

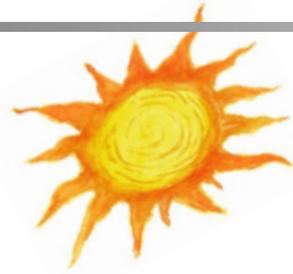
les SFN en réponse aux sécheresses  
en contextes agricoles,  
regards scientifiques  
« l'Effet rhizosphérique »

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*

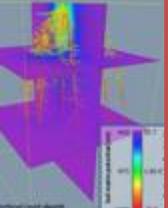
↗ Infiltration      ↘ Ruissèlement / Erosion

↗ 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*

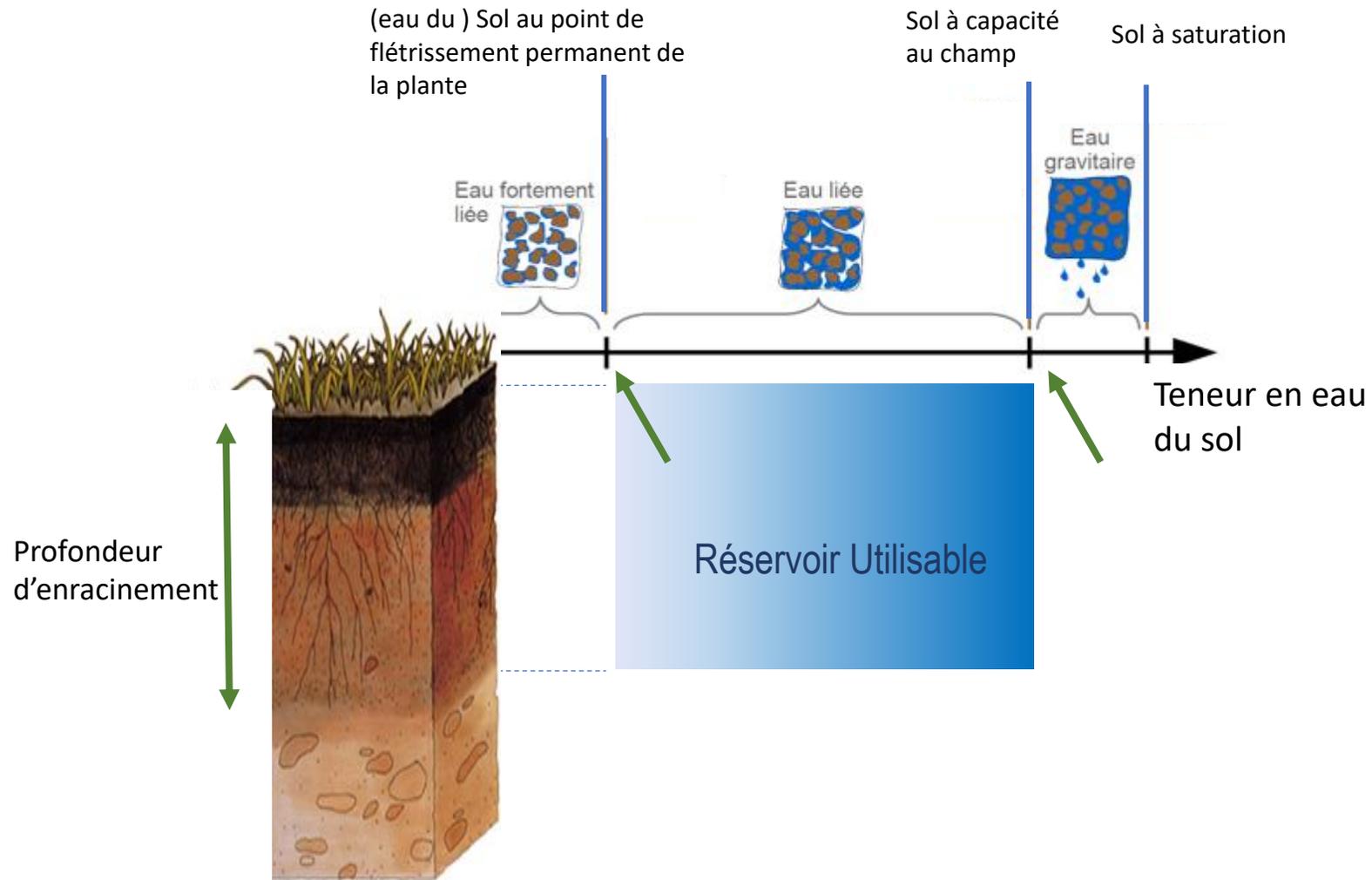
*(suivant type sol, type Carbone Org , temps)*



# 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)



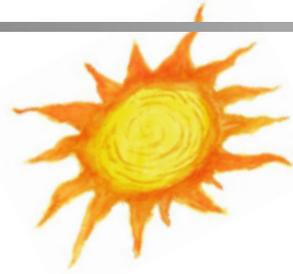
# Enjeux et Contexte

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 ?**

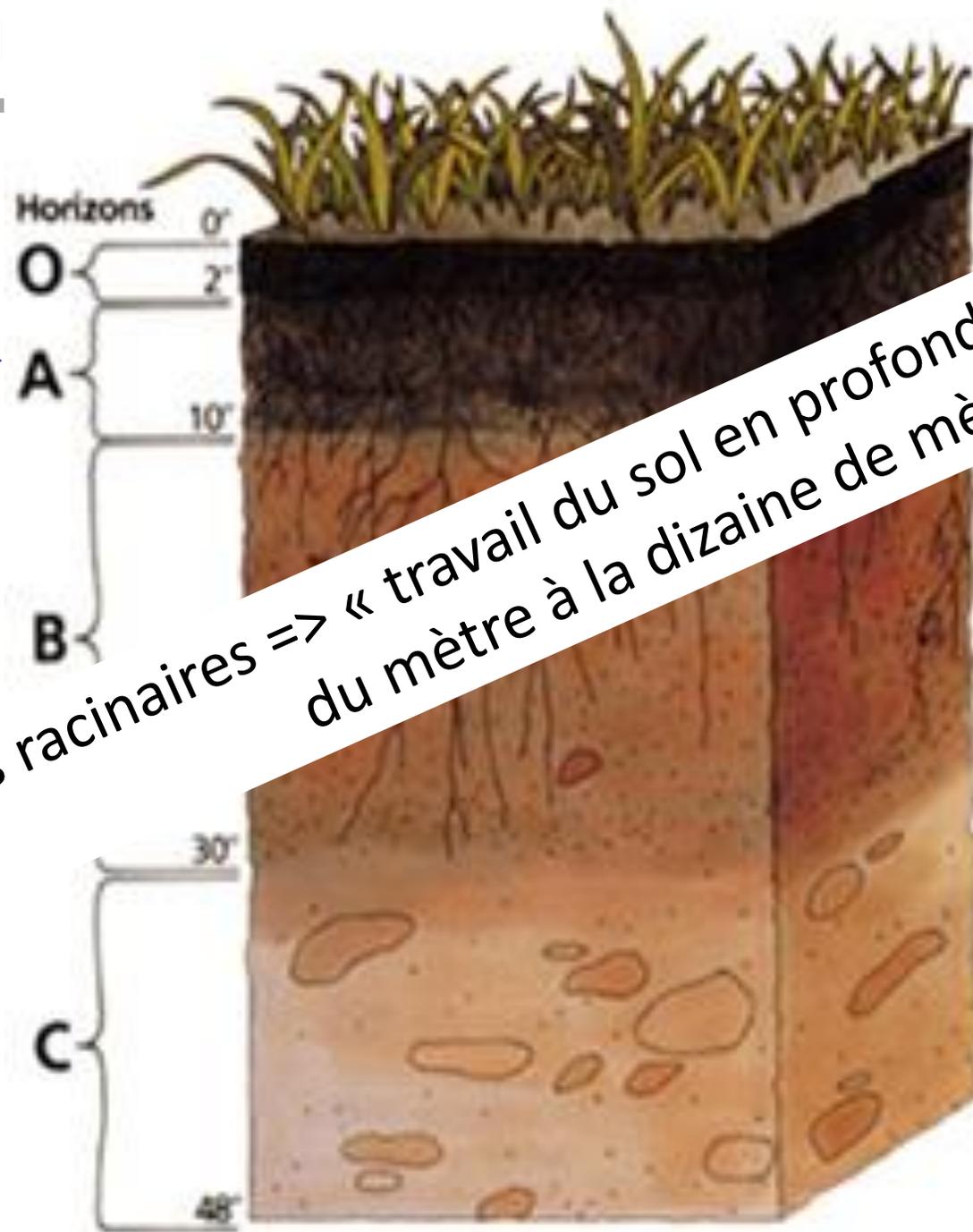


# La plante et le sol



Prélèvements  
Croissance  
Rendement  
Adaptation  
au déficit hydrique

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



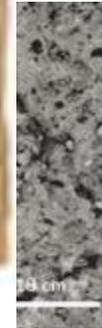
Actions indirectes  
→ « effets indirects »



