

les SFN en réponse aux sécheresses
en contextes agricoles,
regards scientifiques
« l'Effet rhizosphérique »

Annette Bérard et Claude Doussan



Enjeux et Contexte

Driver
Pression
Etats / impacts
Réponses
(+/- conventionnelles)



Changement climatique



Épisodes de sécheresse

Episodes de pluies ±intenses

Déficit hydrique des cultures

Ruissellement / infiltration

⇒ Rendement / qualité
(effet déjà visible pour le blé)

⇒ Engorgement eau sol / cultures
⇒ Ruissellement/ érosion/ inondation
⇒ Recharge de la nappe

- Techniques: irrigation, ReUse
- Génétiques: amélioration
- Agronomiques: (espèces / variétés, densité plantation, amendements...)

- Travail du sol / amendements
- Aménagements (bassins, drains...)
- Agronomie (plantes de couvertures, bandes enherbées...)
- ...



Exemple de pratique agronomique: Agriculture de conservation

Agriculture de conservation:

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



Possible augmentation matière organique sol (mais variable, suivant résidus /rotations...)

Augmentation activité Biologique globale



Des effets physiques

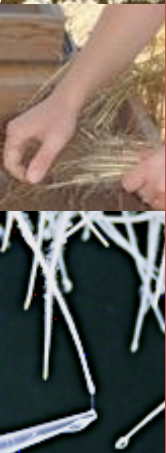
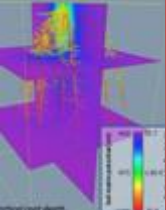
↗ Infiltration ↘ Ruissèlement / Erosion

↗ Eau utilisable par les plantes = **Réserve utile** et effets visibles pour années sèches pour maintien de rendement, diminution irrigation (20-50%) pour un même rendement (Palm et al., 2014, Agr Ecosyst Environ)

MAIS : *Effets sensibles essentiellement sur le sol superficiel (0-20, 30 cm)*

Augmentation Réserve Utile avec la matière organique pas forcément importante

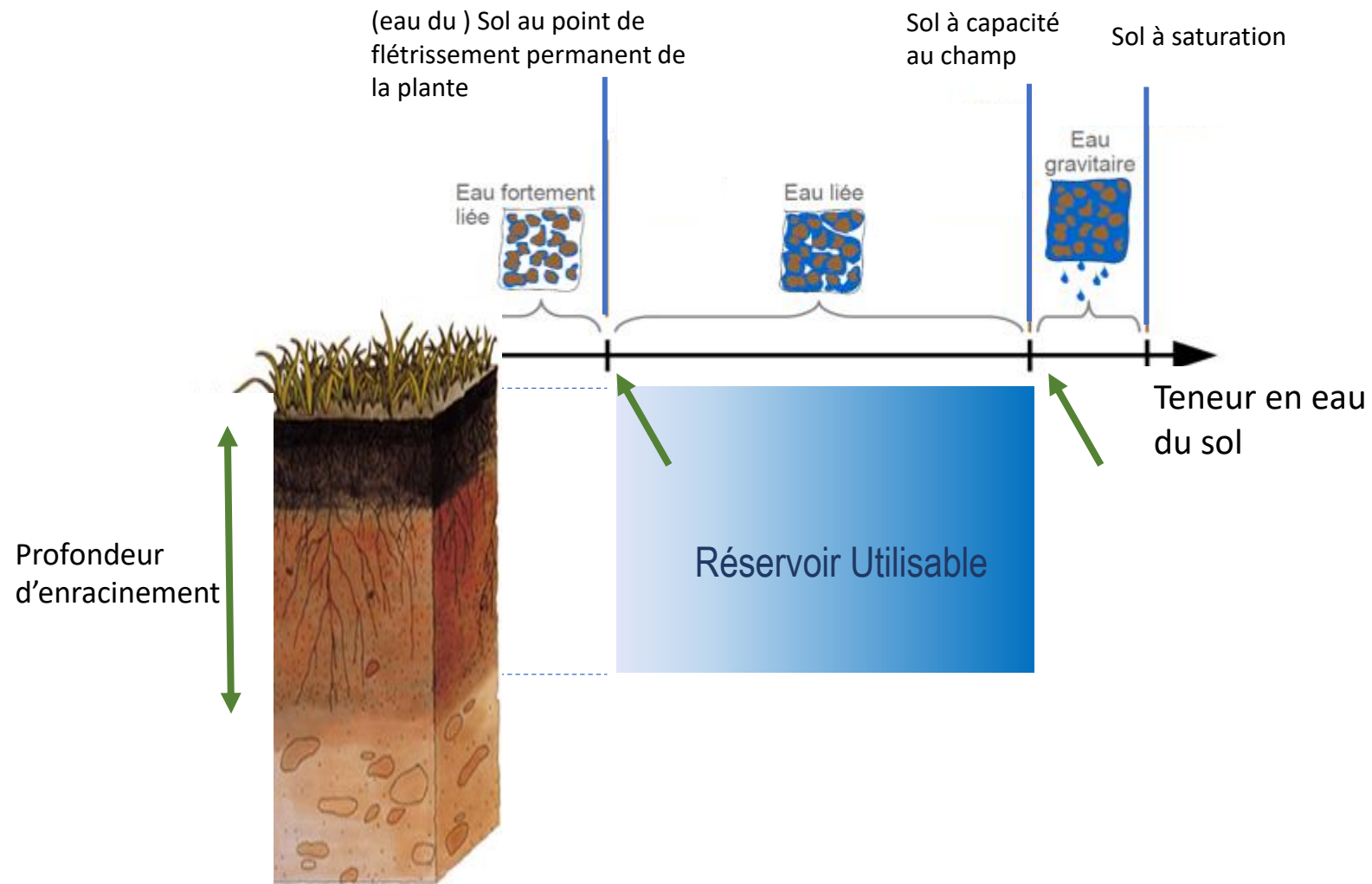
(suivant type sol, type Carbone Org , temps)



Mais c'est quoi la Réserve Utile – ou Réservoir Utilisable – en eau du sol ?

Réservoir en eau Utilisable (RU) =

c'est la Quantité d'eau que le sol peut stocker et restituer aux plantes (pour la croissance végétale)



Enjeux et Contexte

Driver

Pression

Etats / impacts

Réponses



Changement climatique



Épisodes de sécheresse

Episodes de pluies ±intenses

Déficit hydrique des cultures

Ruissellement / infiltration

⇒ Rendement / qualité

⇒ Engorgement eau sol / cultures

⇒ Ruissellement/ érosion/ inondation

⇒ Recharge de la nappe

Une réponse supplémentaire possible dans un cadre d'intensification écologique ?

Augmenter la Réserve Utile du sol ?

Modifier l'infiltrabilité superficielle et profonde du sol ?

Utiliser les couverts et leur systèmes racinaires ?

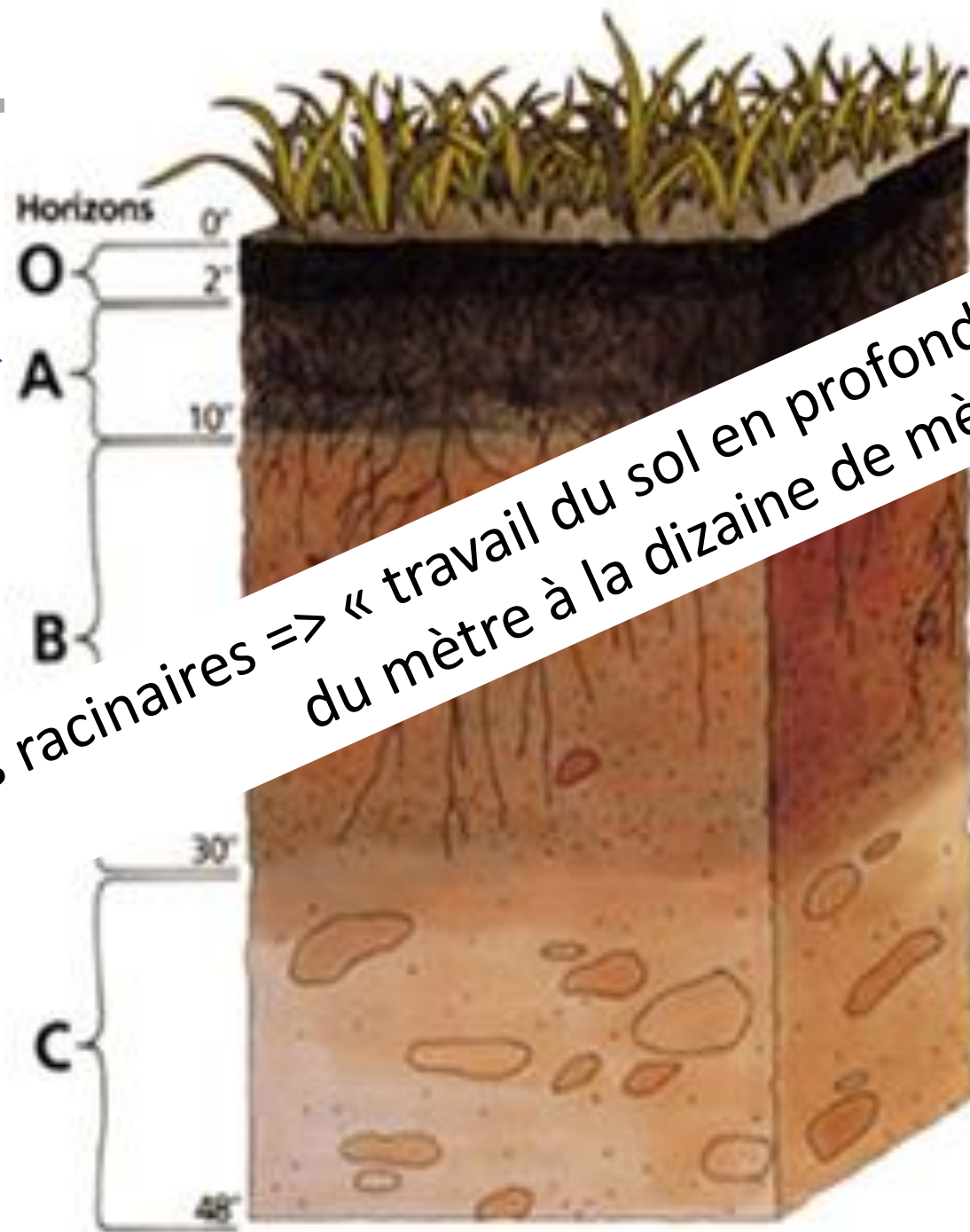


La plante et le sol



Prélèvements
Croissance
Rendement
Adaptation
au déficit hydrique

Les systèmes racinaires => « travail du sol en profondeur » :
du mètre à la dizaine de mètres de profondeur...!



