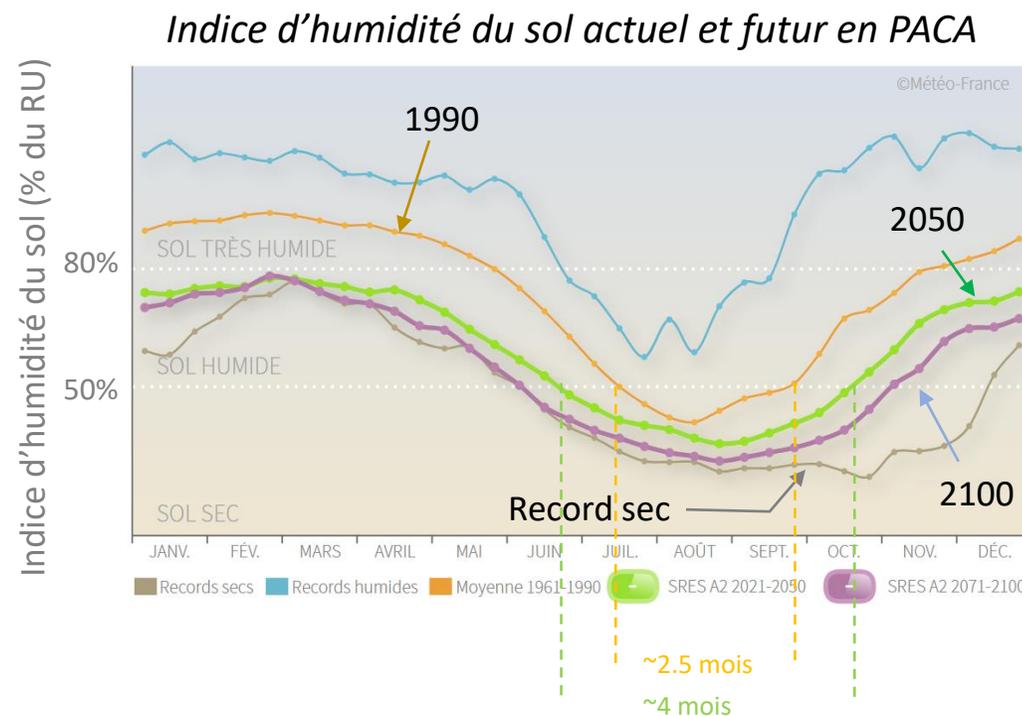
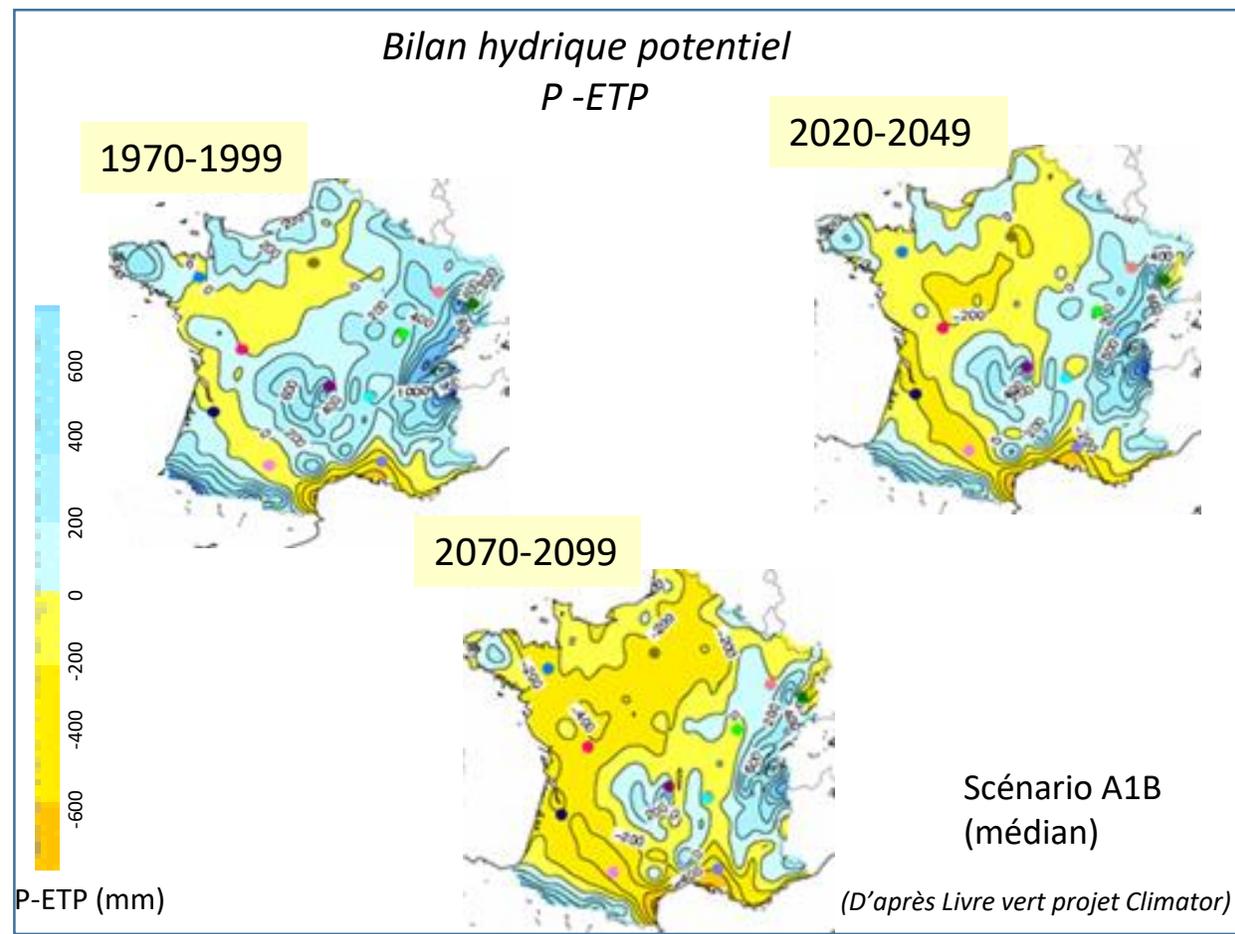
Pratiques et utilisation de l'eau du sol par les couverts végétaux

L' utilisation de l'eau par les plantes dépend d'un climat qui se modifie

Avenir : ETP qui augmente + Pluie constante ou en baisse



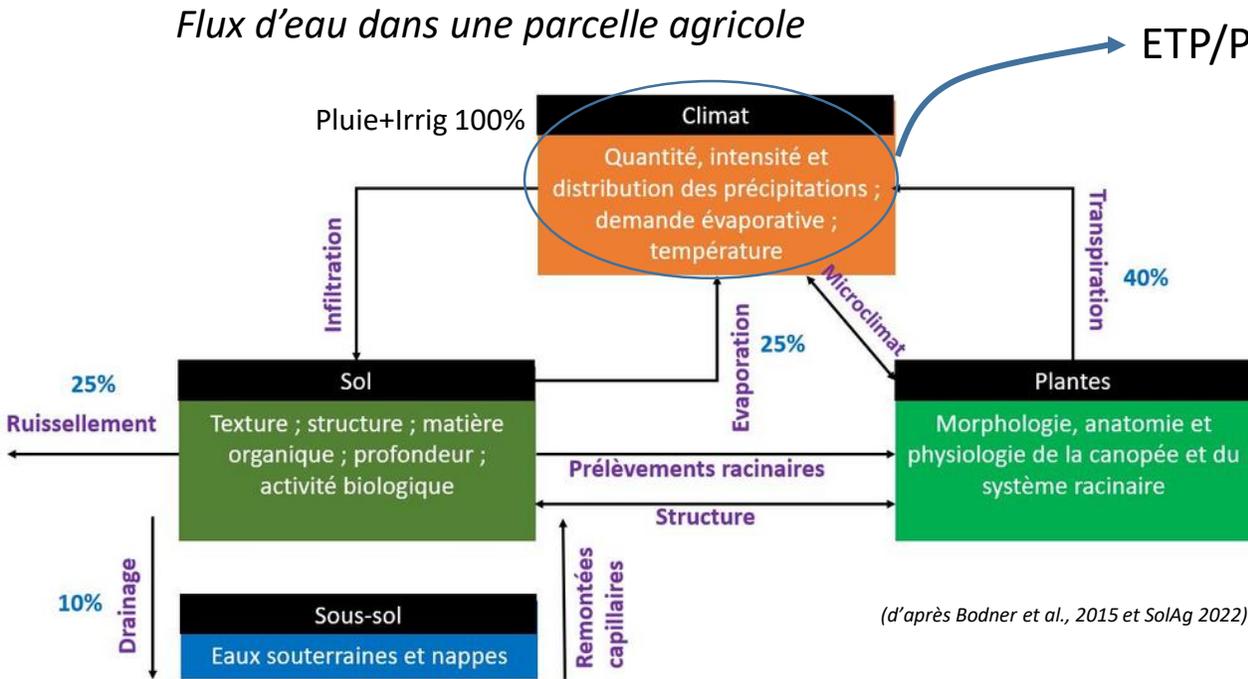
Période de déficit en eau et de temps où le sol s'assèche plus longue



Pratiques et utilisation de l'eau du sol par les couverts végétaux face au défi climatique / eau

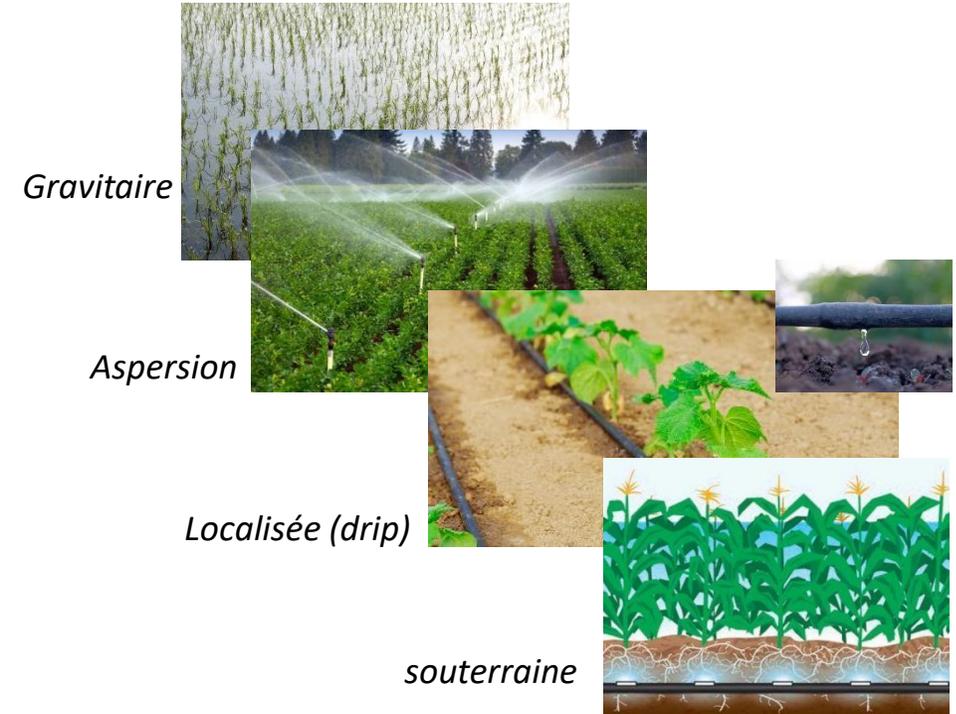
1/ Augmenter l'alimentation en eau : irrigation ?