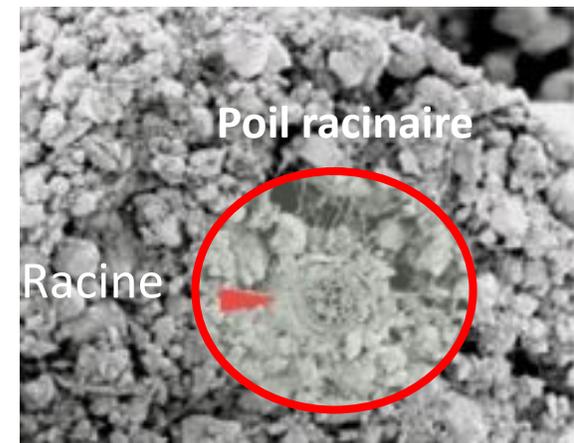
Mucilages racinaires

es

vores

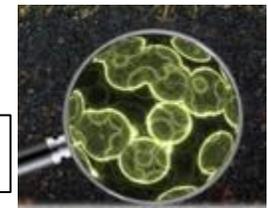


naire



Racine

Poil racinaire



interactions  
avec les  
microorganismes

# Un effet racines sur les propriétés hydriques:

## Mythe ou réalité ? Quelques exemples sur la rétention

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

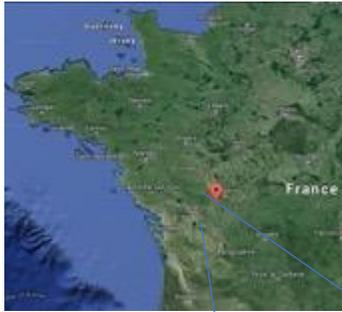


# *Rotations prairie /culture : au champ, long terme (10 ans)*



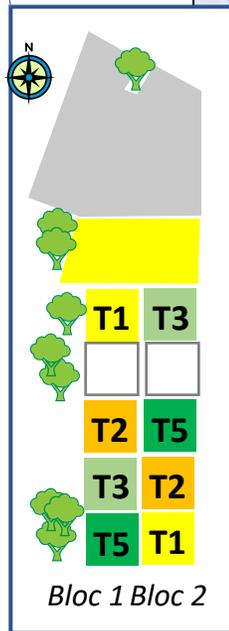
Céréales  
prairie

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



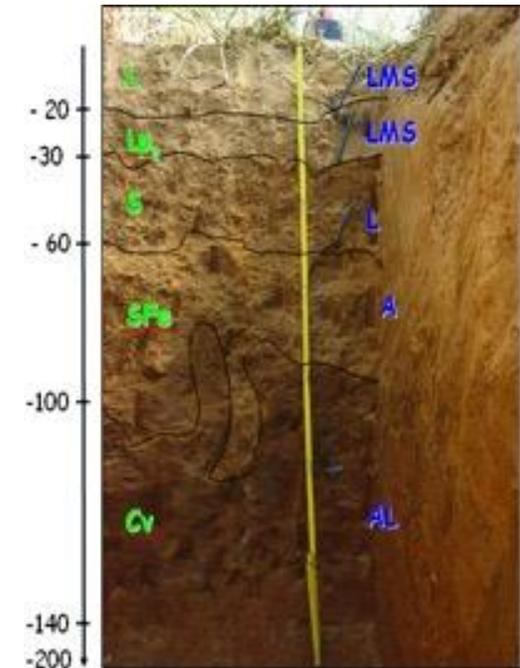
Comparaison de différents systèmes de culture : prairies permanentes ou céréales, rotation céréales/prairies (3/6 ans).

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)



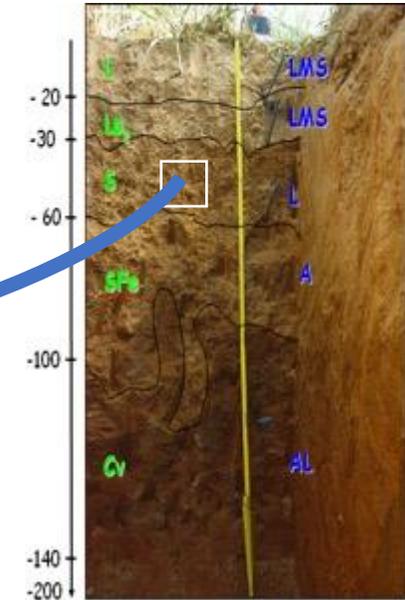
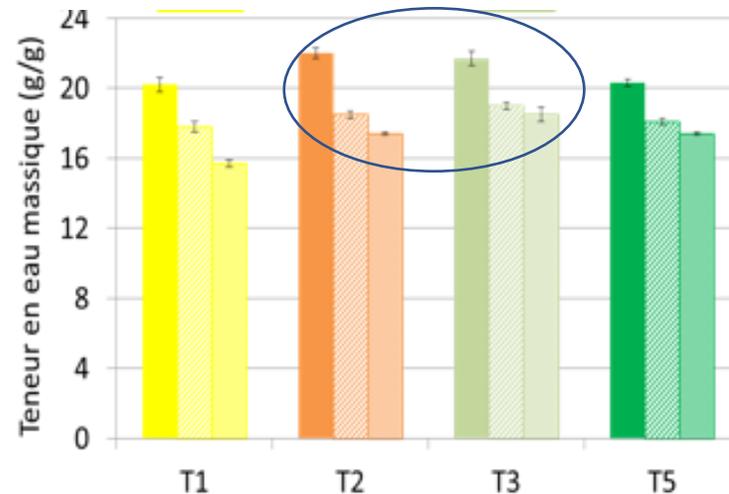
# Rotations prairie / culture : un effet global sur le sol

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

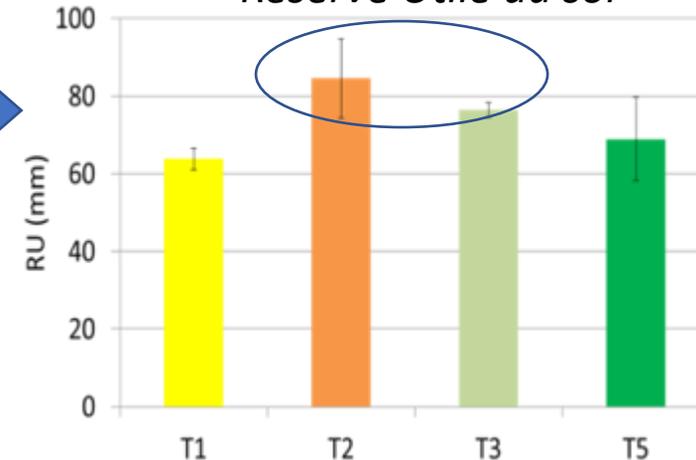
■ 0.1    ■ 0.3    ■ 0.5  
Potential matriciel pour estimation    Capa au champ(bar)

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



Sol Rhizosphérique

Sol "moyen"

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

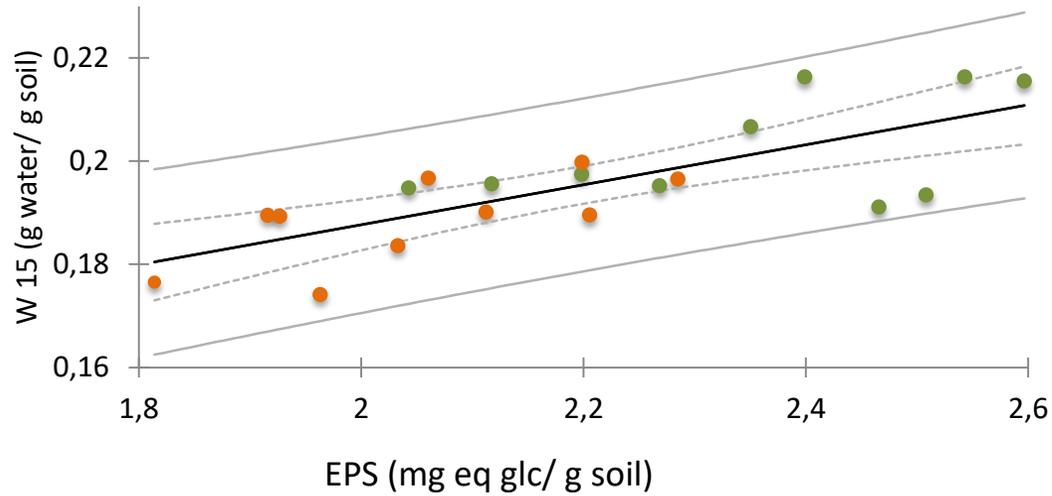
Plus d'Exopolysaccharides dans la rhizosphère