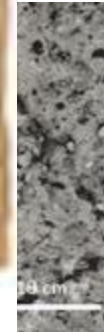
Actions indirectes
→ « effets indirects »



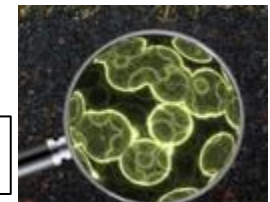
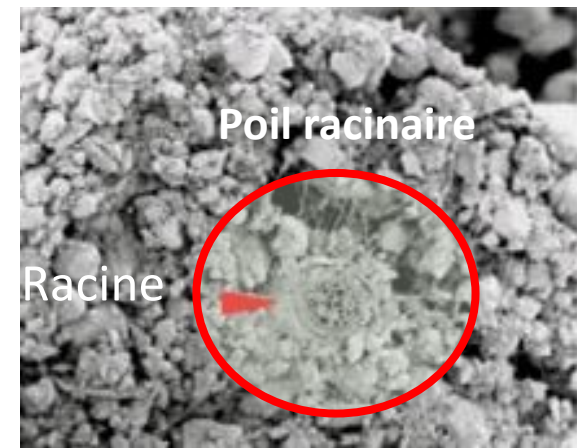
Mucilages racinaires

es

vores



naire



interactions
avec les
microorganismes

Un effet racines sur les propriétés hydriques:

Mythe ou réalité ? Quelques exemples sur la rétention

Type rotation	Effet	Temps/localisation
Rotations « prairie » - culture		
4 ans [2 ans bahia grass – arachide-coton, non irrigué] / 3 ans [arachide-coton-coton, irrigué]	<ul style="list-style-type: none">- 11-20 cm/an irrigation en moins années sèches (modèle)- Rendement sup. ou égal- Effet Prof. racinaire sur RU	~14 ans expé, Floride-USA (Dourte et al., 2016)
Alternance prairie (3-6 ans) / céréales (3 ans)	<ul style="list-style-type: none">- Augmentation 10-20% RU si alternance prairie céréale, sur 0-50 cm)- lié à augmentation CC (~10%)	~10 ans expé, SOERE ACBB-Lusignan (Cousin et Doussan, 2015)
Cultures de couverture		
Seigle-Maïs-Seigle-Soja / Maïs-Soja (sans labour)	<ul style="list-style-type: none">- Augmentation 20% RU, surtout liée à augmentation de la CC (~11%), sur 0-30 cm- Rendement équivalent- Effet visibles sur dynamique hydrique (7-8 ans)	~8-14 ans expé. , Indiana USA (Basche et al., 2016)
Effet locaux: Rhizosphère		
Maïs ou blé (conventionnel)	<ul style="list-style-type: none">- Augmentation de ~ 0.02 g/g PFP et 0-0.02 g/g de CC (suivant stade) dans sol rhizo / sol bulk- Lien entre EPS et transpiration plante	Annuel, Isère , Auvergne (Doussan, Bérard et al., 2016)
Tomate au champ (conventionnel)	<ul style="list-style-type: none">- différence de ~ 0.012 g/g de CC entre 2 variétés- Rendement plus élevé d'une variété/autre sous déficit hydrique	Annuel, Vaucluse (le Gall, Bérard, Doussan et al., 2020-2021)

NB: Il existe des effets temps (échelles de temps), variabilité suivant situation (type de sol, pédoclimat ...), réversibilité...

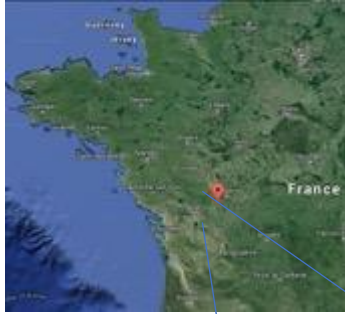


Rotations prairie /culture : au champ, long terme (10 ans)



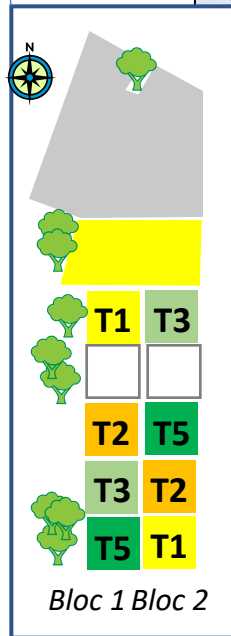
Céréales
prairie

Rotations prairie / culture : au champ, long terme (10 ans)



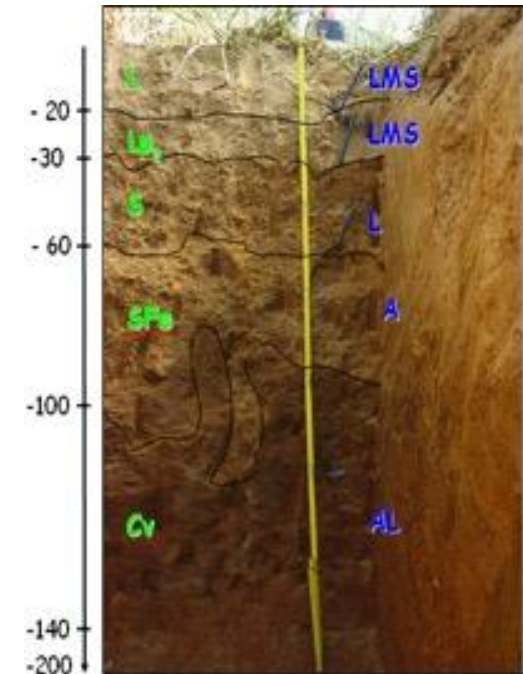
Comparaison de différents systèmes de culture : prairies permanentes ou céréales, rotation céréales/prairies (3/6 ans).

SOERE ACBB - Lusignan



- T1** Culture continue en céréales
- T2** Rotation: prairie 3 ans / céréales 3 ans
- T3** Rotation: prairie 6 ans / céréales 3 ans
- T5** Prairie permanente

Brunisol (sol argileux)



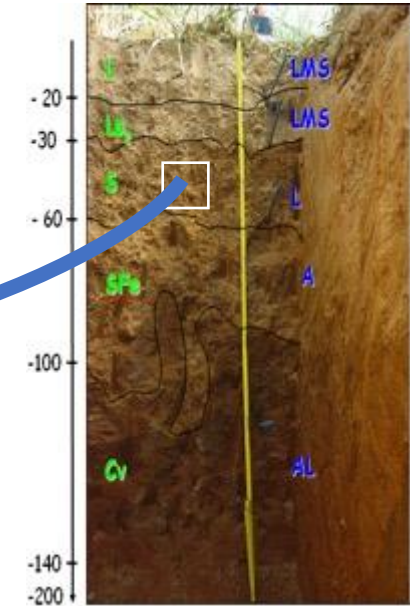
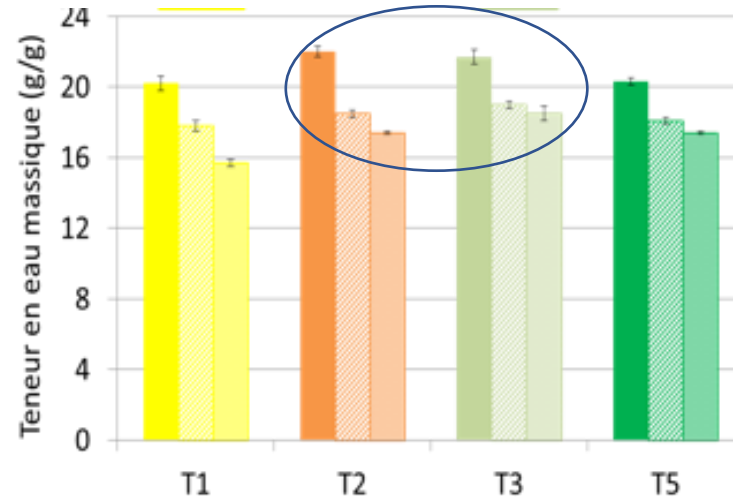
Rotations prairie / culture : un effet global sur le sol

Une variation de la capacité au champ suivant les rotations

- T1** Culture continue en céréales
- T2** Rotation: prairie 3 ans / céréales 3 ans
- T3** Rotation: prairie 6 ans / céréales 3 ans
- T5** Prairie permanente

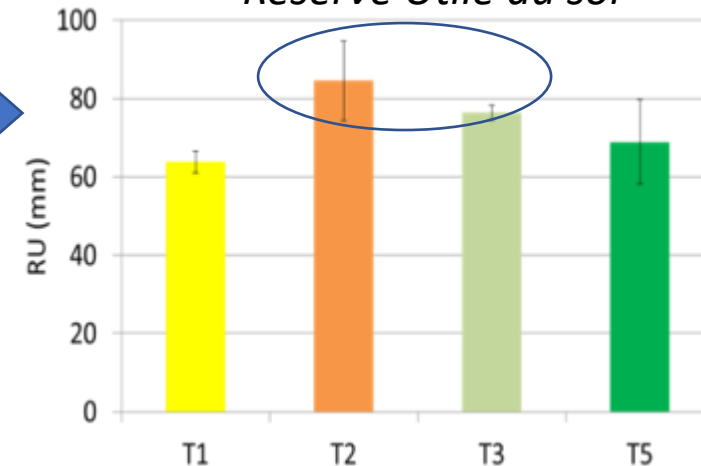
■ 0.1 ■ 0.3 ■ 0.5
Potential matriciel pour estimation Capa au champ(bar)

Rétention en eau à 0.1, 0.3 et 0.5 bars (capacité au champ)



Et une augmentation de la **Réserve Utile du sol** : augmentation significative pour le sol sous rotations par rapport à une culture permanente (prairie ou céréale)

Réserve Utile du sol



Effets locaux : au champ, la rhizosphère du maïs



Effets locaux



Sol influencé
par les racines:
rhizosphérique



Sol nu prélevé
entre 2 rangs:
"moyen"