Flux d'eau dans une parcelle agricole



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

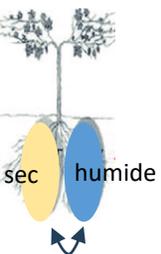
Irrigation ?



Techniques plus ou moins efficaces...
Maitrise des techniques, entretien matériel...

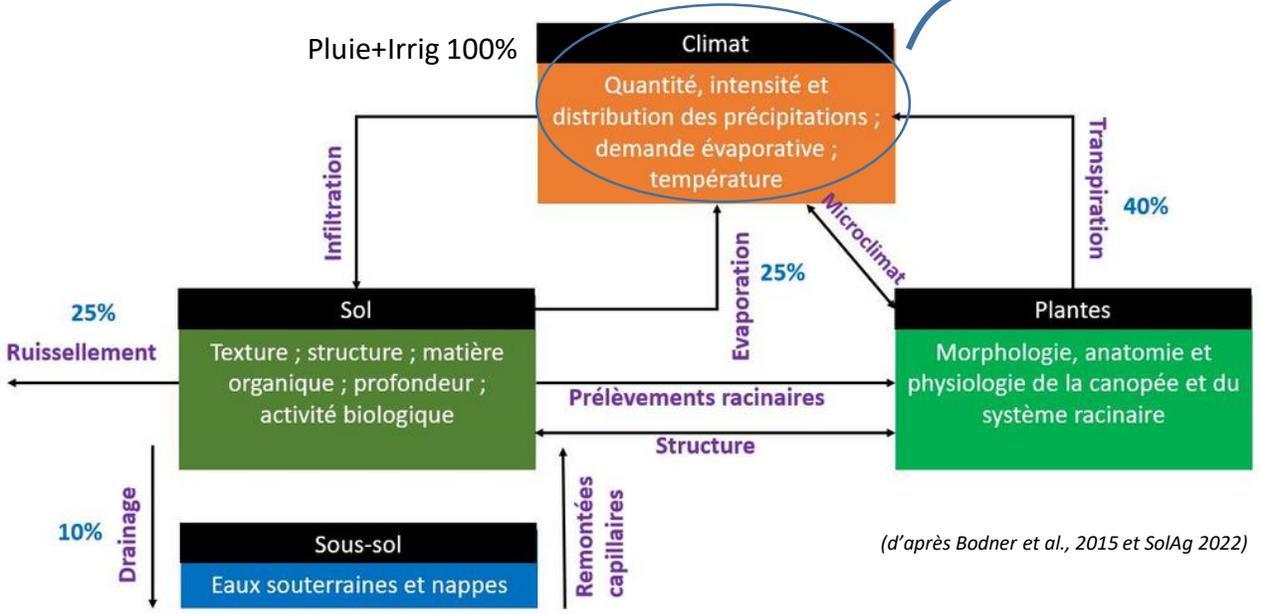
Irrigation déficitaire régulée

Irrigation alternée
(Partial Root Zone Drying)

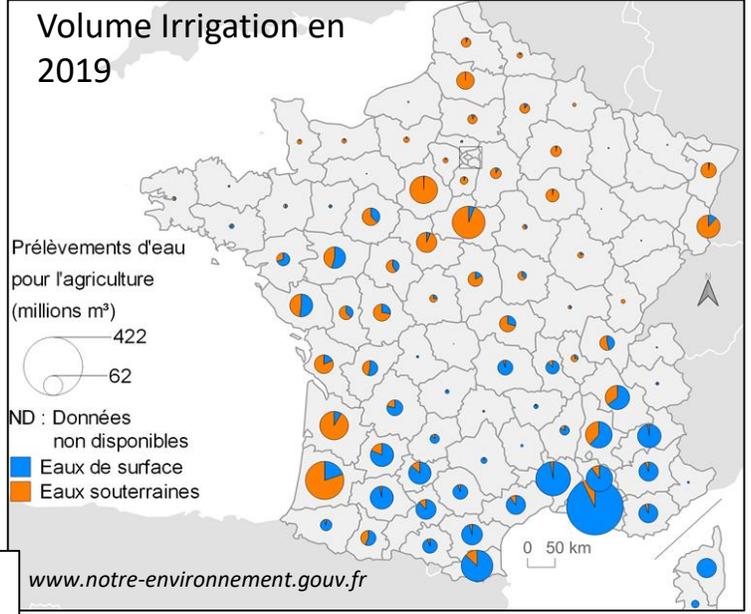


Pratiques et utilisation de l'eau du sol par les couverts végétaux face au défi climatique

Flux d'eau dans une parcelle agricole

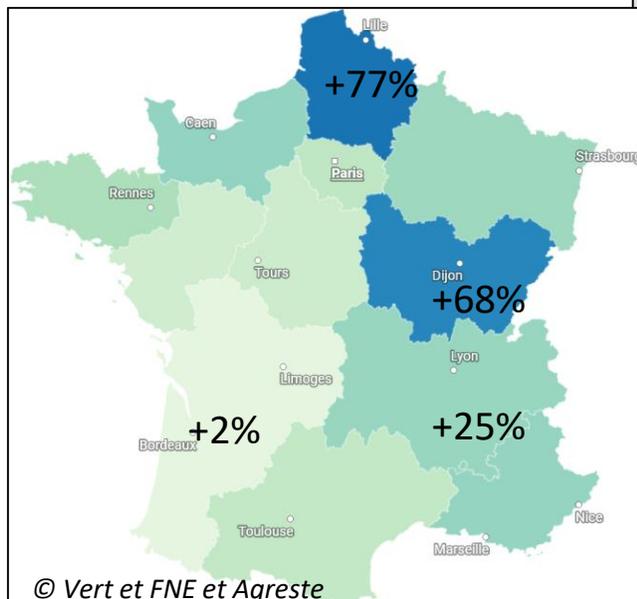


(d'après Bodner et al., 2015 et SolAg 2022)



Mais...

- Distribution inégale ressource eau/utilisation
- Pression sur ressources
- Augmentation restrictions
- Conflits d'usages
- Non durable au niveau mondial: usage humain ~ 1/4 des précipitations ; ~ 1/2 de l'eau circulant dans les rivières du monde entier !! Dont ~ 70% utilisé pour l'agriculture



France: 7% SAU irriguée, 3.1 milliard de m3 eau utilisé ~1.5% de la pluie efficace

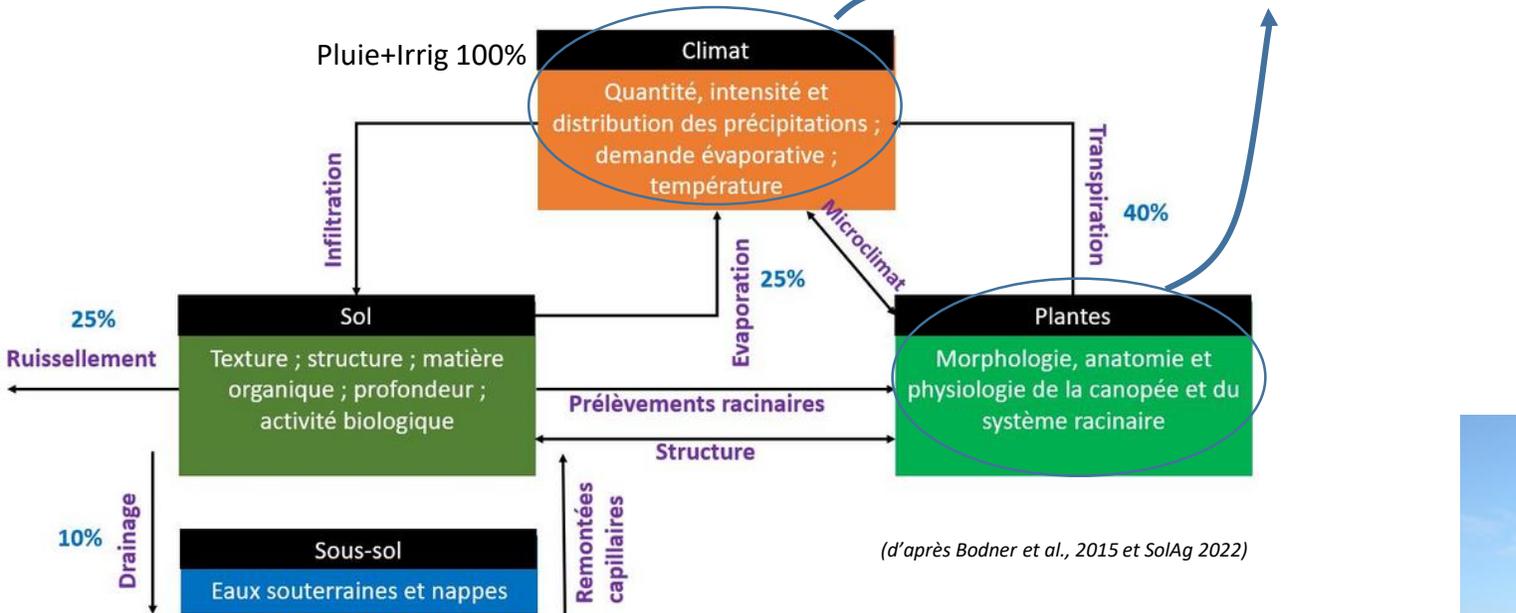
L'augmentation des surfaces irriguées est déjà présente



Pratiques et utilisation de l'eau du sol par les couverts végétaux face au défi climatique / eau

2/ Accorder culture et climat...

Flux d'eau dans une parcelle agricole



Mettre en phase cycle végétatif et cycle hydrologique

Cultures d'hiver / cultures de printemps...

Plantes + tolérantes (sorgho, tournesol, pois chiche...)

