

# Gestion de l'état structural des sols

**Effet des engins agricoles sur le tassement :**  
Quelles conséquences agronomiques et quelles solutions ?

**Vincent Tomis  
Agro-Transfert RT**

[v.tomis@agro-transfert-rt.org](mailto:v.tomis@agro-transfert-rt.org)



# Projet Sol-D'Phy d'Agro-Transfert

## Gestion durable de la fertilité physique du sol

Vincent Tomis – Claire Turillon – Annie Duparque

→ Aider les agriculteurs à préserver l'état structural de leur sol et développer leur fertilité biologique

Des outils et méthodes complémentaires pour l'aide à la décision, développés dans le cadre du projet :



Outils de modélisation de l'évolution de l'état structural sous les passages de roues



Références sur l'impact d'une dégradation de l'état structural du sol



Méthodes simplifiées d'observation de l'état structural du sol



Références sur les effets du climat et de la biologie du sol sur la restructuration

Permettre de **limiter les risques de tassement (conditions d'intervention des engins dans les parcelles, évolution de l'organisation des chantiers) et optimiser le recours au travail du sol en favorisant la régénération naturelle**

Projet conduit en partenariat avec :



# Contexte

**Des chantiers de plus en plus performants, mais aussi de plus en plus lourds : contraintes au sol élevées, souvent en conditions humides**

=> Des risques élevés de tassements, en particuliers des tassements profonds, difficiles à diagnostiquer (peu de prise de conscience des tassements profonds)



Source : Combine forum



**→ Quelles conséquences agronomiques de cette évolution des chantiers ?**

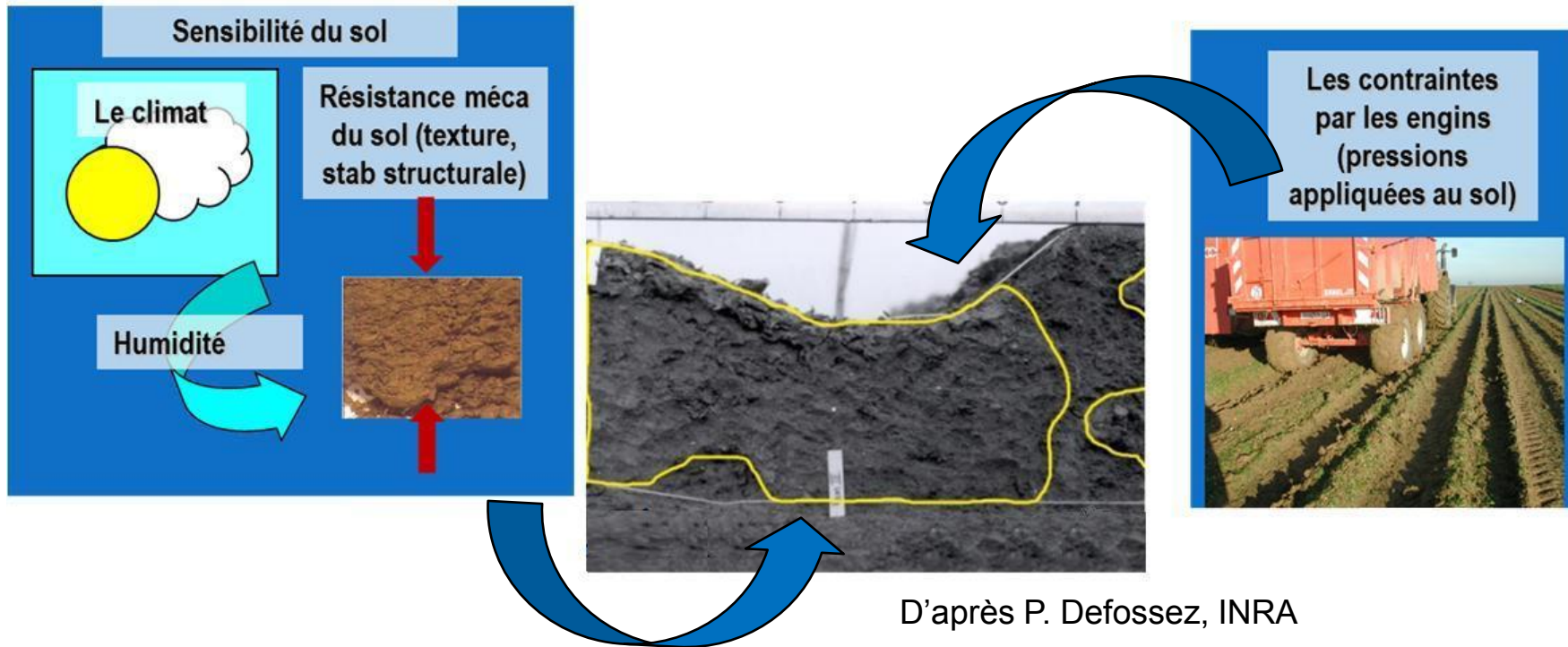
## Tassements provoqués lors des récoltes, mais aussi lors des implantations