Effets locaux



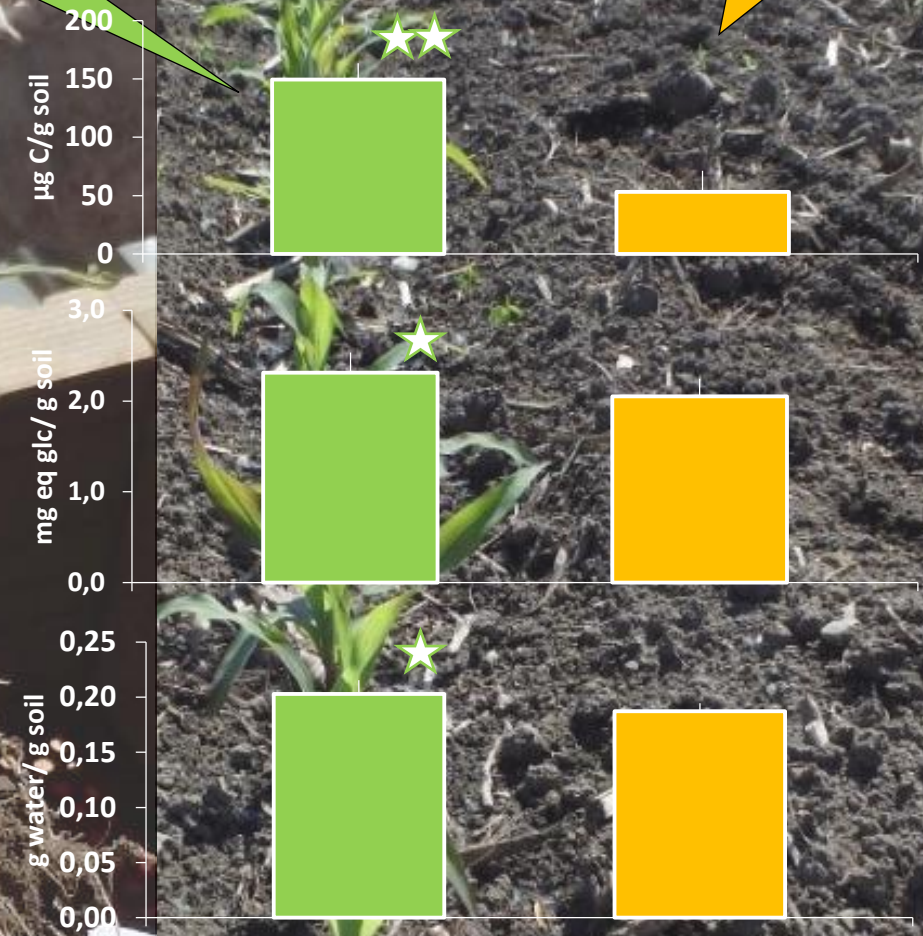
Biomasse microbienne plus élevée dans ce « hotspot biologique » qu'est la rhizosphère



Plus d'Exopolysaccharides dans la rhizosphère

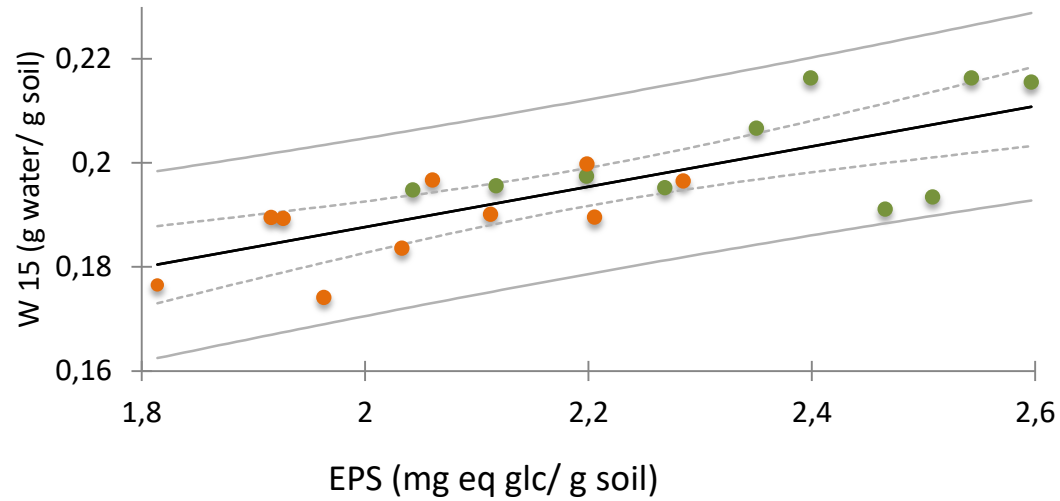


Rétention en eau (15 bars, point de flétrissement) plus élevée dans la rhizosphère

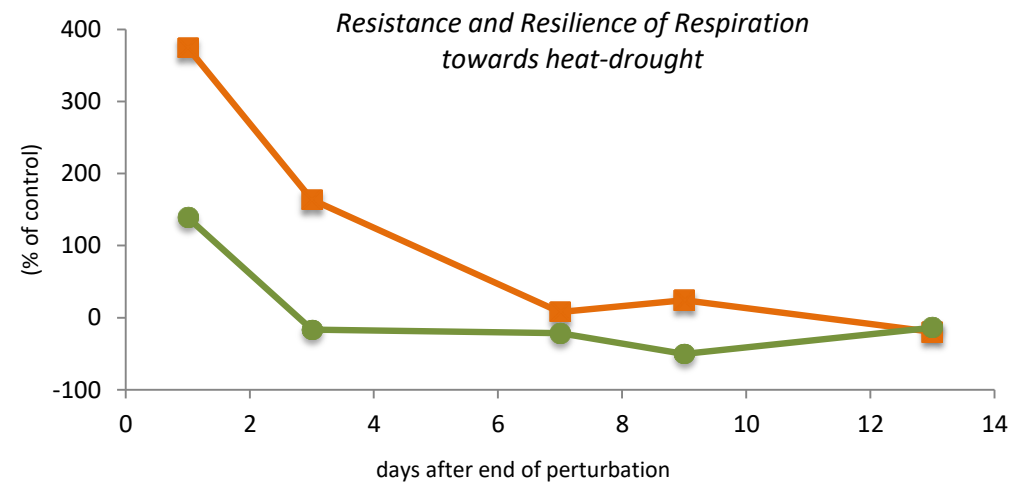


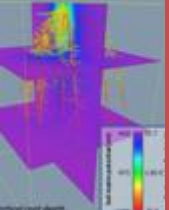
Effets locaux : la rhizosphère du maïs

la rétention en eau est en partie expliquée par les exopolysaccharides du sol et les activités microbiennes



dans la rhizosphère, les communautés microbiennes du sol ont une résistance plus élevée face à un stress climatique (appliqué de manière artificielle)





*Effets locaux : au champ, la rhizosphère du maïs
→ un effet sur les propriétés hydriques du sol
→ Et sur la réponse des microorganismes au stress de canicule*



Effets locaux et déficit hydrique: une expérimentation sur le blé



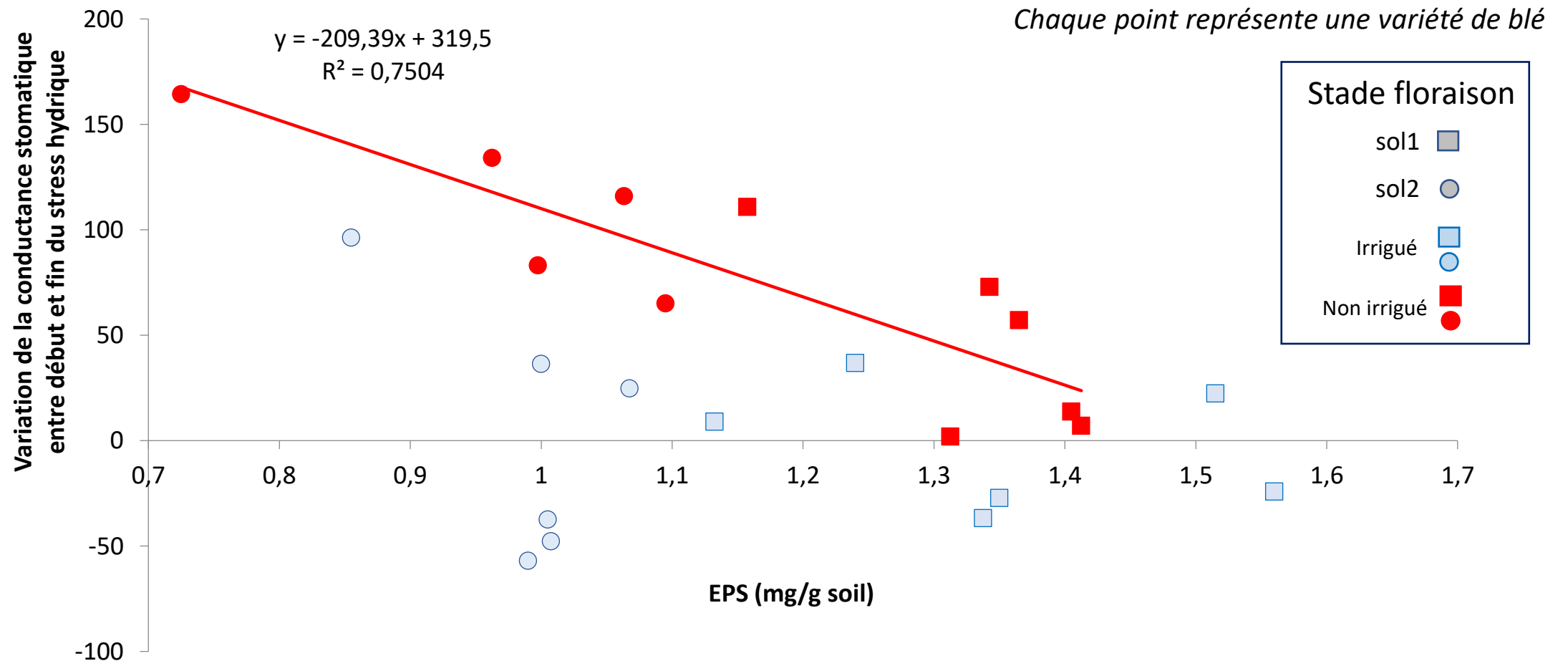
Mesure de la conductance stomatique

6 variétés de blé
2 conditions d'irrigation (stress hydrique et témoin)
2 sols étudiés

Les exopolysaccharides du sol dans la rhizosphère

réduisent la sensibilité des variétés de blé au déficit hydrique

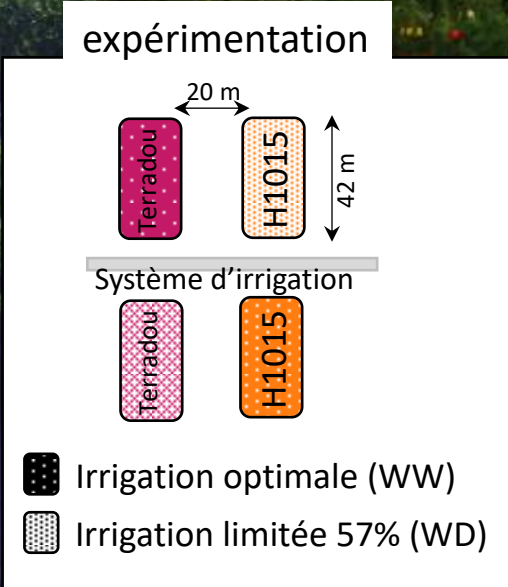
Relation entre la chute de transpiration au cours de la sécheresse et les exopolysaccharides de la rhizosphère



