

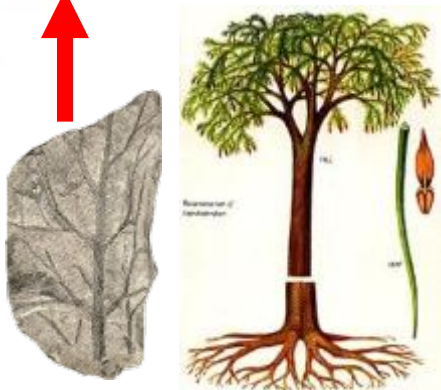
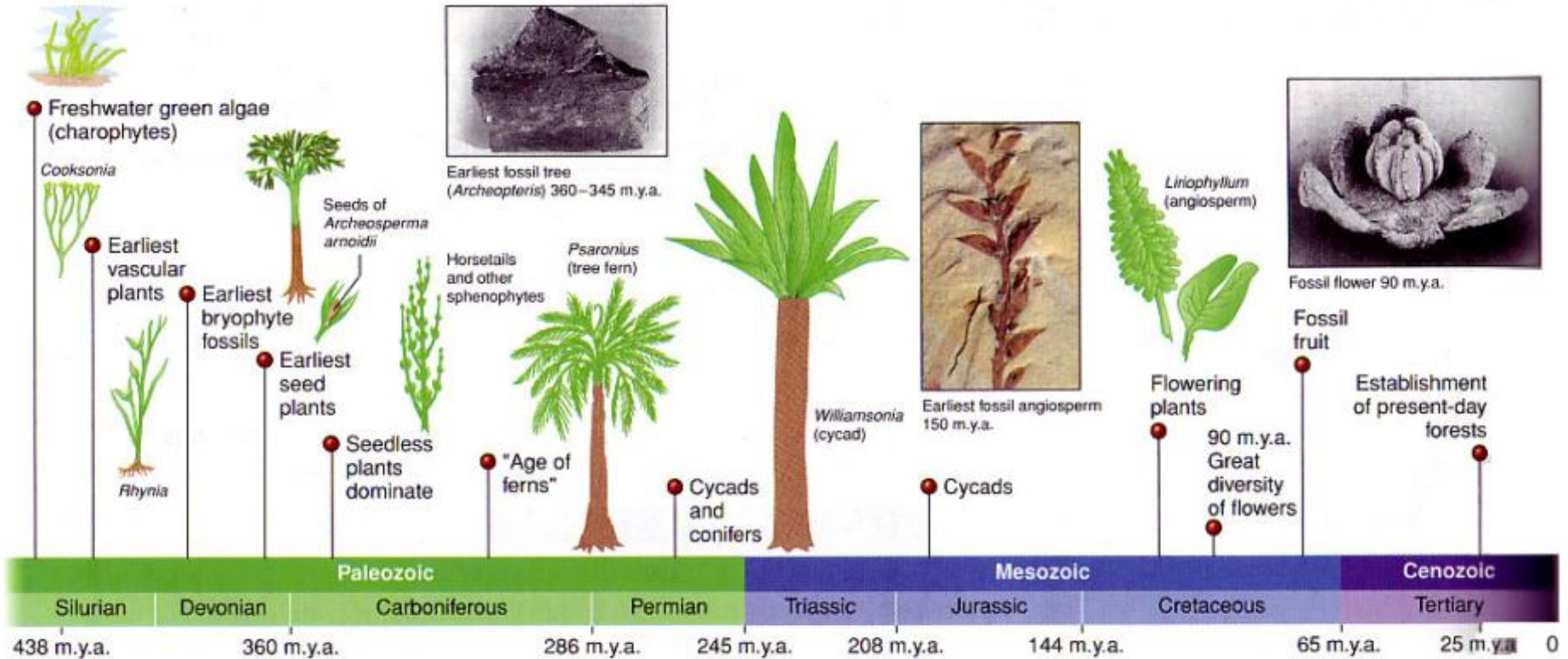
Architecture, dynamique et fonctionnement racinaire chez les arbres de plantation en milieu tempéré et tropical

Quels effets de la profondeur du sol?

Christophe Jourdan

UMR Eco&Sols, CIRAD, Montpellier

Un peu d'histoire...



“...nos racines” ont 400 millions d'années, elles sont apparues avec les premières plantes vasculaires, à la sortie de l'eau...

Pas de sol...

... sans racines



Définitions et fonctions

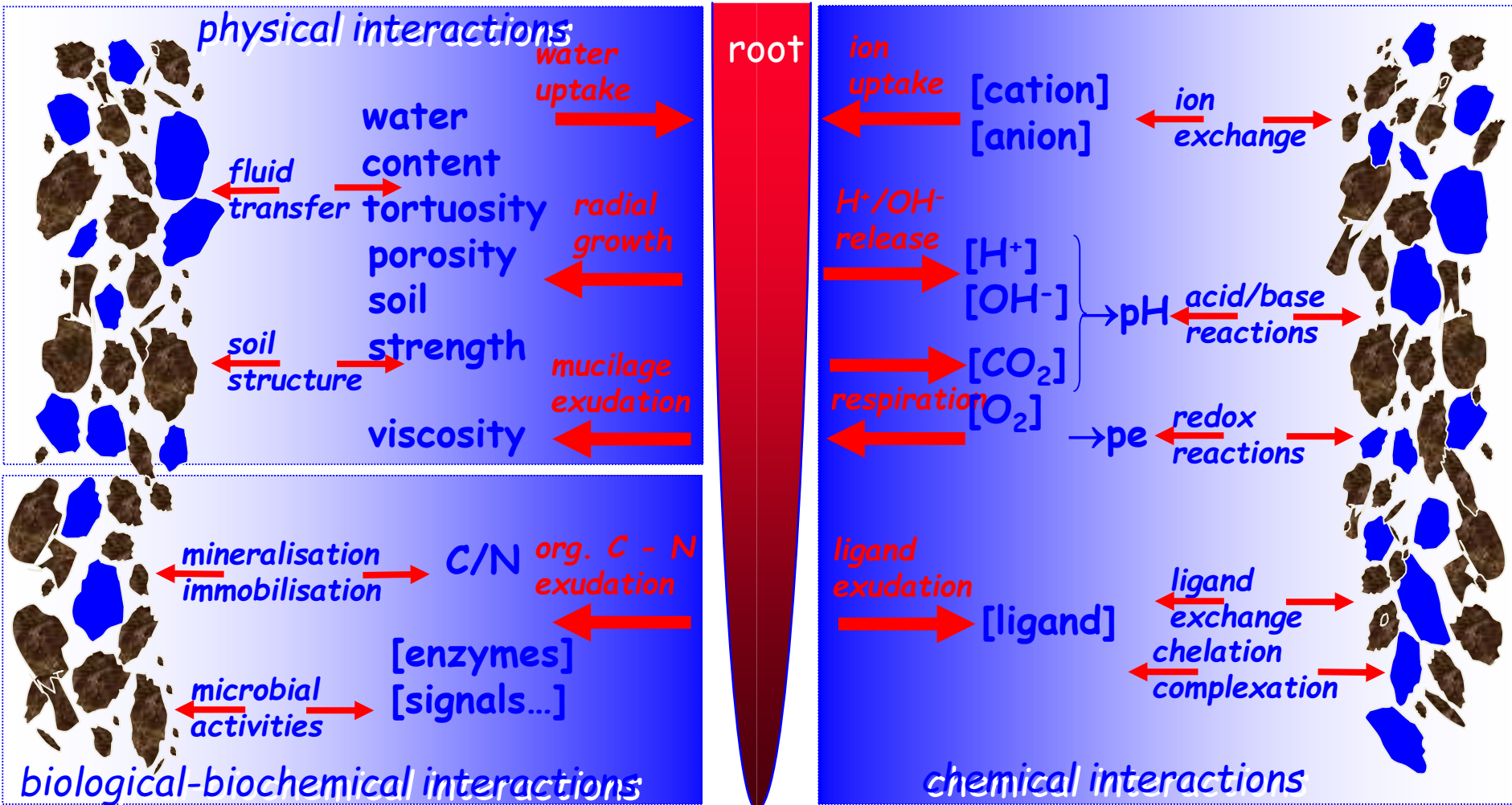
La racine est la partie du végétal qui le fixe généralement au sol ou sur un support (cas des épiphytes) et lui assure son **ancrage**, son **alimentation** en eau et en sels minéraux.

Le fait d'être dans le sol n'est pas une garantie pour déterminer les racines. Certaines tiges poussent également dans le sol (corme du taro, rhizomes).

Les autres fonctions des racines :

- organe de stockage
- lieu de synthèse de certains régulateurs de croissance, hormones, métabolites secondaires...
- transport de l'eau, élts mnx, hormones... zones absorbantes => tiges
- organe de propagation et de dispersion de la plante
- association symbiotique (fixation N, mycorhizes, cyanophycées...)
- communication entre plantes (anastomoses...)
- contrôle de l'environnement rhizosphérique :
 - physique : microporosité, micro-compaction
 - biochimique : exudats chimiques (H⁺, acides organiques, acides aminés, hydrates de C, flavonoïdes, 'allelochemicals', mucilages,...)
 - écologique : microflore et microfaune

Stratégies de modification du sol - rhizosphère



Root functions and consequent interactions in the rhizosphere
 (Hinsinger, Gobran, Gregory & Wenzel, 2005 - New Phytol. 168)

« Hall of fame » des auteurs qui ont **caractérisé**...

...la structure, l'architecture, l'enracinement...

bref les systèmes racinaires dans leur ensemble!



Evelyn J

Weaver

Kutschera

Atger

Canadell

Schenk

Bleby

Drawings

Tree arch. mod.

Rooting depth

Hydraulic

1600

1926

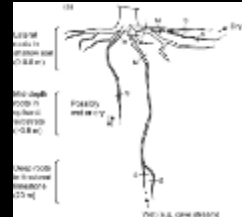
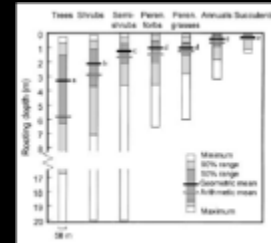
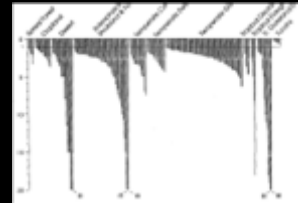
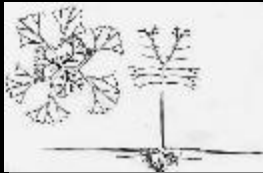
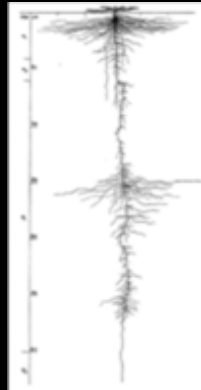
1960

1992

1996

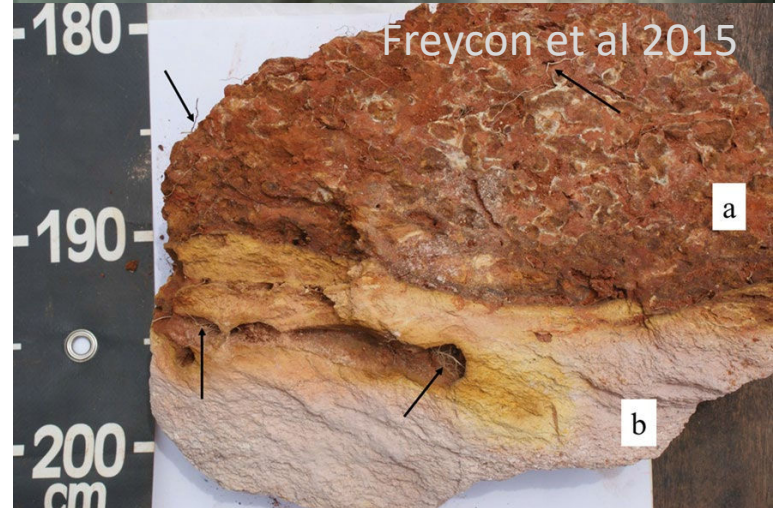
2000

2010



Les racines ont colonisé tous les milieux

- Air
- Aquatique
- Terrestre
 - Sol sableux
 - Sol argileux
 - Sol calcaire
 - Sol marneux
 - Sol latéritique
 - Sol tourbeux
 - Sol caillouteux
 - Sol rocheux
 - ...



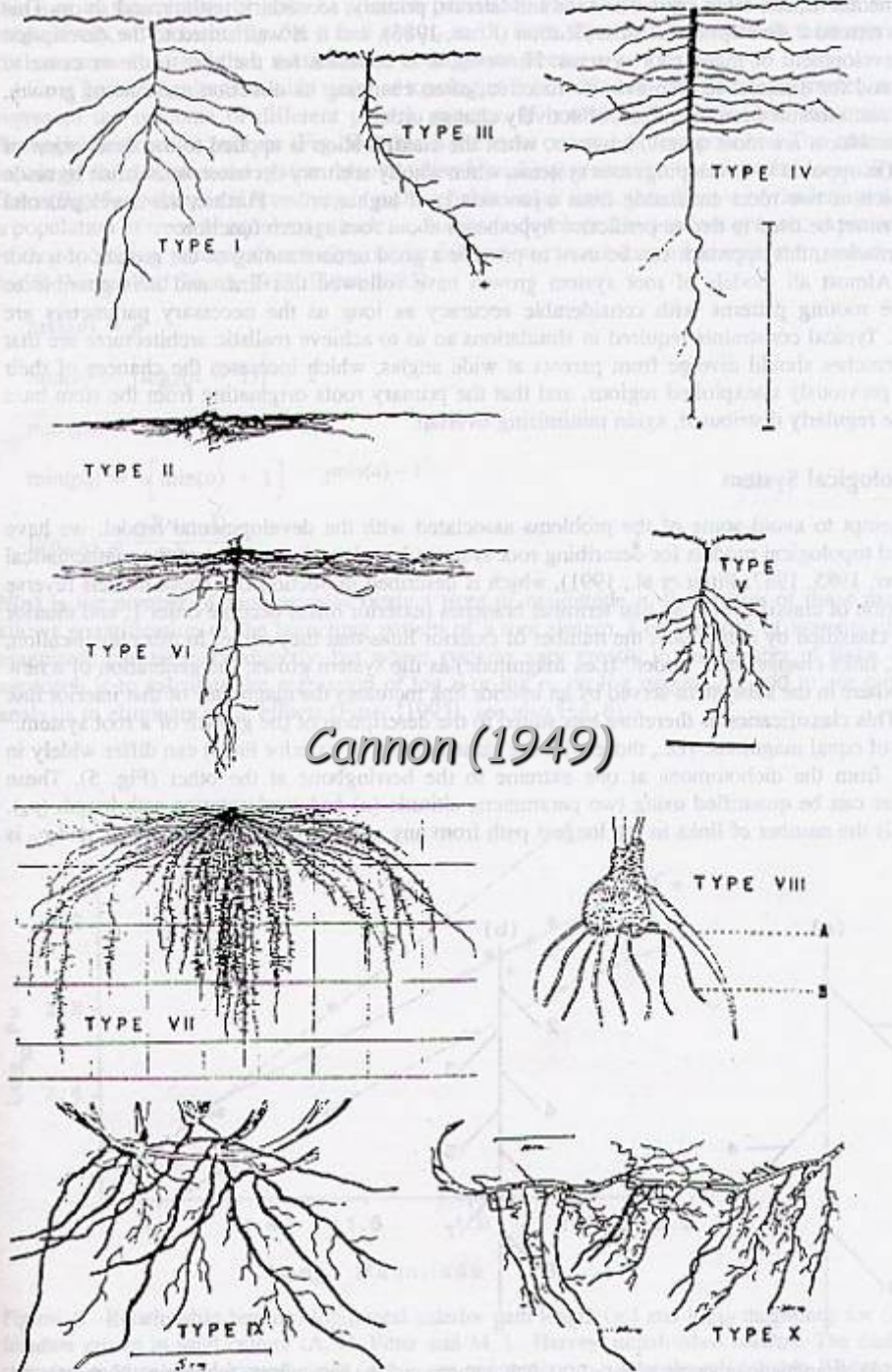
Les racines ont colonisé tous les continents*

- Boréal
- Tempéré - Continental
- Tempéré - Montagnard
- Tempéré - Méditerranéen
- Tempéré - Océanique
- Aride
- Tropical
- Tropical altitude
- Equatorial

* *Excepté les pôles*



Première tentative de classification des systèmes racinaires



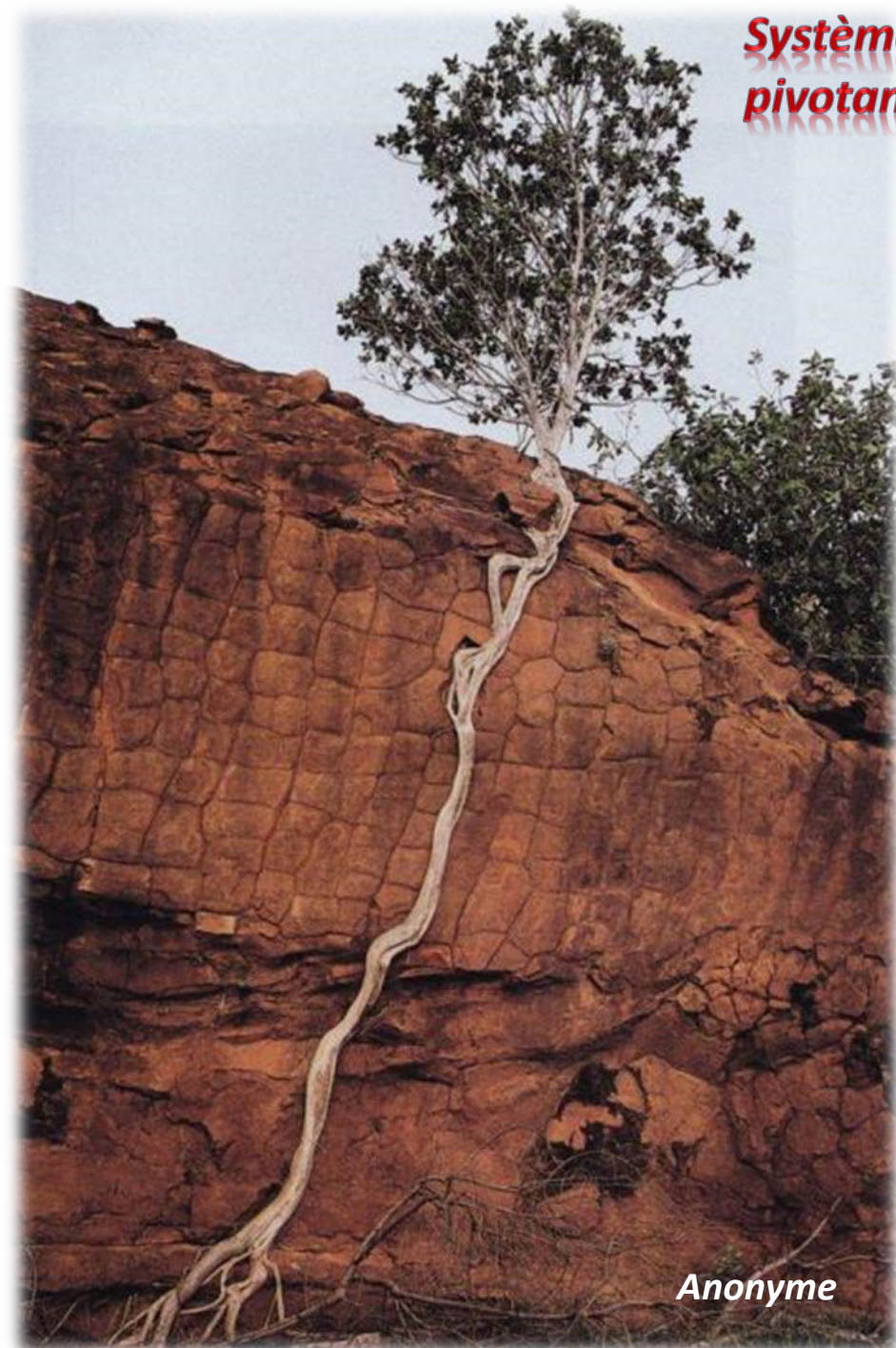
❖ **Les systèmes racinaires primaires :**
Ils dérivent de la croissance verticale et la ramification de la radicule de la plantule qui persiste dans la vie de la plante : cas des Dicotylédones

→ Système racinaire pivotant

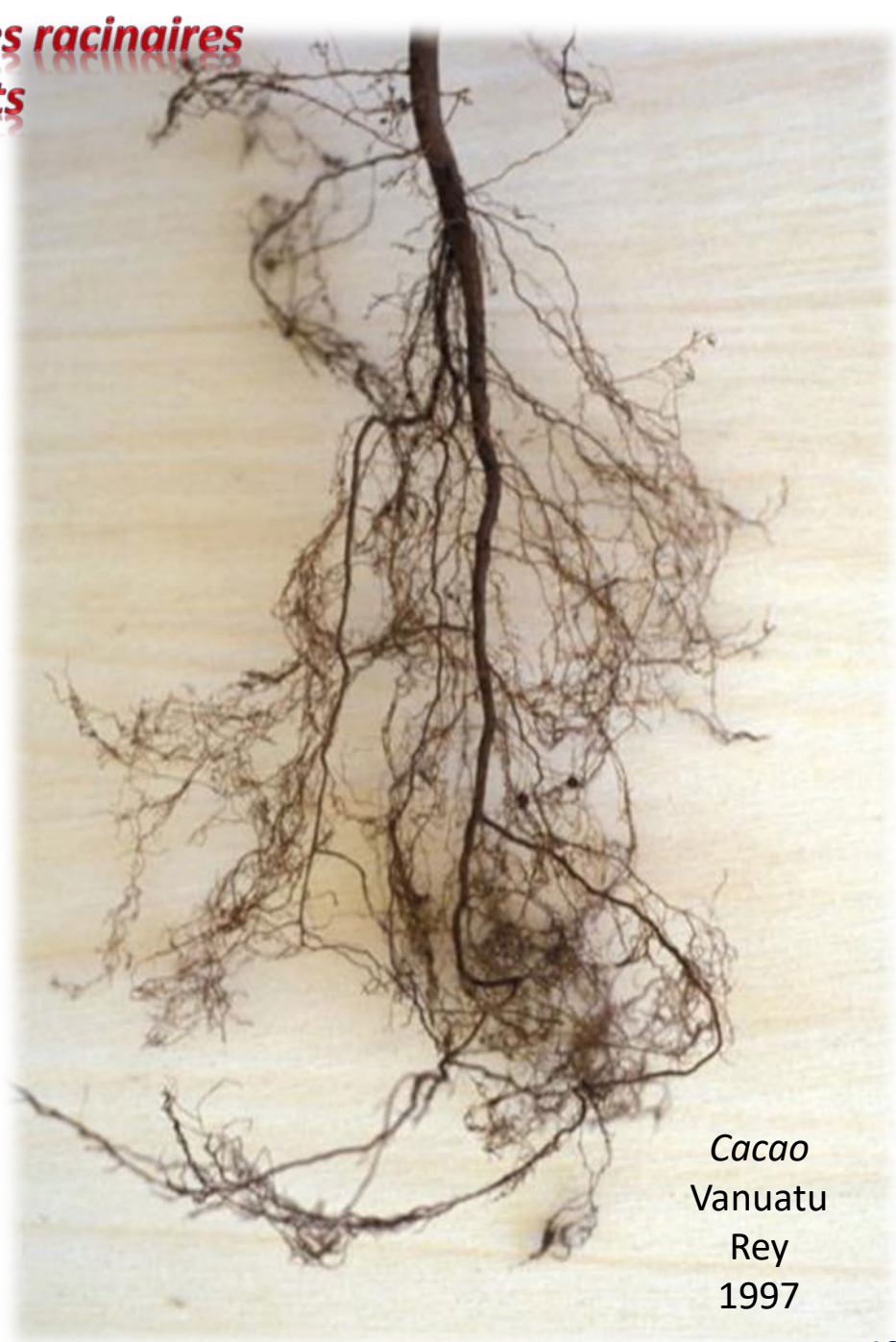
❖ **Les systèmes racinaires adventifs :**
la radicule meurt et est très rapidement remplacée par un système adventif : cas des Monocotylédones