Plantation de pommes de terre en 1 passage :



# Tassement par les engins :

## Facteurs qui déterminent le tassement :



$$\text{Contrainte au sol} = \frac{\text{Charge à la roue}}{\text{Surface de contact sol-pneu}}$$

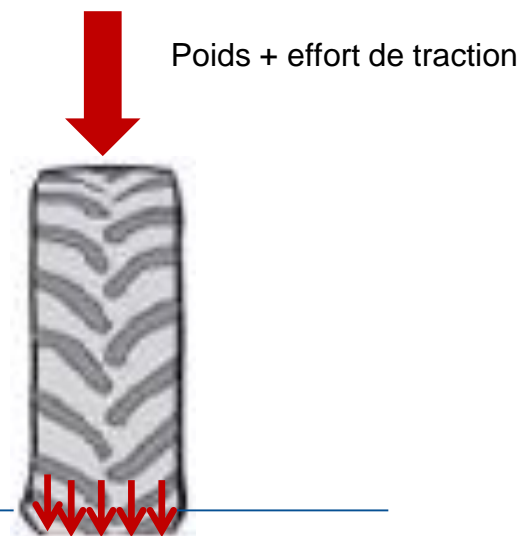
(pression appliquée au sol)

# Tassement par les engins :

## Facteurs qui déterminent le tassement :

$$\text{Contrainte au sol} = \frac{\text{Charge à la roue}}{\text{Surface de contact sol-pneu}}$$

(pression appliquée au sol)