Effets locaux : au champ, la rhizosphère de variétés de tomates



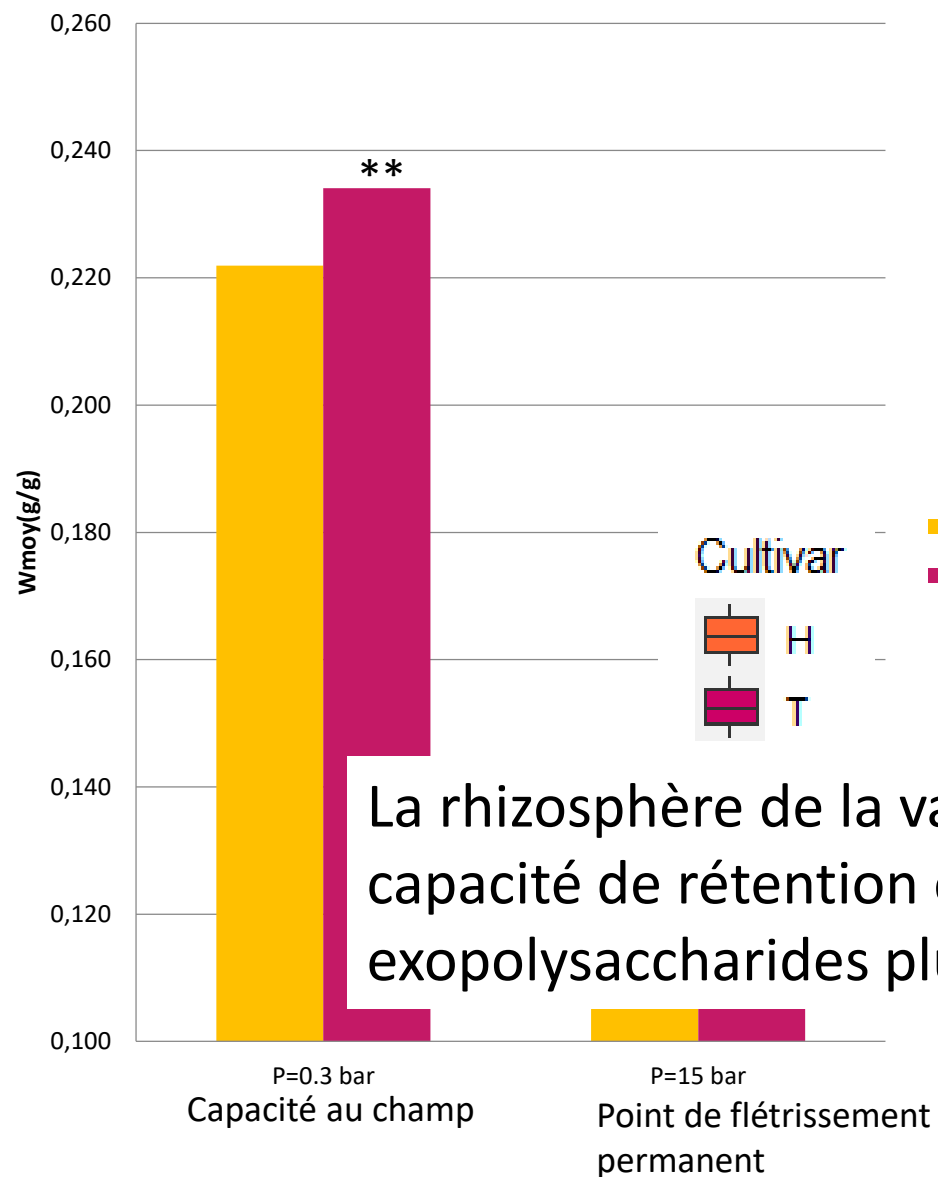
2 variétés de tomate
2 conditions d'irrigation



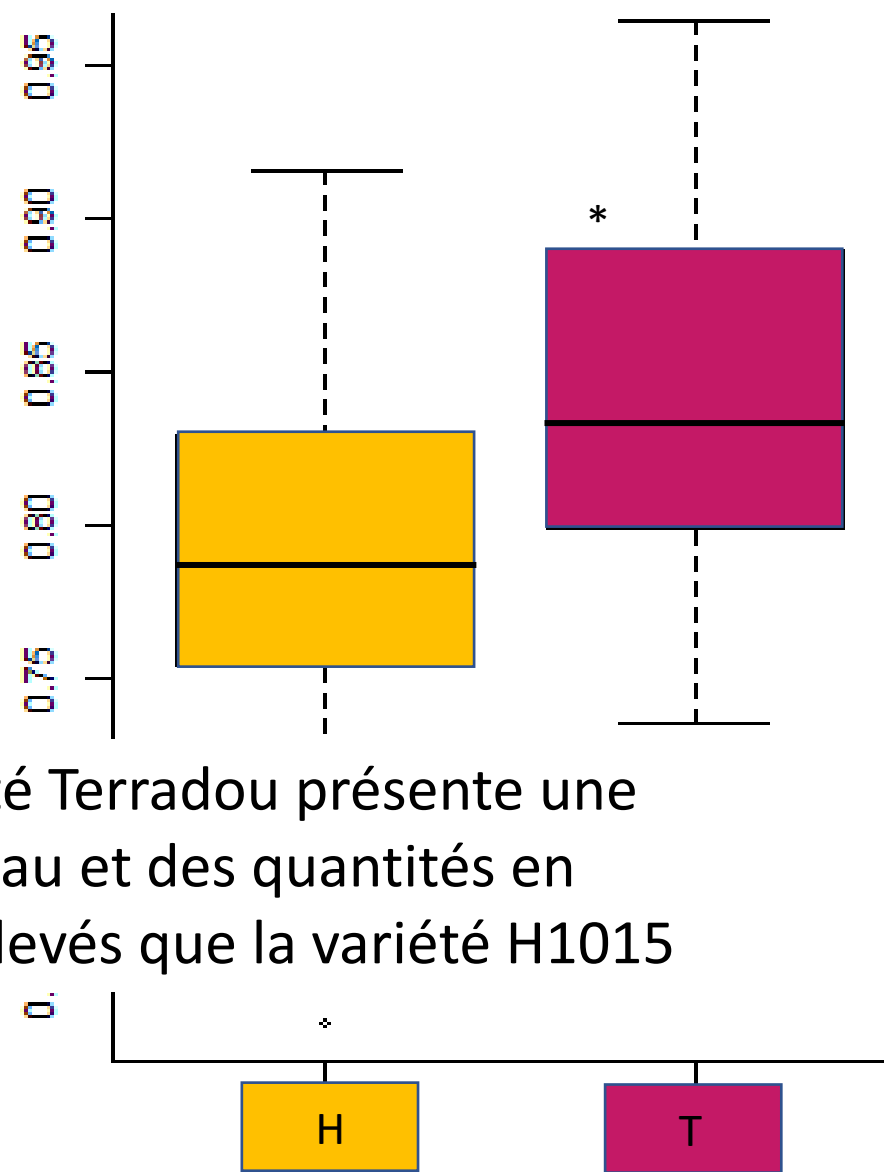
Propriétés du sol dans la rhizosphère



Rétention en eau

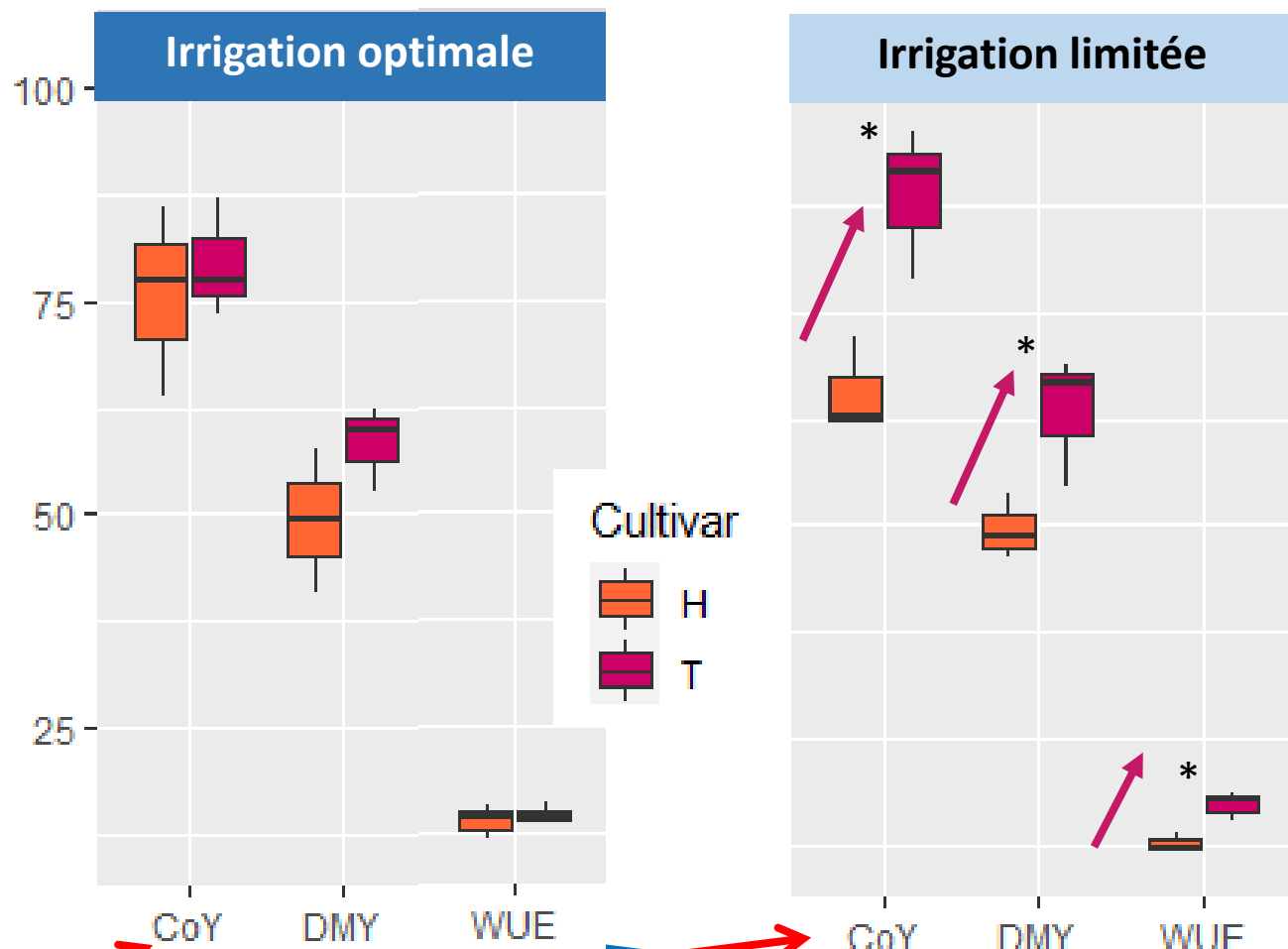


Exopolysaccharides du sol



La rhizosphère de la variété Terradou présente une capacité de rétention en eau et des quantités en exopolysaccharides plus élevées que la variété H1015