→ Système racinaire fasciculé

***Systèmes racinaires
pivotants***



Anonyme



*Cacao
Vanuatu
Rey
1997*

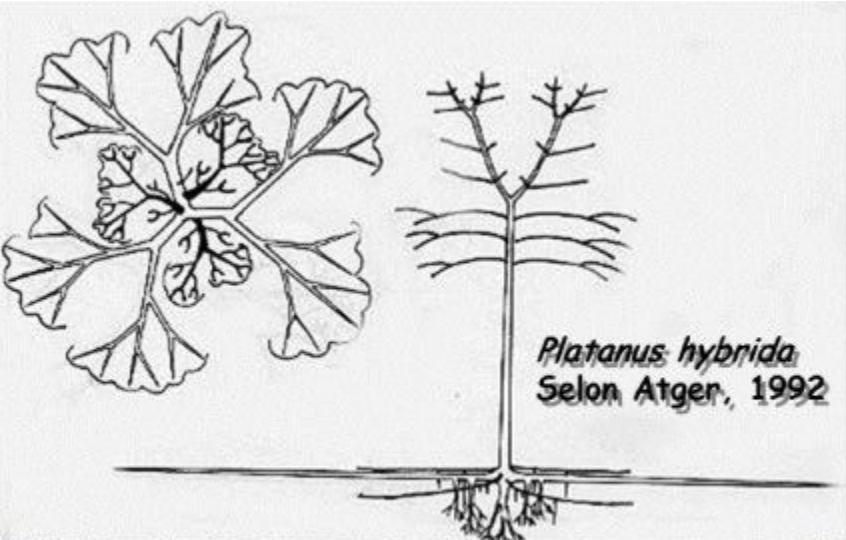
Systemes racinaires fasciculés



Dioscorea
Benin
Cornet
2006

Phoenix
Algeria
Rey
2011

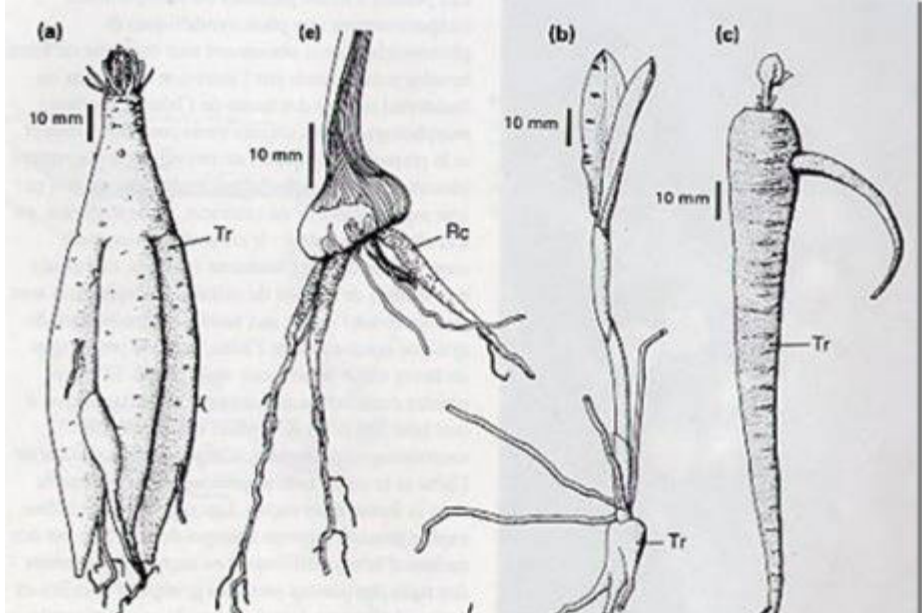
Systemes racinaires étalés - plagiotropes



Bell, 1993

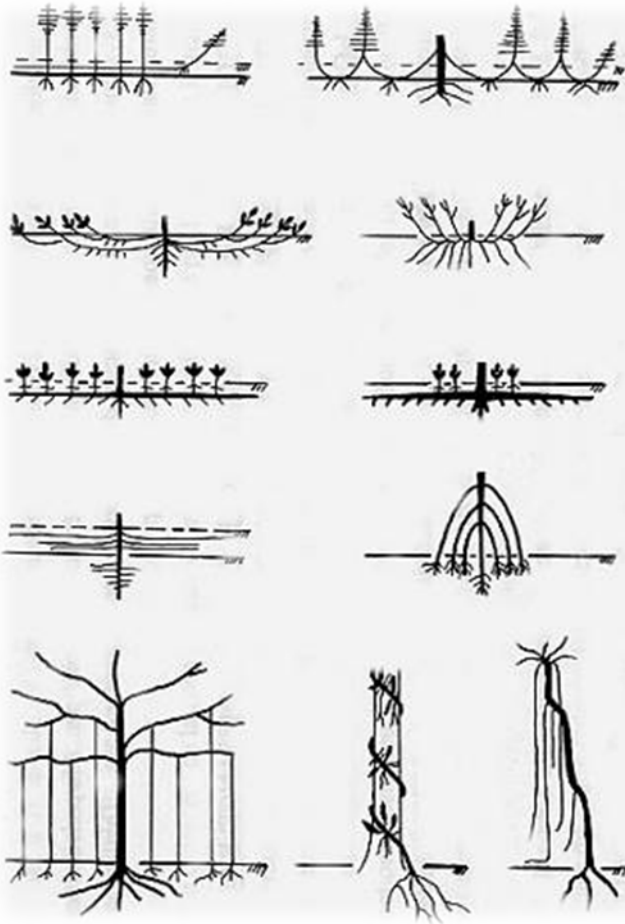


Systemes charnus charnus- renflés

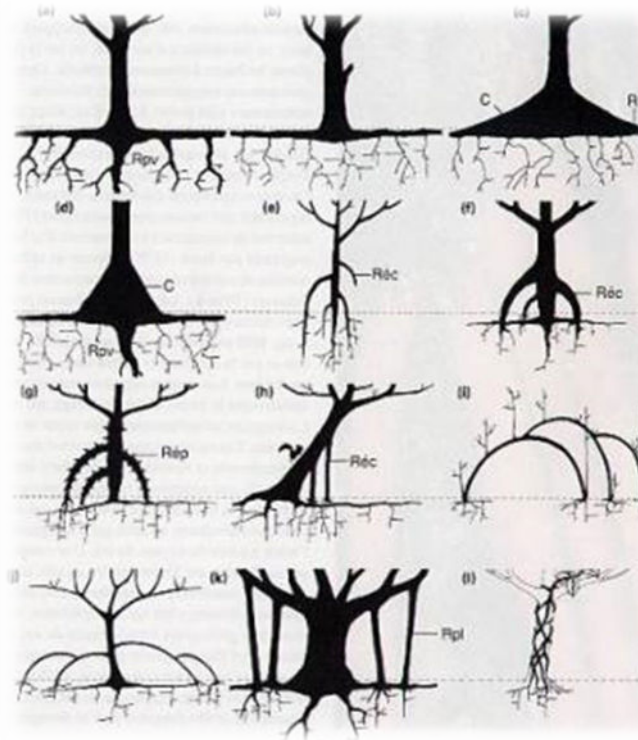


Diversité de l'architecture racinaire des arbres principalement sous les tropiques

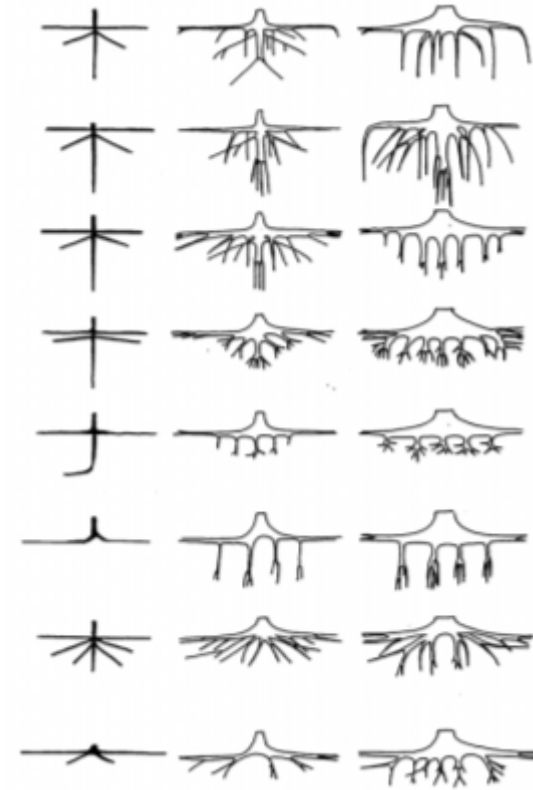
(Krasilnikov, 1968 ; Kolesnikov, 1971 ; Jenik 1978 ; Atger 1992)



Kolesnikov
1971



Jenik
1978



Atger
1992



Jardin Botanique de Bogor, Indonésie (Jourdan, 2003)

La plasticité racinaire: une réalité!

les végétaux, pour survivre,
doivent faire preuve d'adaptation...
= de plasticité

faible

stress

fort

et développer des stratégies de colonisation et
de modification de leur environnement (sol)
pour prélever eau et sels minéraux

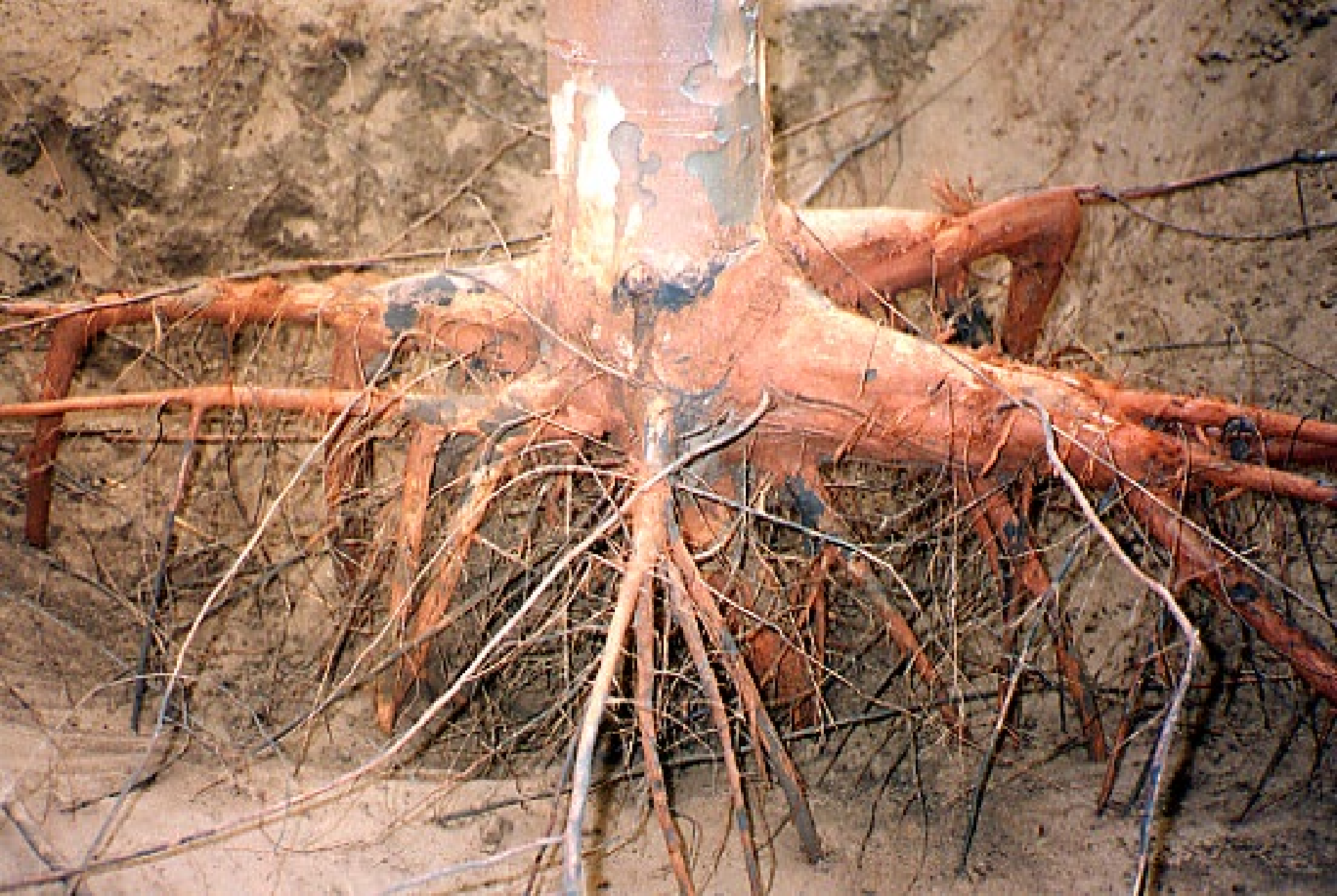
La plasticité racinaire: une réalité!



"Plants need to cope, need to be clever"
(Ryan 2004)



Caféier - Brésil



Eucalyptus - Congo



Y. Leroux

Hévéa - Côte d'Ivoire



Cocotier Vanuatu



Palmier à huile - Côte d'Ivoire



C. Didier

Manguier - Sénégal

Un outil pour synthétiser: la modélisation

- Besoin d'appréhender un objet complexe, non directement observable en entier et potentiellement de grande dimension
- Besoin de décrire, observer, mesurer pour comprendre et agir...
- Modélisation utile pour simplifier, décrire, synthétiser mais aussi estimer et prédire...
- Attention à la validation, la généralité et au champ d'application des modèles
 - modèles peu robustes dans d'autres pays, conditions...
 - modèles spécifiques (espèce, genre)
 - calibration locale : cas des colonisations racinaires profondes avec des paramètres mesurés en surface

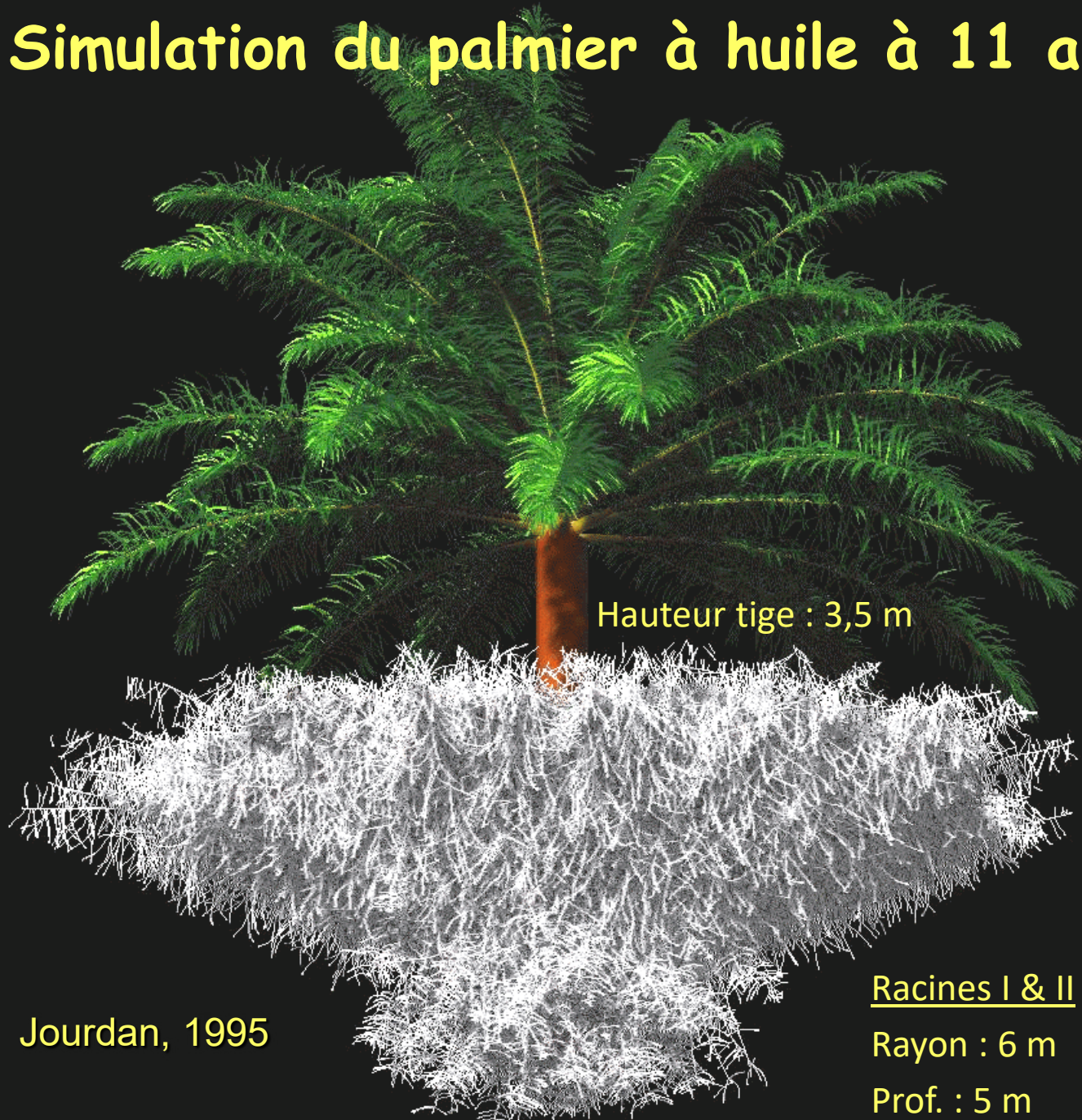
Simulation du palmier à huile à 11 ans



Hauteur tige : 3,5 m



Simulation du palmier à huile à 11 ans



Hauteur tige : 3,5 m

Jourdan, 1995

Racines I & II

Rayon : 6 m

Prof. : 5 m

Simulation de l'eucalyptus à 20 mois

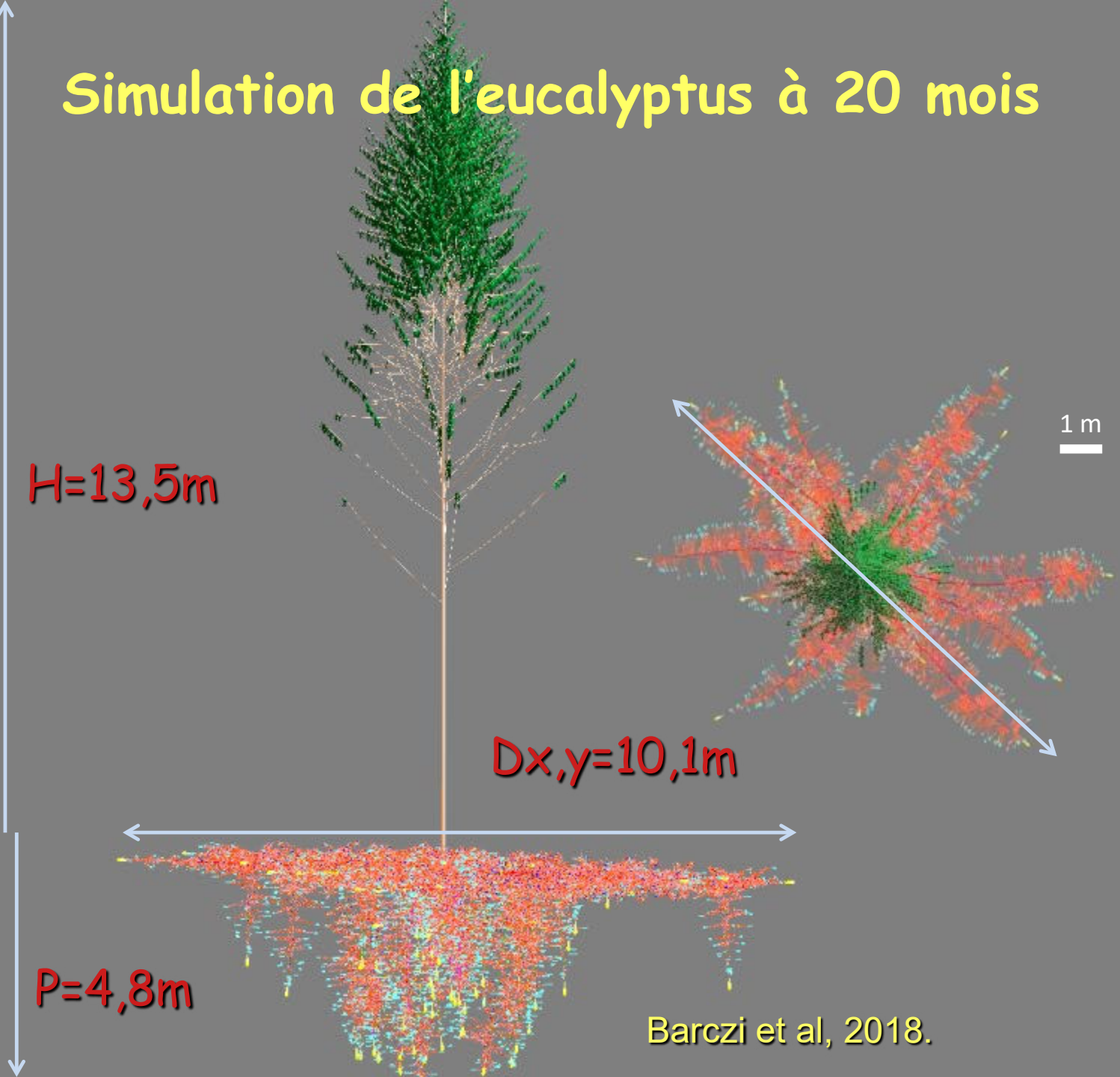
$H=13,5\text{m}$

$D_{x,y}=10,1\text{m}$

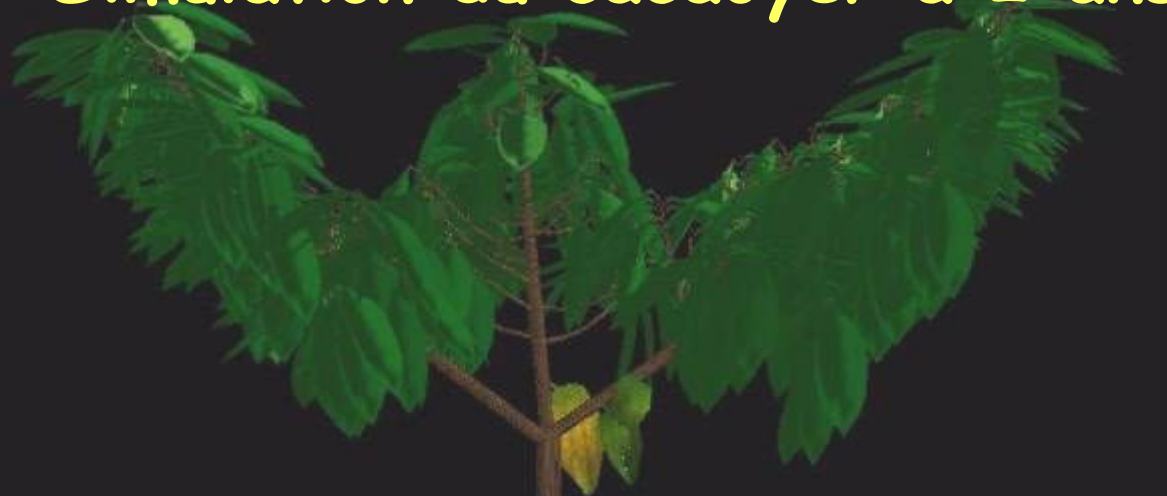
$P=4,8\text{m}$

1 m

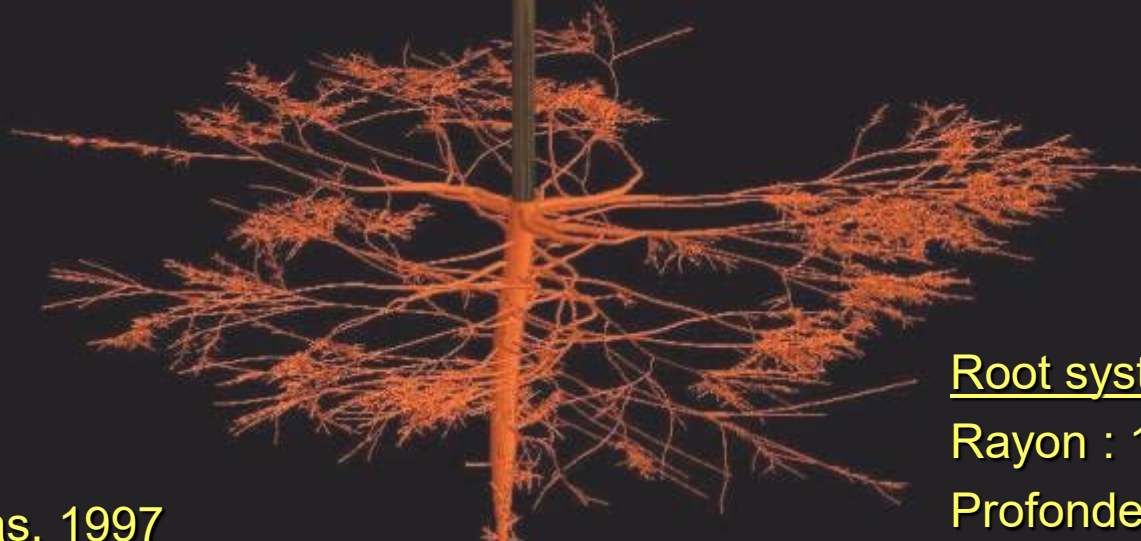
Barczi et al, 2018.