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

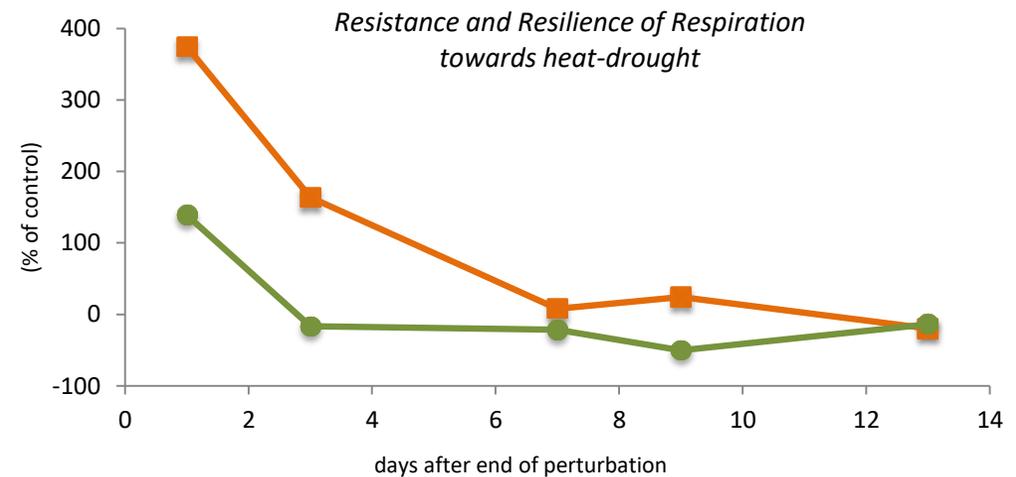


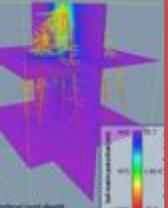
# Effets locaux : la rhizosphère du maïs

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*



(Doussan, Bérard et al., 2016)

Mais

# Effets locaux et déficit hydrique: une expérimentation sur le blé



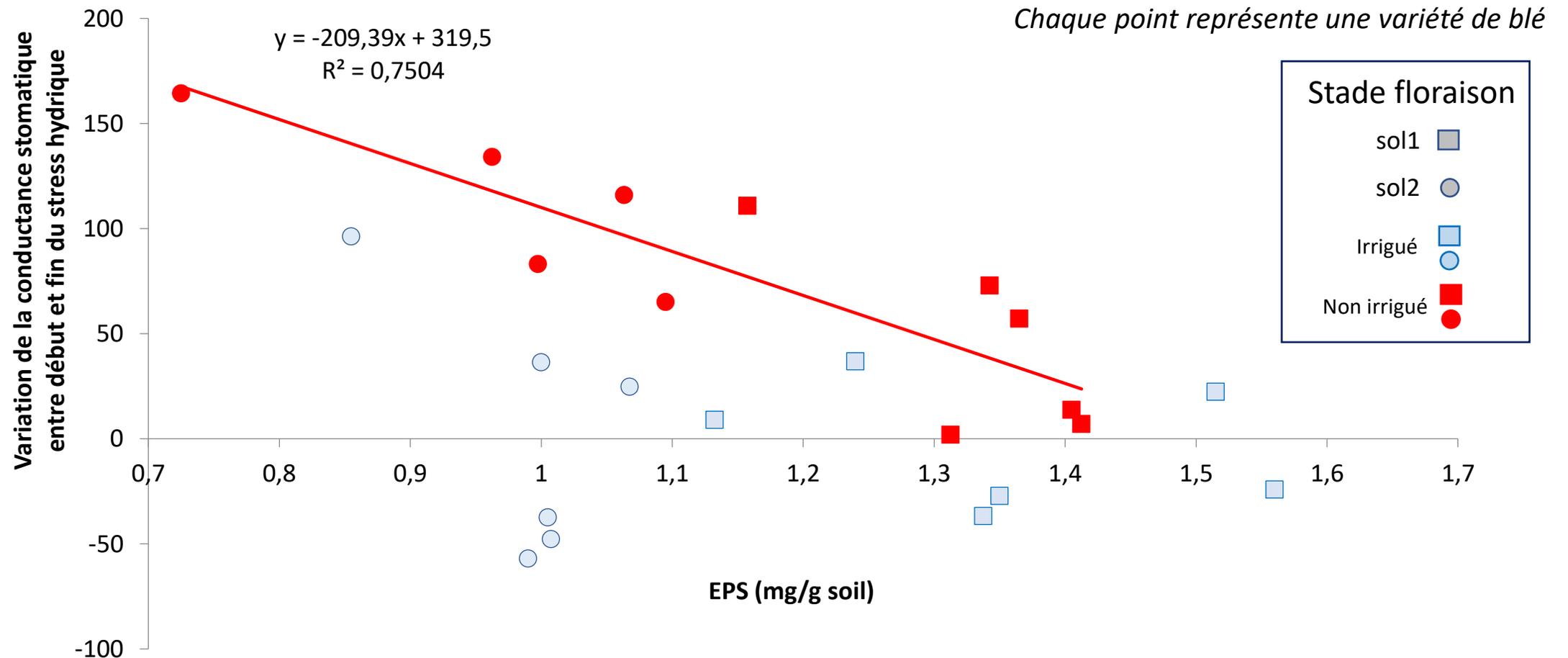
Mesure de la conductance stomatique

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

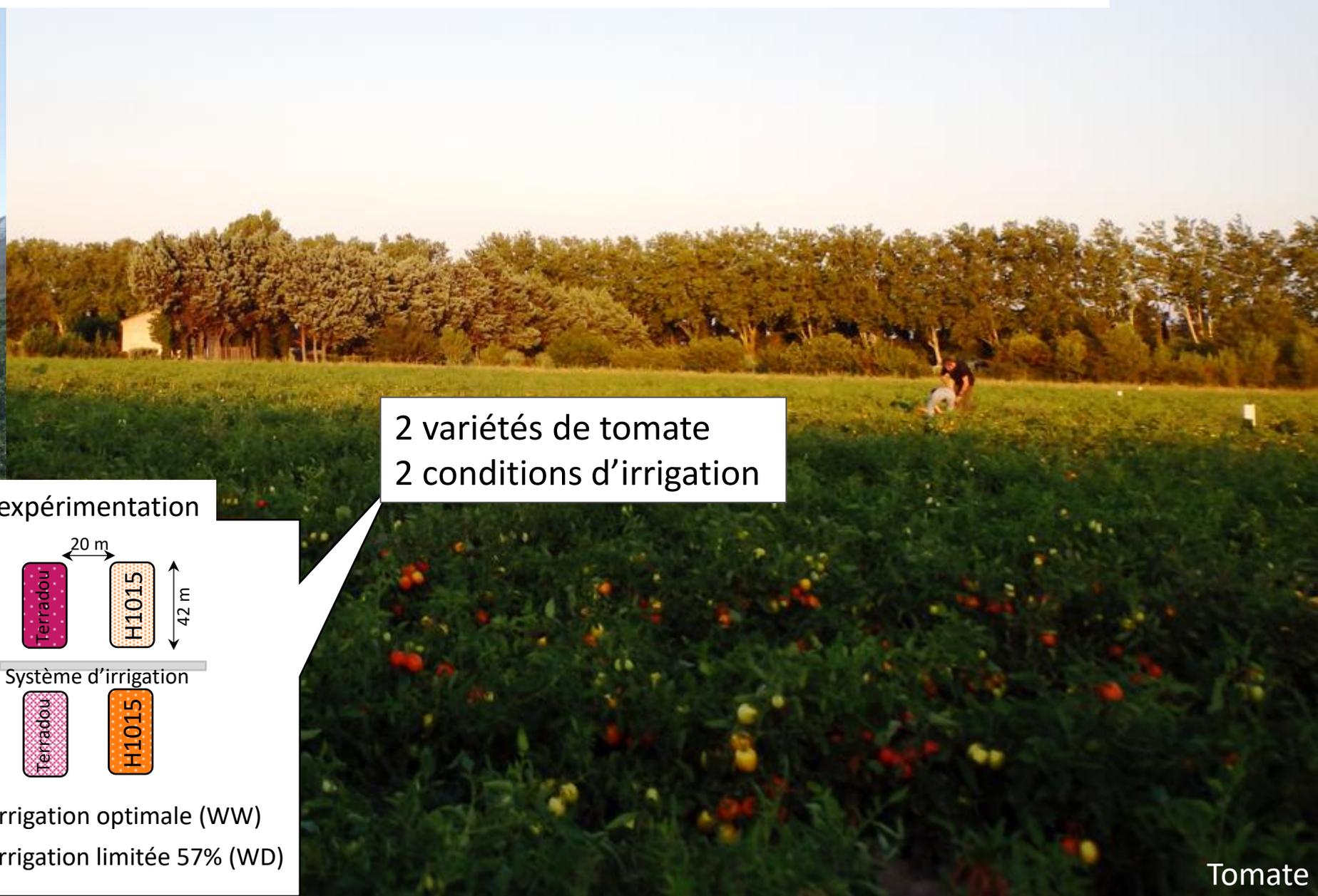
# Les exopolysaccharides du sol dans la rhizosphère