Jouer sur densité de plantation de la culture



Oliviers Tunisie (aridoculture)

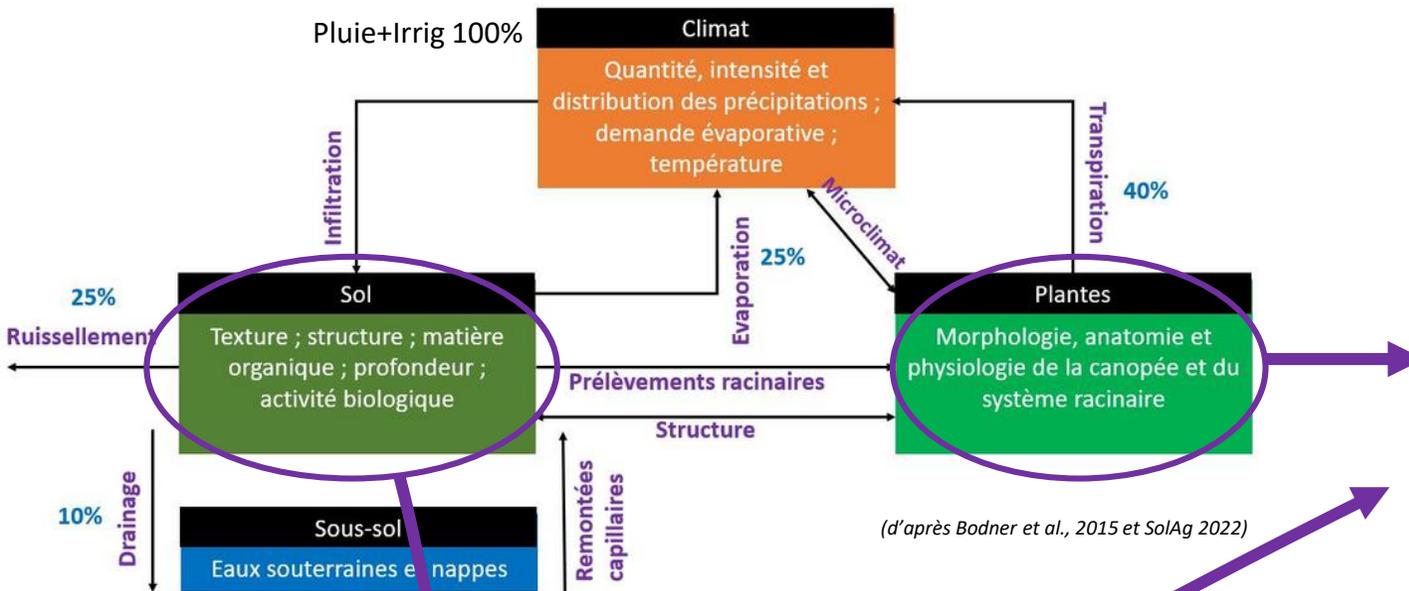
Pluie (mm)	Densité plants (distance - arbre/ha -)
500	8 x 8 – 156
380	12x12 – 70
250	24 x 24 - 18

(Itier B. www.plantes-et-eau.fr, Ennabli 1993)

Pratiques et utilisation de l'eau du sol par les couverts végétaux face au défi climatique / eau

3/ Augmenter l'efficience d'utilisation de l'eau par la plante ...

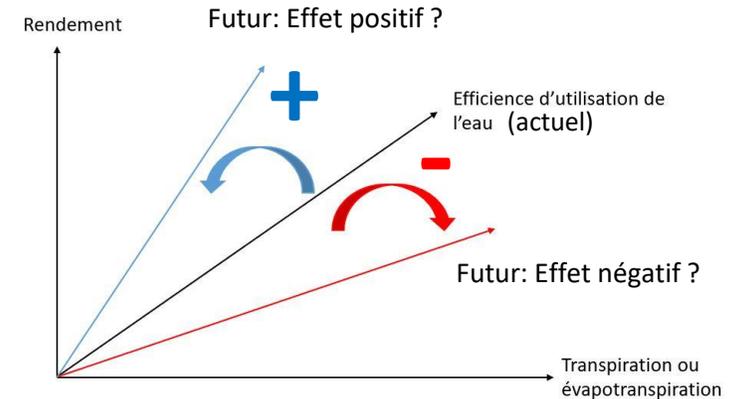
Flux d'eau dans une parcelle agricole



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

Génétique/physiologie et efficience:
 Régulation stomatique et osmotique
 Régulation de la croissance/architecture foliaire
 Allocation des photoassimilats
 Profondeur racinaire et plasticité racines

Efficience d'utilisation de l'eau



(d'après Hatfield et Dold, 2019 et et SolAg 2022)

$$EF_{\text{eau}} = Ir * B / (E + T)$$

$$= Ir * (B/T) * (1 + E/T)$$

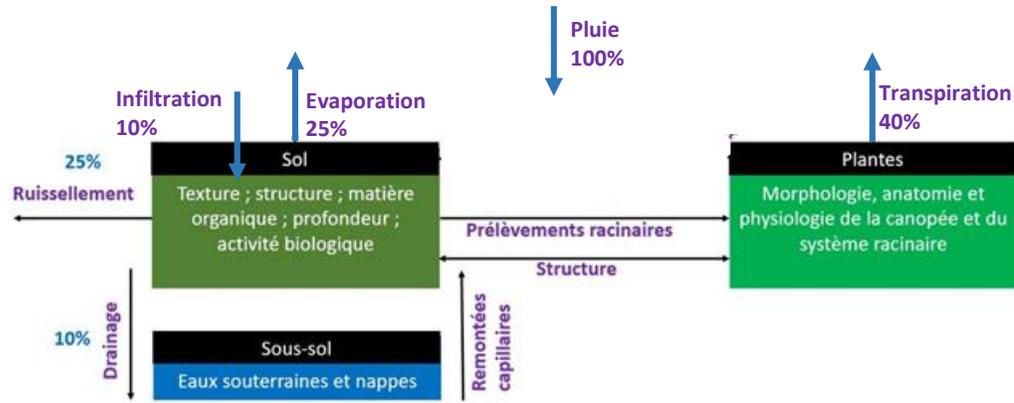
Génétique/Physiologie
 =f(stress)

Couvert+Pratiques
 =f(stress)

Génétique/Physiologie+Pratiques
 =f(stress)

Pratiques et utilisation de l'eau du sol par les couverts végétaux face au défi climatique / eau

3/ Augmenter l'efficacité d'utilisation de l'eau par la plante ... en passant par la qualité et fonctions des sols



Gerer la qualité des sols pour la ressource en eau : une interaction entre processus hydrologiques et biologiques

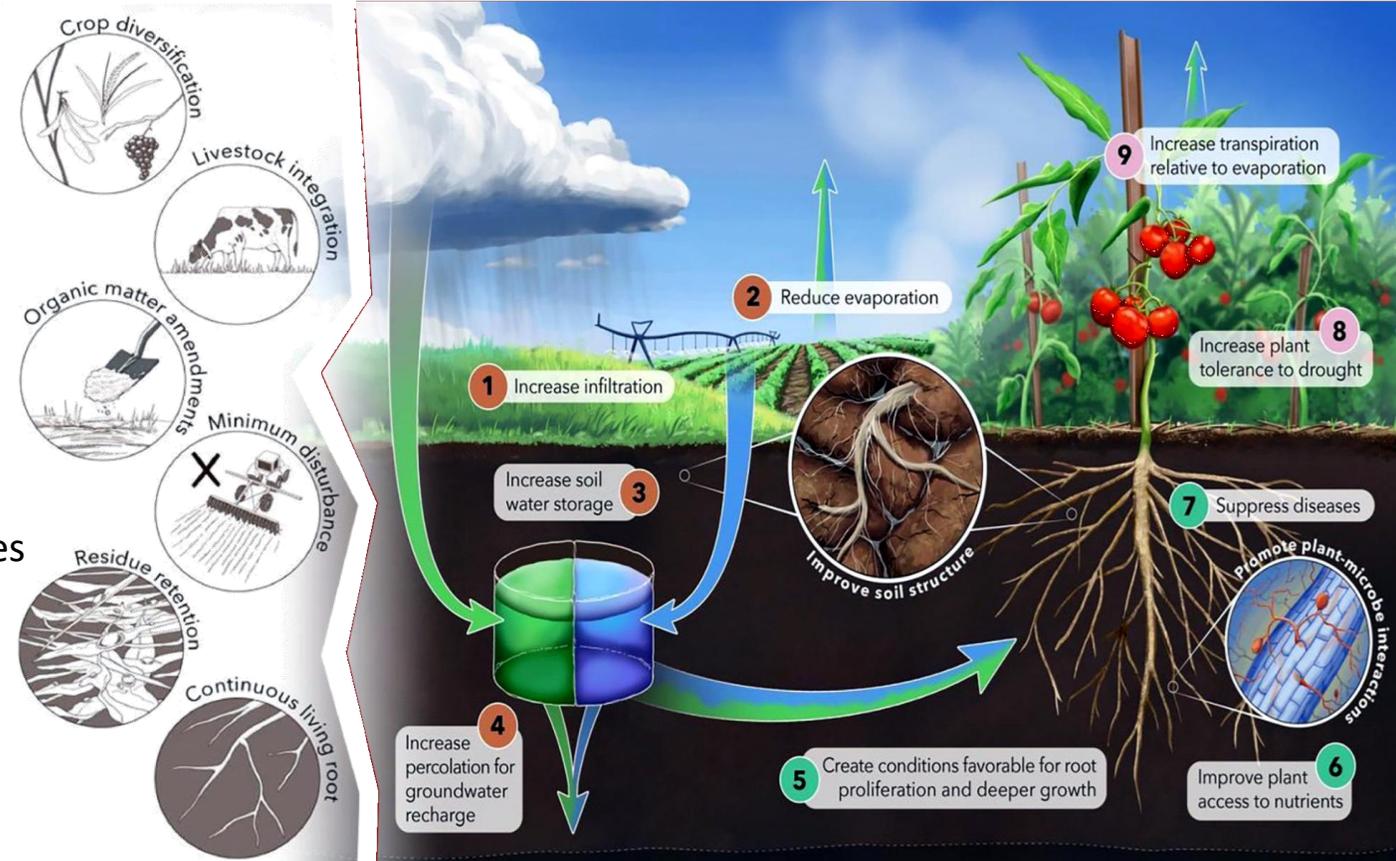
Pratiques

Processus

● Hydrologique

● Interactions plante-sol-microbes

● De surface



Principes d'agroécologie (favoriser les mécanismes naturels, biodiversité, ne pas dégrader, favoriser C dans le sol)

Agriculture de conservation

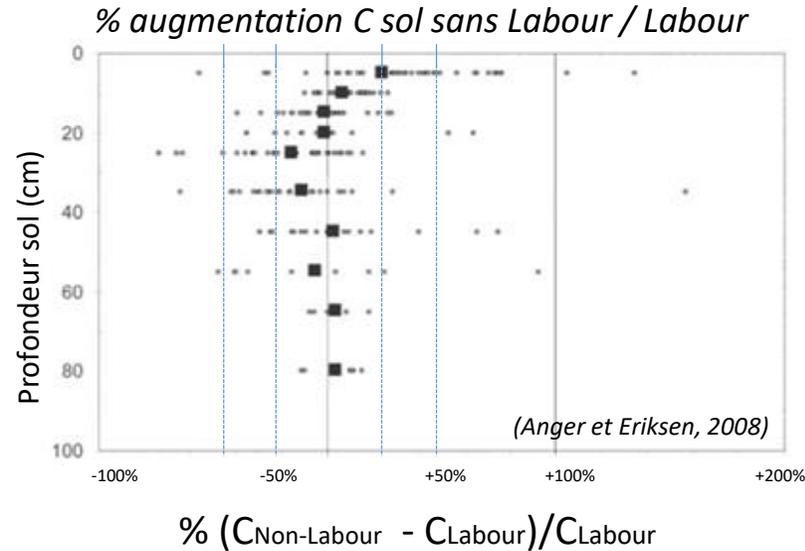
Agroforesterie

...