Simulation du cacaoyer à 2 ans



Hauteur tige : 1,5 m

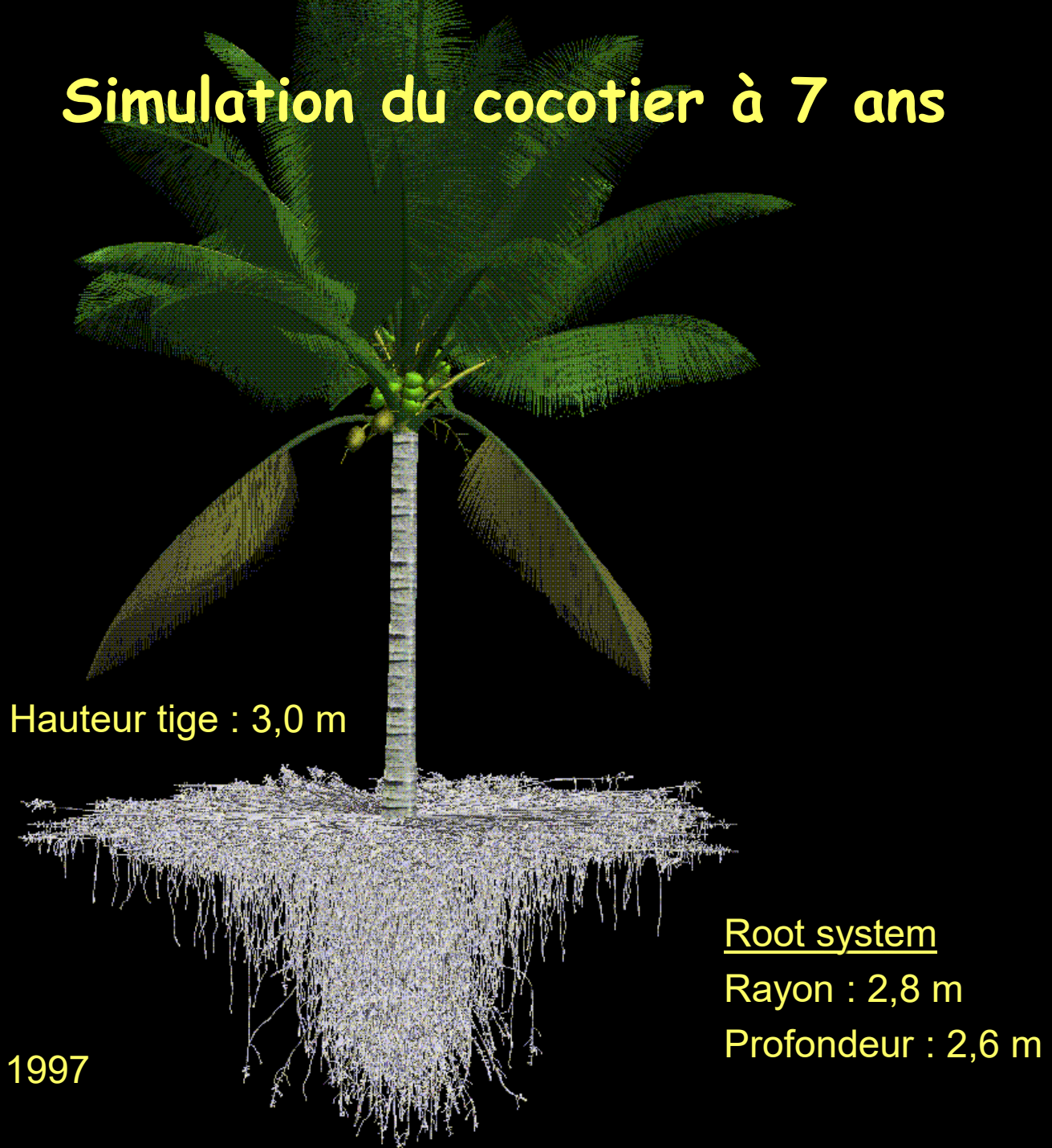


Root system

Rayon : 1 m

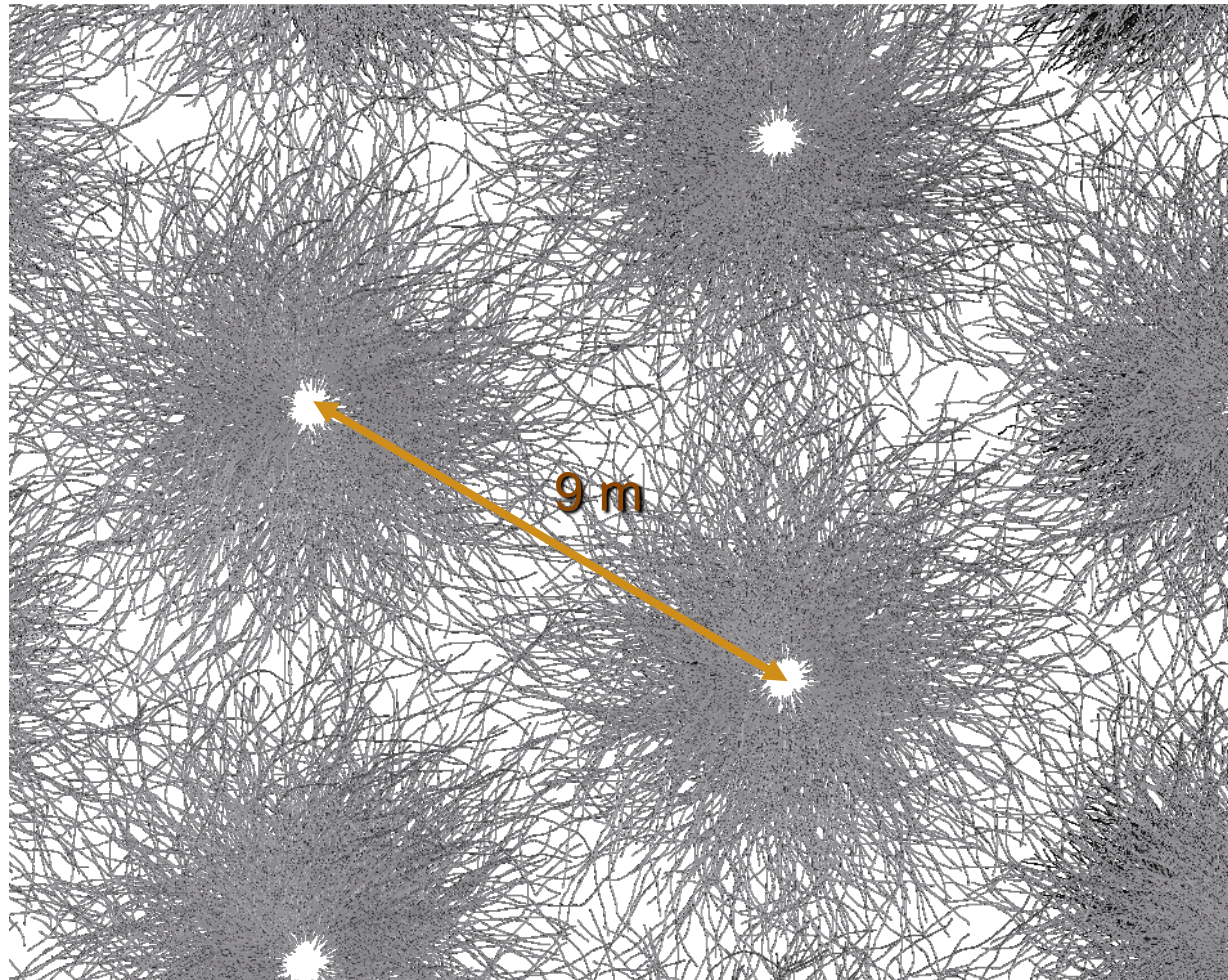
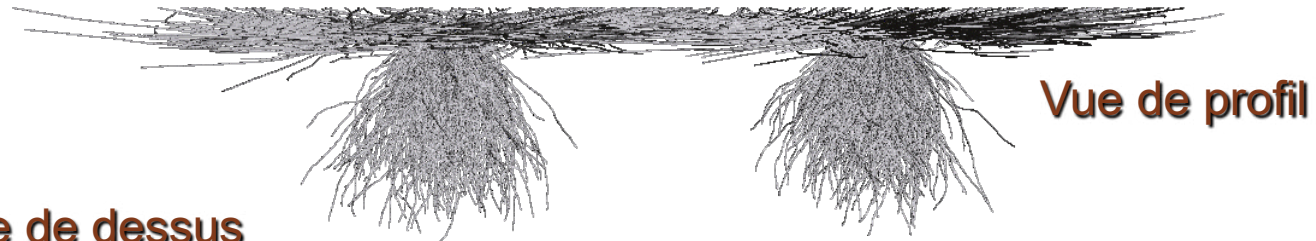
Profondeur : 0,8 m

Simulation du cocotier à 7 ans

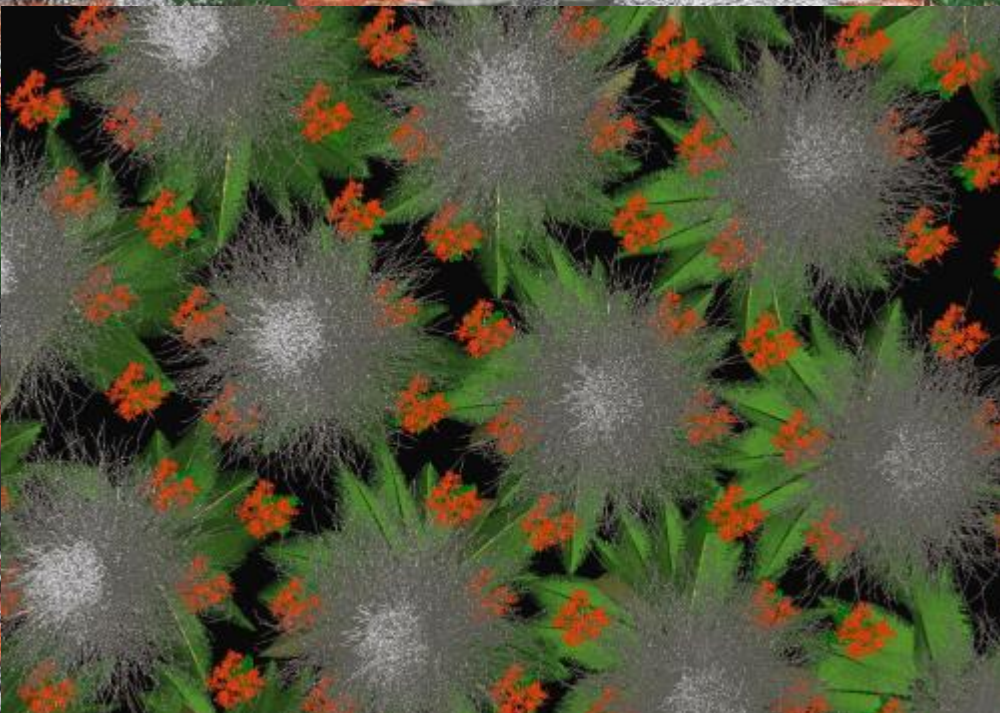
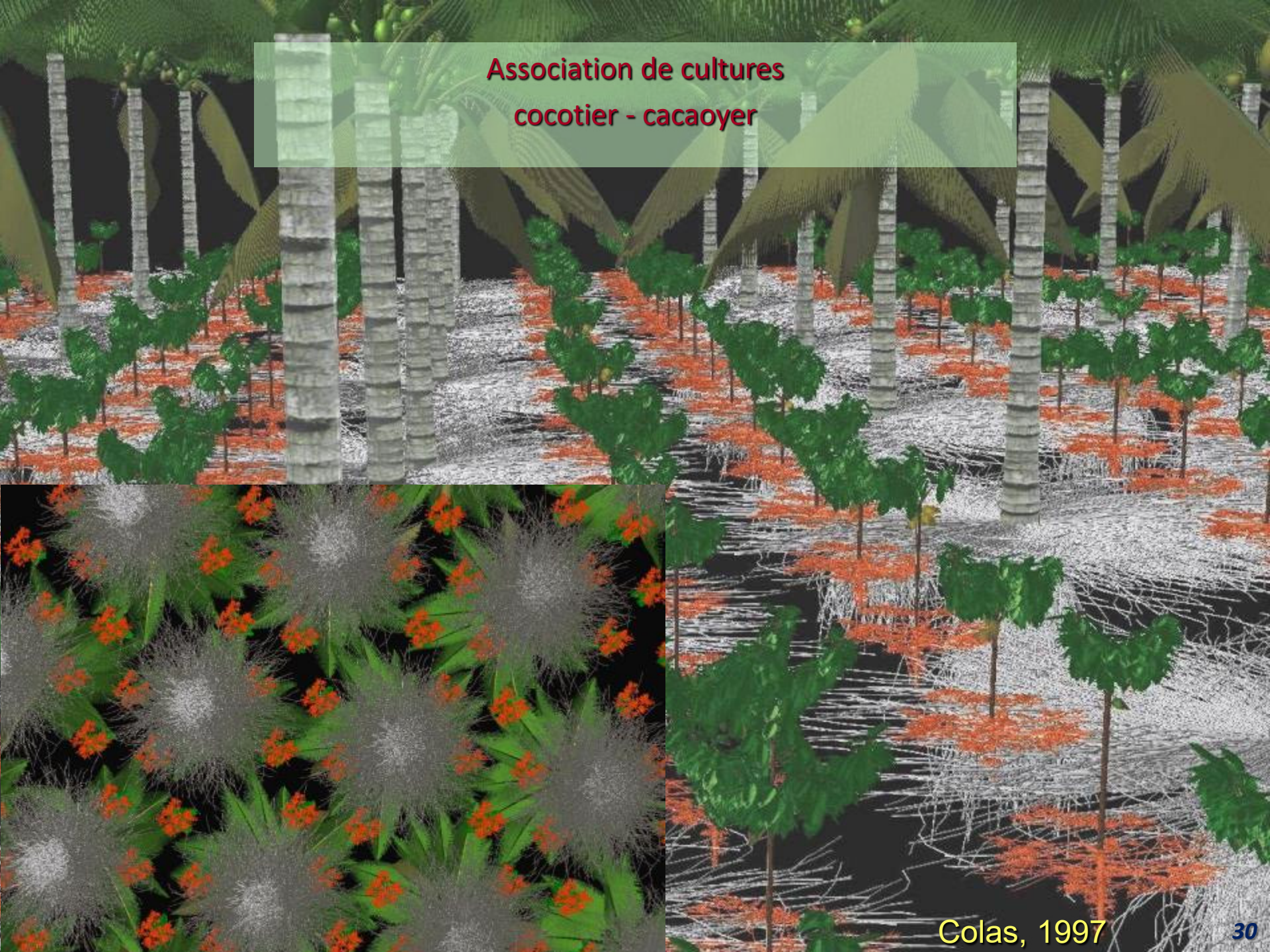


Colas, 1997

Distribution spatiale de plantation de palmier à huile de 7 ans



Association de cultures
cocotier - cacaoyer

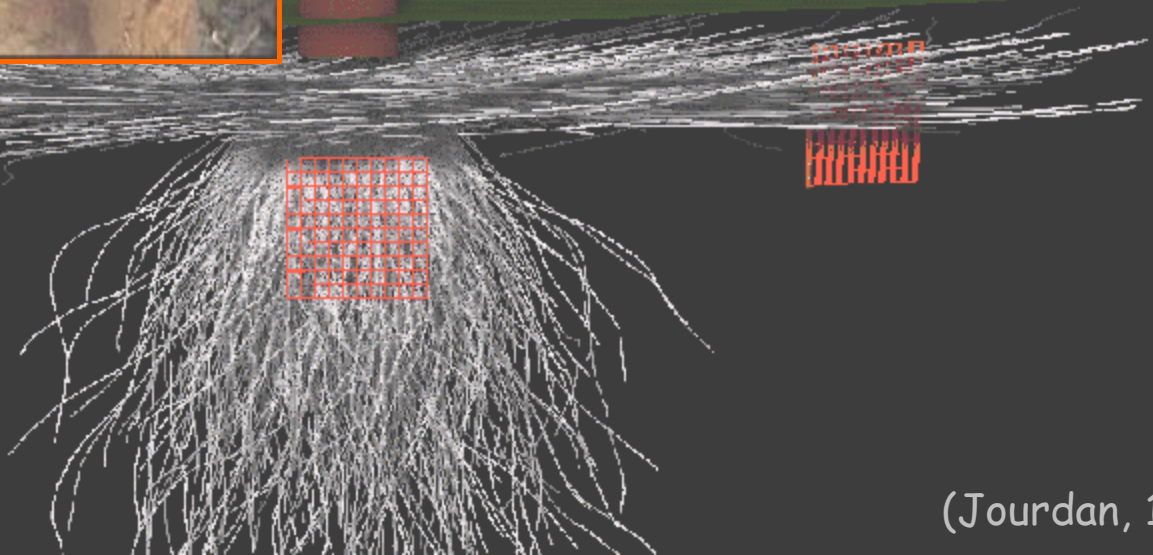
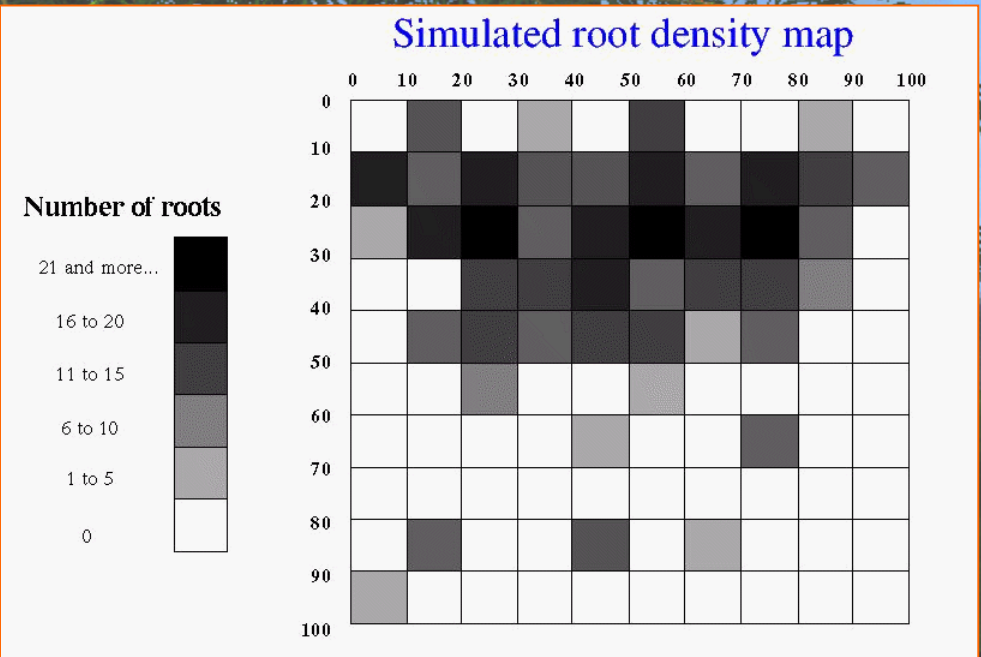




Palmier à huile, 11 ans

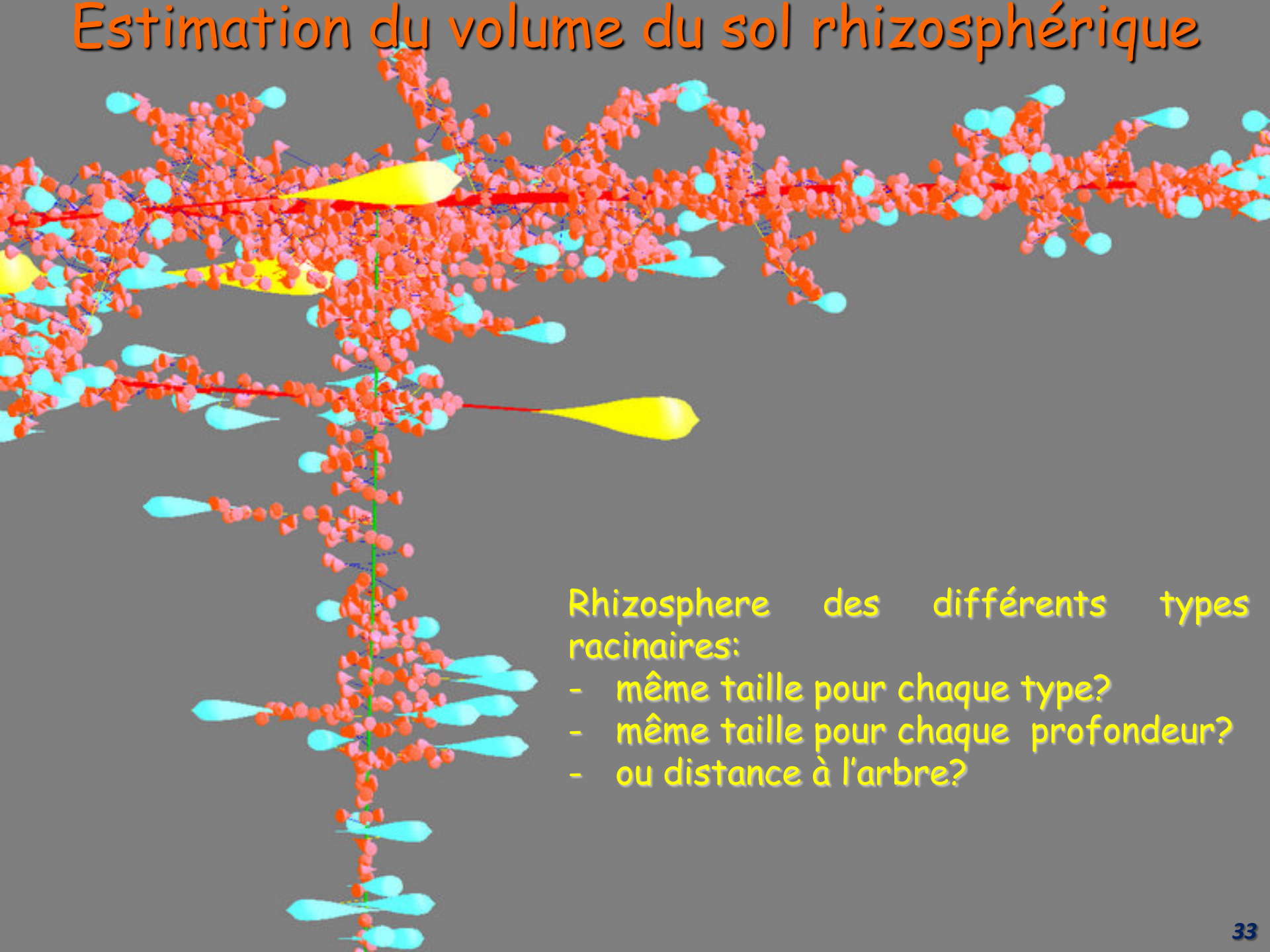
(Jourdan, 1995)