La plante répond au déficit hydrique selon ces propriétés du sol

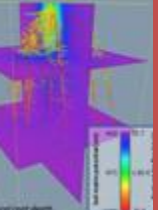


La variété Terradou est plus efficace en conditions de limitation en eau que la variété H1015

Rendement Commercial (t/ha)

Rendement en matière sèche (kg/ha)

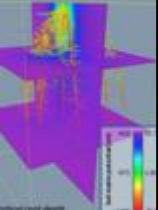
Efficacité d'utilisation de l'eau (kg/m³)



Effets locaux : au champ, la rhizosphère de variétés de tomates

- un “effet rhizosphère” sur les propriétés hydriques du sol*
- En partie expliqué par les activités microbiennes et les EPS du sol*
- Ces propriétés hydrophysiques, chimiques et microbiologiques sont différentes entre les rhizosphères des deux variétés de tomate*
- Et vont dans le même sens que la différence d’efficience d’utilisation de l’eau par ces variétés*

SYNTHESE

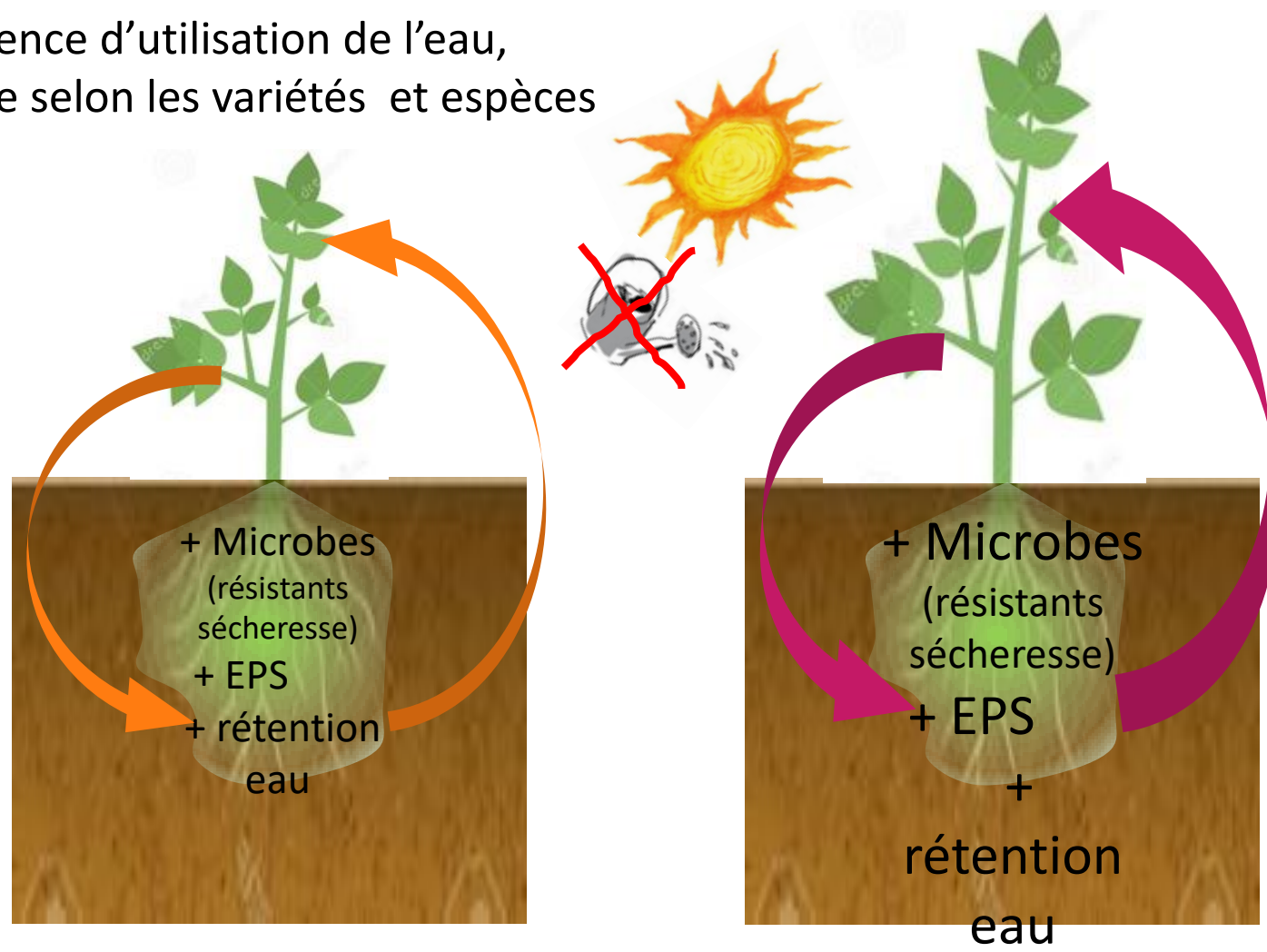


La plante : un « effet rhizosphère » ...

→ Variations des propriétés du sol liées à la plante (rhizosphère)

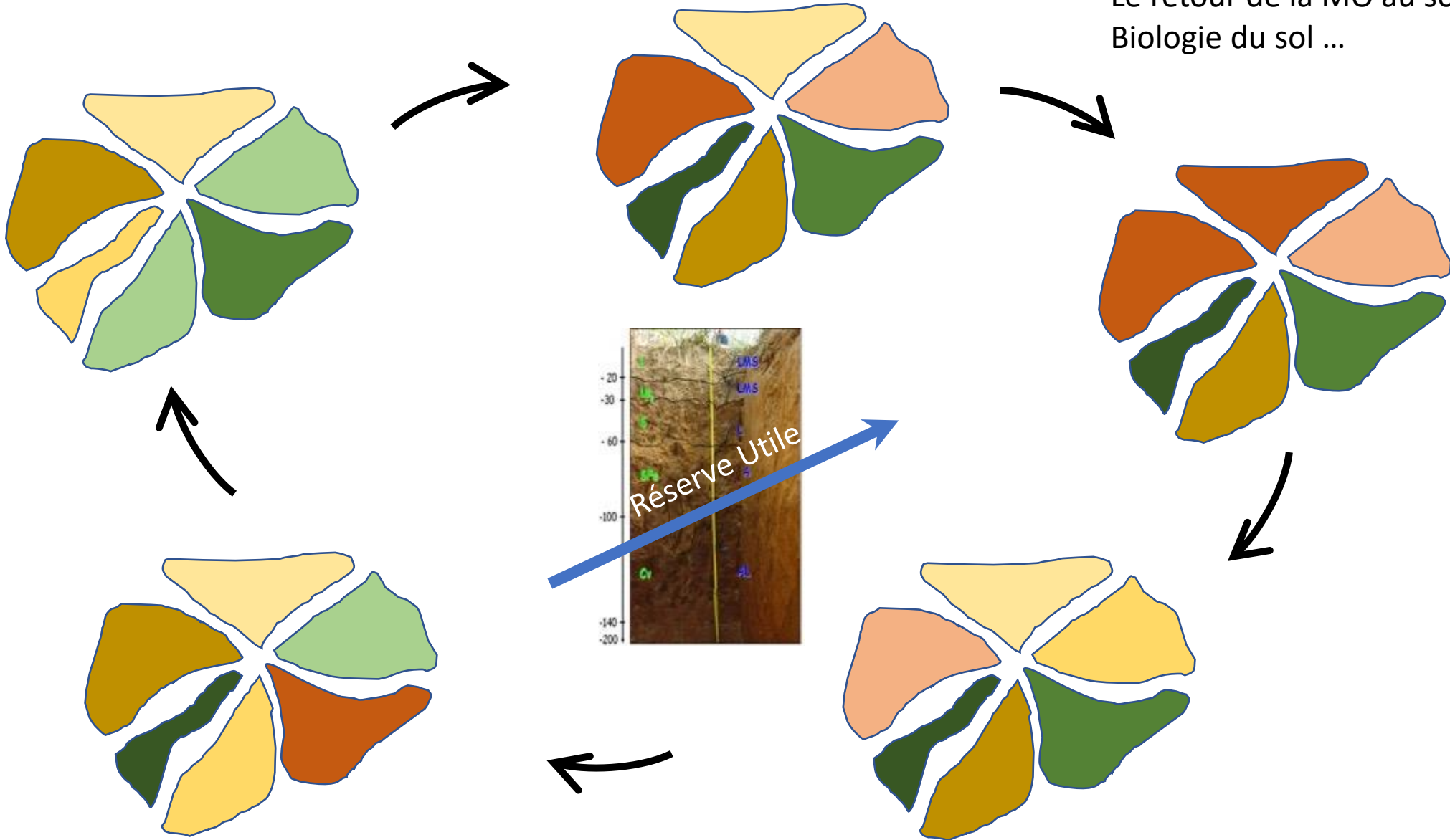
→ EPS, activités microbiennes → rétention en eau

➔ Conséquences possibles sur l'efficacité d'utilisation de l'eau,
... Mais variable selon les variétés et espèces

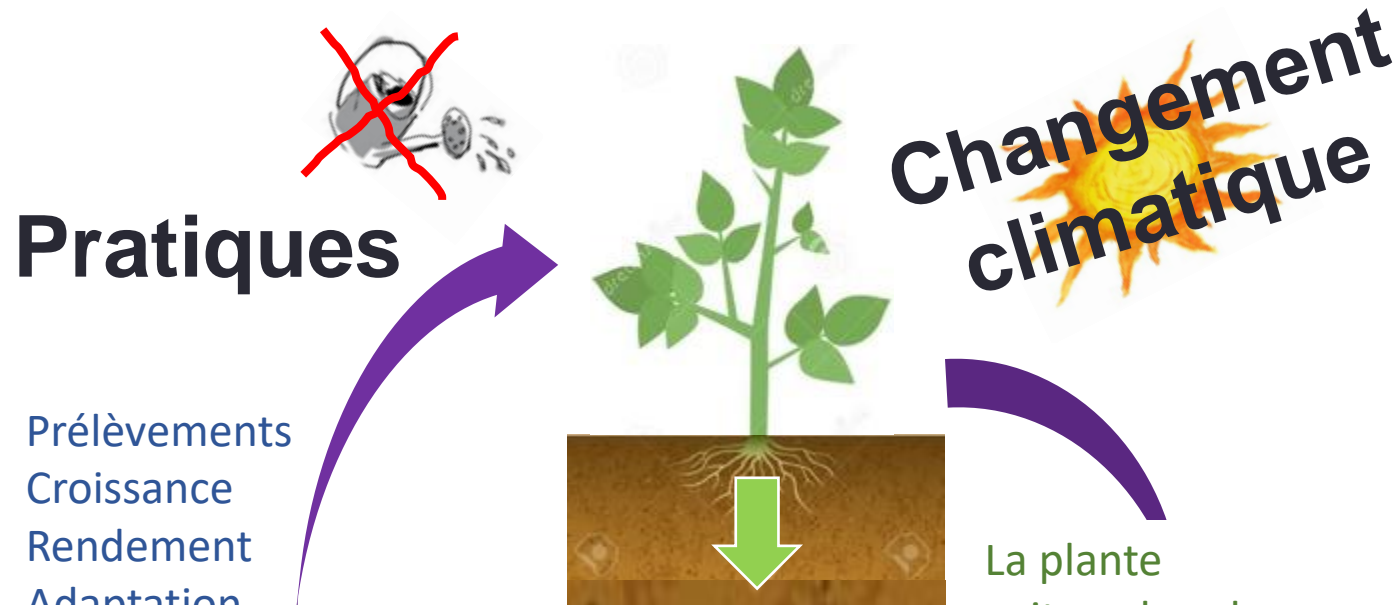


Les rotations modifient les propriétés hydriques du sol

En lien avec les racines Mais aussi
Le retour de la MO au sol ?
Biologie du sol ...