Pression appliquée au sol  
≠  
Pression de gonflage du pneu

→ Résultante de l'équipement du matériel

**Le pneumatique est l'interface permettant une répartition optimale de la pression au sol**

## Mesures de la propagation des pressions dans le sol et le sous-sol par des capteurs :

*Lamandé et al. Soil and Tillage Research, 2011*

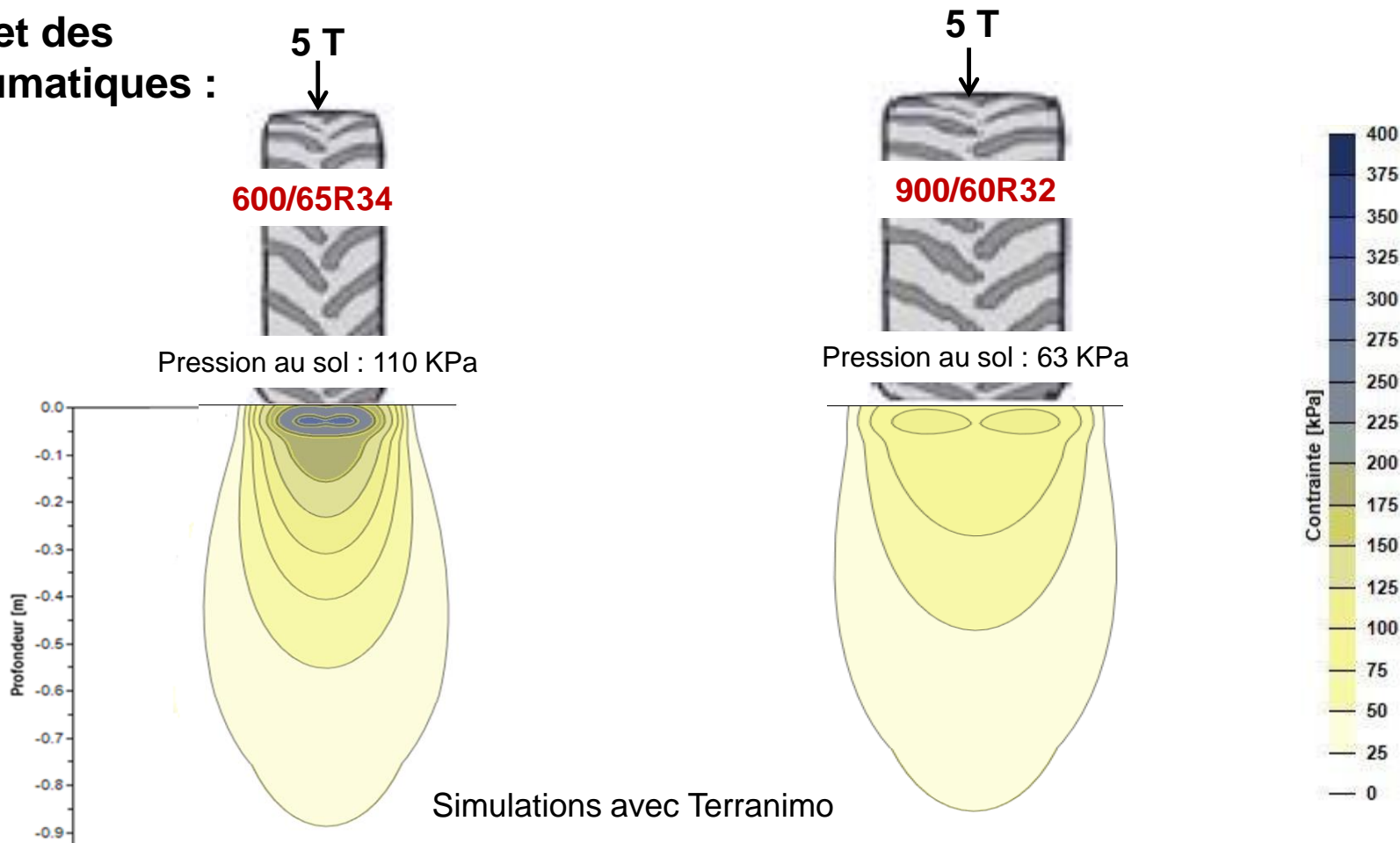