Simulation de la compétition pour l'espace entre feuilles et racines



Estimation de la densité racinaire au champ par carte d'impacts racinaires

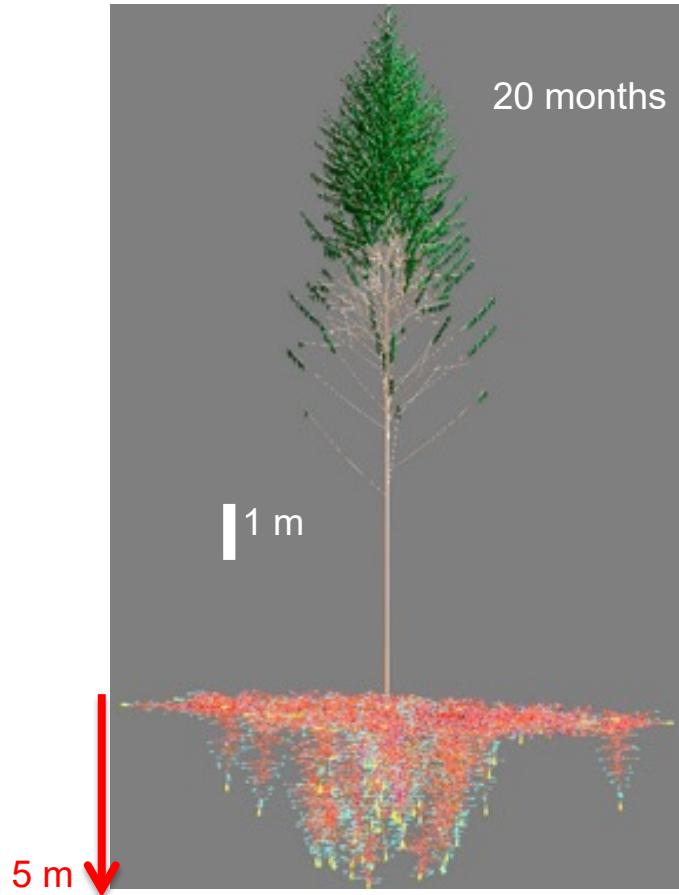
Estimation du volume du sol rhizosphérique



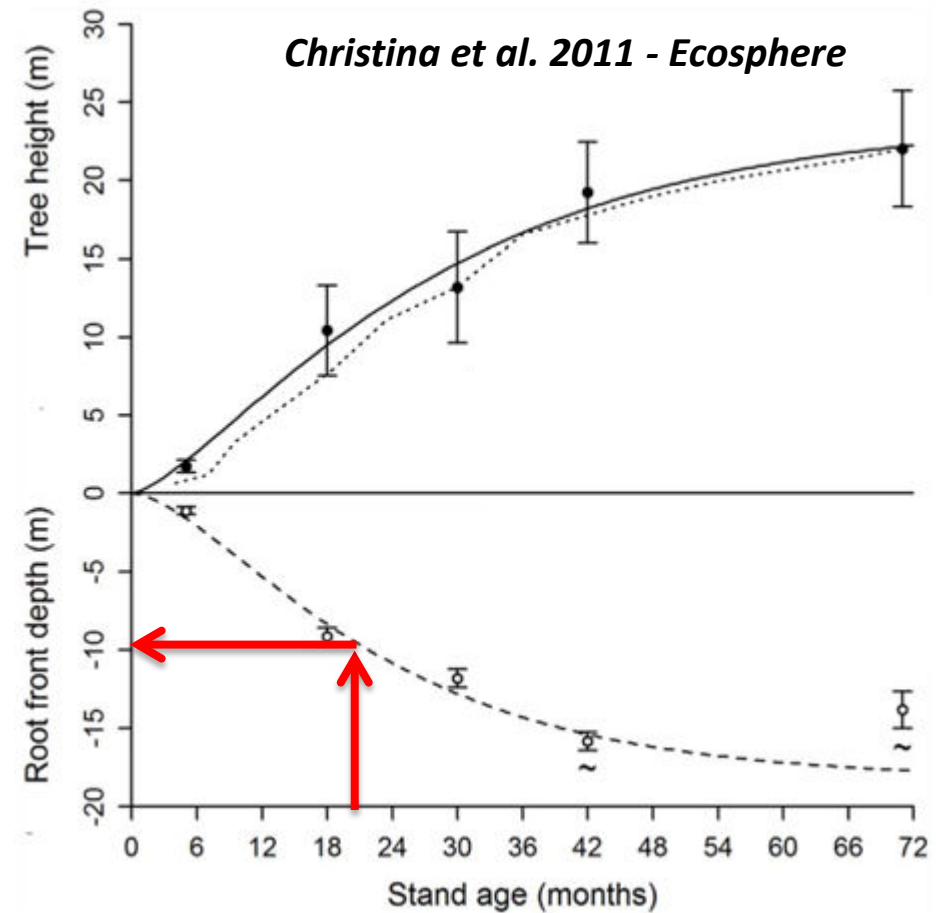
Rhizosphere des différents types racinaires:

- même taille pour chaque type?
- même taille pour chaque profondeur?
- ou distance à l'arbre?

Mais bien souvent les modèles restent loin...



Rey et al. 2011 – IBC conference, Melbourne, Australia



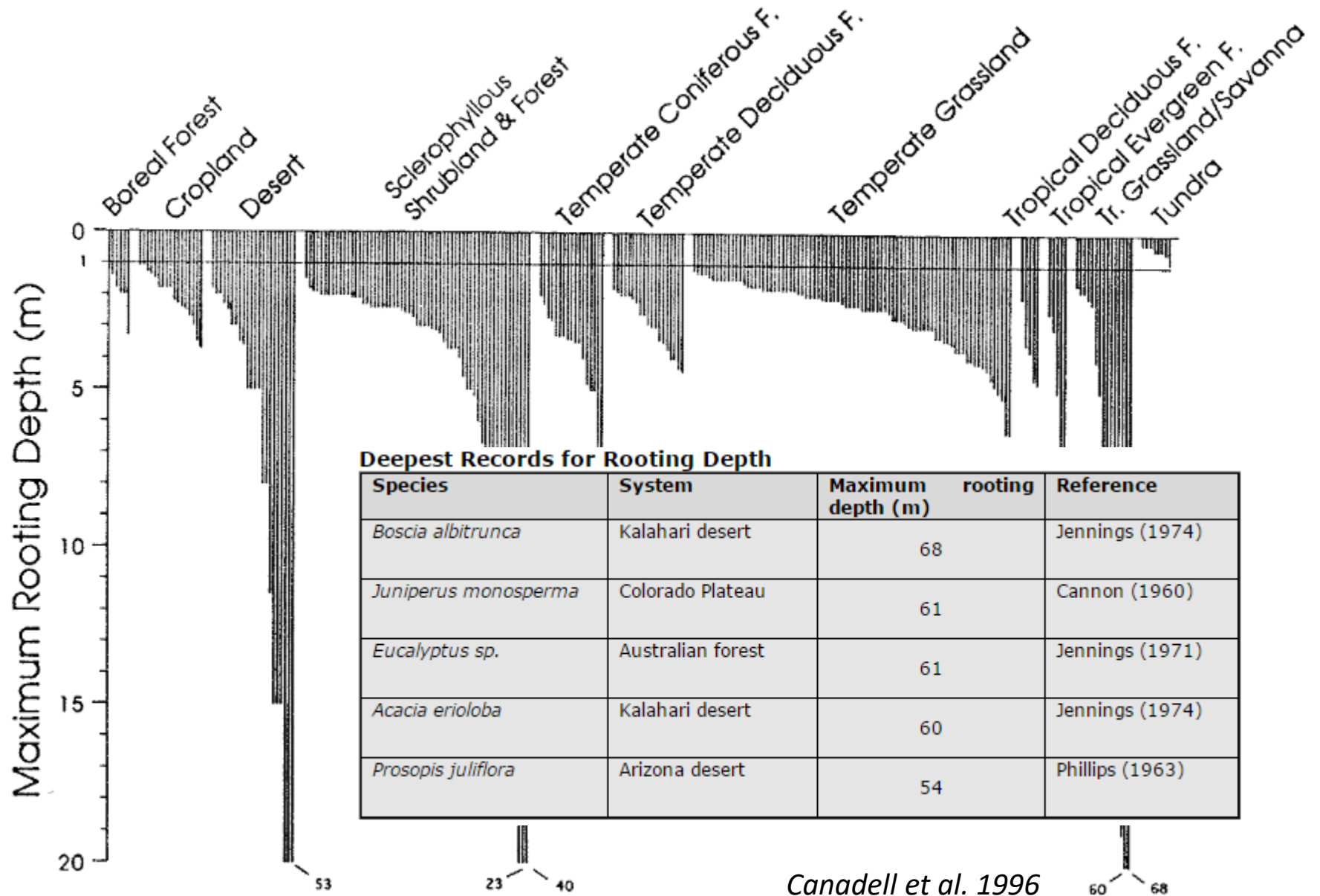
Hauteur des arbres et profondeur de front racinaire de l'eucalyptus au Brésil

... de la réalité!

Les racines ont colonisé la profondeur du sol



Les racines ont colonisé la profondeur du sol



Colonisation racinaire profonde...

Peu d'études finalement...

Les racines des cultures, des arbres sont étudiées en surface 0-30 cm, 1m de profondeur, rarement plus profond...

- **facilité d'étude** : pbs d'excavation, accès, intérêt au-delà d'1 m de profondeur
- **présence de nutriments** : litières aériennes, fertilisants...
- **biomasse racinaire plus importante** : pas besoin de creuser plus profond!

Colonisation racinaire profonde...

- **Quelles fonctions?**
 - Ancrage?
 - Nutrition minérale?
 - Alimentation hydrique?
- **Quels rôles?**
 - Passer les mauvaises saisons?
 - Lutter contre les compétitions entre plantes?...
- **Quelles conséquences?**
 - Sur le bilan C (priming effect?)
 - Sur le bilan hydrique
 - Sur les cycles biogéochimiques...

Plantes modèles



- *Eucalyptus*: l'espèce caducifoliée la plus plantée au monde en milieu tropical (20 million ha)
- la + productive en biomasse avec un accroissement annuel de $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ au Brésil
- pluies 1400 mm an^{-1} mais forte demande en eau et nutriments





- *Noyer - blé en association*
- Sud de France, moins de 800 mm y⁻¹ de précipitations
- forte et longue période (3 mois) de sécheresse



Plantes modèles



- *Faidherbia albida* - Mil en association
- Sénégal, moins de 500 mm y^{-1} de pluie
- très forte et très longue période (8 mois) de sécheresse





- *Chêne truffier*

- Sud de France, moins de 700 mm y⁻¹
de pluie

- forte et longue période (3 mois) de
sécheresse



Les plantations d'eucalyptus au Brésil: un modèle d'étude



- Forte production de biomasses aérienne

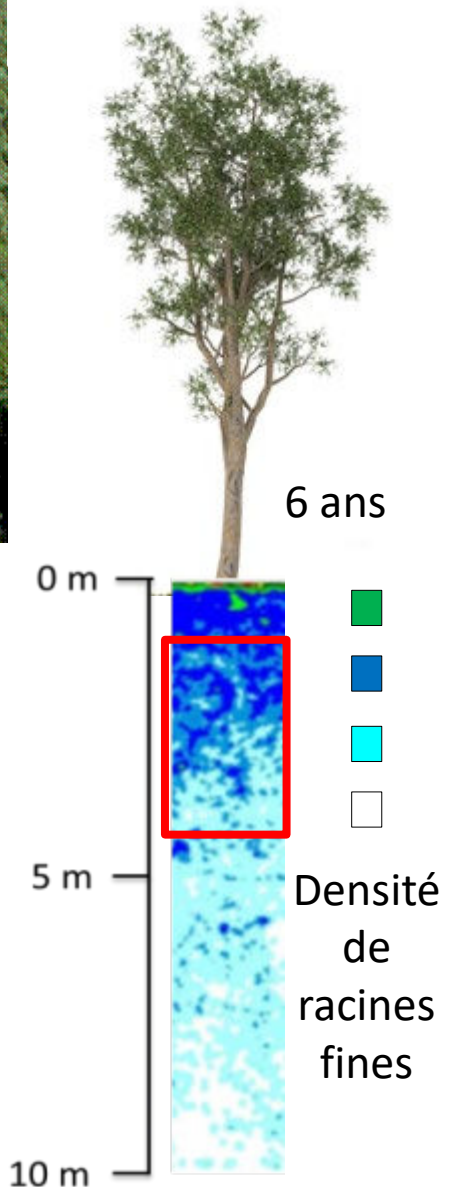
ET **souterraine !**

→ **80% des racines fines sous 1m** (Laclau et al 2013)

- Accès à la nappe Indispensable à la survie des arbres matures à la sécheresse (Christina et al 2011)

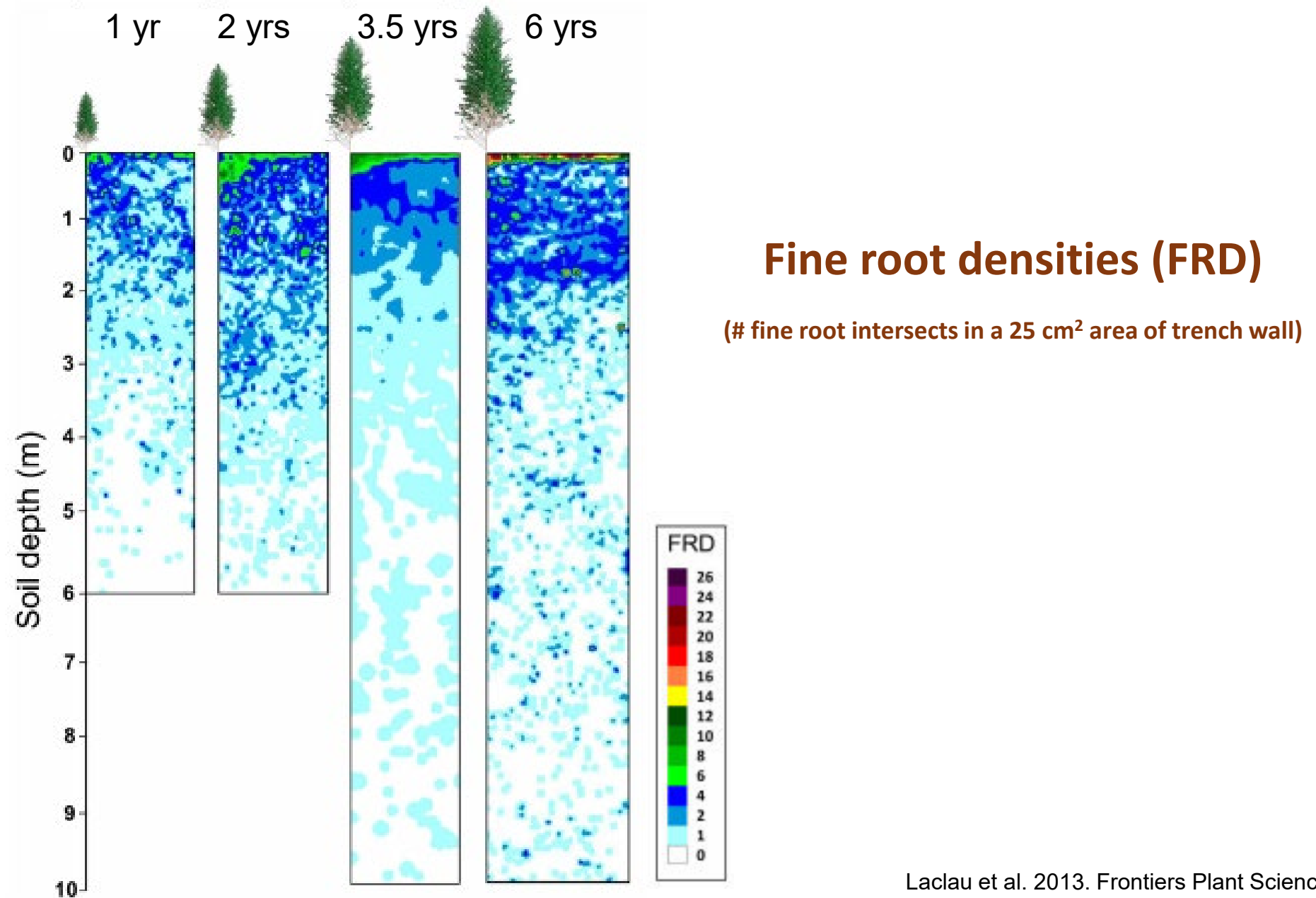
→ **Rôle des racines fines profondes dans la nutrition ??**

Kriged maps of roots less than 1 mm in diameter (FRD, number of root intersects counted in a 25 cm² area of trench wall) on the P0 soil profile

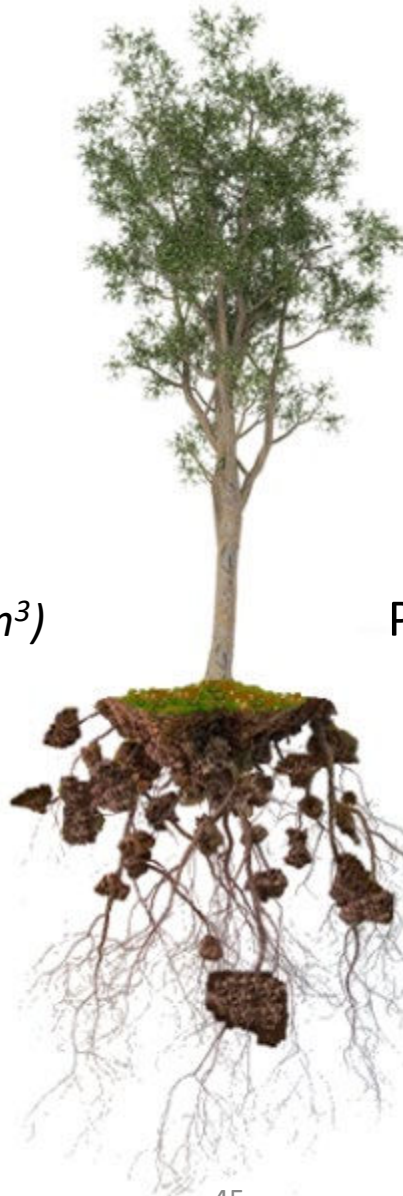


→ Laclau et al. 2013

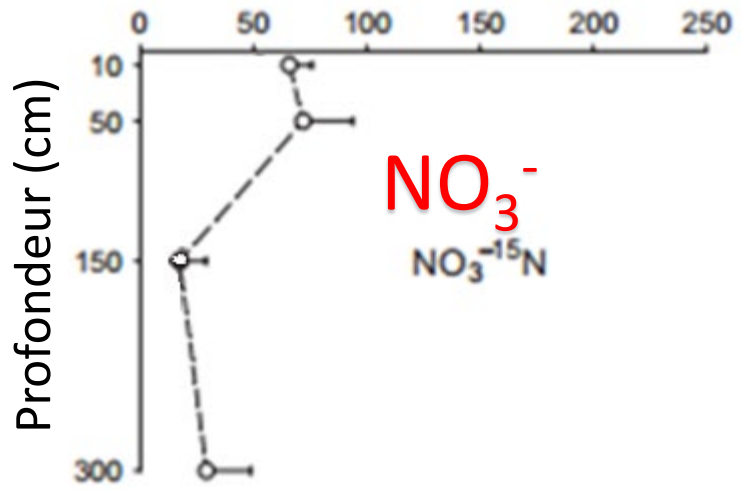
Une colonisation très rapide supérieure à 10m de profondeur



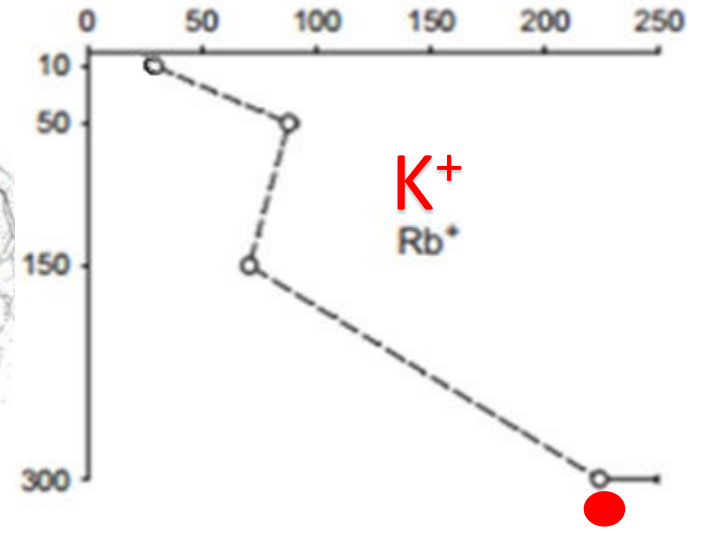
Une absorption différentielle entre la surface et la profondeur



Potentiel d'absorption (% $cm^{-1} cm^3$)



Potentiel d'absorption (% $cm^{-1} cm^3$)



(Silva et al. 2011)⁴⁵

Une absorption différentielle entre la surface et la profondeur

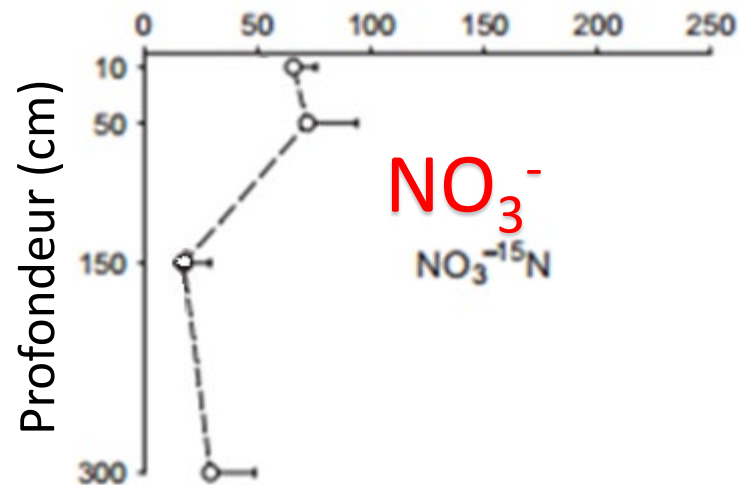
Les racines profondes sont capables d'absorber des nutriments

...