## réduisent la sensibilité des variétés de blé au déficit hydrique

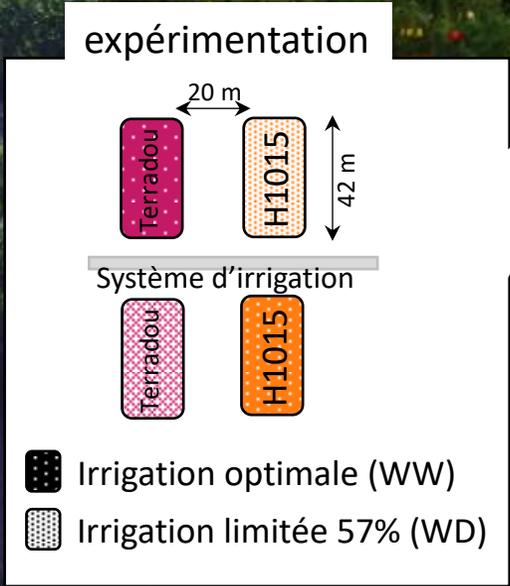
*Relation entre la chute de transpiration au cours de la sécheresse et les exopolysaccharides de la rhizosphère*



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



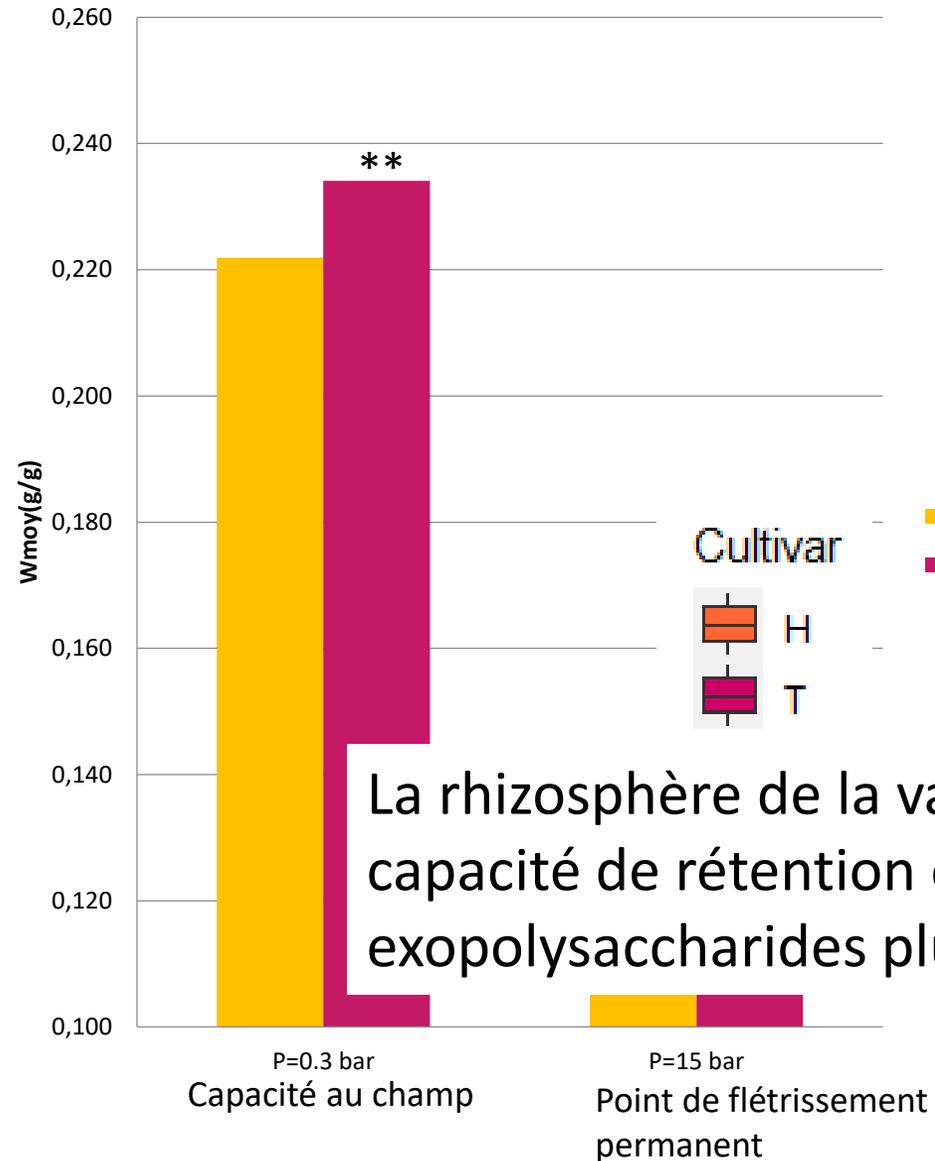
2 variétés de tomate  
2 conditions d'irrigation