Pratiques et utilisation de l'eau du sol par les couverts végétaux face au défi climatique / eau

4/ la qualité des sols... travail du sol / couverture du sol et stock de carbone du sol (Pellerin et al., 2019, INRAE)

Non-Labour seul



Augmentation sur 0-15 cm

Baisse possible 20-50cm

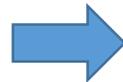
↳ Peu d'augmentation globale sur 0-100 cm du Carbone organique !

Stockage additionnel possible C ~ 60 kgC/ha/an en France

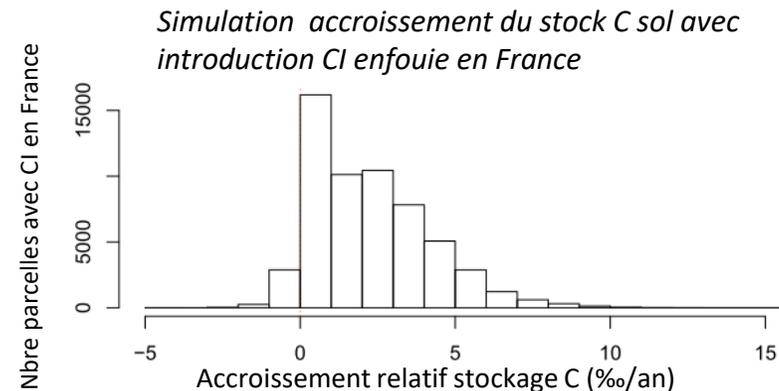
couverture sol: cultures intermédiaires plus longues, résidus

+

Enfouissement résidus



Stockage additionnel C ~ 300 (± 300) kgC/ha/an (global, tempéré)
[France: 126kgC/ha/an]



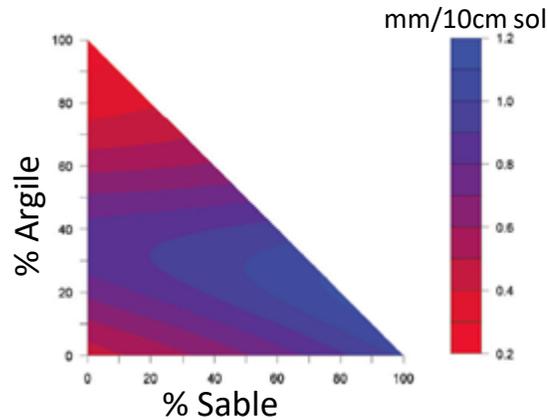
Pratiques et utilisation de l'eau du sol par les couverts végétaux face au défi climatique / eau

4/ 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 !

Un gain modeste ?

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



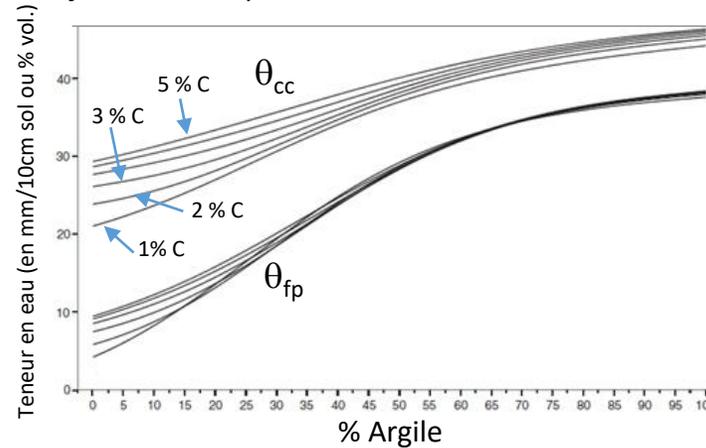
(Misnay, Mcbratney 2018)

Effet du %C sur CC et PFP !



+ d'effet sur sol grossier

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



Effet moyen de \nearrow 1 %C Sol : 1.4-1.9 mm/10cm sol

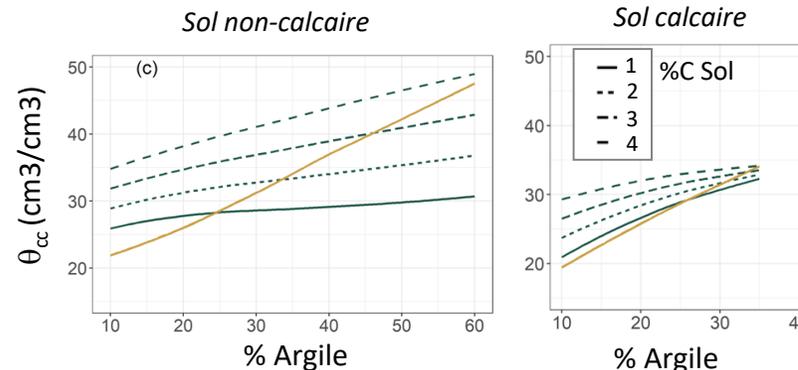
\downarrow
Si scénario réaliste d'augmentation de 0.1 %C /an par pratique alors augmentation RU de \sim 0.2 mm/10 cm sol pour un sol grossier (0-15 cm) \rightarrow Faible !

Un effet type de sol

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

(Bagnall et al., 2022)

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



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

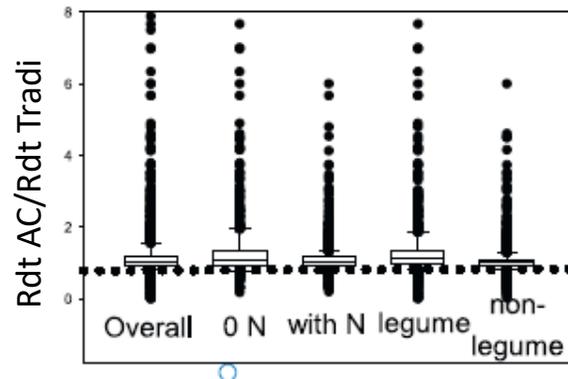
Pratiques et utilisation de l'eau du sol par les couverts végétaux

5/ Agriculture de conservation (AC) et composantes de l'efficacité d'utilisation de l'eau

- L'AC ne dégrade pas les rendements et augmente l'efficacité de l'eau (dépend temps d'installation du système)

A un niveau global

Ratio rendement culture avec / sans culture de couverture (Daryanto et al., 2018)



En France (dans le SO – Alletto et al., 2022):

Augmentation de 15 à 20% de l'efficacité d'utilisation l'eau sous AC / traditionnel

- Une efficacité meilleure en AC n'est pas forcément liée à un meilleur RU !

A un niveau global

D'une réduction de RU de -25%, à 0% (pas d'effet), à une augmentation jusque 50%....

L'effet est plus fort en surface : 0-15cm, mais le plus souvent modeste à moyen (Abdallah et al., 2021)

Lien avec effet MO variable vu précédemment...

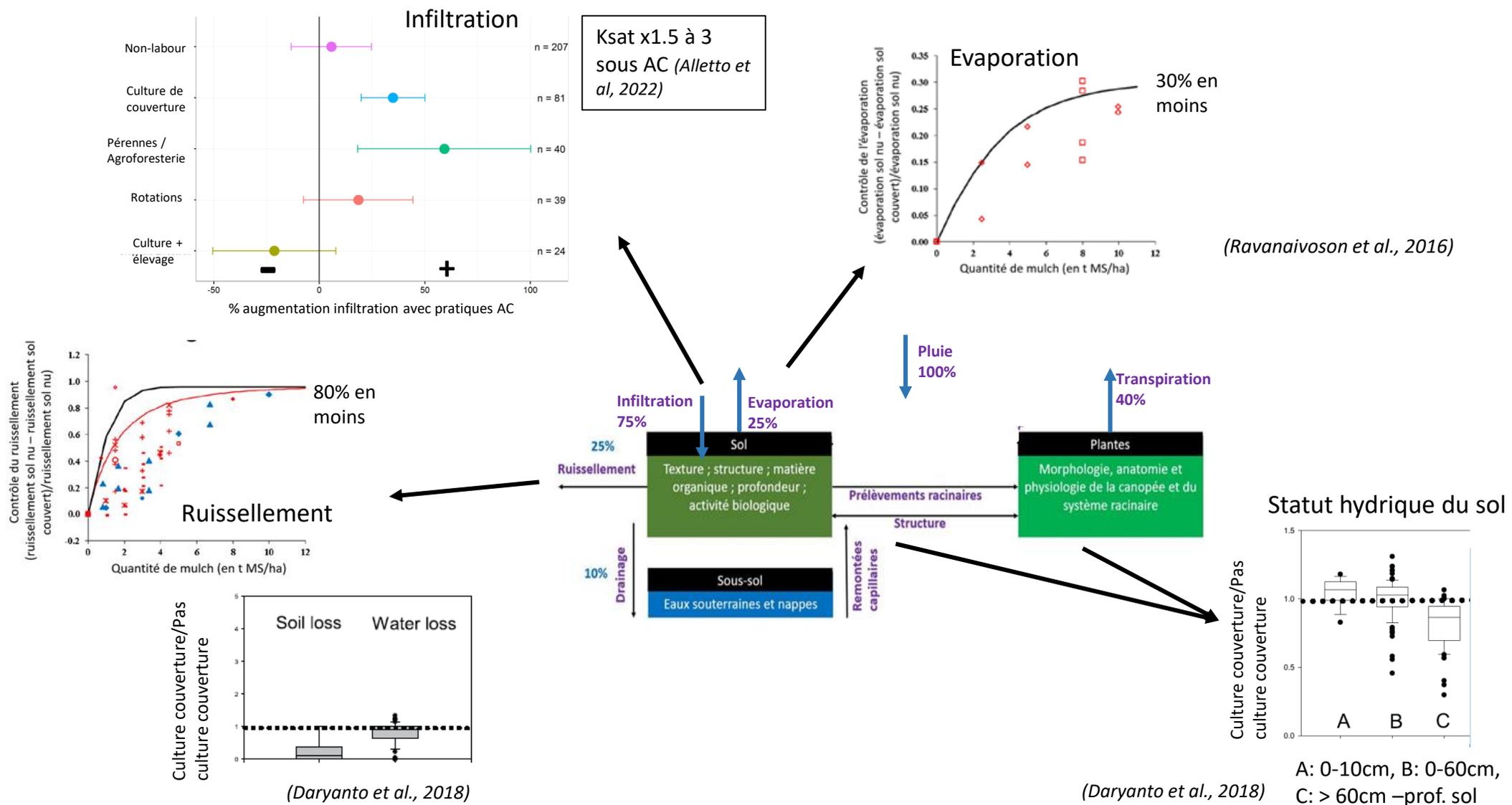
En France (dans le SO – Alletto et al., 2022):