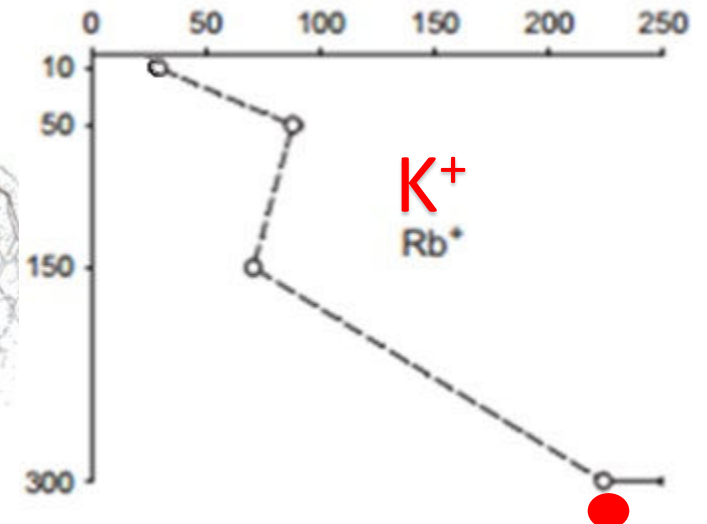
→ Spécialisation du fonctionnement avec la profondeur lorsque les nutriments leur sont fournis en grande quantité

Qu'en est-il en conditions réelles de sols pauvres en nutriments?

Potentiel d'absorption (% $cm^{-1} cm^3$)



Potentiel d'absorption (% $cm^{-1} cm^3$)



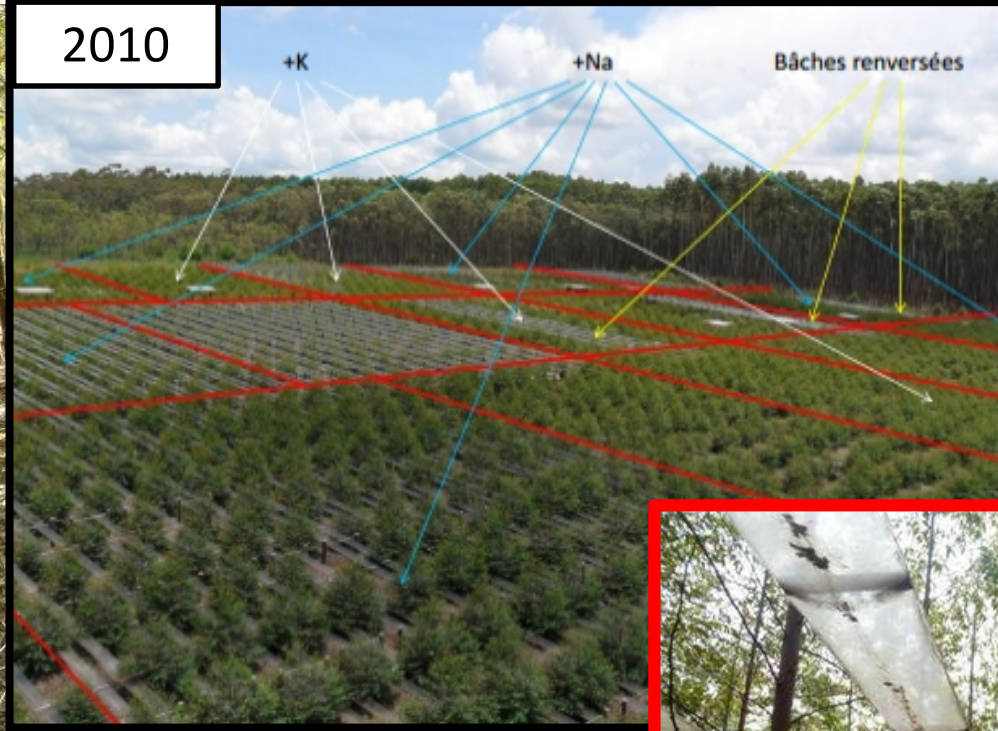
(Silva et al. 2011)⁴⁶

Plantation clonale d'*Eucalyptus grandis*

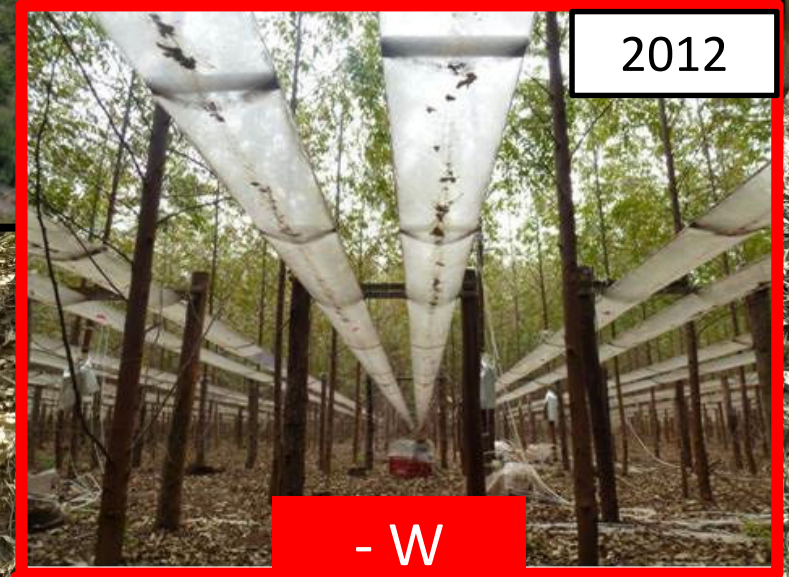
2015



2010



2012



+ W

« *Pluies naturelles* »

Régime de pluie non perturbé

- W

« *Réduction des pluies* »

- 37% des pluvioléssivats

Les dispositifs d'étude



17m depth observatory pits (+W, -W)



Root windows to monitor root dynamics and functioning



Trenches between plots

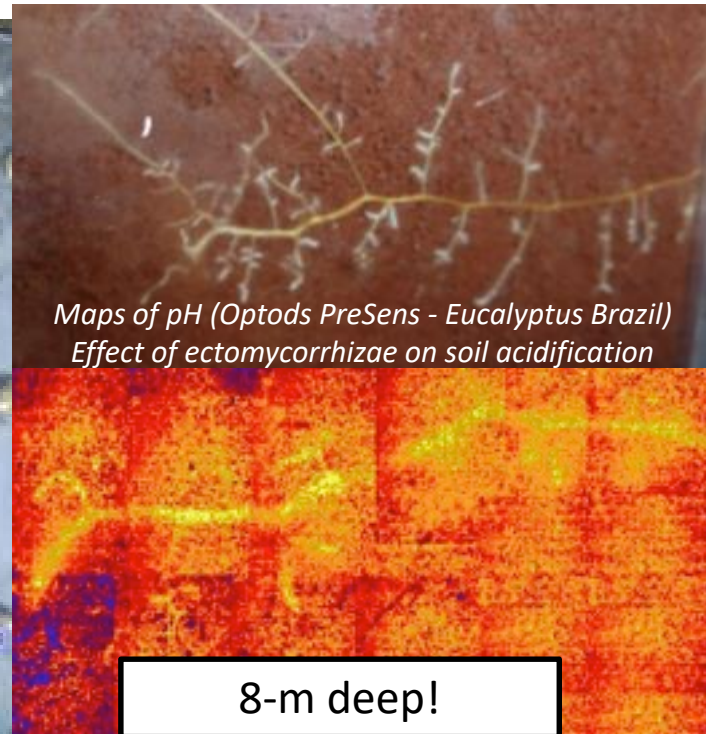


TDR probes down to 17 m

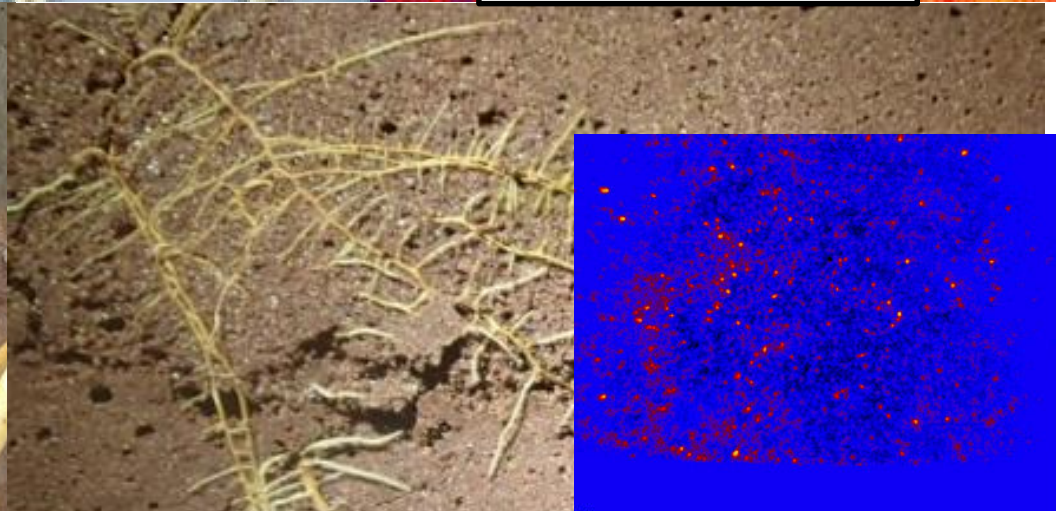


18 schaffolds

Puits de 17m pour observer le fonctionnement racinaire



8-m deep!



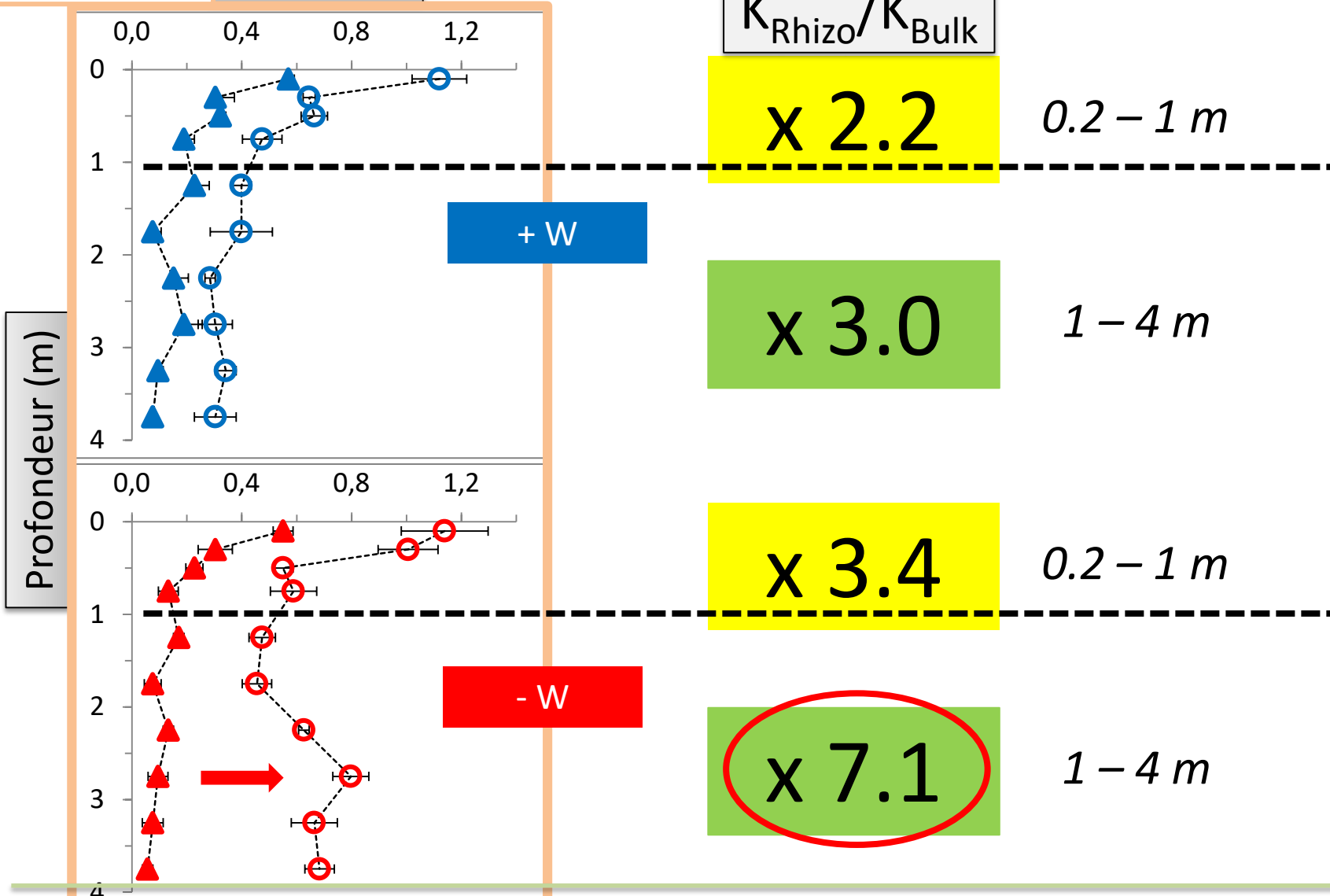
Effet rhizosphère: K vs profondeur pour +W et -W

	Bulk	Rhizo
+W		
-W		

Saison sèche

K (mg.kg⁻¹)

K_{Rhizo}/K_{Bulk}



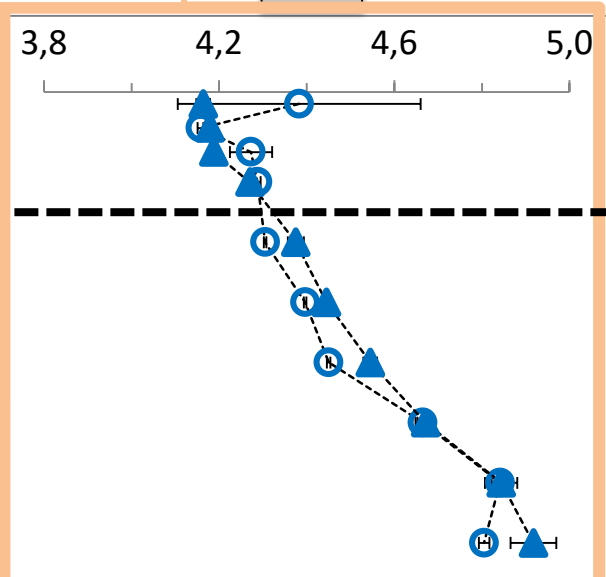
pH vs profondeur pour +W et -W

	Bulk	Rhizo
+W		
-W		

Saison sèche

pH

Profondeur (m)



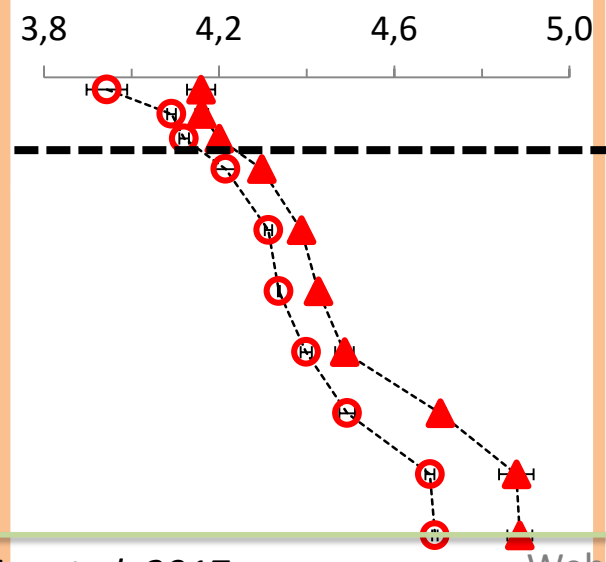
$H_3O^+_{Rhizo}/H_3O^+_{Bulk}$

x 0.95

0.2 – 1 m

x 1.14

1 – 4 m



x 1.20

0.2 – 1 m

x 1.40

1 – 4 m

- **Accumulation de protons** dans la rhizosphere, **en particulier en profondeur**
- **Accumulation de K_{ech}** dans la rhizosphère, **en particulier en profondeur**
- **Accumulation de Al_{ech}** dans la rhizosphere, mais pas de P (profil stable)

- Lien entre acidification et augmentation du K_{ech} dans le bulk soil
- Lien entre acidification et augmentation de Al_{ech} en rhizosphere et dans le bulk





- **La réduction des pluies favorise l'effet rhizosphérique** pendant la saison sèche.
- La réduction des pluies n'a pas d'effet en saison des pluies, jusqu'à 2m.

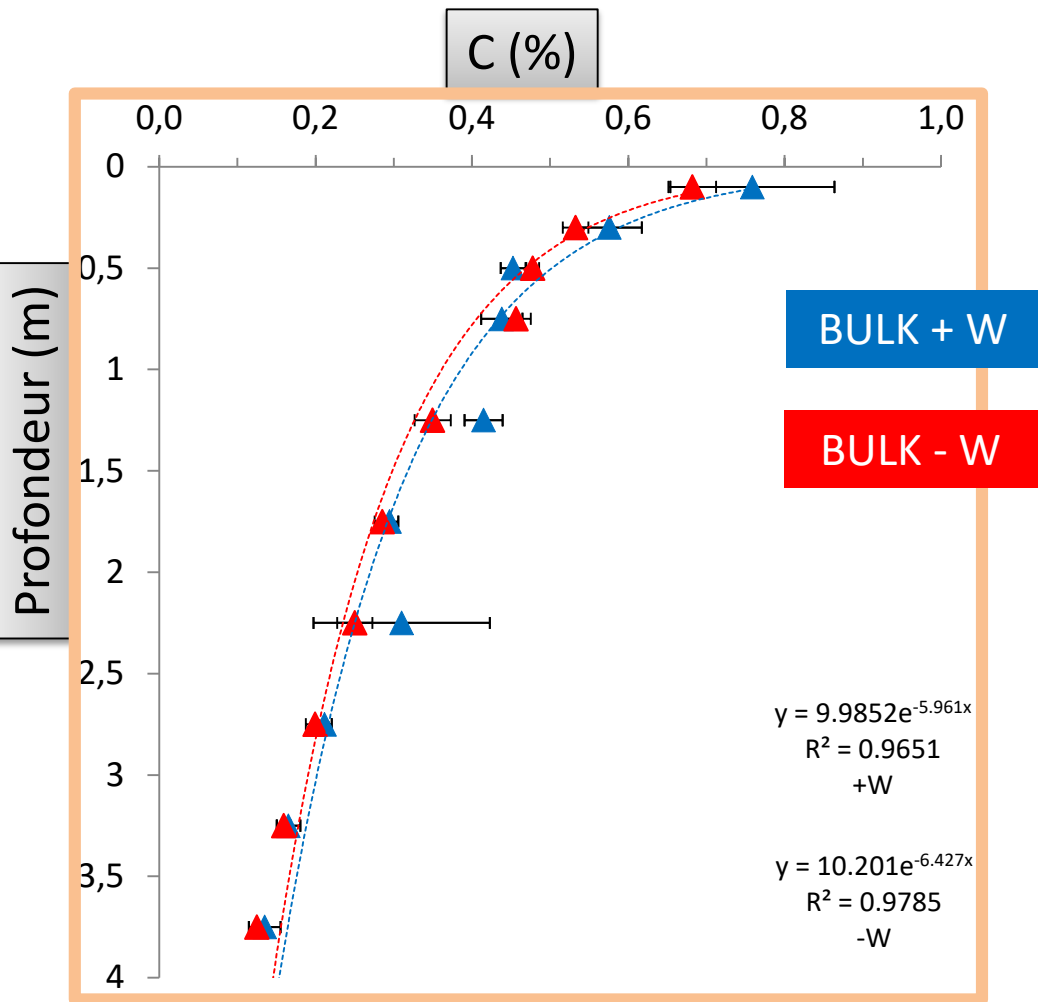
- **Accumulation de protons** dans la rhizosphere, **en particulier en profondeur**
- **Accumulation de K_{ech}** dans la rhizosphère, **en particulier en profondeur**
- **Accumulation de Al_{ech}** dans la rhizosphere, mais pas de P (profil stable)
- Lien entre acidification et augmentation du K_{ech} dans le bulk soil
- Lien entre acidification et augmentation de Al_{ech} en rhizosphere et dans le bulk
- **La réduction des pluies favorise l'effet rhizosphérique** pendant la saison sèche.
- La réduction des pluies n'a pas d'effet en saison des pluies, jusqu'à 2m.

L'acidification de la rhizosphere pourrait augmenter la disponibilité en K_{ech} , notamment en grande profondeur et pendant les sécheresses, en favorisant l'altération.

Réactivité importante pour K, or rôle important de K dans la régulation de l'eau de la plante → Part d'une adaptation?