→ Permet de mieux comprendre les facteurs qui déterminent le tassement à différentes profondeurs

# Tassement par les engins :

## Facteurs qui déterminent le tassement :

→ Effet des pneumatiques :



→ Même charge à la roue : le pneumatique large limite la pression au sol

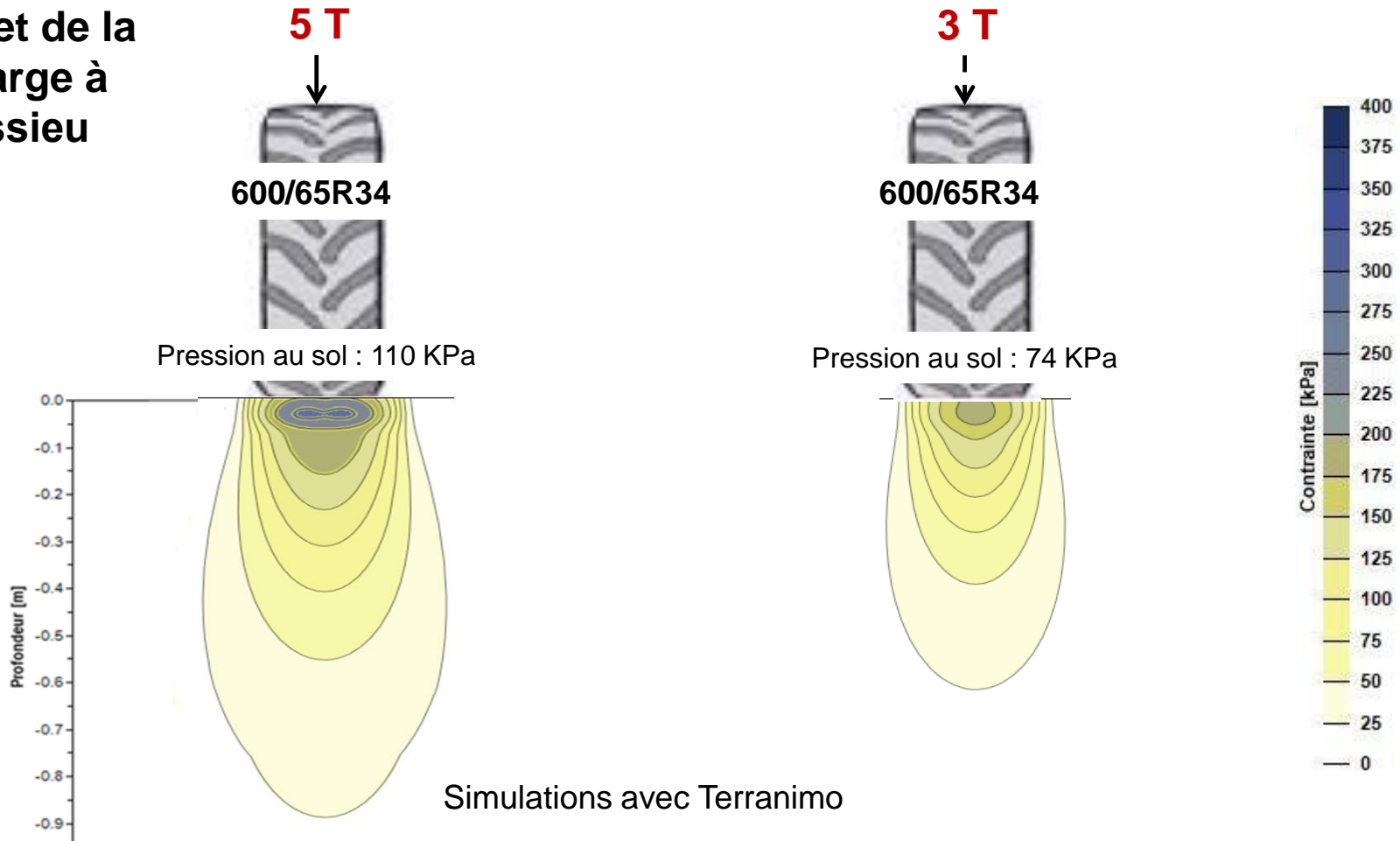
**Importance du pneumatique vis-à-vis du tassement en surface**  
Cependant, peu d'effet du pneumatique sur le tassement en profondeur