La plante et le sol interagissent dans la rhizosphère



***Une Solution Fondée sur la Nature :
Utilisons les racines pour améliorer
la gestion de l'eau
Dans les agrosystèmes!***

La plante et le sol interagissent dans la rhizosphère



ndement

*Des questions, des recherches,
de l'ingéniérie à approfondir :*

i) Echelle de la plante

- *Quels résultats avec des sols différents ?*
- *Caractériser les « traits rhizosphériques » d'espèces agricoles variées → phénotypage ?*

rhizosphere





*Des questions, des recherches,
de l'ingéniérie à approfondir:
ii) Echelle des systèmes de cultures*

→ Pouvons nous préparer le sol (à travers le système racinaire et sa rhizosphère) par la diversification des cultures ? (agroforesterie, agriculture de conservation, mélanges et cultures intermédiaires...)



Merci !



Annette Bérard et Claude Doussan

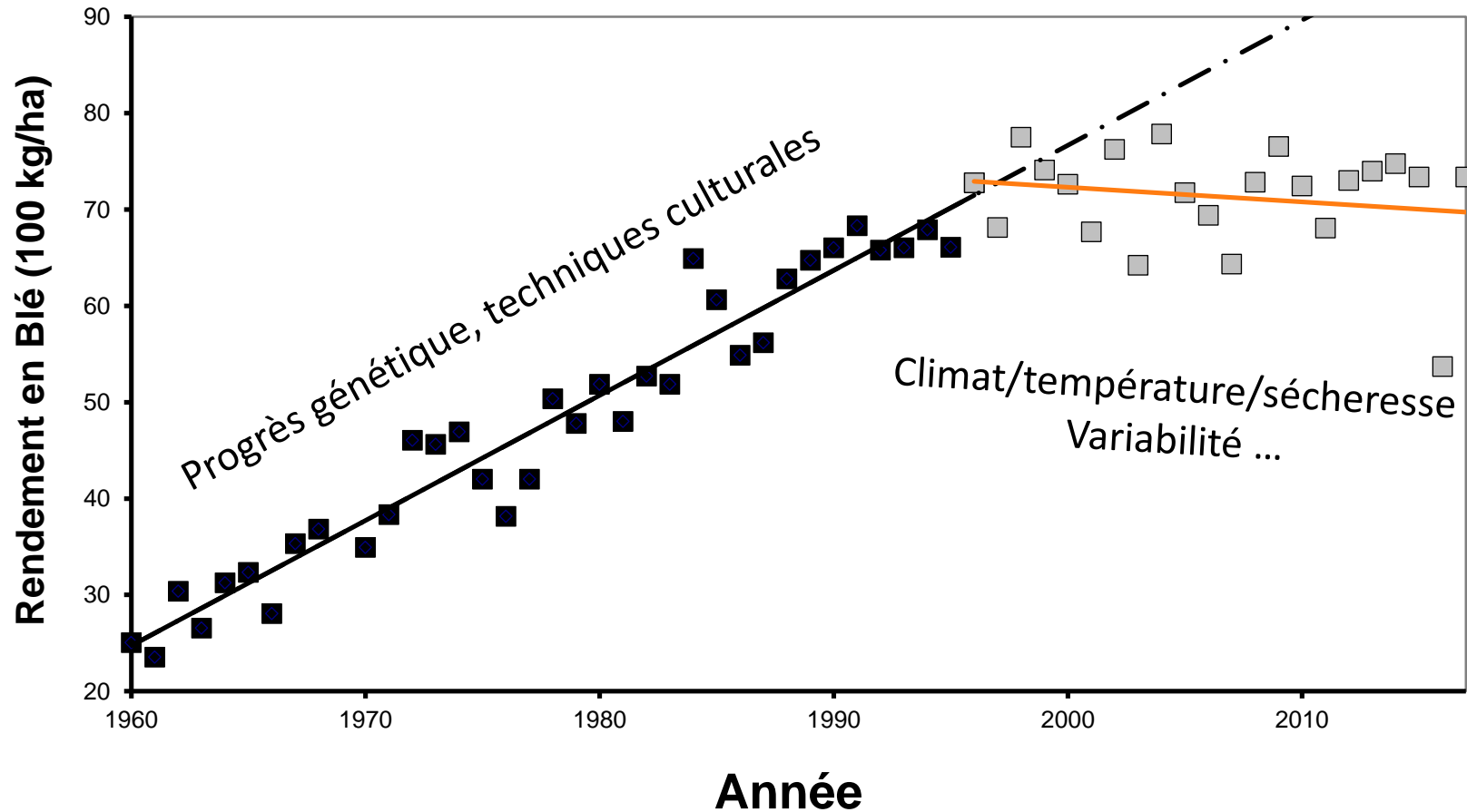
Diapos supp

Enjeux et Contexte



Changement Climatique / eau et agriculture → rendements en baisse ...

Evolution des rendements de blé en France sur la période 1960-2017



Racines et propriétés physiques / hydriques du sol

Les système racinaires => « travail du sol en profondeur » : du m à la dizaine de mètres de profondeur...!

Avec des actions directes sur le sol :

- Perforation du sol par les racines et création d'une porosité +/- continue

Et des actions indirectes :

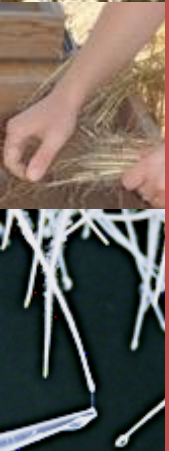
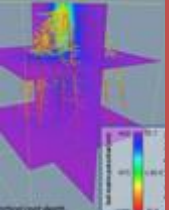
- Effets hydrique: Humectation / dessiccation du sol suite prélèvement eau
- Effets carbone : Exsudation-Rhizodépot / processus rhizosphériques / Polymères (EPS) spécifiques: hydro-rétenteurs et hydrophobes

Avec des conséquences sur :

- ⇒ Décompaction du sol: accès au sous-sol des racines (Yunusa, 2003; Lesturgez et al., 2004...)
- ⇒ Agrégation/structuration du sol (Kohler-Milleret et al., 2014; De Leon-Gonzalez et al., 2007....)
- ⇒ Modification du système de pores :
 - pores de transmission/aération : macro-porosité (Meek et al., 1992; Yunusa et al., 2002...)
 - pores de stockages : mésoporosité (Bodner et al., 2014; Villamil et al., 2006...)

↳ Racines ↔ Potentialité de modification propriétés hydriques sol (rétention, $K(h)$, hydrophobicité)

↳ Forte interactions avec les pratiques / système de culture (effets type plante, C et eau)



Quelques exemples



Système de culture	Pratiques influençant des effets racines	facteurs
+ / - conventionnel	Travail du sol: - Labour conventionnel - Réduit ou non travail	C / eau
	Fertilisation minérale /organique	C
	- Plantes de couverture ou service - Jachère	C / perforation
	Types de rotations (+/- longues, e.g. prairies/culture)	C / eau / perforation
+/- en rupture	Cultures en mélange	
	Agroforesterie : apports des ligneux	Perforation, C litière...
	Utiliser un « priming effect » racinaire: préparer le sol avec plante spécifique avant culture	C / eau/ perforation...

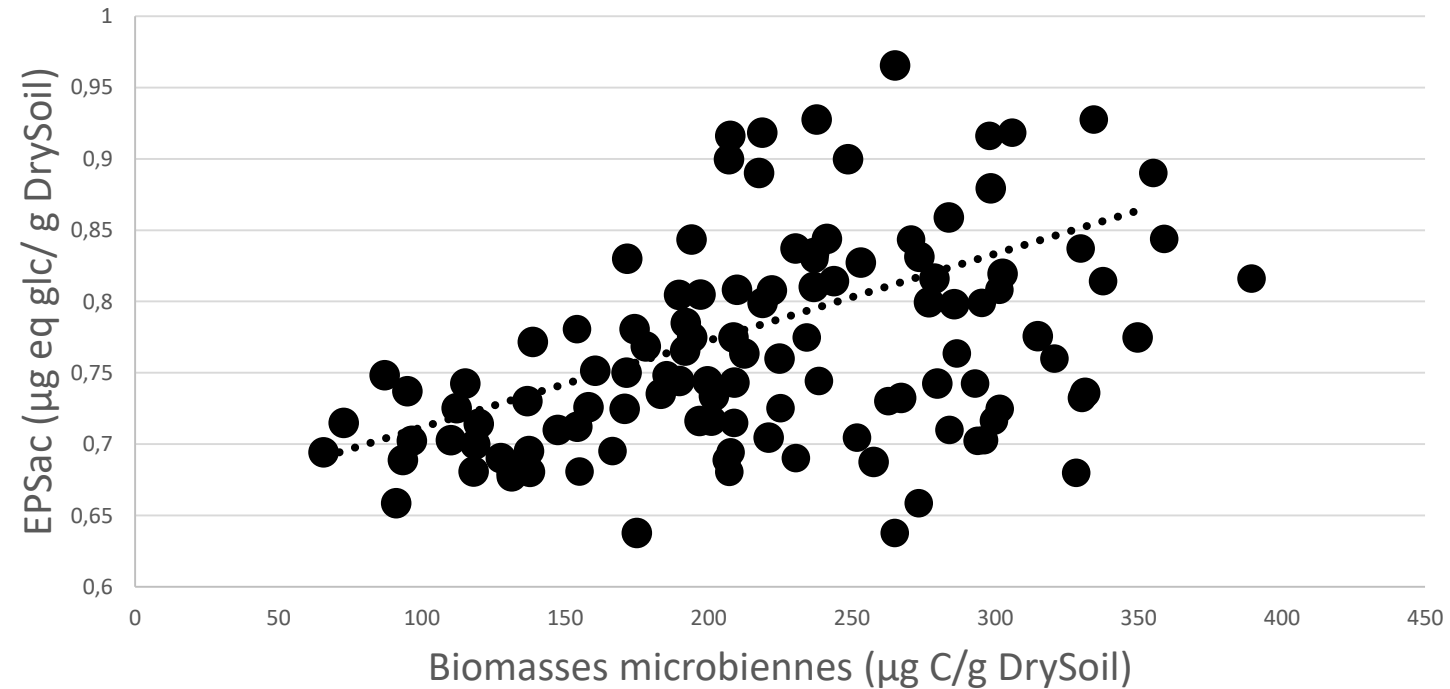
De l'utilisation d'un contexte à des approches spécifiques d'utilisation des racines