RU plus importante 0-5 cm en AC / Labour (>10%) mais faible/moyen sur le profil de sol (~10%)

Pratiques et utilisation de l'eau du sol par les couverts végétaux

5/ Agriculture de conservation (AC) et composantes de l'efficacité d'utilisation de l'eau

- Sous AC, plus d'eau rentre dans le sol (infiltration) et moins est perdue (évaporation sol, ruissellement)



Pratiques et utilisation de l'eau du sol par les couverts végétaux

5/ Agriculture de conservation (AC) et composantes de l'efficience d'utilisation de l'eau

- La structure du sol et la porosité (taille des pores) évolue sous AC

« Court » terme < 10 ans

- Décroissance porosité totale
- +/- décroissance macroporosité
- +/- Augmentation microporosité
- Augmentation densité

Long terme > 10 ans

- Augmentation macroporosité
- Augmentation connectivité pores

Amélioration structure et stabilité du sol = f(t)

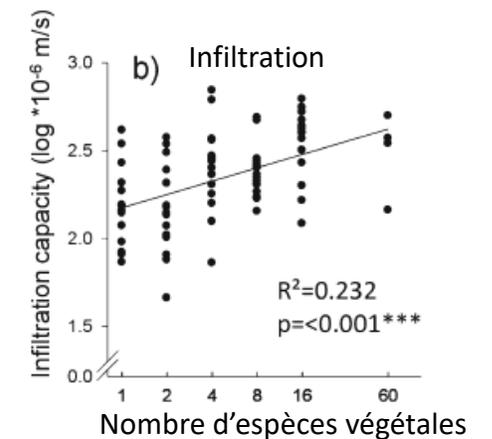
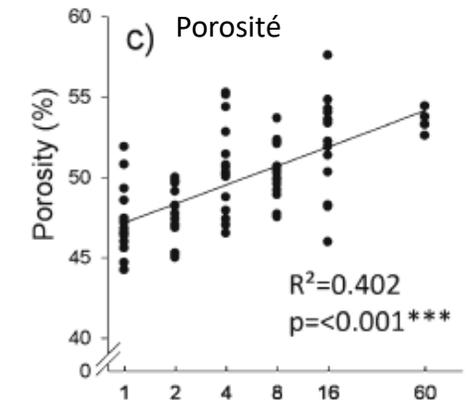
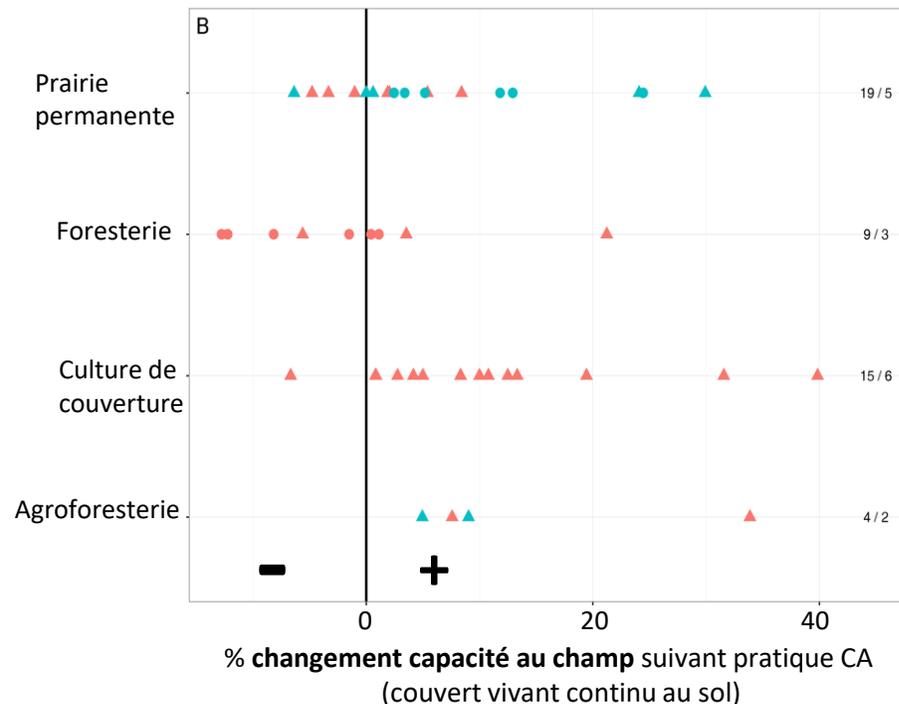
Un effet pratiques CA



Un lien avec la richesse en diversité des espèces de couverture

Actions des racines, de la pédofaune, et de la matière organique

Augmente capacité infiltration/aération mais pas forcément RU



Pratiques et utilisation de l'eau du sol par les couverts végétaux

5/ Agriculture de conservation (AC) et composantes de l'efficience d'utilisation de l'eau

- L'AC influence l'activité biologique du développement racinaire aux interactions sol-plante-microorganismes

Système racinaire

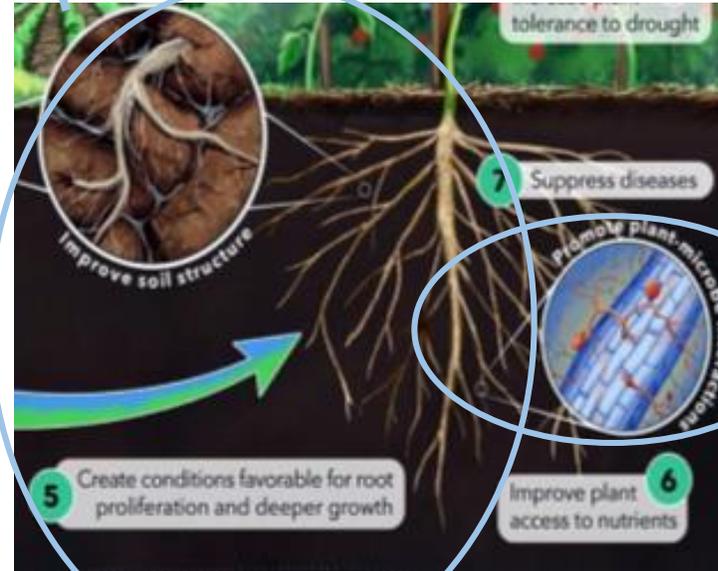
Le système racinaire peut se développer plus en profondeur sous AC (+60 à 100% - eg. Alletto et al, 2022)

↳ Effet direct sur RU !

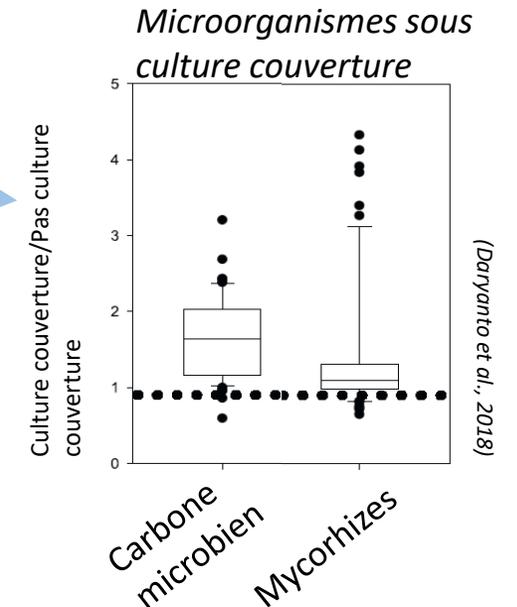
Effet dépend du type de culture de couverture => 2 à 6 fois plus pénétration en profondeur (maïs) avec couverture (légumineuse /poacée) que trèfle rouge ou (moutarde/poacée) (Spielvogel et al., projet RootWays)

↳ Effet « macropores », chemin préférentiel pour les racines, avec des propriétés spécifiques

↳ Des effets indirects sol- racines influencent efficience utilisation de l'eau



sol-plante-microorganismes



↳ Agrégation / Stabilité struct. Minéralisation / Nutrition ... mais aussi régulation biologique /pathogènes

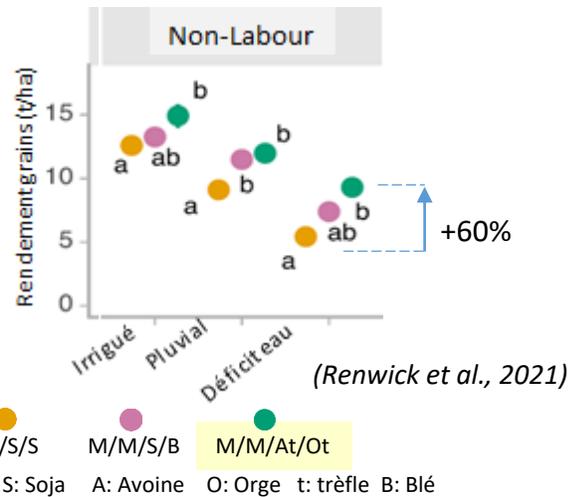
Pratiques et utilisation de l'eau du sol par les couverts végétaux

5/ Agriculture de conservation (AC) et composantes de l'efficacité d'utilisation de l'eau

- L'efficacité d'utilisation de l'eau passe par des interactions indirectes sol-racines-plante

Exemple: Diversification rotations

Rendement de maïs avec des rotations sur 4 ans pour différents déficits en eau (essai 14 à 36 ans)