# Tassement par les engins :

## Facteurs qui déterminent le tassement :

→ Effet de la charge à l'essieu

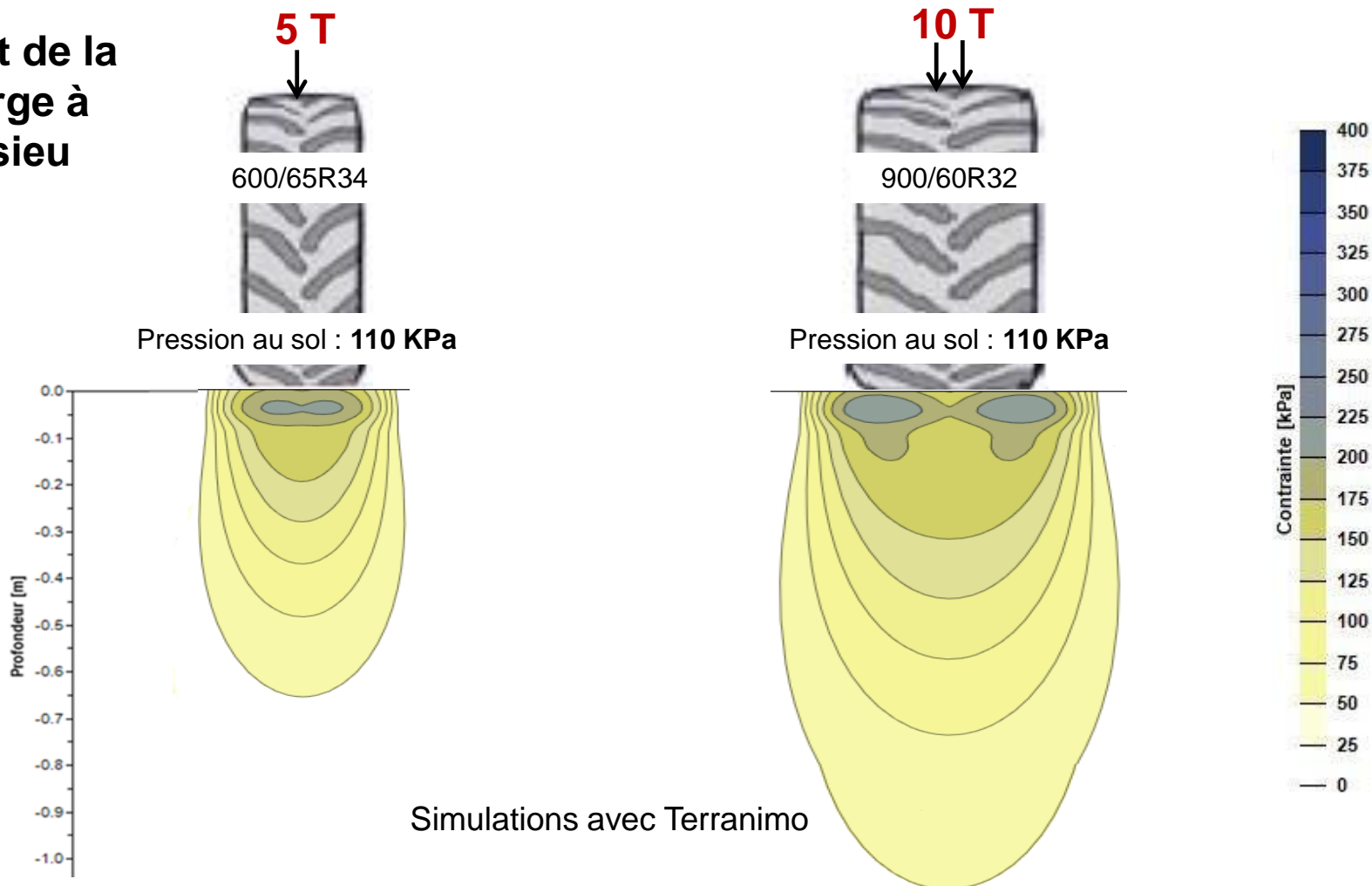


→ Mêmes pneumatiques : la **charge élevée** augmente le **tassement en surface** et **en profondeur**

# Tassement par les engins :

## Facteurs qui déterminent le tassement :

→ Effet de la charge à l'essieu



→ Même pression de surface : la charge élevée est compensée par le pneu large, mais contrainte plus importante en profondeur avec la charge lourde

Importance du **poids** vis-à-vis du **tassement en profondeur**

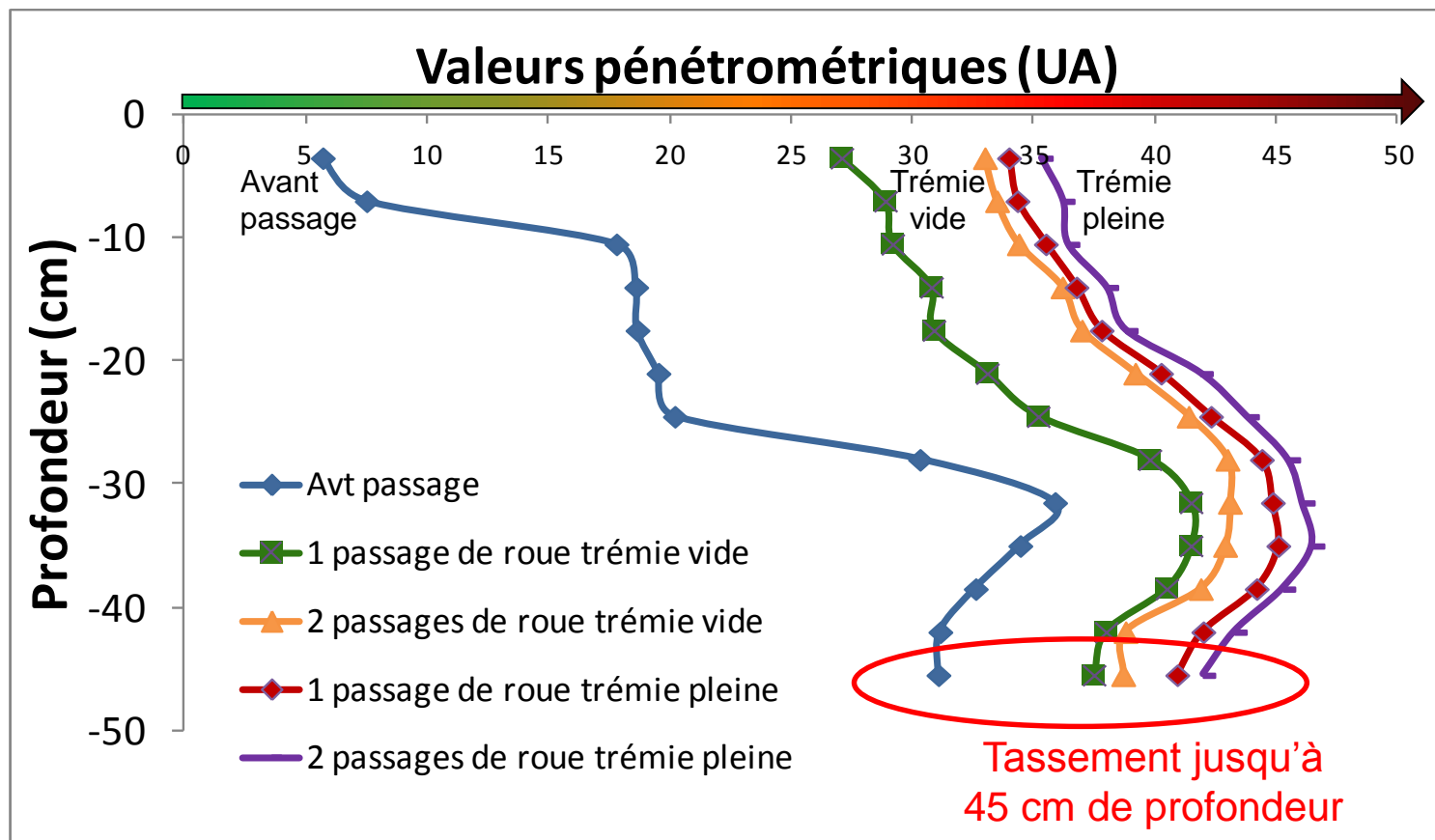
# Tassement par les engins :