Les biomasses microbiennes (en particulier les champignons) sont liées aux exopolysaccharides du sol

Leurs activités (en particulier celles des champignons) se différencient selon la variété de tomate et la limitation en eau



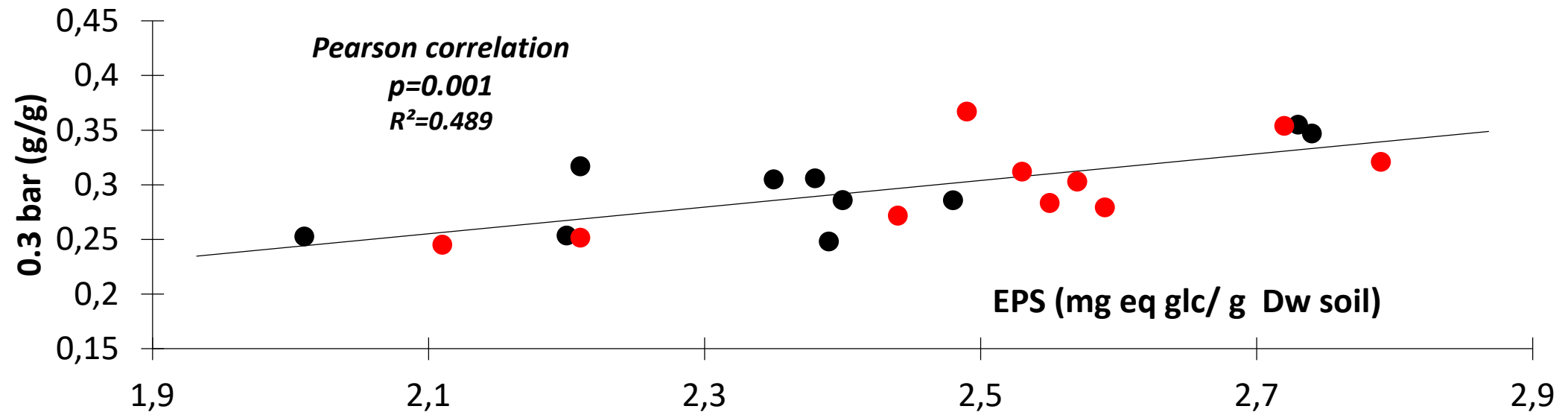
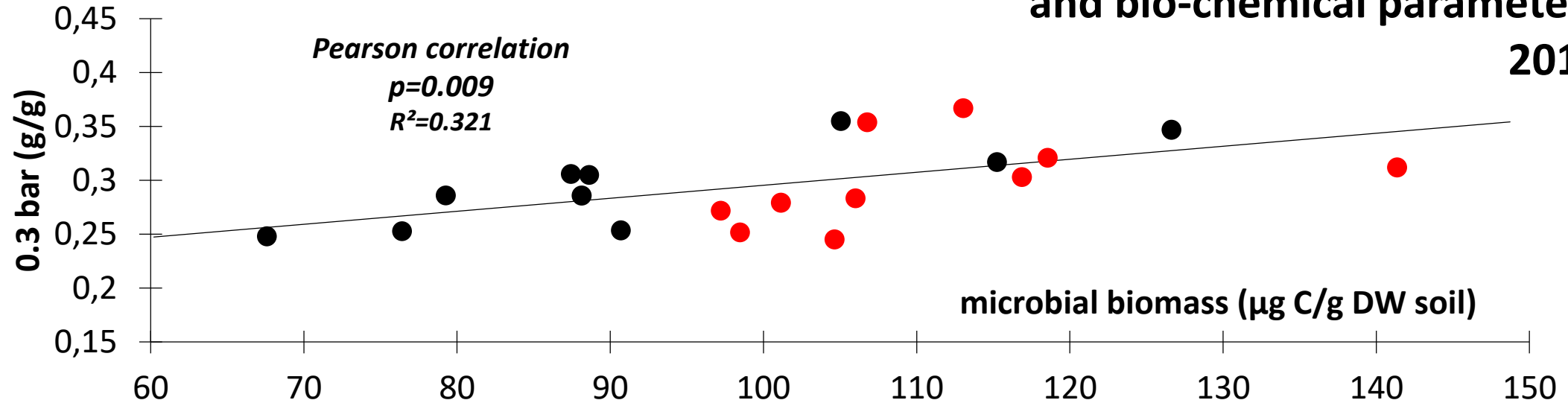
La quantité d'exopolysaccharides du sol, ainsi que l'activité des microorganismes (champignons en particulier) expliquent une partie des mesures de rétention d'eau du sol.

... la piste des mycorhizes est à creuser

Azodure 2016: La plante a un effet sur les propriétés hydriques du sol

En rouge: inoculés

Pearson correlations between WR-0.3 bar and bio-chemical parameters 2016



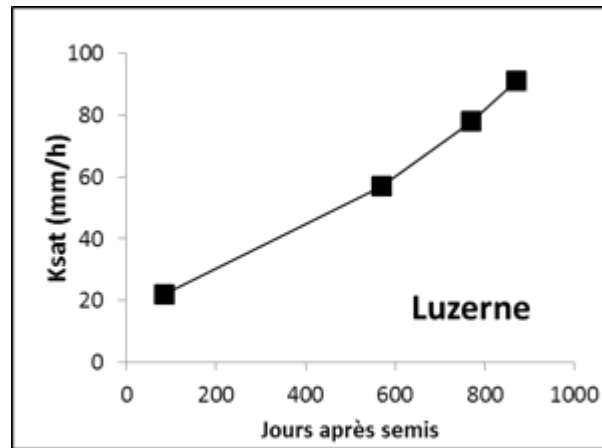
Un profil de CR ?

⇒ « Primer-plant » concept (Yuanusa, 2003) et effet du temps / pérennité effets

Un priming effect des racines sur propriétés sol (remediation compaction, amelioration strcuture pore stockage/transmission)...

Vers une vision
système

Conductivité hydraulique ~ saturation



(D'après Meek et al., 1992, SSSAJ)



⇒ Augmentation de la capacité au champ si alternances prairie/grande culture ... (Cousin, Doussan, 2013, Pari scientifique EA)



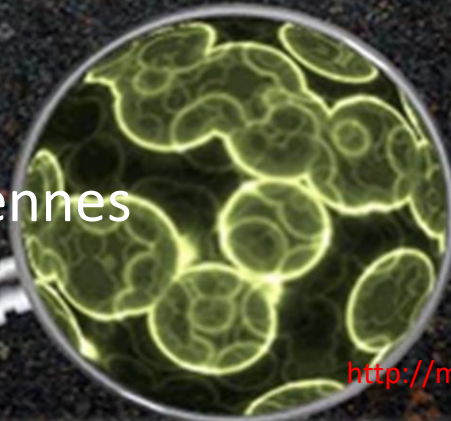
La microBIOLOGIE du SOL

- Une biodiversité sous estimée

bactéries, archaebactéries et champignons

Dans 1 gramme de sol :

- Plus d'un milliard de bactéries
- Plus de 10 000 espèces bactériennes



La microBIOLOGIE du SOL

- **Quels rôles pour la plante ?**

Décomposition des Matières Organiques
Recyclage et solubilisation des nutriments
Fixation atmosphérique de l'azote
Fourniture de substances organiques complexes

... Mais aussi ... l'approvisionnement en eau

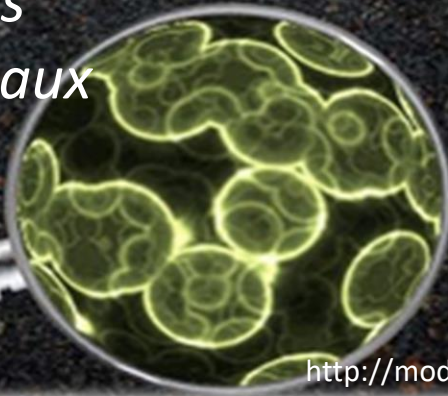
*« Aggrégations » microbiennes
« Pontages » fongiques*

La microBIOLOGIE du SOL

- Des « points chauds »
et des « moments chauds »

bactéries, archaebactéries et champignons

Ces microorganismes vivent dans des « niches » et réagissent rapidement aux changements du milieu



<http://modernfarmer.com/>



mycorrhiziens

modernfarmer.com/

Sécheresse caniculaire

indirects

Changements des habitats microbiens

directs

Impacts au niveau cellulaire adaptations/mort

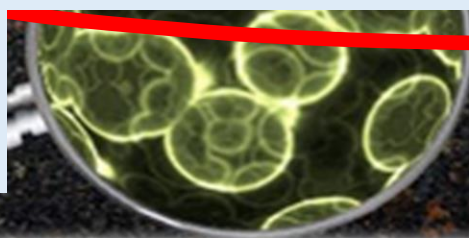
Sélection des communautés microbiennes
perte de biodiversité
Résistance?
Résilience?