C_{org} et N_{tot} vs profondeur pour +W et -W

	Bulk	Rhizo
+W		
-W		

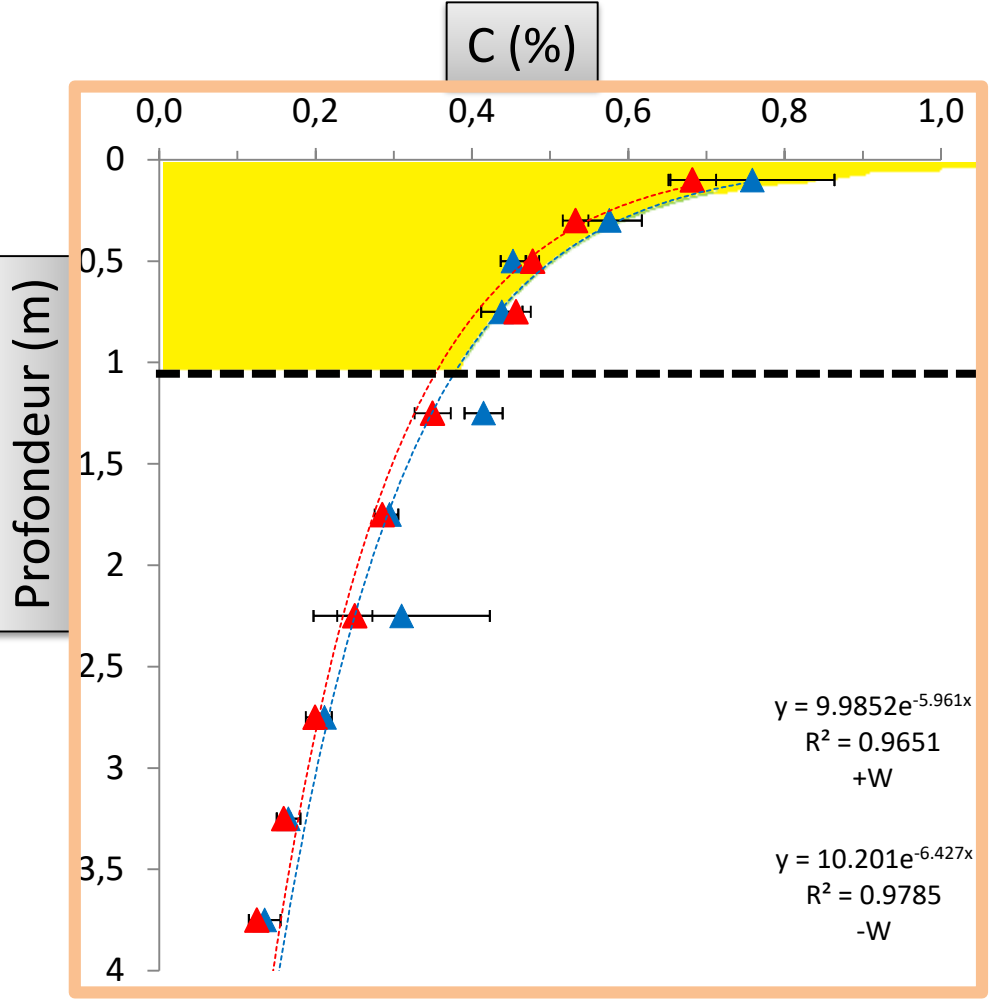


Diminution exponentielle

Pas d'effet traitement

C_{org} et N_{tot} vs profondeur pour +W et -W

	Bulk	Rhizo
+W		
-W		

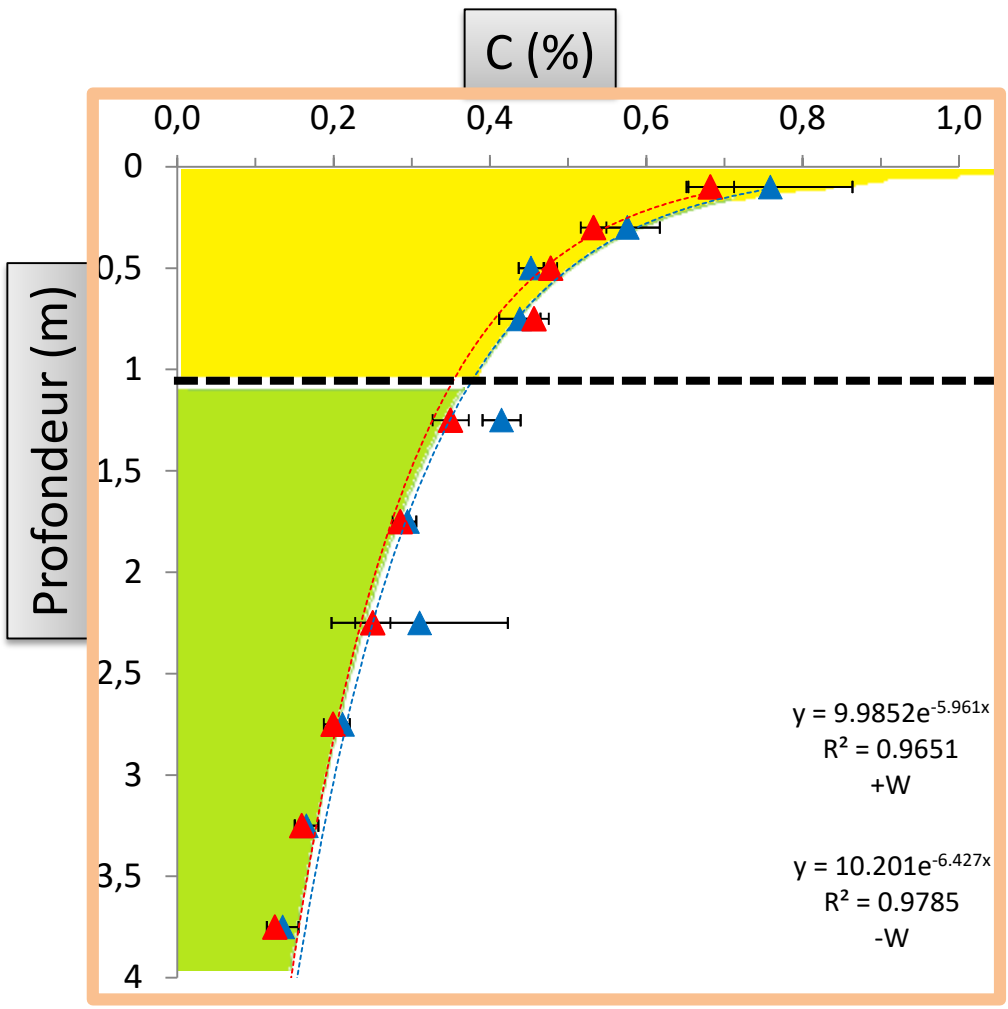


Rumpel et Kogel-Knabner 2011

Pierret et al 2016

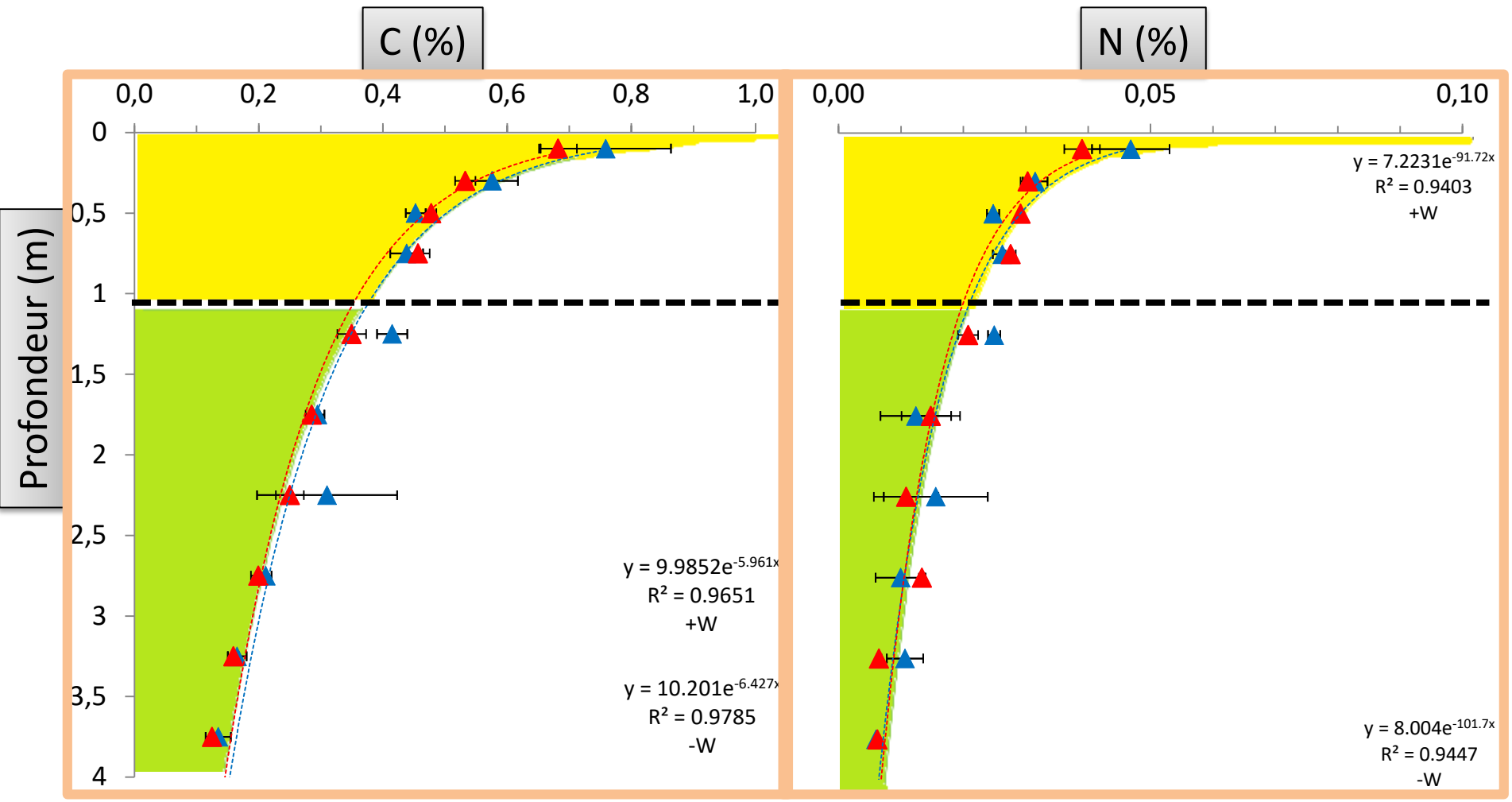
C_{org} et N_{tot} vs profondeur pour +W et -W

	Bulk	Rhizo
+W		
-W		



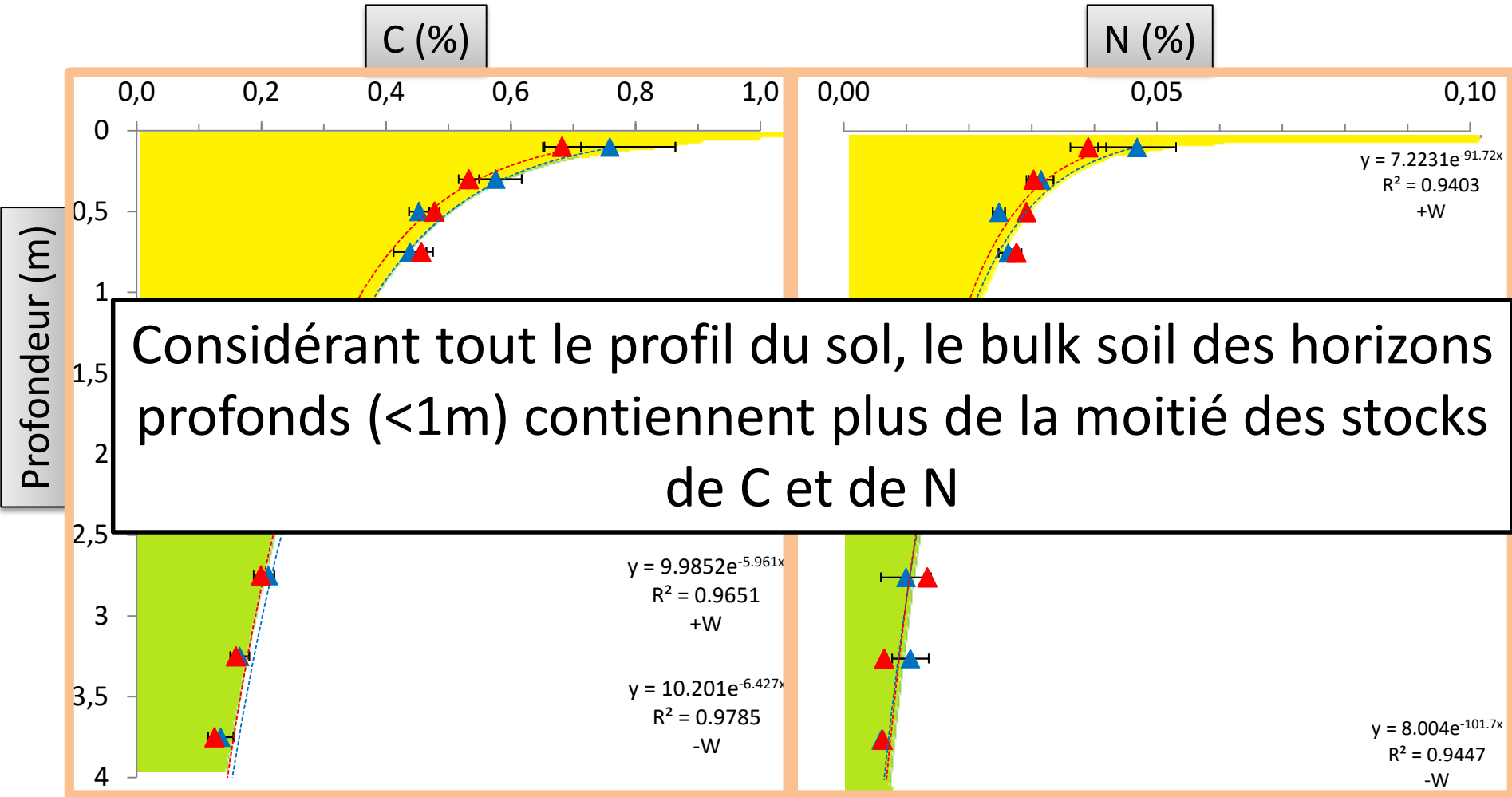
C_{org} et N_{tot} vs profondeur pour +W et -W

	Bulk	Rhizo
+W		
-W		



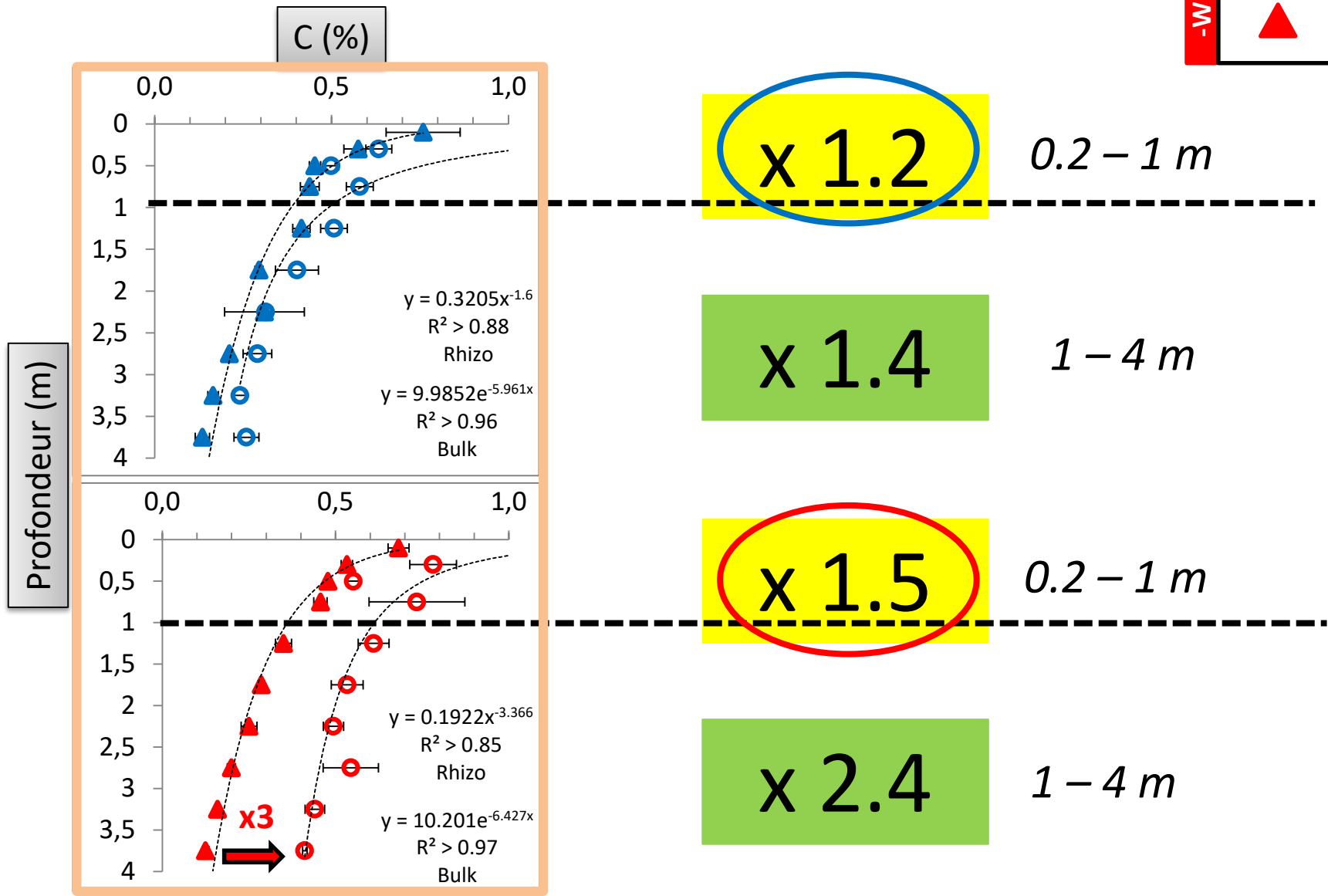
C_{org} et N_{tot} vs profondeur pour +W et -W

	Bulk	Rhizo
+W		
-W		



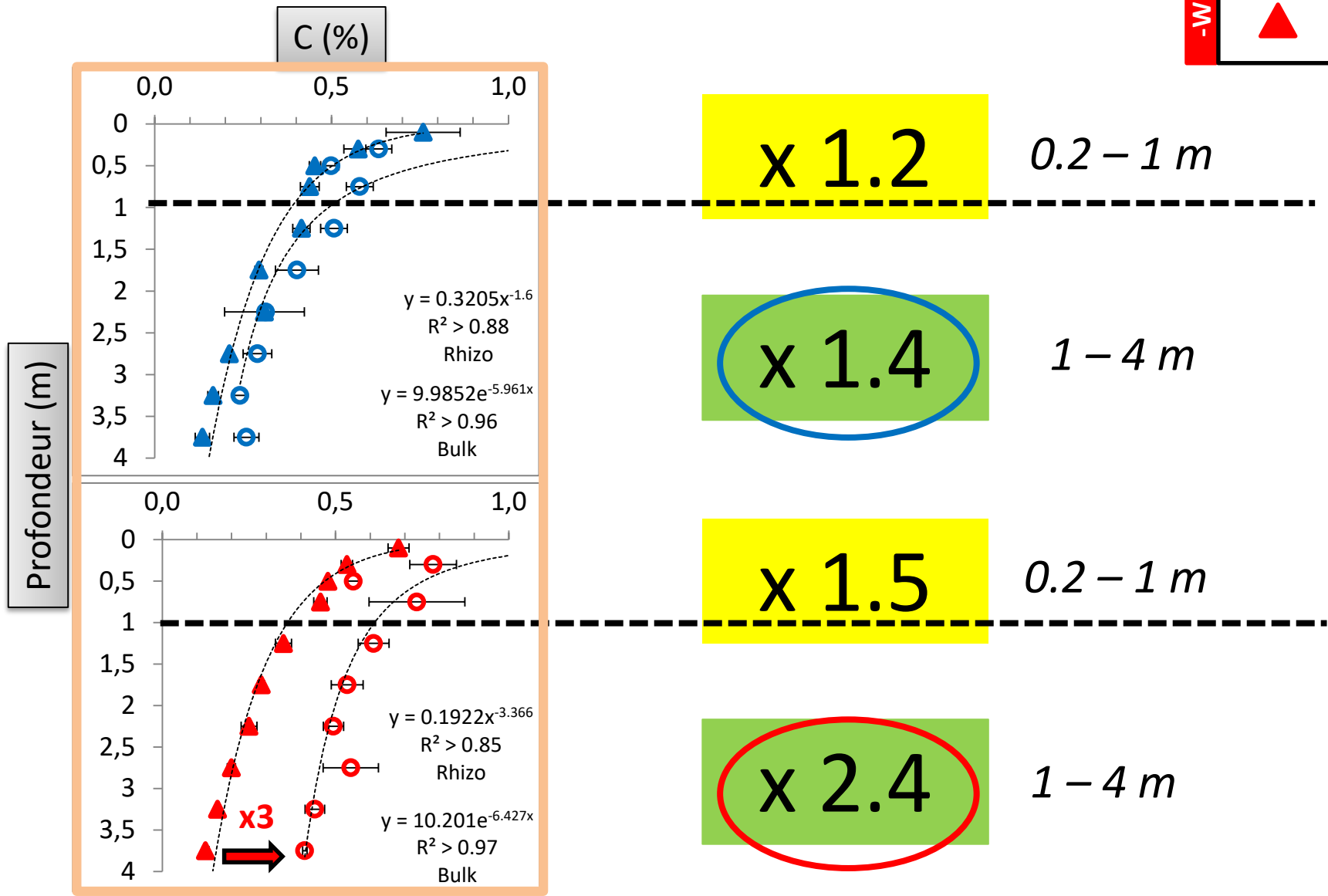
C_{org} et N_{tot} vs profondeur pour +W et -W

	Bulk	Rhizo
+W		
-W		



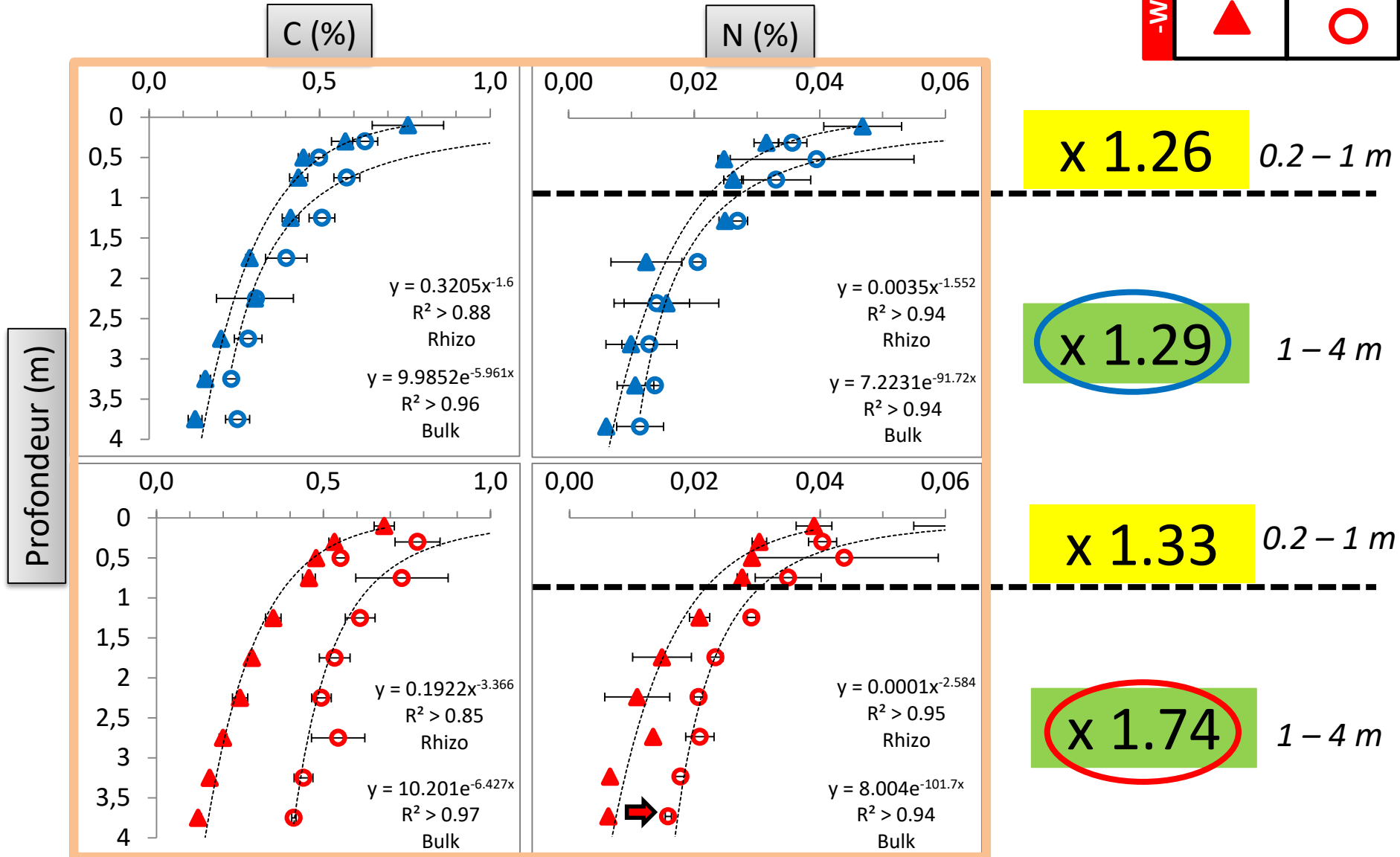
C_{org} et N_{tot} vs profondeur pour +W et -W

	Bulk	Rhizo
+W		
-W		







C_{org} et N_{tot} vs profondeur pour +W et -W

	Bulk	Rhizo
+W		
-W		



C_{org} et N_{tot} vs profondeur pour $+W$ et $-W$

	Bulk	Rhizo
$+W$		
$-W$		

Accumulation de C et N en rhizosphère

→ Hypothèse : Rhizodéposition

Accumulation favorisée par la réduction des
pluies en saison sèche,
en particulier en grande profondeur

Importance de la prise en compte des sols profonds, au-delà du premier mètre dans l'évaluation des stocks de carbone

Part faible mais non négligeable du carbone apporté au sol via le fonctionnement racinaire