**Etude de l'effet charge/ essieu et répétition des passages sur le tassement**  
Exemple de l'intégrale à betterave :



# Tassement par les engins :

Etude de l'effet charge/ essieu et répétition des passages sur le tassement  
Exemple de l'intégrale à betterave :



Source : essais Sol-D'Phy 2014 Agro-Transfert, ITB, Ceta Ham

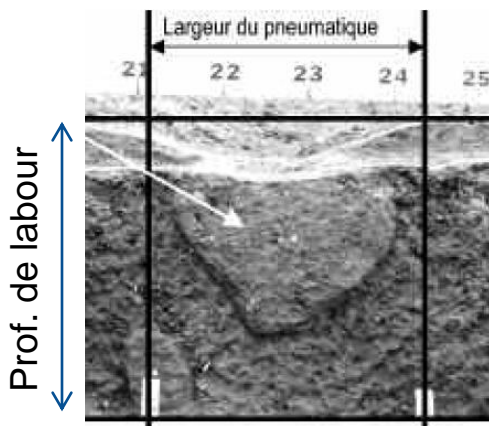
→ **Contrainte maximale déterminante pour le tassement** : préférer plusieurs passages avec de faibles charges plutôt qu'un seul passage avec des charges lourdes

# Tassement par les engins :

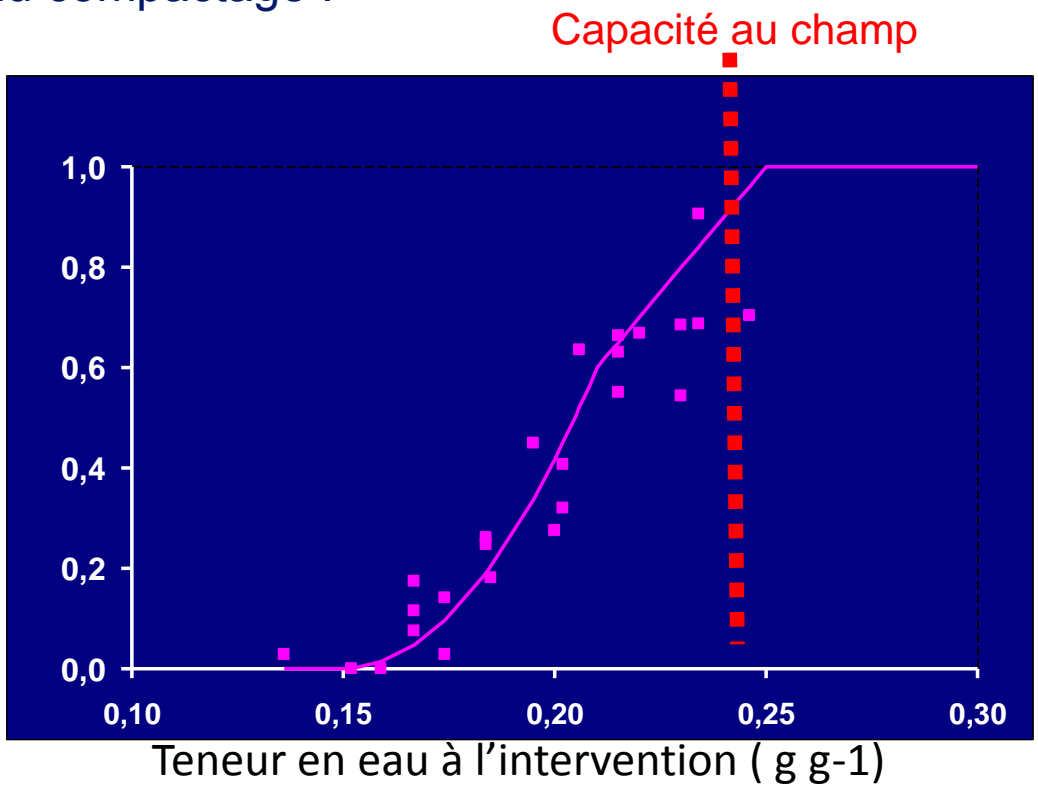
## Facteurs qui déterminent le tassement :