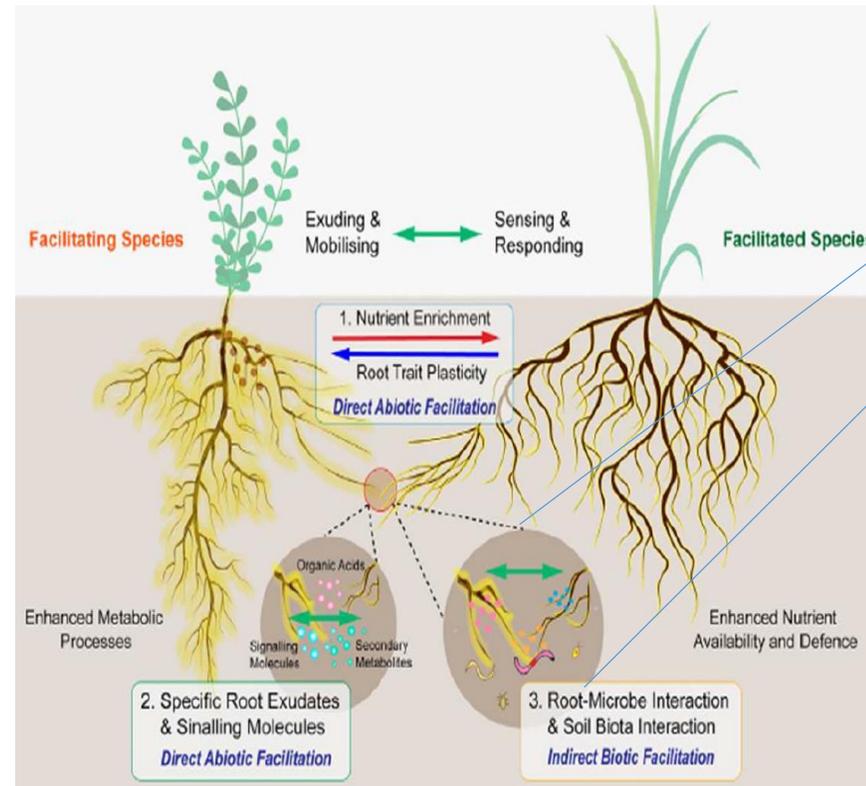


Rotation la plus diversifiée permet limiter chute du rendement (~+60%) en déficit par rapport au conventionnel (/génétique ~+7% hybride tolérant)

Lié à une amélioration statut hydrique plante, au travers matière organique (qui varie peu...) mais sans lien avec modif propriétés hydriques sol, N statut, eau profonde
 ➔ Effet indirects sol-racines-plante..

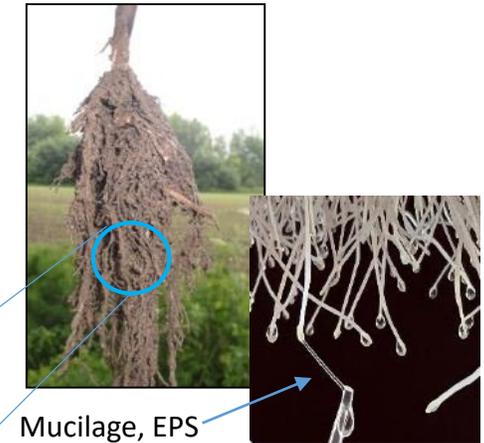
Des effets facilitateurs directs/indirects

Avec des plantes cohabitant mais possiblement aussi avec des successions de plantes (e.g. culture intermediaire)



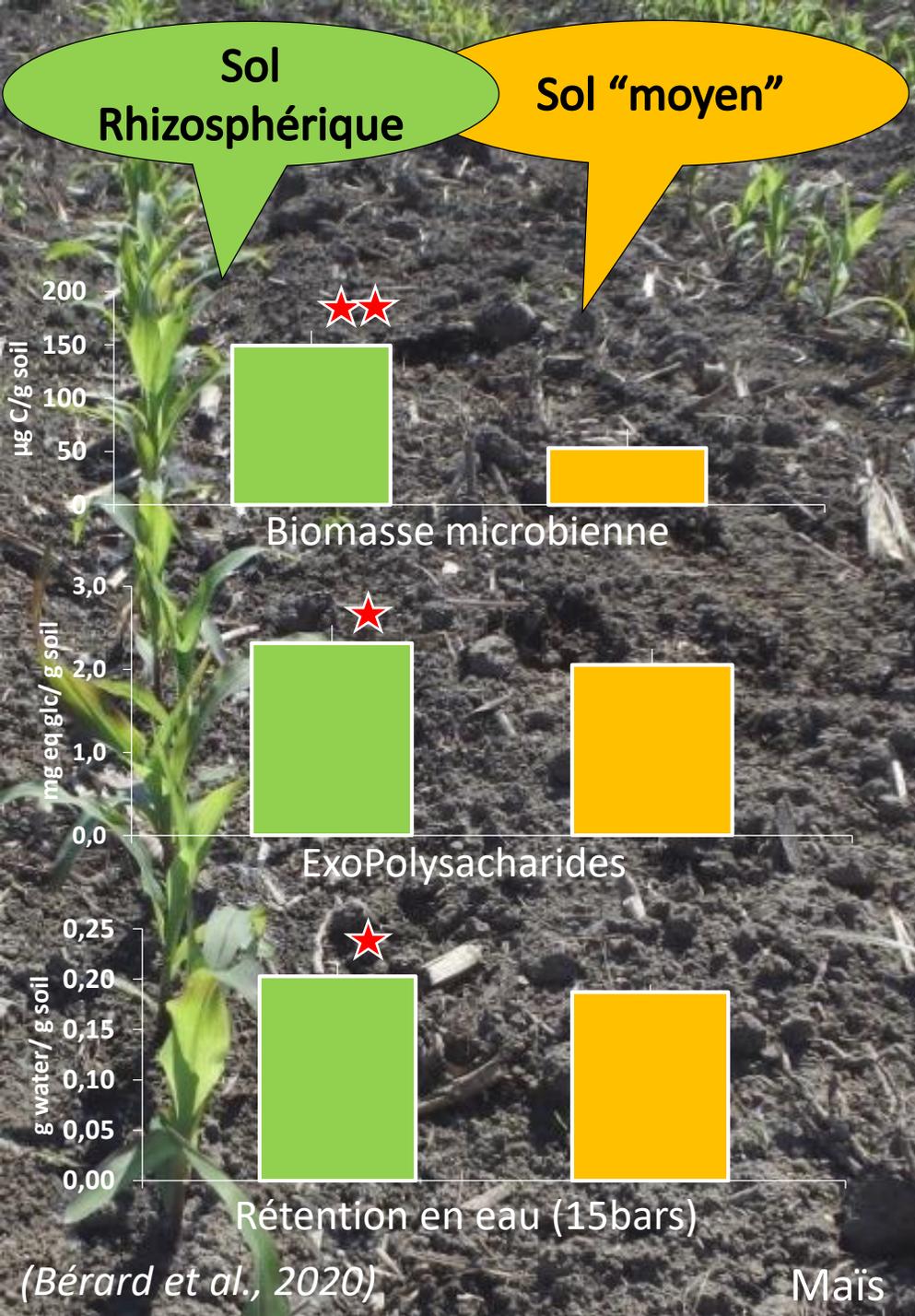
(d'après Yu et al., 2021)