# Propriétés du sol dans la rhizosphère

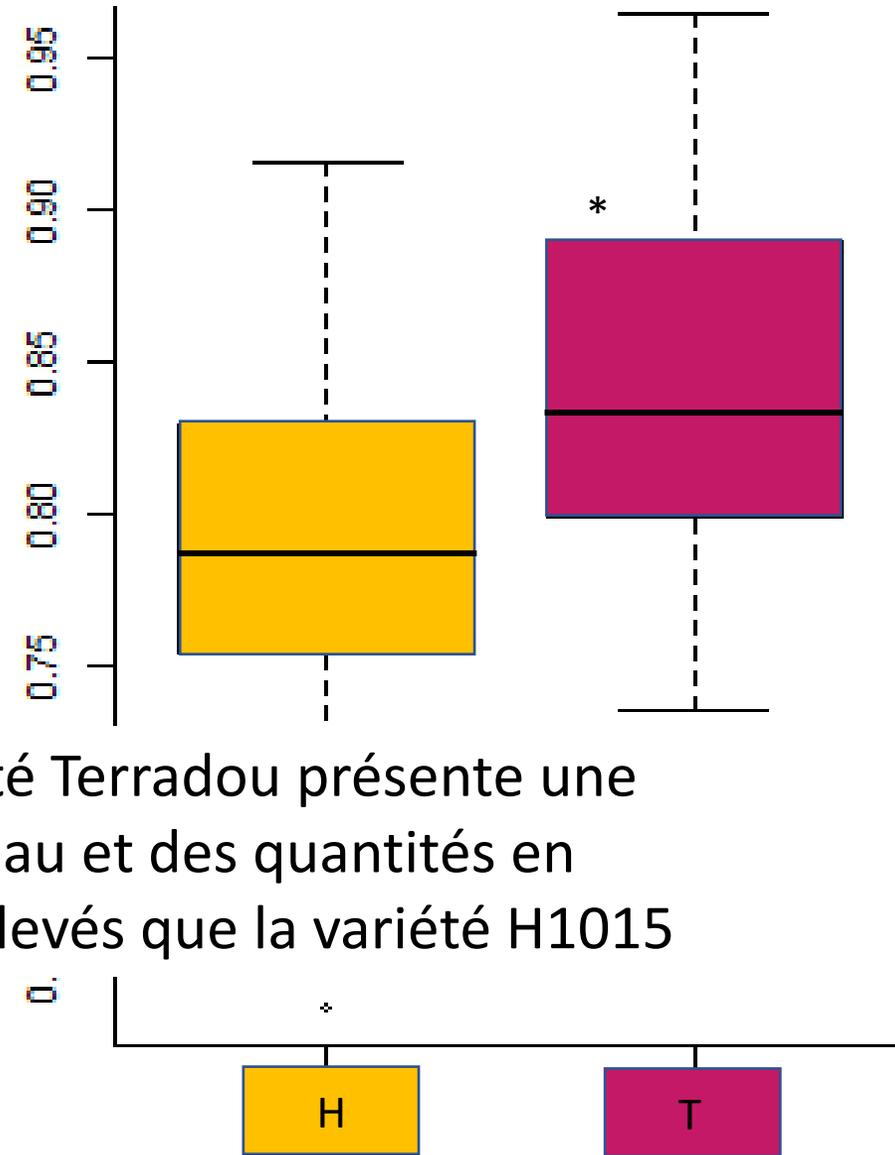


## Rétention en eau

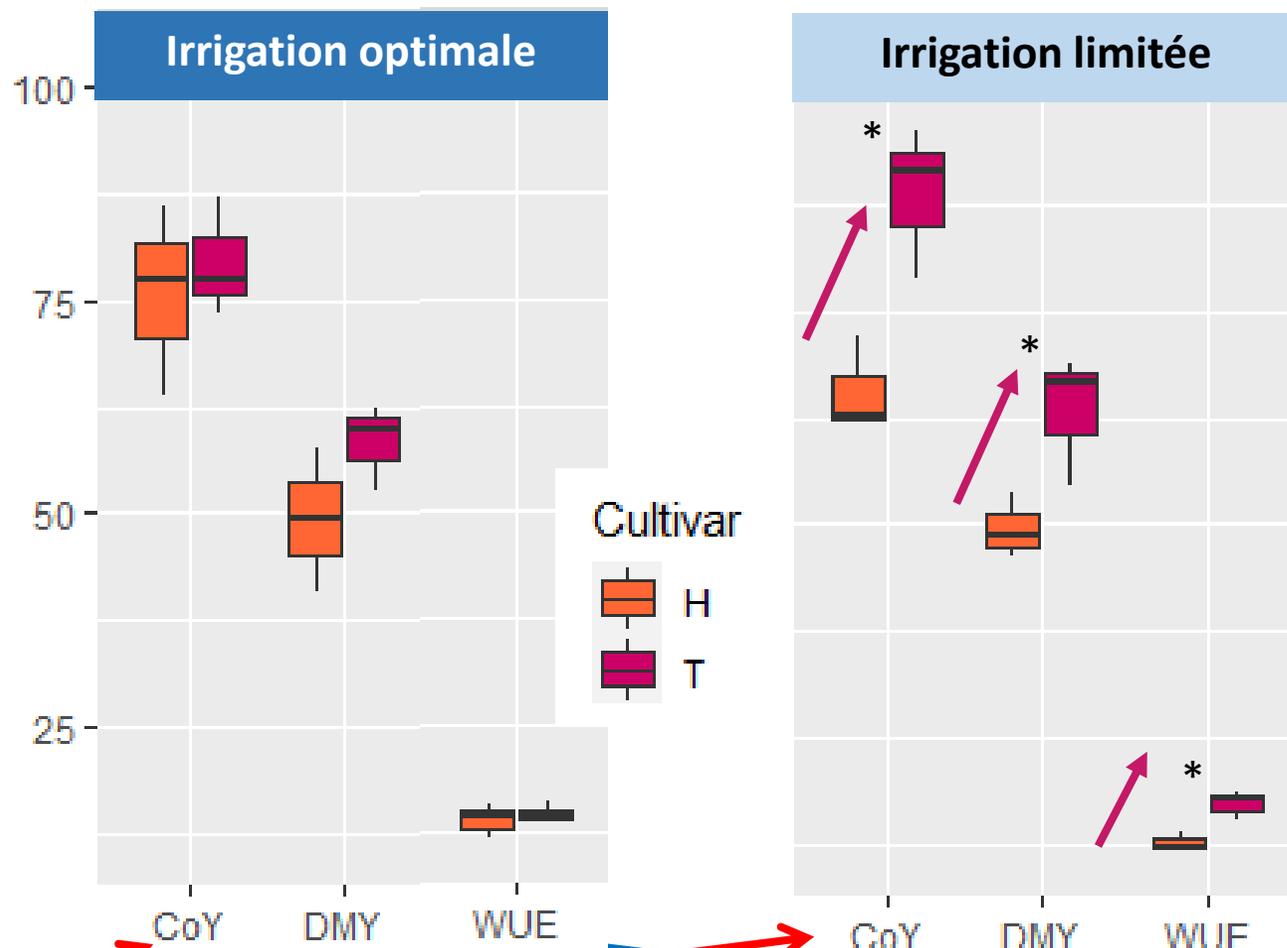


La rhizosphère de la variété Terradou présente une capacité de rétention en eau et des quantités en exopolysaccharides plus élevées que la variété H1015

## Exopolysaccharides du sol



# La plante répond au déficit hydrique selon ces propriétés du sol

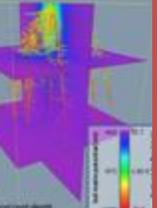


La variété Terradou est plus efficace en conditions de limitation en eau que la variété H1015

Rendement Commercial (t/ha)

Rendement en matière sèche (kg/ha)

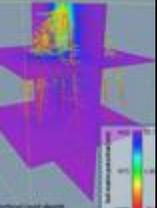
Efficience d'utilisation de l'eau (kg/m<sup>3</sup>)



*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'efficacité d'utilisation de l'eau par ces variétés*