→ Humidité du sol :

Effet des contraintes appliquées (opérations de récolte) et de l'humidité à l'intervention sur l'intensité du compactage :



Proportion de zones tassées sous les passages de roues



Les ornières sont surtout créées lorsque les sols sont à saturation, mais les tassements interviennent dans une gamme d'humidité plus large autour de humidité à capacité au chp

# Tassement par les engins :

Confusion entre ornière et tassement :



- Sol à saturation
  - Pneumatiques étroits
- Ornières



- Pneumatiques larges,
  - Marche en crabe
- Pas d'ornière

**→ Dans les 2 situations, présence de tassement**

Derrière un chantier automotrice + benne : moins beau visuellement avec les ornières (fluage) et plus difficile à reprendre (nivelage), mais tassement plus faible qu'une intégrale en profondeur

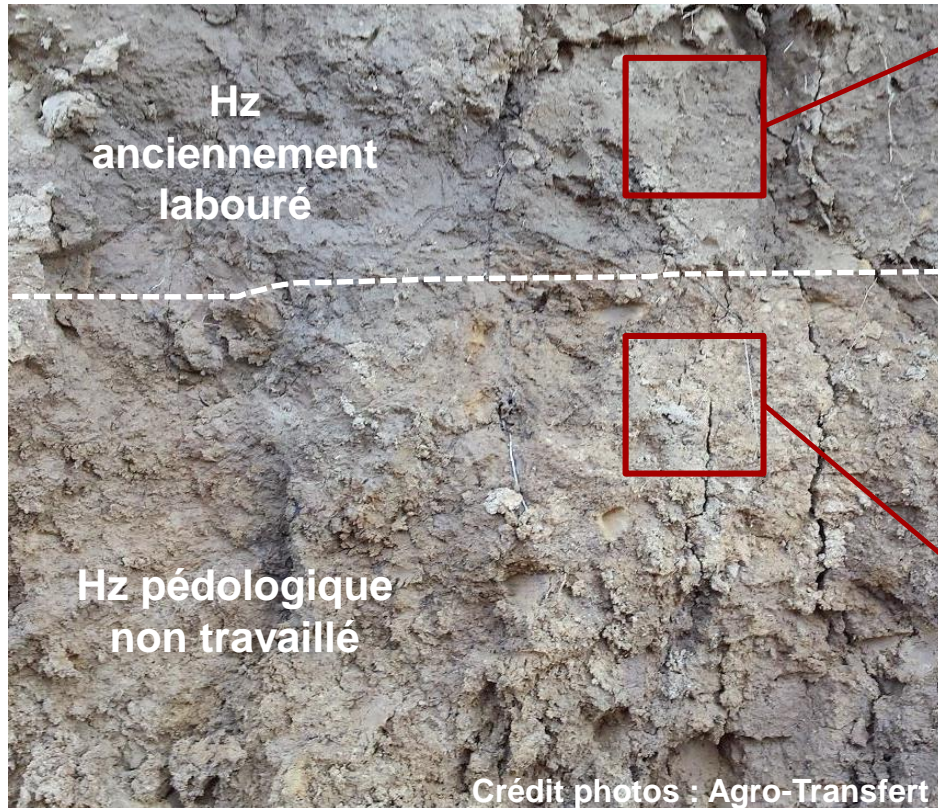
# Tassement par les engins :

## Facteurs qui déterminent le tassement :

→ Stabilité structurale :



Sensibilisation des sols travaillés :