Un hot spot : la rhizosphère



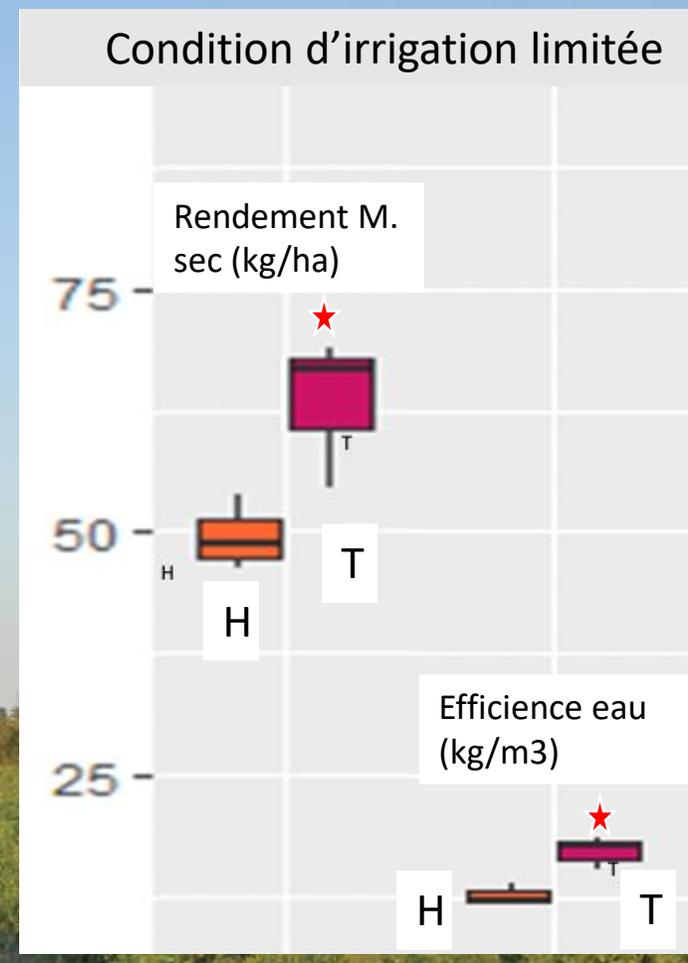
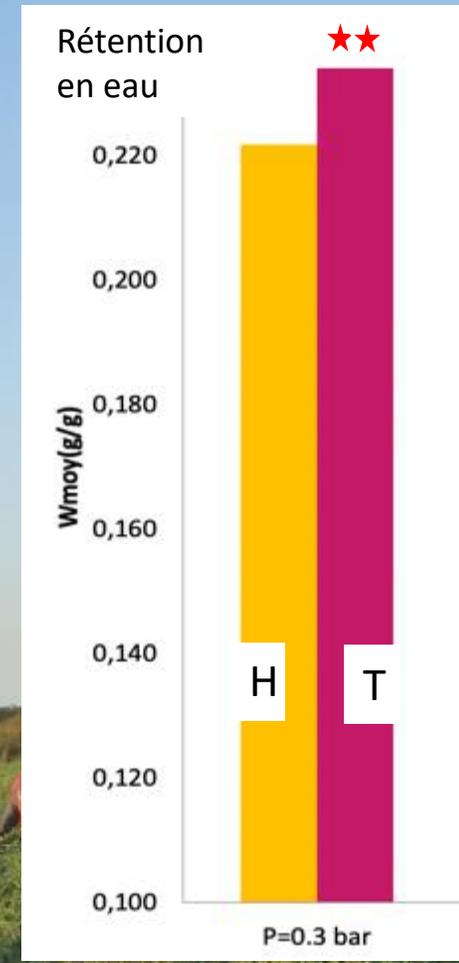
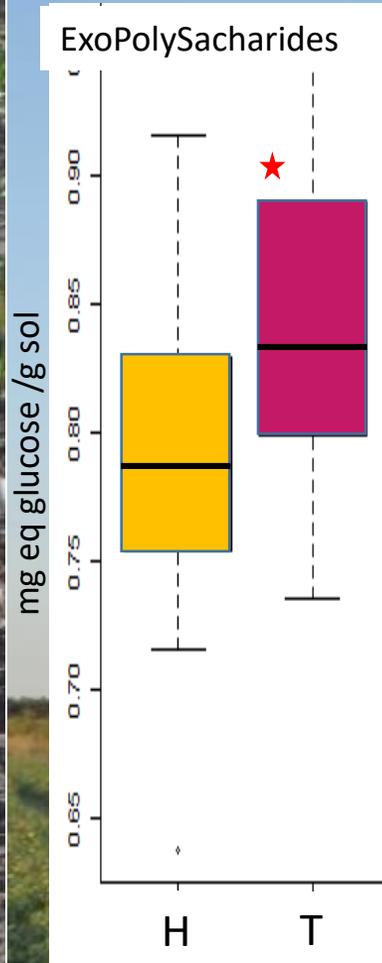
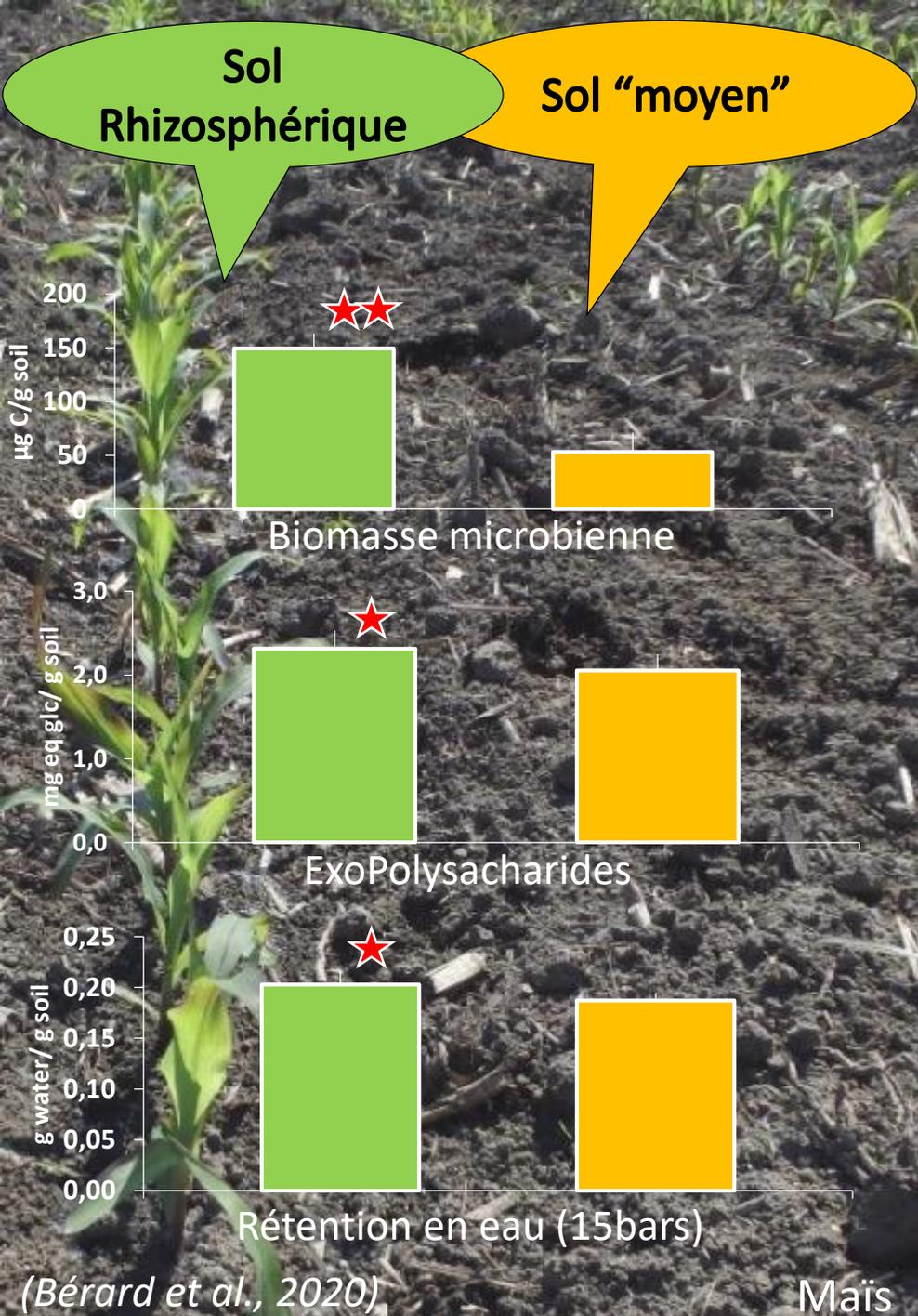
Mucilage, EPS

EPS rhizosphère



← Une différenciation des propriétés du sol

Des effets facilitateurs indirects :
la rhizosphère



Des différences suivant variétés (ici tomate H et T)

Des effets facilitateurs indirects :

la rhizosphère

(Doussan et al. 2024, Le Gall et al. 2024 et 2021)

Tomate

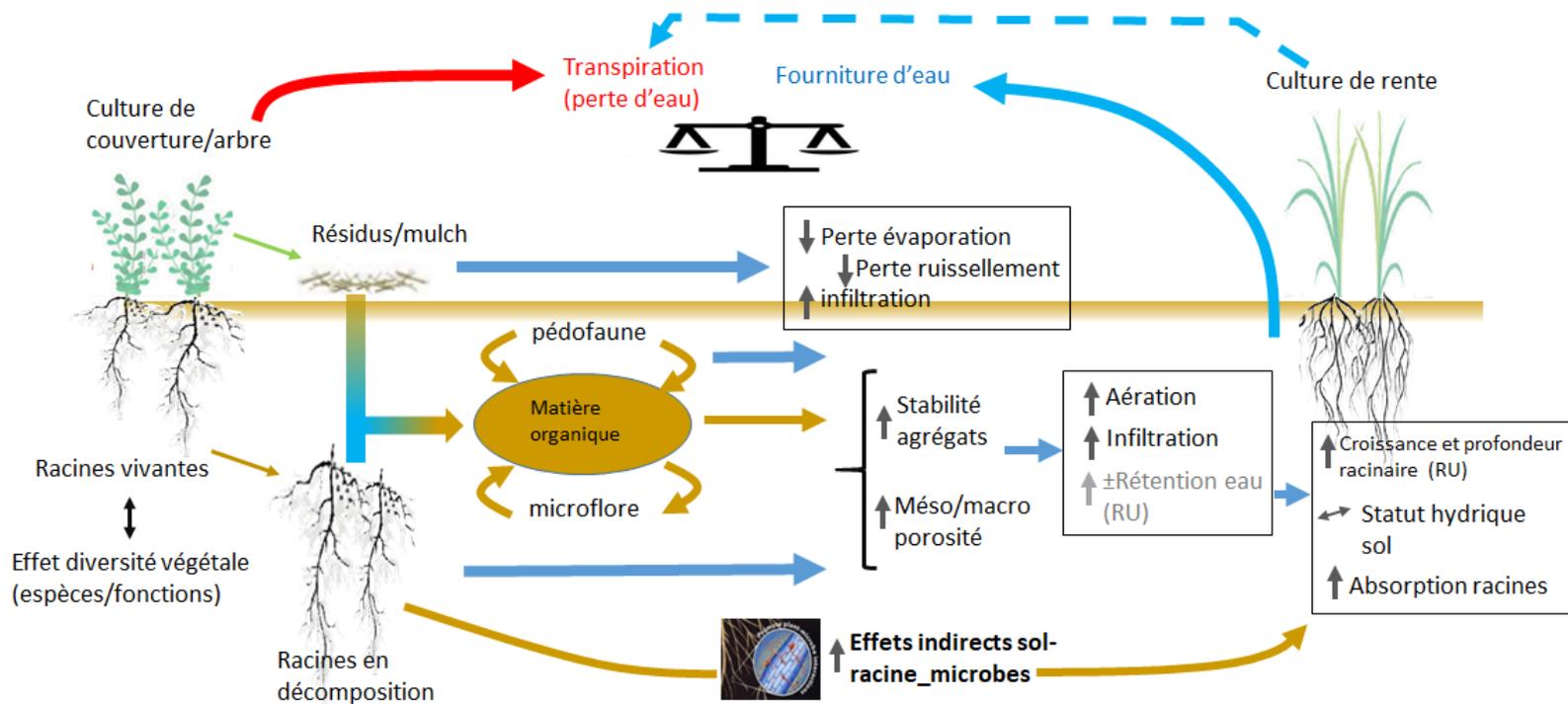
Pratiques et utilisation de l'eau du sol par les couverts végétaux

Quelles conclusions ?

Les pratiques visant à maintenir/améliorer la qualité des sols

- Pas de travail, ou réduit, du sol
- Couverture végétale permanente du sol
- Retour des résidus de récolte au sol
- Rotation de culture, incluant des cultures de « couverture » (amendements organiques)

Cultures de couverture/service et impacts alimentation hydrique et transpiration des cultures



Mais fonction du :

- **Sol** (plus d'effets en sol plus grossier ?)
- **Climat** (plus d'effets d'un climat humide/froid à sec/chaud ?)
- **Diversité** spécifique et fonctionnelle des plantes de service (plus d'effet avec plus de diversité ?)