*SYNTHESE ....*

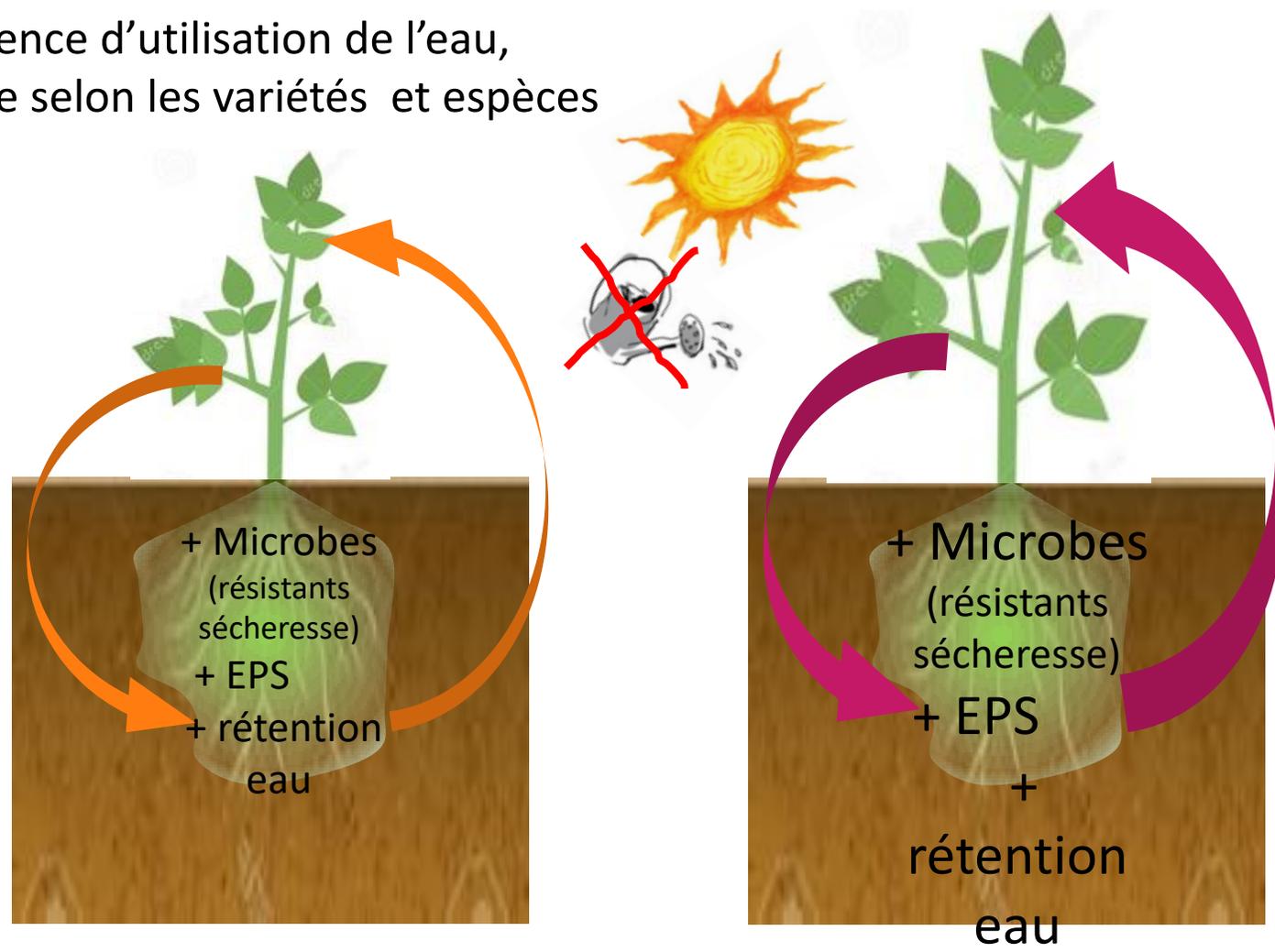


# La plante : un « effet rhizosphère » ...

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

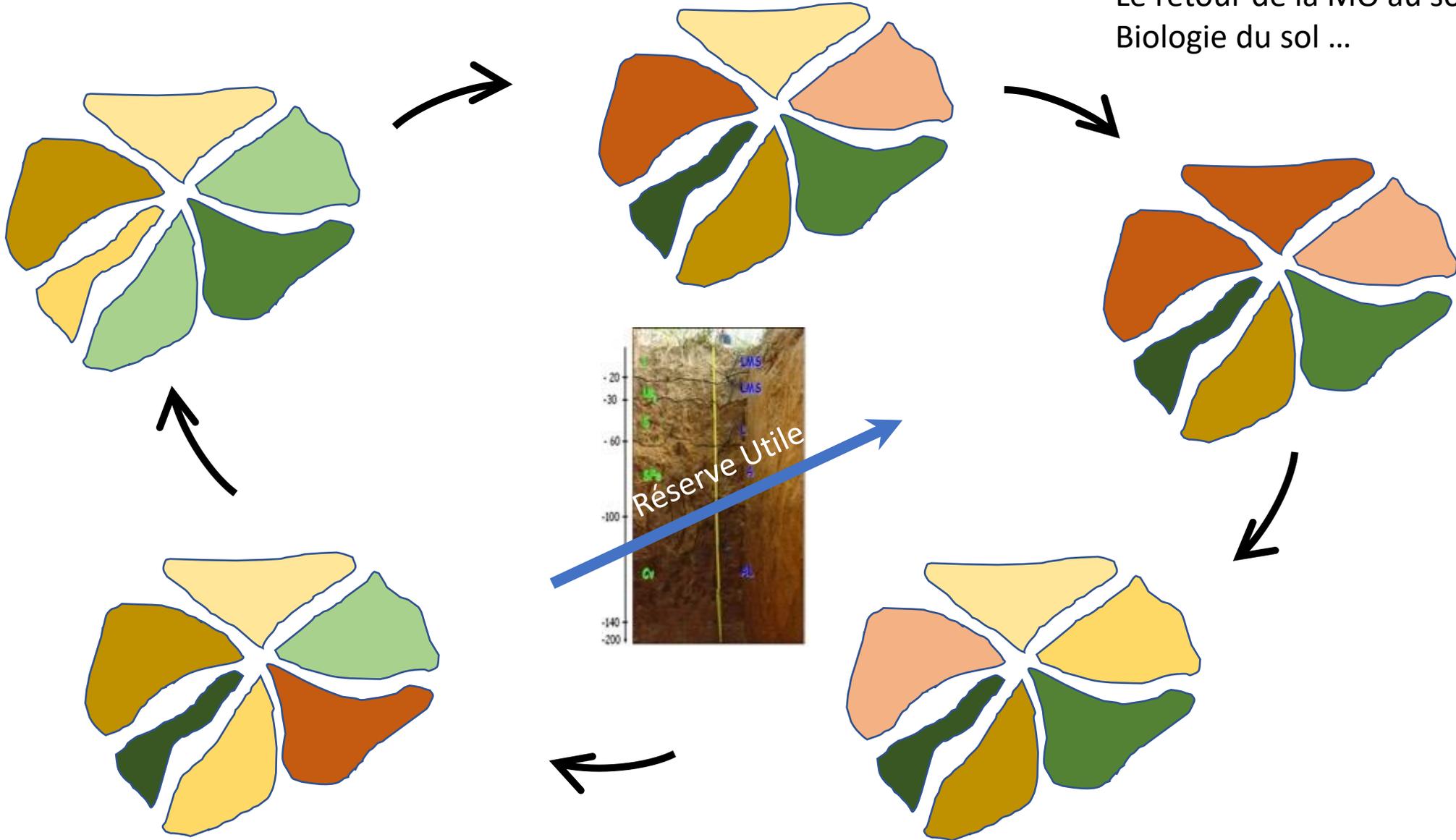
→ EPS, activités microbiennes → rétention en eau

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

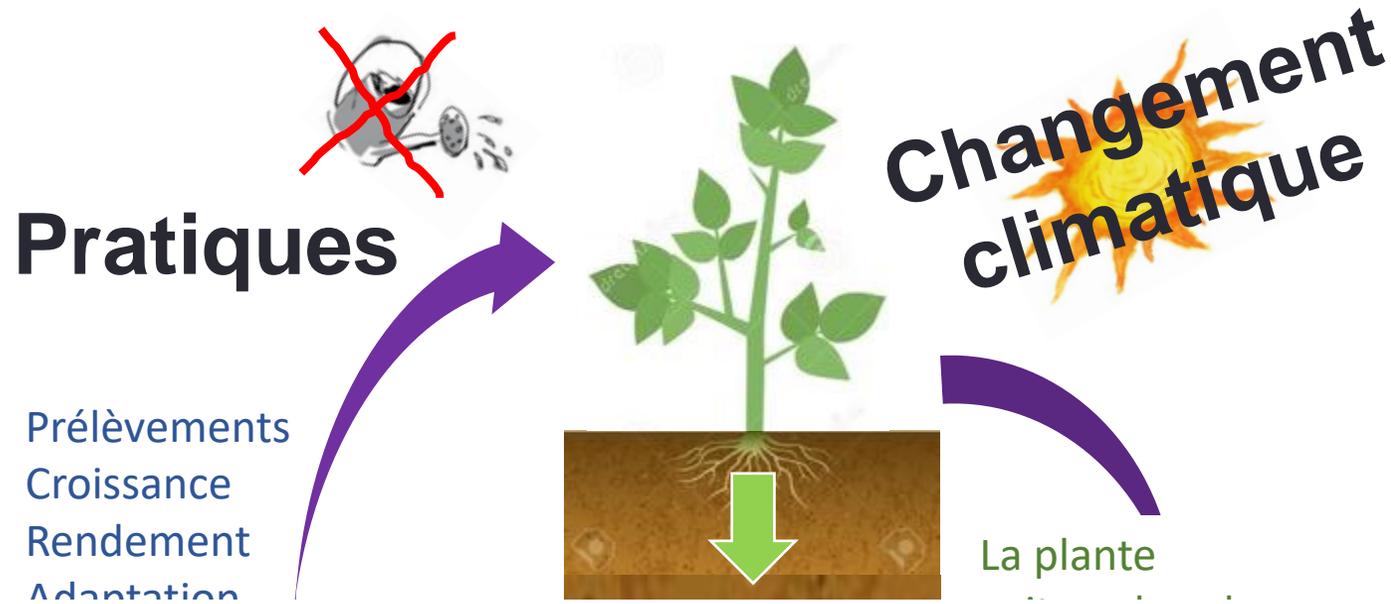


# Les rotations modifient les propriétés hydriques du sol

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'ingénierie 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

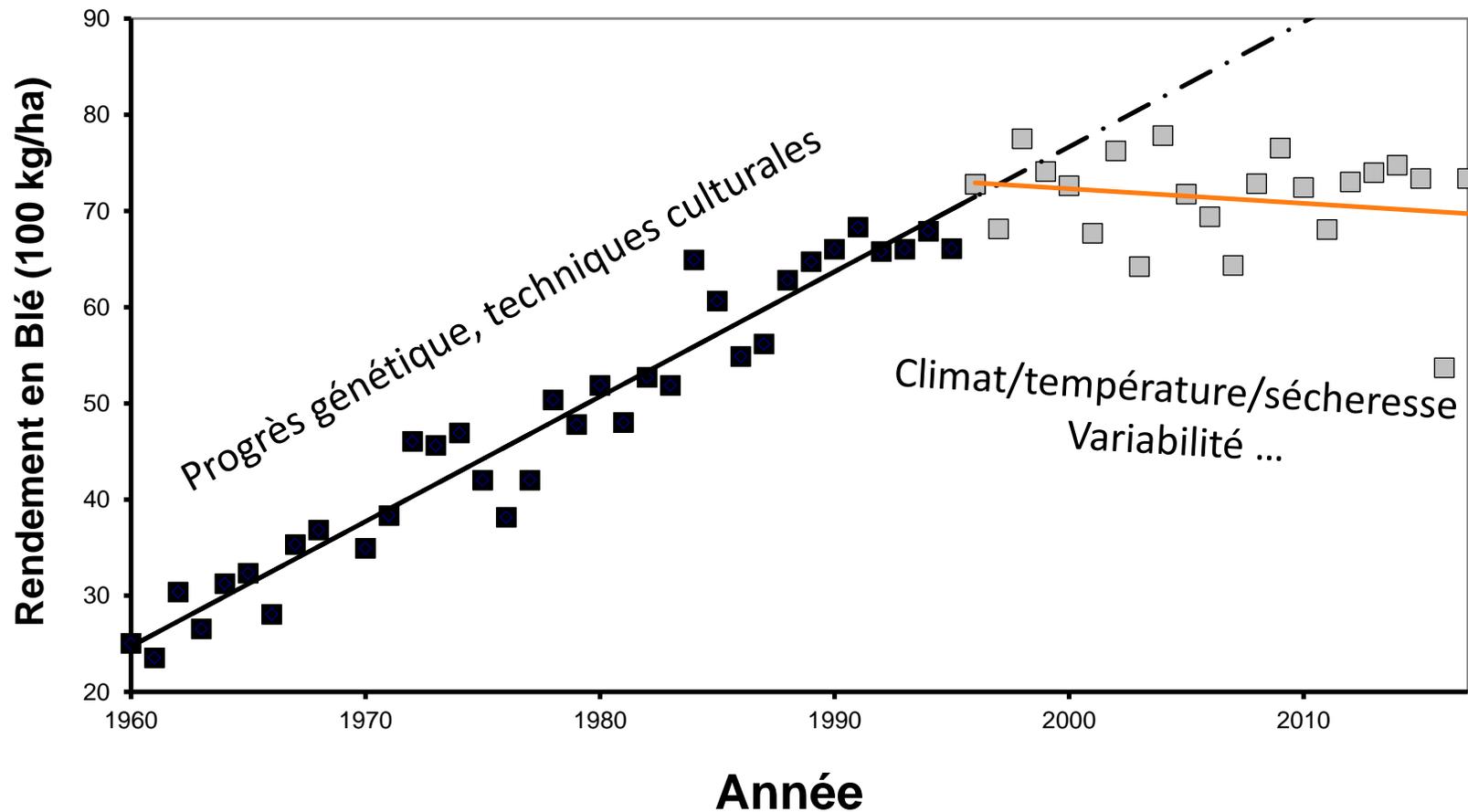
Diapos supp

# 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 :

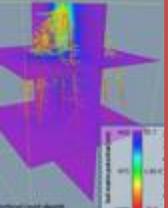
- Effets hydrique: Humectation / dessiccation du sol suite prélèvement eau
- Effets carbone : Exsudation-Rhizodépot / processus rhizosphériques / Polymères (EPS) spécifiques: hydro-rétenteurs et hydrophobes

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...