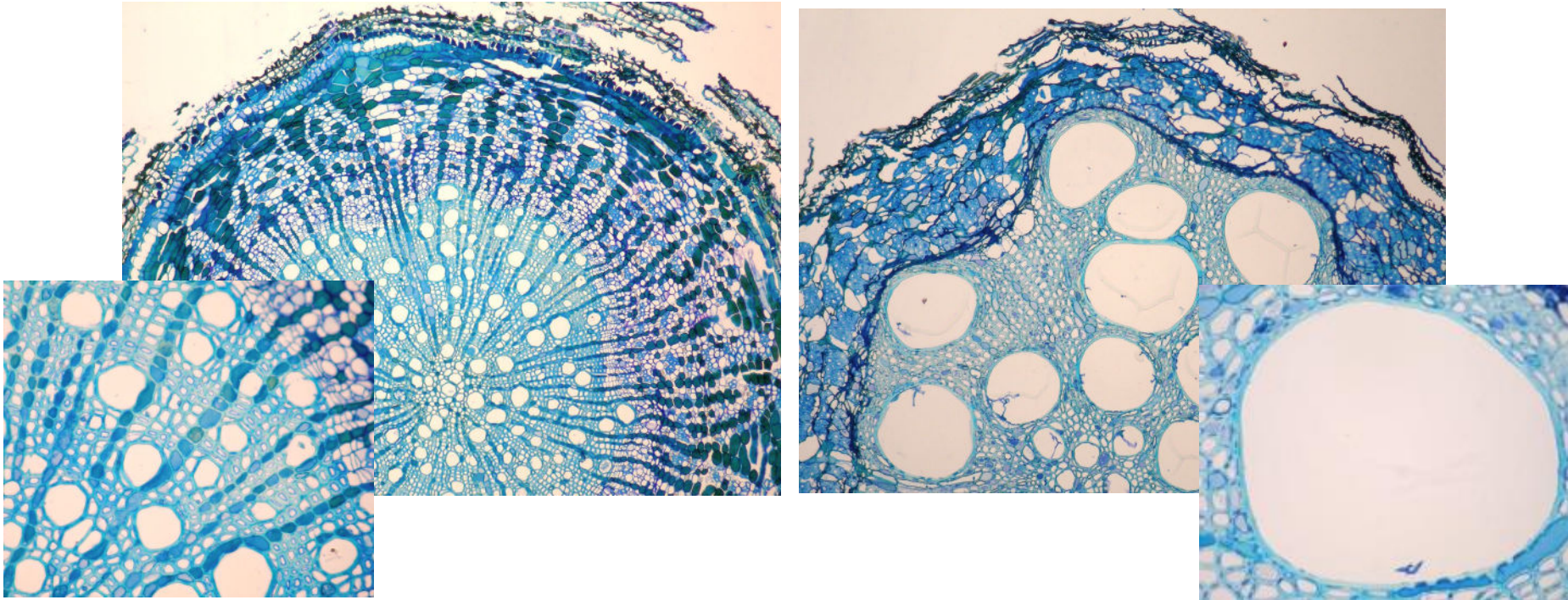
Rasse et al : C sub soil, essentiellement d'origine racinaire

→ turnover MAIS EGALEMENT RHIZODEPOSITION qui est une grandeur beaucoup moins étudiée et prise en compte

L'anatomie racinaire est fortement impactée par la profondeur

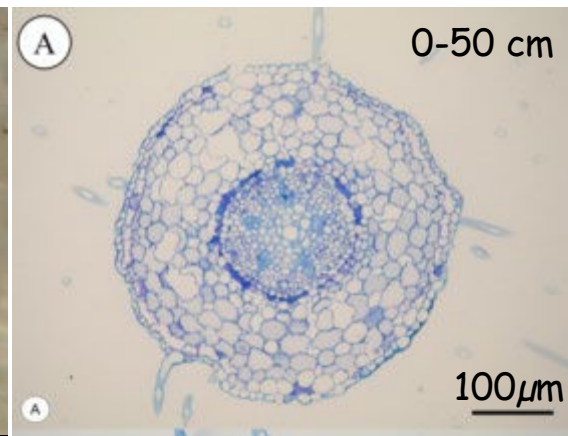
0-50 cm

15-16 m



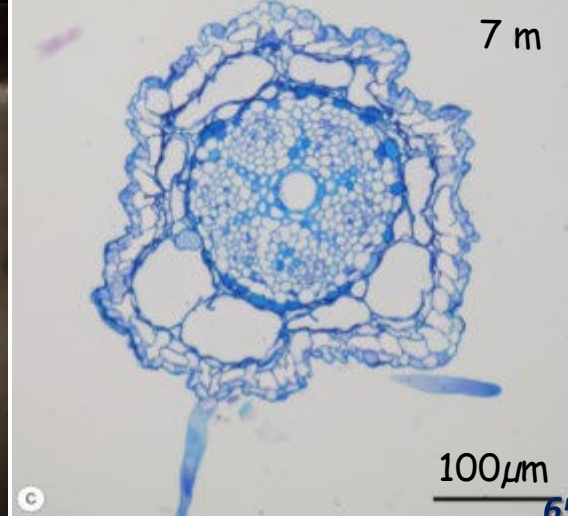
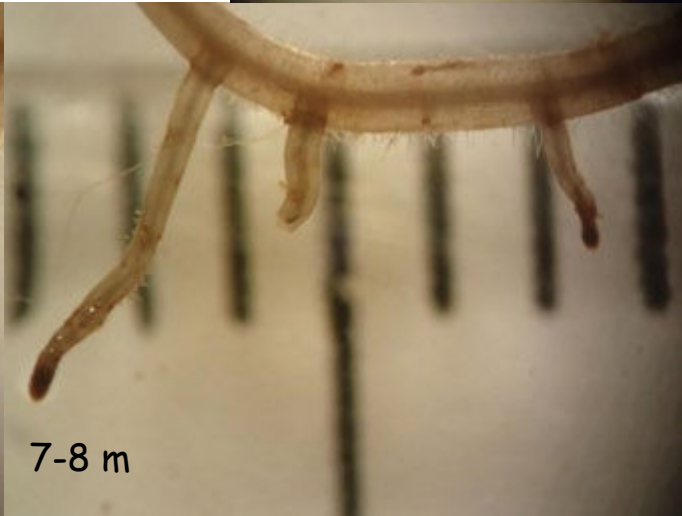
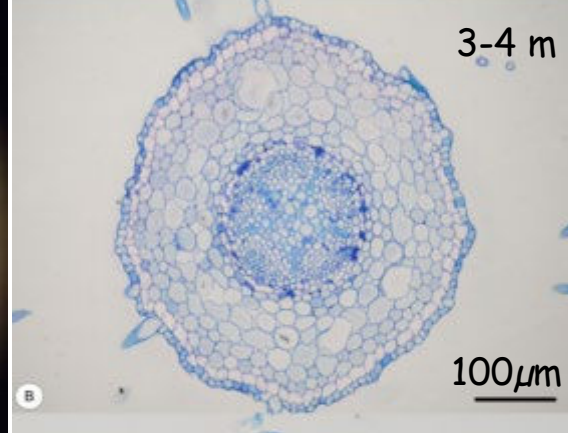
- Les racines fines différenciées (1-2 mm diamètre) présentent un périderme subérisé, un phloème secondaire avec des rayons dilatés, cambium et du xylème secondaire.
- Le xylème secondaire : larges vaisseaux, fibres et cellules du parenchyme, distribuées sur une surface plus grande en profondeur (50.2%) qu'en surface (31.4%).
- Les vaisseaux de xylème des racines profondes ont des diamètres plus importants ($148.3 \pm 11,1 \mu\text{m}$) qu'en surface ($42.1 \pm 16,1 \mu\text{m}$).

Gomide et al In prep..



Analyses morphologiques et anatomiques
Maestrado Maela Peron

- Mycorhizes profondes > 7 m
- Aérenchyme et poils racinaires



Racines fines
d'eucalyptus à plus de
15 m de profondeur



Ectomycorhizes en profondeur !

De 0 à 4 m

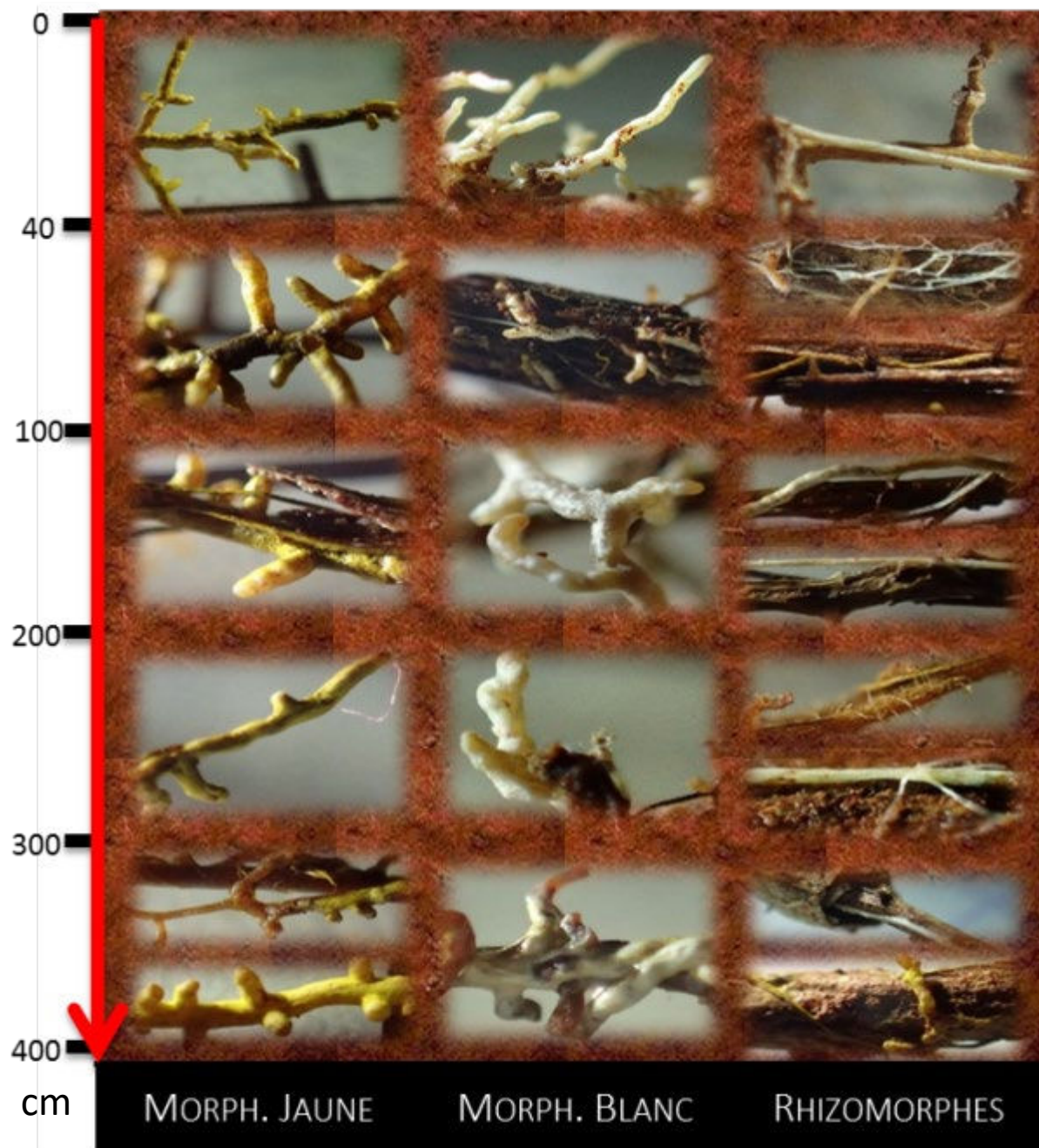
En +W et -W

Saison des pluies

Saison sèche



FRUCTIFICATIONS



Suivi dynamique de la croissance racinaire

- Scanner CI-600 (CID Inc., WA, USA) circulaire
- Minirhizotrons : tubes transparents

Images:

- Interface 360°
- Format TIF
- Resolution 300 dpi





Etude dynamique racinaire



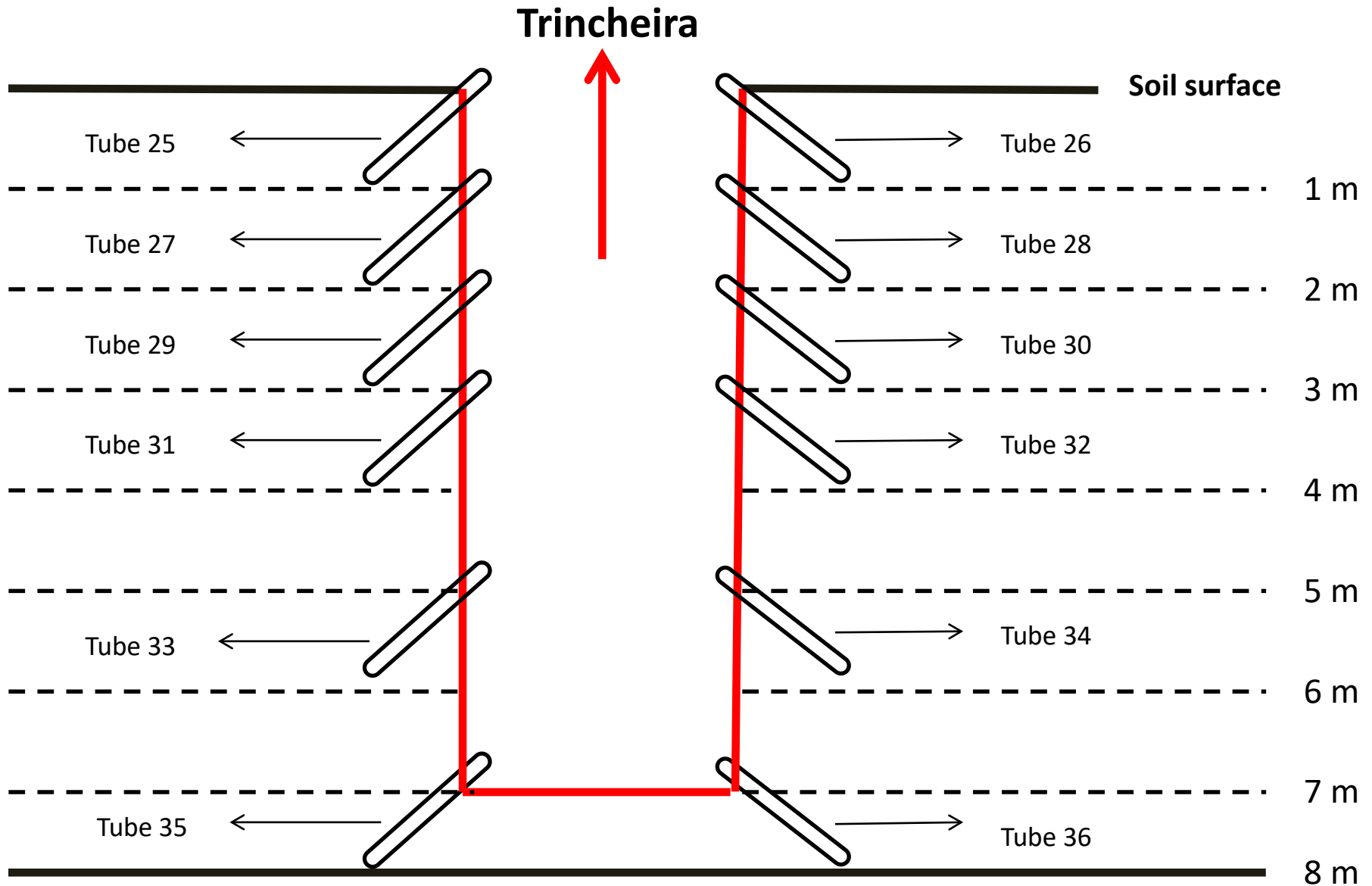
-7 m



Eucalyptus, Brésil



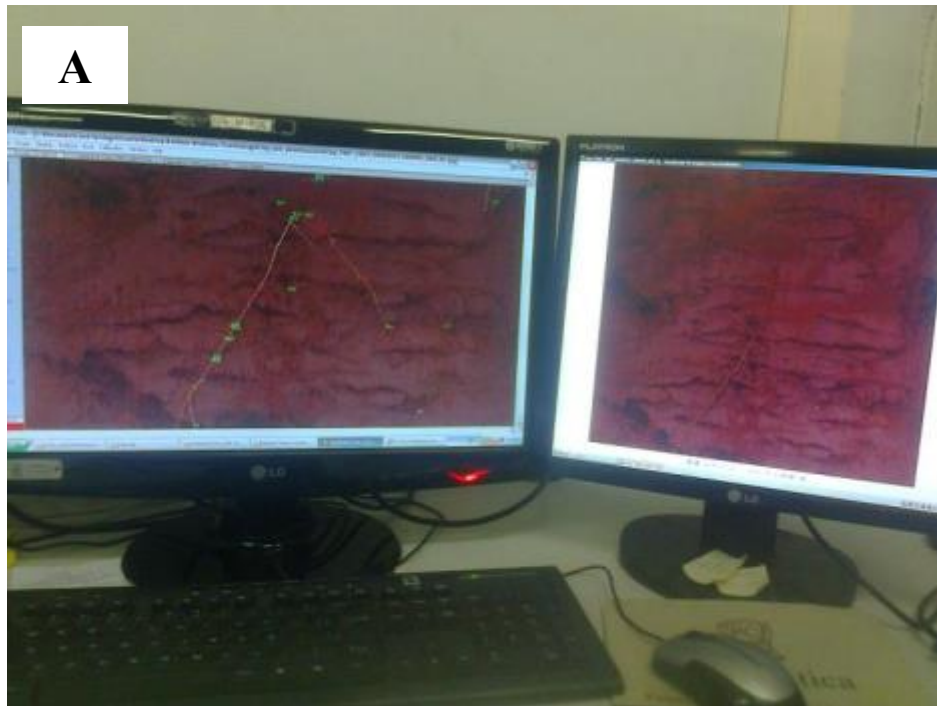
Schéma du dispositif



ANALYSE D'IMAGES

- Identificação: **Clay_T001_L007_01312013_000000_015_GL**
- Surface analysée : 422 cm²
- Software : WinRHIZO Tron V.2008b (Regent – Canada)

A



B



Détection automatique des racines et analyse d'images par intelligence artificielle

Fine root dynamics monitoring through automatic root detection by deep learning

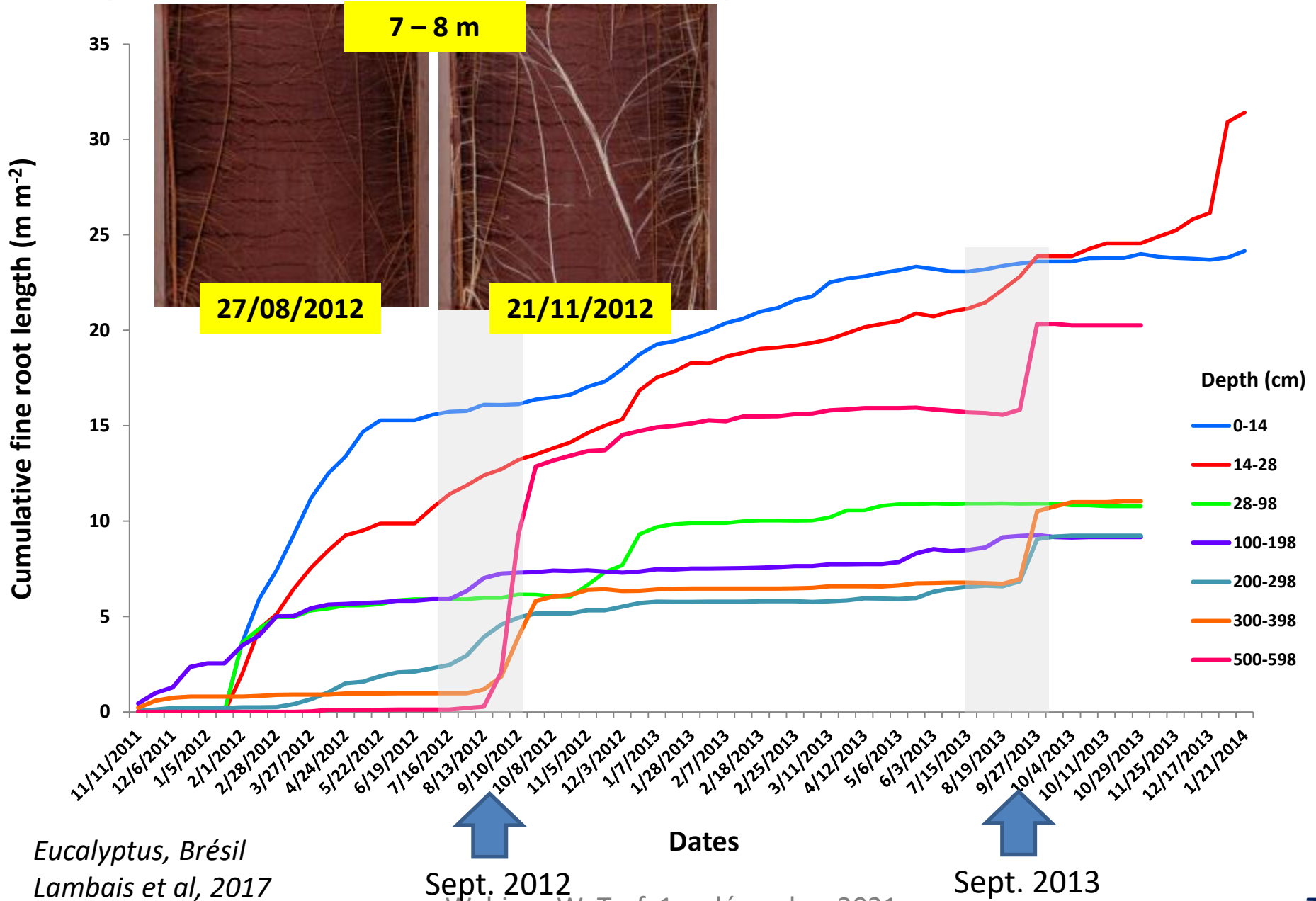
Groundnut fine root growth at a depth of 50 cm observed on September 13th, 2019