Fonctions microbiennes impactées

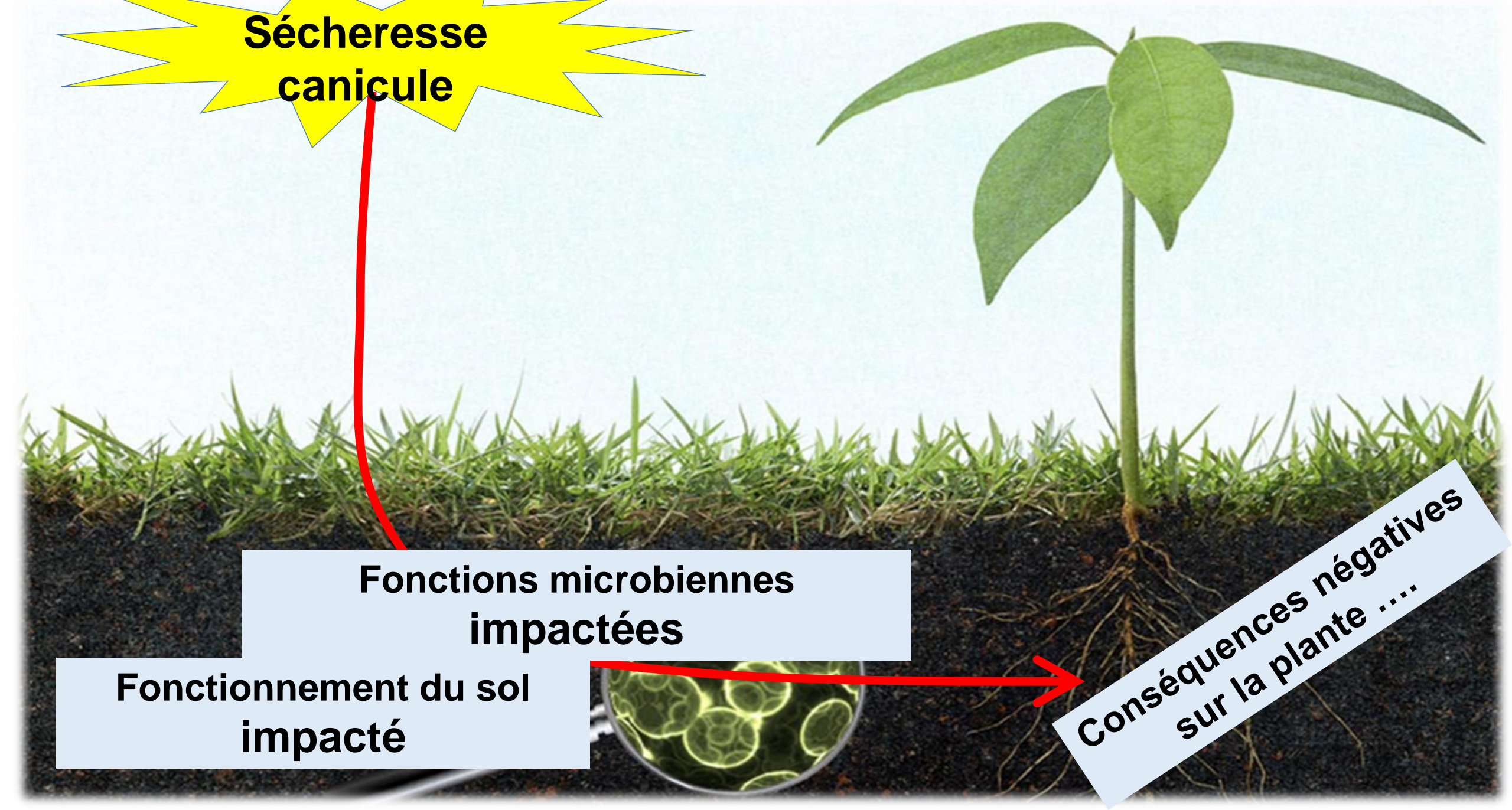
**Sécheresse
canicule**

**Fonctions microbiennes
impactées**

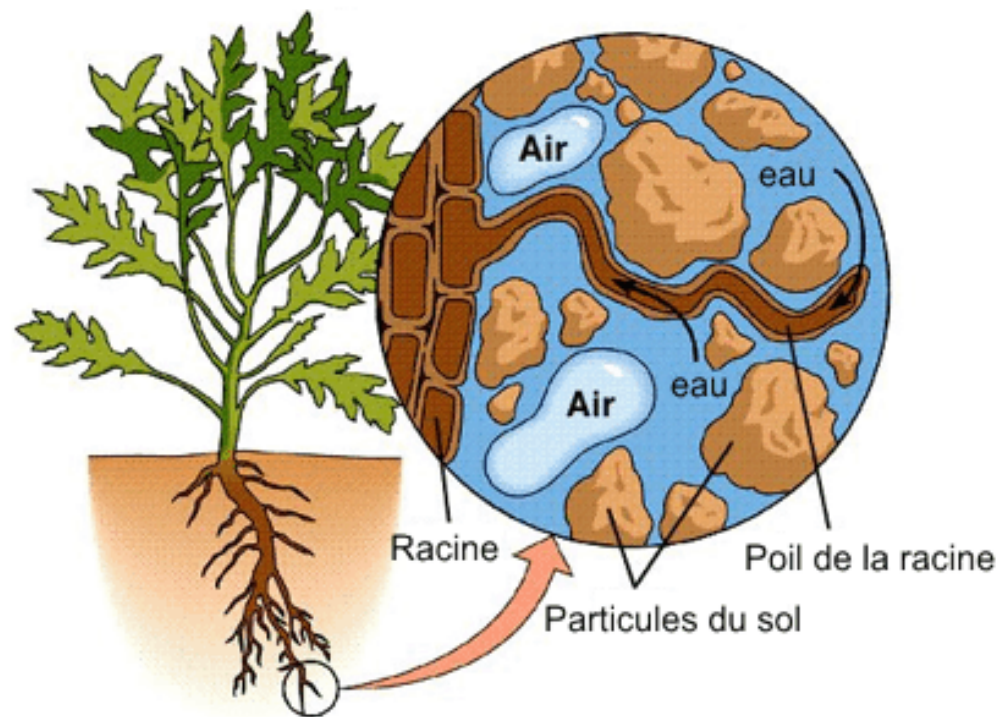
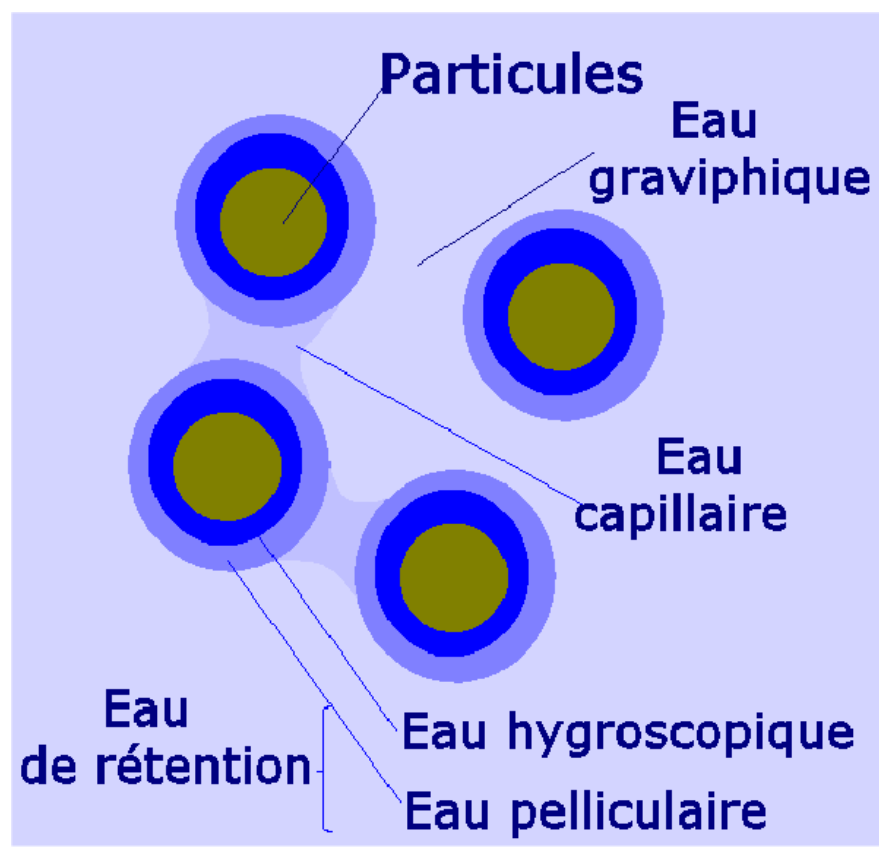
**Fonctionnement du sol
impacté**



**Conséquences négatives
sur la plante**



La rétention en eau du sol



Et à l'étranger ?

Il existe déjà quelques tentatives:

UK:

INVITED COMMENTARY



HYDROLOGICAL PROCESSES

Hydrol. Process. **21**, 2217–2221 (2007)

Published online 23 May 2007 in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com). DOI: 10.1002/hyp.6780

Genetically modified hydrographs: what can grass genetics do for temperate catchment hydrology?

« Can advances in molecular genetics really offer potential to change the timing and shape of a hydrograph? »

C. J. A. Macleod,^{1*}
A. Binley,² S. L. Hawkins,³
M. W. Humphreys,³
L. B. Turner,³
W. R. Whalley⁴ and
P. M. Haygarth¹



Rothamsted

A novel grass hybrid to reduce flood generation in temperate regions



Christopher (Kit) J. A. Macleod^{1,2}, Mike W. Humphreys³, W. Richard Whalley⁴, Lesley Turner³, Andrew Binley⁵, Chris W. Watts⁴, Leif Skøt³, Adrian Joyner¹, Sarah Hawkins³, Ian P. King^{3,6}, Sally O'Donovan³ & Phil M. Haygarth⁵

2013

Year	D																																
	2008																2009																
DeY	4	8	9	10	12	14	30	31	35	60	69	70	74	280	293	295	299	313	313	317	322	327	336	338	347	7	8	12	13	15	25	52	59
Event	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
Lm	56.5	70.9	52.6	85.9	76.9	68.4	63.5	64.7	70.9	3.7	57.7	37.6	46.4	53.6	31.8	25.3	27.3	39.8	56.0	38.8	41.0	28.3	34.0	59.8	58.3	35.3	51.4	42.2	48.9	31.7	25.1	13.4	25.0
Fa	58.2	69.0	54.2	98.9	79.2	78.4	72.1	67.1	72.5	17.0	59.8	35.3	40.6	43.1	37.3	33.4	41.6	57.4	85.2	60.7	56.5	51.2	63.9	73.8	75.9	53.8	67.0	56.0	68.5	54.6	54.8	39.0	54.9
Lm x Fa	48.2	52.2	37.3	64.4	32.3	66.5	53.3	42.2	41.8	7.7	62.8	53.5	50.0	30.7	30.4	19.9	27.6	45.2	62.0	30.2	37.9	32.0	36.7	61.0	61.1	47.8	66.4	53.3	70.6	52.4	39.3	38.3	59.8
Lp	62.7	75.3	57.0	85.9	84.0	79.9	77.4	73.7	85.4	21.1	60.5	63.6	53.6	49.2	37.5	49.9	32.7	60.5	79.0	52.9	50.6	42.0	50.6	79.0	75.2	52.5	70.8	57.5	75.3	53.6	49.9	36.4	58.2
Fp	43.7	74.5	52.3	82.6	65.3	78.3	63.1	72.4	68.3	10.3	65.0	48.9	54.3	44.2	36.0	32.1	36.9	51.6	68.1	37.2	24.8	27.5	35.8	66.1	69.5	49.5	66.2	51.2	67.5	56.0	42.4	28.7	57.3
Lp x Fp	22.9	23.5	26.5	58.0	29.4	49.0	32.4	34.2	31.9	0.9	52.0	34.0	27.3	23.0	19.0	2.1	12.1	34.5	46.9	5.2	3.8	15.5	24.1	43.0	52.5	39.0	49.9	24.0	46.5	48.4	24.4	13.7	46.1



Festulolium