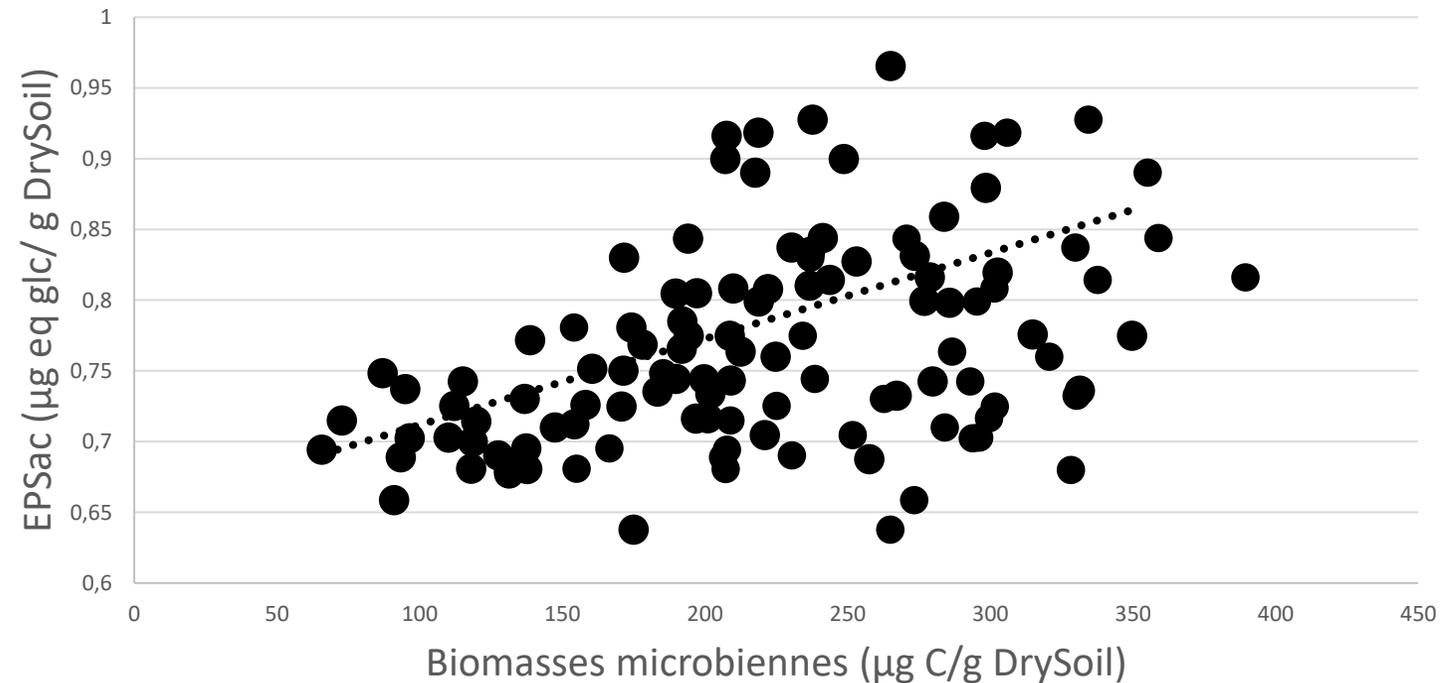
De l'utilisation d'un contexte à des approches spécifiques d'utilisation des racines





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



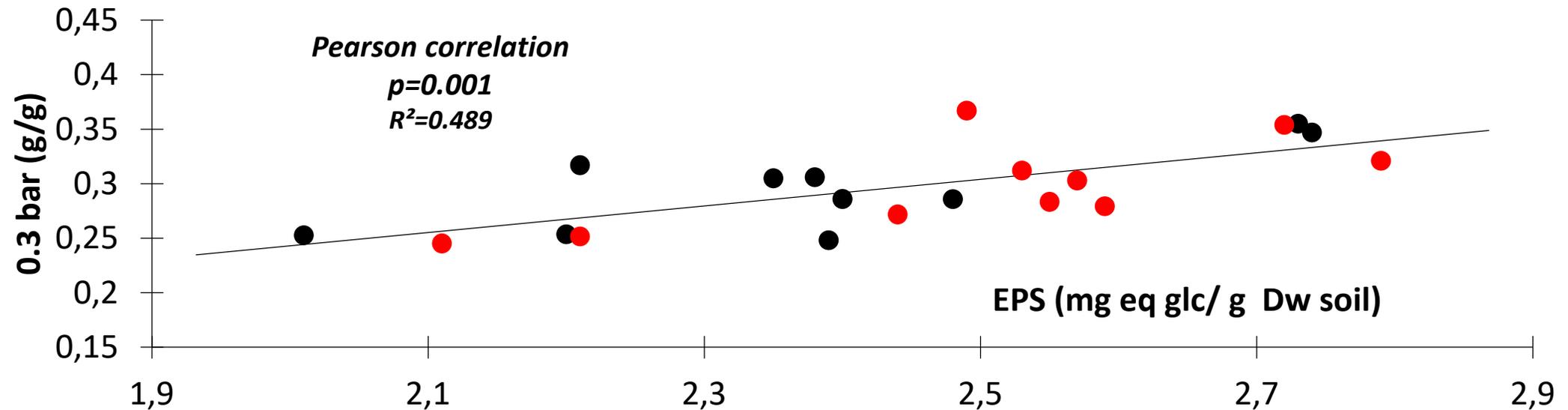
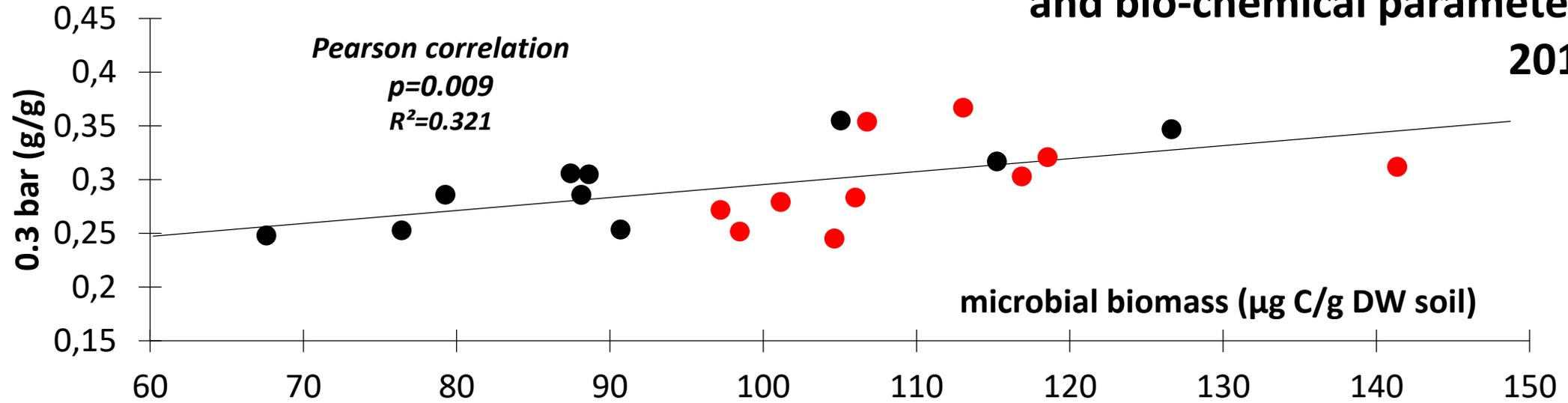
La quantité d'exopolysaccharides du sol, ainsi que l'activité des microorganismes (champignons en particulier) expliquent une partie des mesures de rétention d'eau du sol.