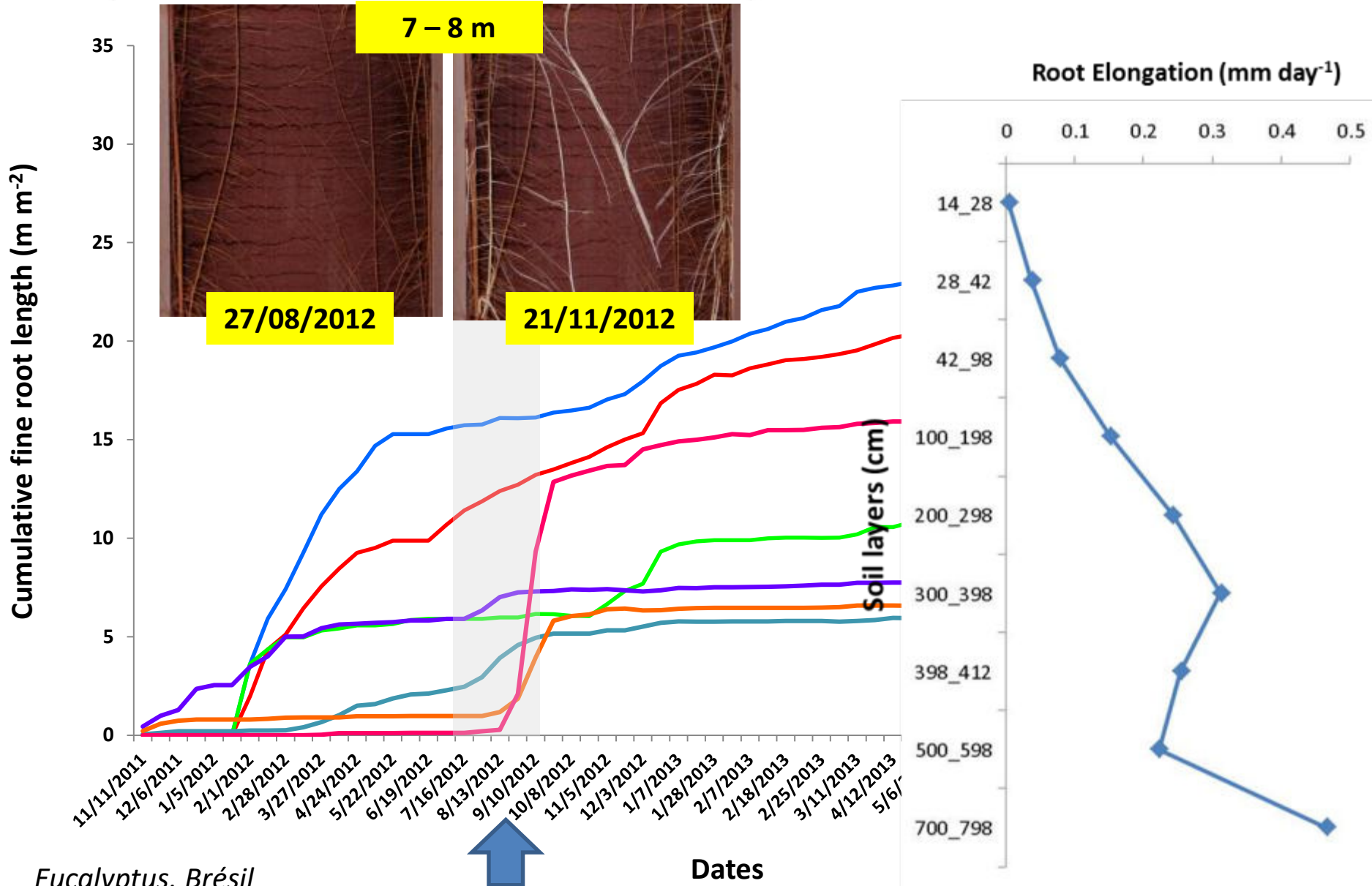
Automatic fine root segmentation through Scanorhize software



Dynamique racinaire et profondeur du sol

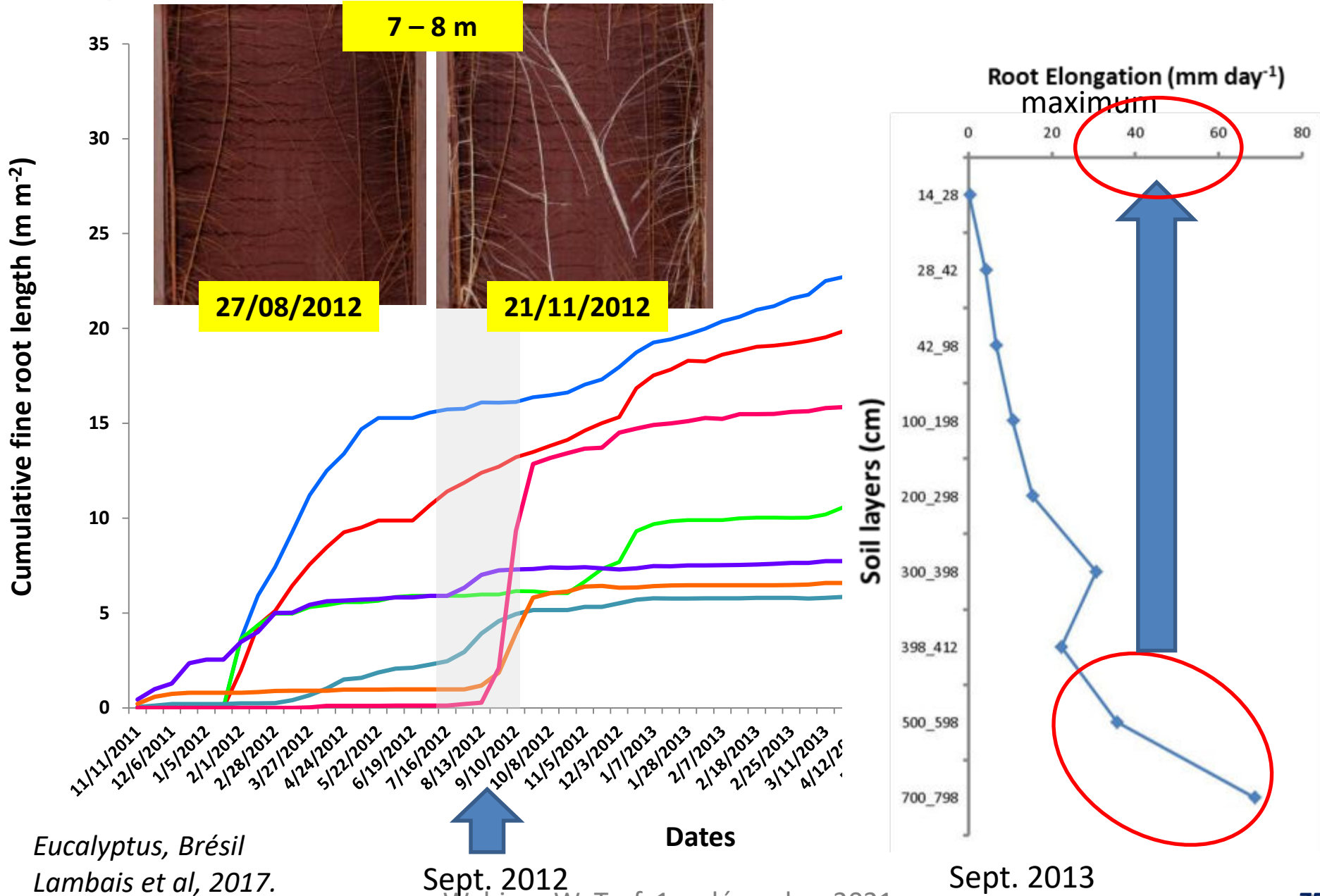


Dynamique racinaire et profondeur du sol



Eucalyptus, Brésil
Lambais et al, 2017

Dynamique racinaire et profondeur du sol

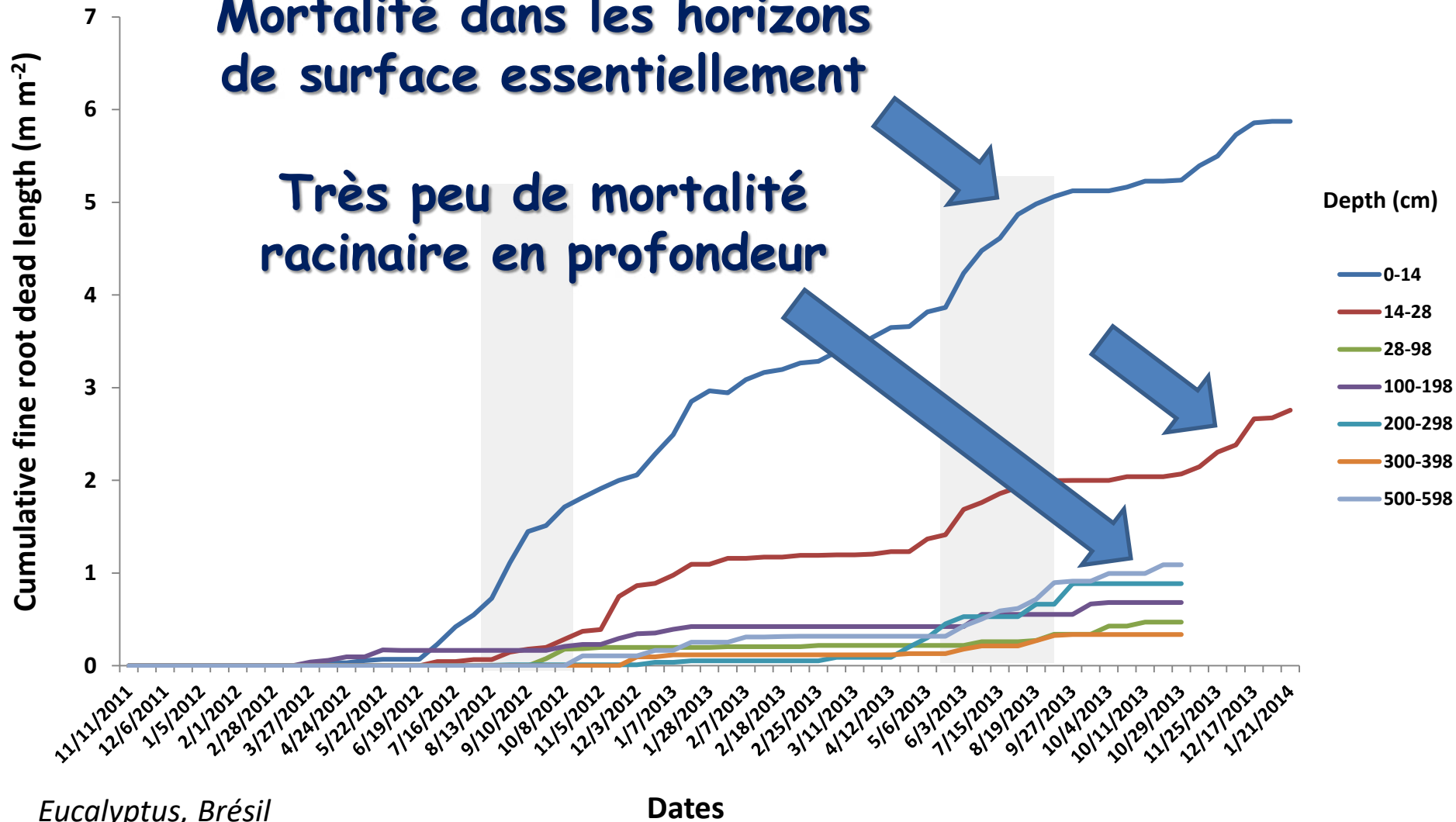


Eucalyptus, Brésil
 Lambais et al, 2017.

Dynamique racinaire et profondeur du sol

Mortalité dans les horizons de surface essentiellement

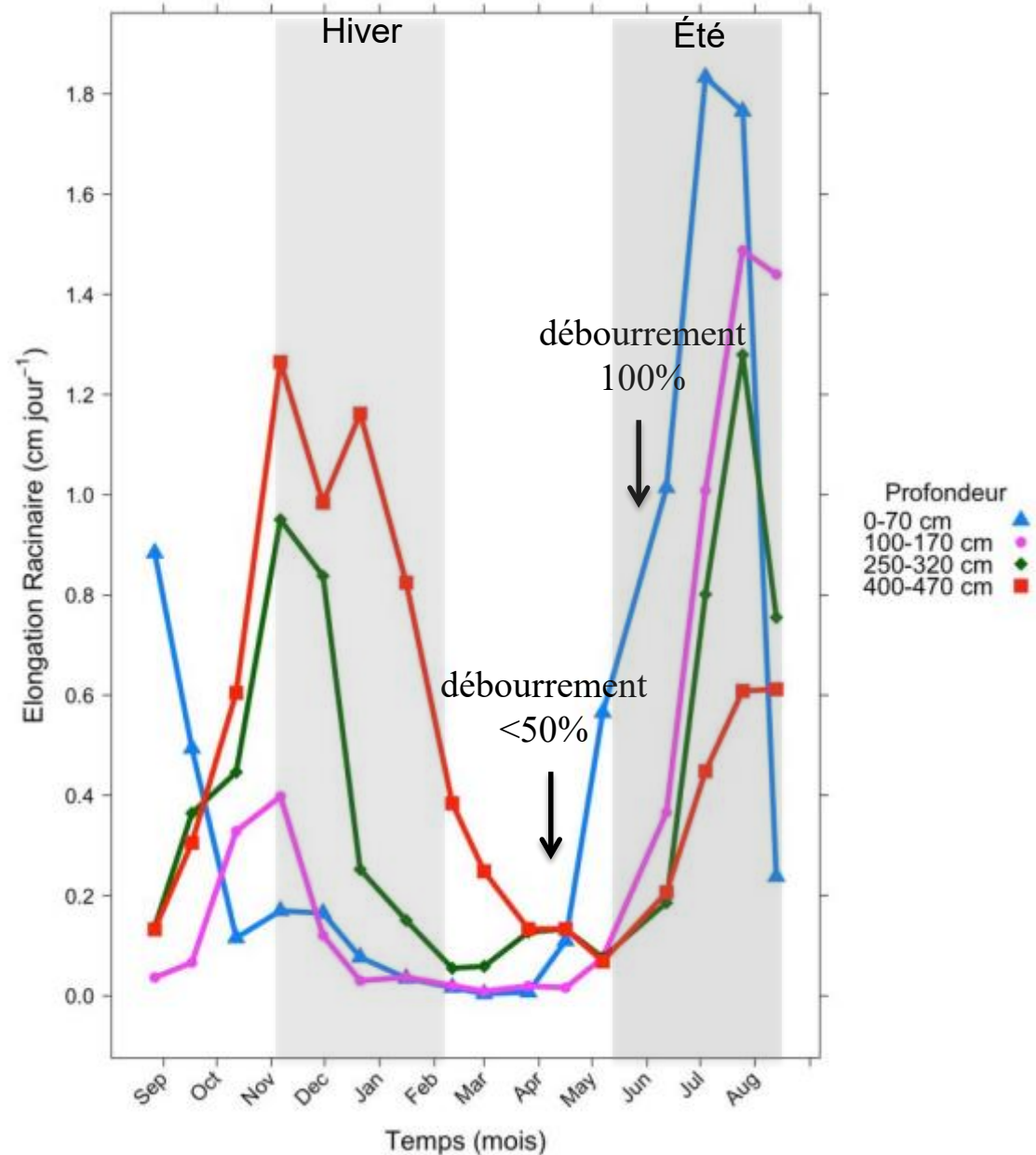
Très peu de mortalité racinaire en profondeur



Eucalyptus, Brésil
Lambais et al, 2017

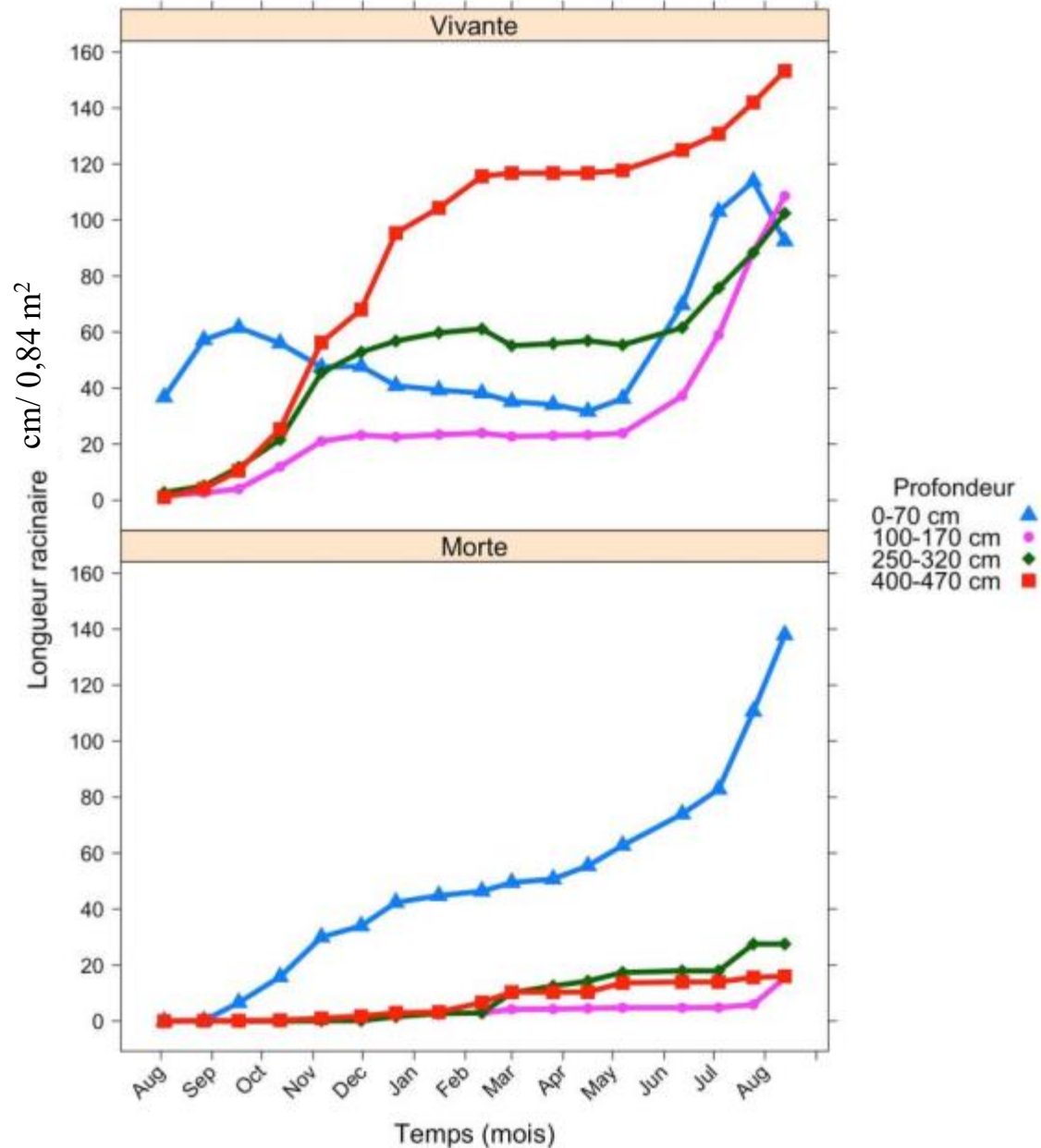
Dynamique racinaire et profondeur du sol

Elongation Racinaire (cm jour⁻¹) du noyer à Restinclière



Dynamique racinaire et profondeur du sol

Production et mortalité chez le Noyer par profondeur en fonction du temps



Dynamique racinaire profonde au Sénégal

Deep fine root monitoring down to the water table



Fine roots of Faidherbia at a depth of -6 m before the raise of the water table (left) and under 50 cm of water (right). Images taken a month apart at the end of the 2019 rainy season.



Quelques remarques pour conclure

- Accumulation de H^+ , K_{ech} , C et N dans la rhizosphère, augmenté en saison sèche, en réduction de pluie et d'autant plus en profondeur
- L'acidification rhiz. pourrait augmenter la disponibilité en nutriments (K_{ech}), notamment en grande profondeur et pendant les sécheresses, en favorisant l'altération
- Les racines profondes ont accès à un réservoir d'eau et nutriments plus grand → adaptation aux périodes sèches

Quelques remarques pour conclure

- La prise en compte des racines profondes permet de mieux estimer la position véritable du front racinaire, le stock total de biomasse, inputs de litières dans le sol :
→ faire un bilan C correct à l'échelle de l'écosystème....
- La phénologie racinaire est globalement synchrone avec la période végétative, mais varie avec la profondeur
- Des croissances racinaires hivernales sont possibles, mais en profondeur....
- La dynamique change en profondeur, pas forcément dans le sens espéré...
- La durée de vie est globalement augmentée; la mortalité réduite → participent au stockage de C

Quelques remarques pour conclure

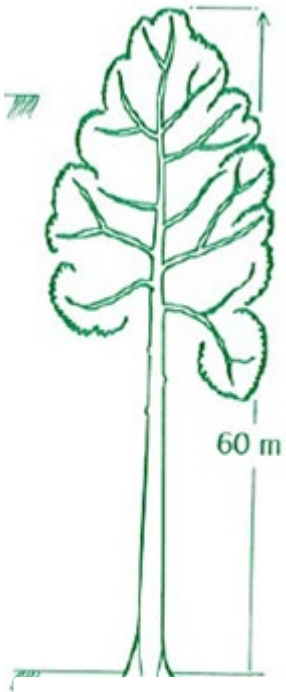
Caractériser le rôle des racines en profondeur : **fonction absorption** (eau et nutriments), **fonction exsudation** + **production de litières** (apport de C dans le sol)

- **Applications** : meilleure quantification des services écosystémiques rendus par ces plantations en fonction de diverses pratiques culturales
- séquestration de C en profondeur,
 - recharge nappes phréatiques par infiltrométrie,
 - redistribution hydraulique en surface (cultures associées)
 - « safety net » en système agroforestier,
 - qualité des eaux...

→ **Amélioration** :

- des modèles de nutrition minérale (meilleure prise en compte des zones fonctionnelles)
- des bilans de C et biogéochimiques à l'échelle de l'écosystème intégrant tout le profil de sol

Quelle est la hauteur de ces plantes?
Sont-elles comparables?
Quelle est la plus grande?

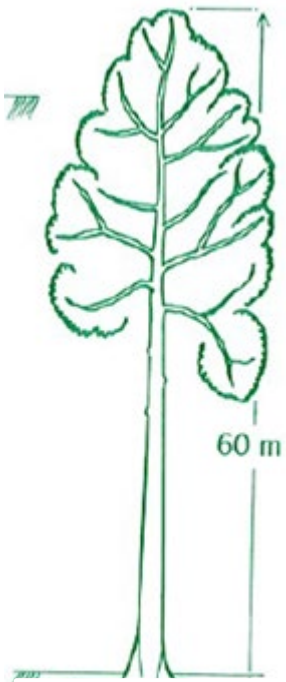


Jujubier de Lybie



Dipterocarpus sp.
en Inde

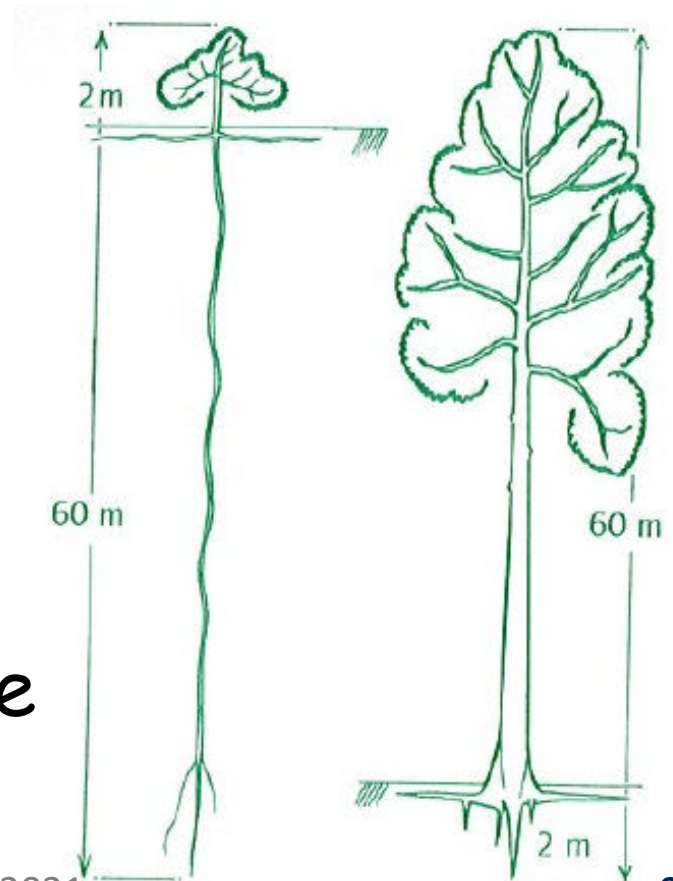
Quelle est la hauteur de ces plantes?
Sont-elles comparables?
Quelle est la plus grande?



Jujubier de Lybie



Dipterocarpus sp.
en Inde



Le système
racinaire fait partie
de la plante, ... non?



Merci !

Route de l'école, près de Mawsynram, Inde