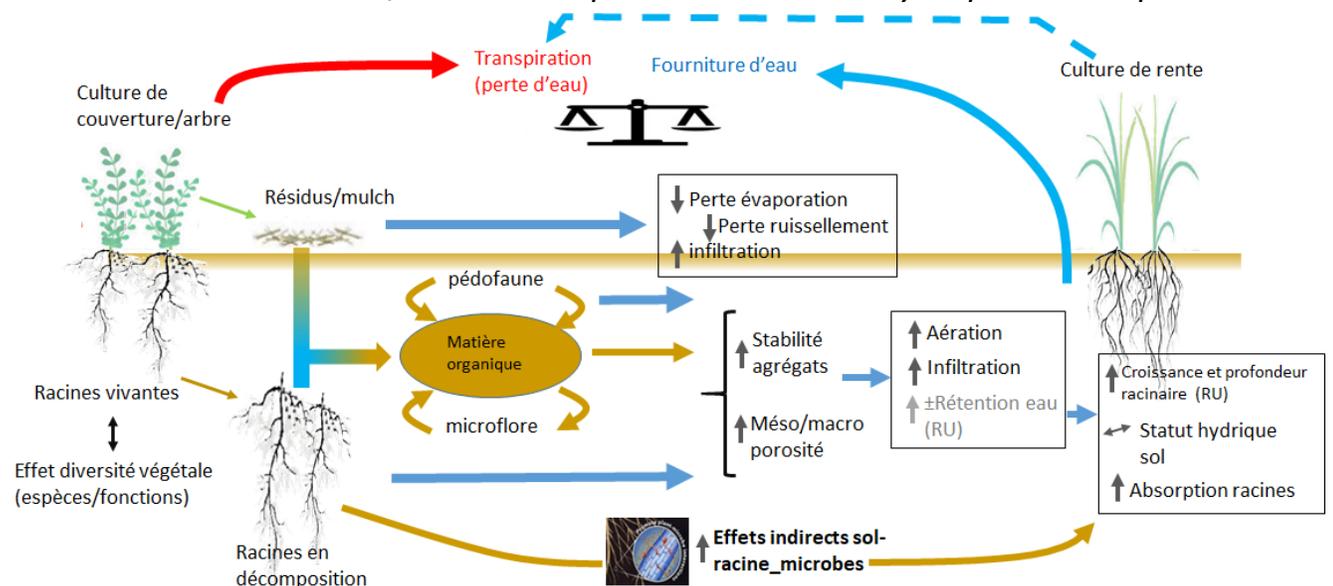
Pratiques et utilisation de l'eau du sol par les couverts végétaux

Quelles conclusions ?

Les pratiques visant à maintenir/améliorer la qualité des sols

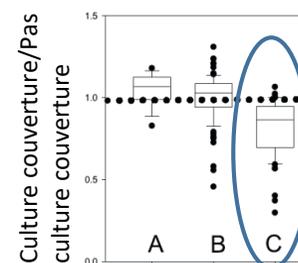
- Pas de travail, ou réduit, du sol
- Couverture végétale permanente du sol
- Retour des résidus de récolte au sol
- Rotation de culture, incluant des cultures de « couverture » (amendements organiques)

Cultures de couverture/service et impacts alimentation hydrique et transpiration des cultures



Drainage et réalimentation des nappes ?

Statut hydrique du sol

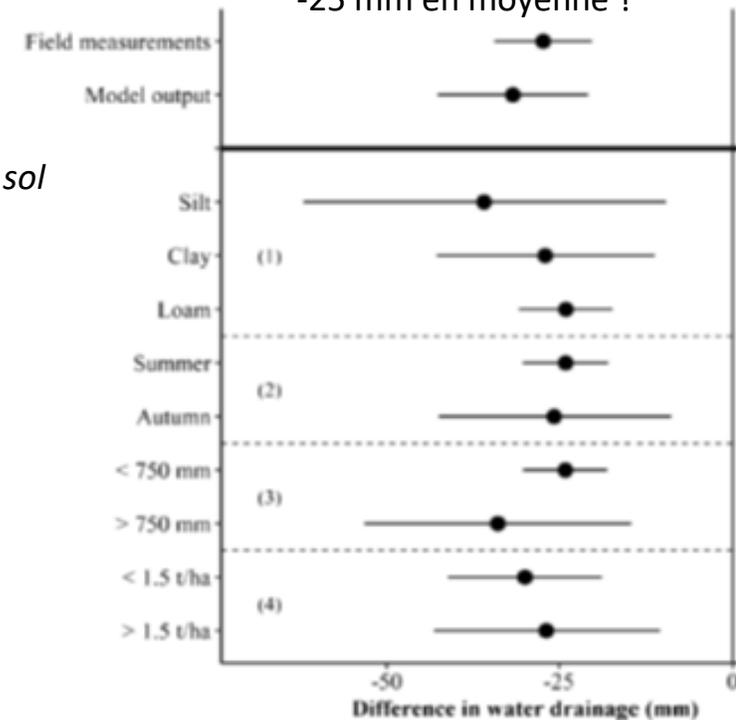


A: 0-10cm, B: 0-60cm, C: > 60cm –prof. sol

(Daryanto et al., 2018)

Différence de drainage Culture couverture/témoin

-25 mm en moyenne ?



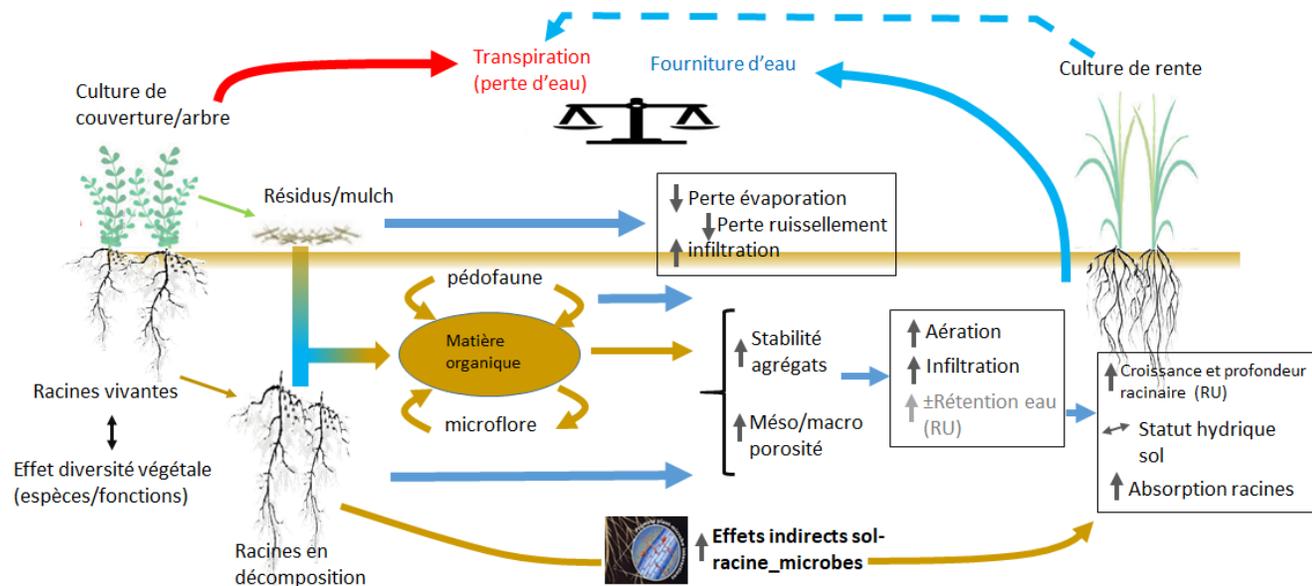
Pratiques et utilisation de l'eau du sol par les couverts végétaux

Quelles conclusions ?

Les pratiques visant à maintenir/améliorer la qualité des sols

- Pas de travail, ou réduit, du sol
- Couverture végétale permanente du sol
- Retour des résidus de récolte au sol
- Rotation de culture, incluant des cultures de « couverture » (amendements organiques)

Cultures de couverture/service et impacts alimentation hydrique et transpiration des cultures



Enjeux pour la recherche:

- Complexité des interactions => Enjeux comprendre leur déterminisme
- Complexité des combinaisons (pratiques)
- Nécessité d'établir des références d'efficacité dans divers contextes (climat et sol)
- Problème du temps et des évolutions à long terme (observatoires/participatif...)



Du pain sur la planche, collectivement...

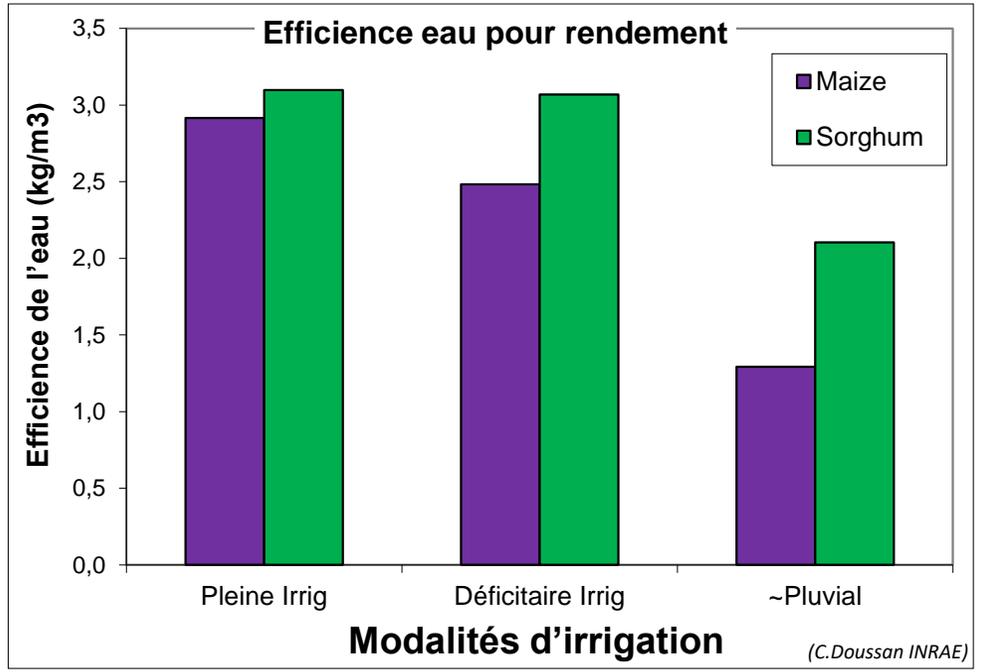


MERCI pour votre
attention !



Concepts de base : Efficacité d'utilisation de l'eau par les plantes – Relation Eau - Production

Efficacité d'utilisation de l'eau (EF_{eau}) = quantité de biomasse produite par unité de quantité d'eau consommée par culture



$$EF_{eau} = I_r * B / (E + T)$$

$$= I_r * (B/T) * (1 + E/T)$$

↓ Génétique/Physiologie = f(stress)
 ↓ Génétique/Physiologie + Pratiques = f(stress)
 ↓ Couvert + Pratiques = f(stress)

I_r = indice de récolte [-]
 B = Qté de biomasse [kg/m²]
 E = Evaporation sol [mm]
 T = Transpiration plante [mm]

Relation entre rendement ou biomasse et Evapotranspiration cumulée
 => EF_{eau} équivalents entre culture = 6.7 kg/m3 mais meilleure capacité Sorgho à extraire eau en déficit hydrique (C. Doussan INRAE)