*... 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**



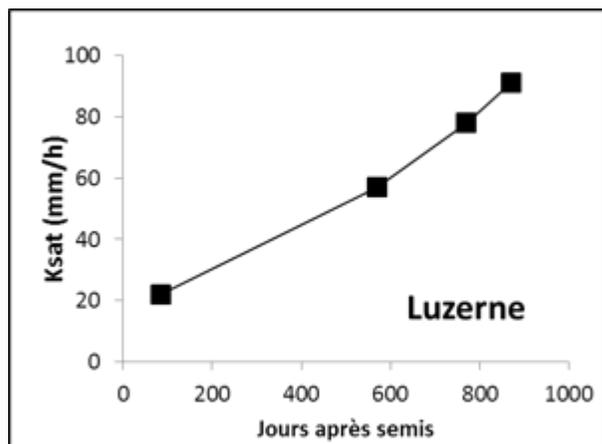
# Un profil de CR ?

⇒ « 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)



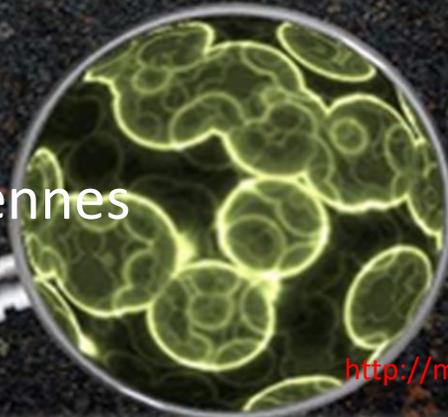
# La microBIOLOGIE du SOL

- **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*

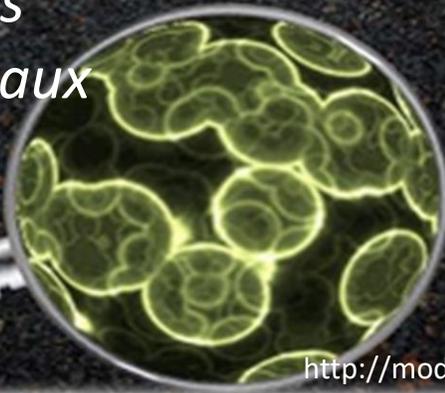
*« Aggrégations » microbiennes  
« Pontages » fongiques*

# 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/>



*mycorhiziens*

[modernfarmer.com/](http://modernfarmer.com/)

# Sécheresse canicule

*indirects*

Changements  
des  
habitats microbiens

*directs*

Impacts au niveau cellulaire  
adaptations/mort

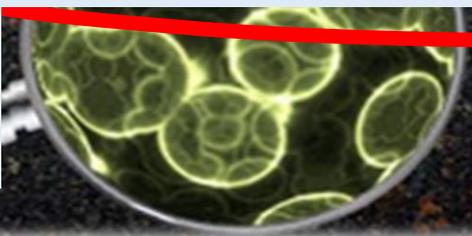
**Sélection des communautés microbiennes**  
**perte de biodiversité**  
**Résistance?**  
**Résilience?**

**Fonctions microbiennes  
impactées**

**Sécheresse  
canicule**

**Fonctions microbiennes  
impactées**

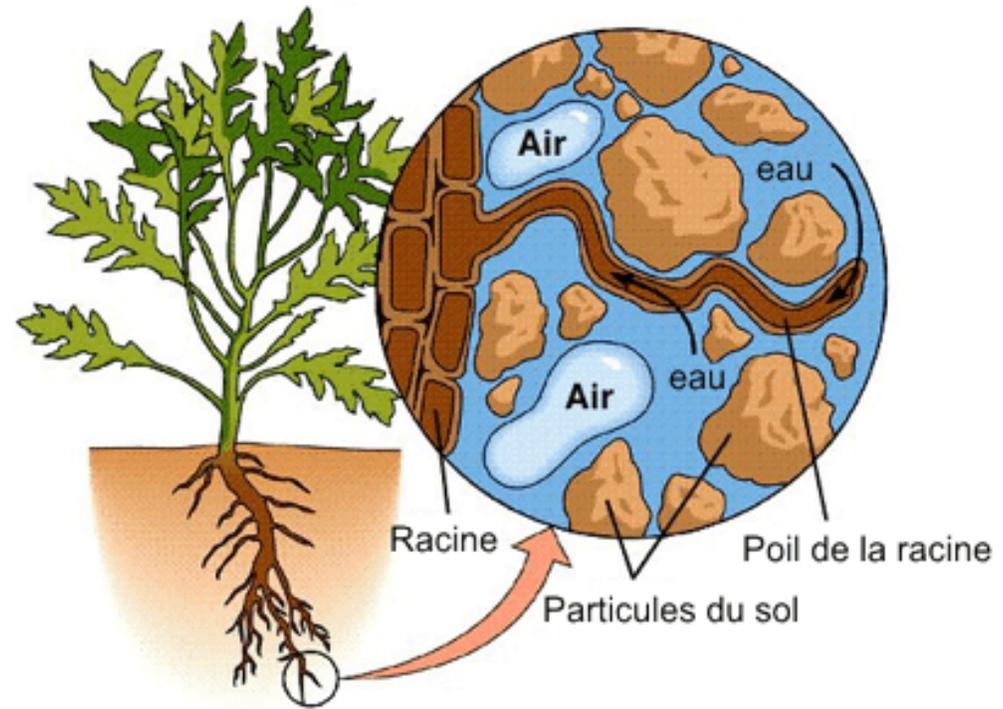
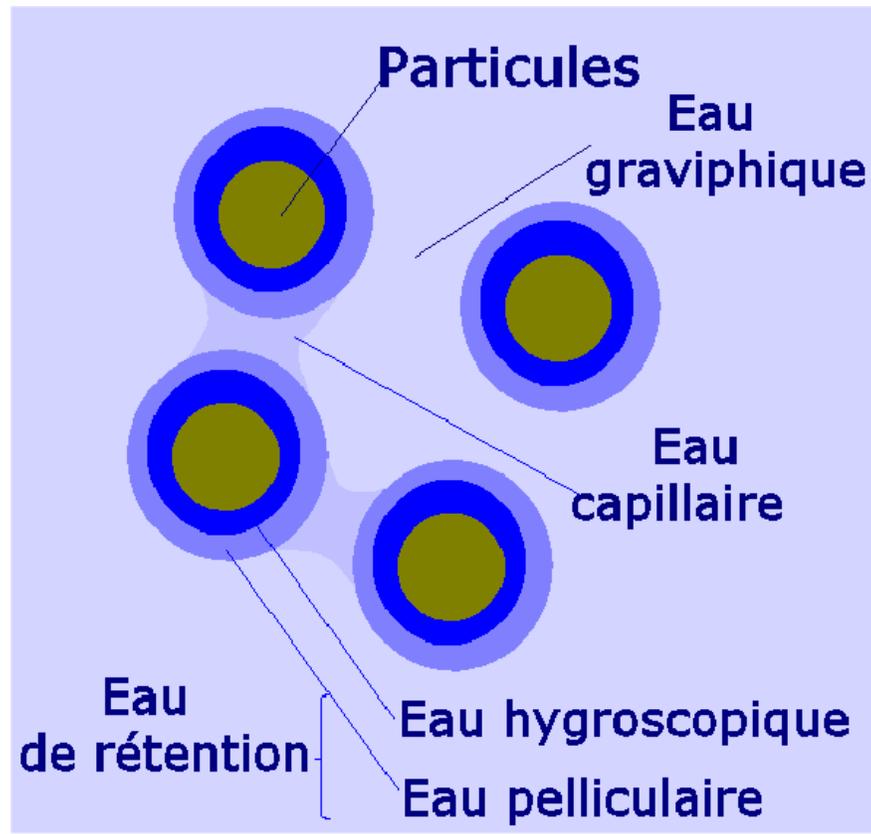
**Fonctionnement du sol  
impacté**



**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,<sup>1\*</sup>  
A. Binley,<sup>2</sup> S. L. Hawkins,<sup>3</sup>  
M. W. Humphreys,<sup>3</sup>  
L. B. Turner,<sup>3</sup>  
W. R. Whalley<sup>4</sup> and  
P. M. Haygarth<sup>1</sup>



Rothamsted

## A novel grass hybrid to reduce flood generation in temperate regions



Christopher (Kit) J. A. Macleod<sup>1,2</sup>, Mike W. Humphreys<sup>3</sup>, W. Richard Whalley<sup>4</sup>, Lesley Turner<sup>3</sup>, Andrew Binley<sup>5</sup>, Chris W. Watts<sup>4</sup>, Leif Skøt<sup>3</sup>, Adrian Joynes<sup>1</sup>, Sarah Hawkins<sup>3</sup>, Ian P. King<sup>3,6</sup>, Sally O'Donovan<sup>3</sup> & Phil M. Haygarth<sup>5</sup>

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*