→ Tassement jusqu'à la profondeur travaillée

# Tassement du sol :

## Facteurs qui déterminent le tassement :

→ Stabilité structurale via les 'colles organiques' :

Effet des exsudats émis par les racines :



→ Participent à l'agrégation des particules de sol



# Tassement du sol :

## Facteurs qui déterminent le tassement :

→ Stabilité structurale via les 'colles organiques' :

Effet des exsudats émis par les racines :

Manchon de terre autour des racines :



Crédit photos : CIRAD

# Résultats des observations de terrain Sol-DPhy:

## Systemes spécialisés et betteraviers (12 profils)

### Tassements à l'implantation :



## Systèmes spécialisés et betteraviers

Tassement profond, sous le labour et dans l'horizon pédologique :



Semelle de labour



Hz pédologique tassé



Attention à la persistance des tassements profonds

# Quelles conséquences des tassements au niveau agronomique ?

# Conséquences des tassements

→ **Fonctionnement du sol, population de vers de terre :**

Ver de terre écrasé sous un passage de roue :



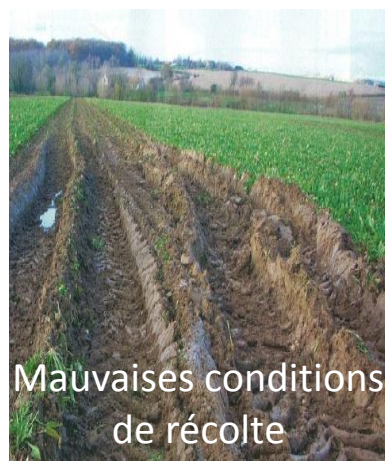
Photo : V. Tomis, Agro-Transfert

# Conséquences des tassements

Expérimentations conduites de 2010 à 2013 :

## Essais Sol-D'Phy et EAUPTION PLUS Agro-Transfert

### Réseau de parcelles agricoles



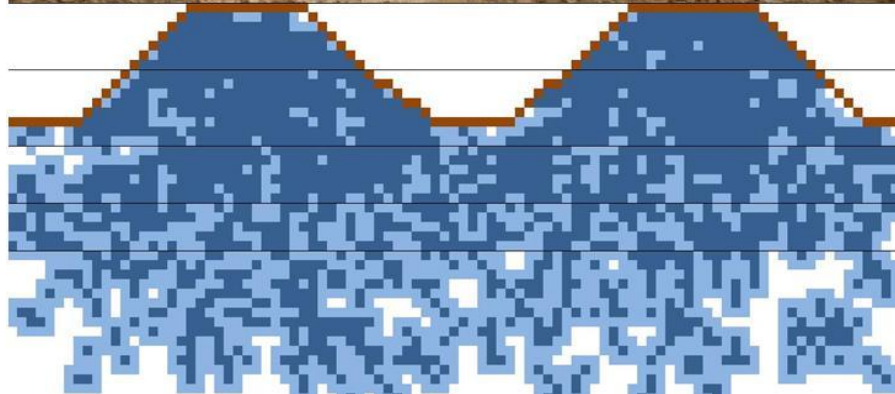
### Dispositif expérimental d'Arvalis de Villers St Christophe (02)



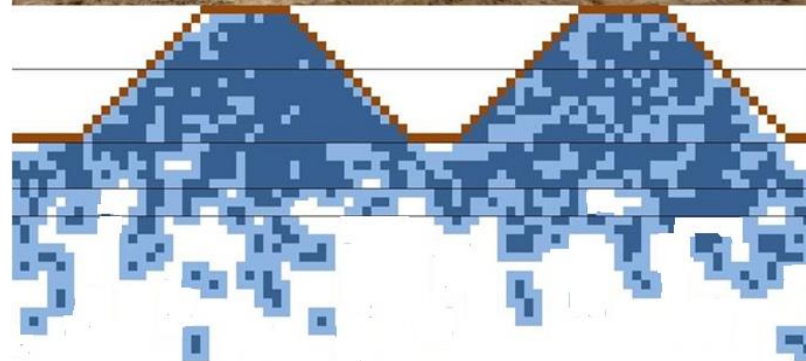
- Des années climatiques différentes : 2011 sèche, 2012 humide
- Des types de sol différents : sable argileux, sable limoneux, limons moyens et limons argileux
- Différentes variétés utilisées : Bintje, Lady Claire, Franceline, Saturna

## Les tassements profonds limitent l'enracinement :

*état structural « favorable »*



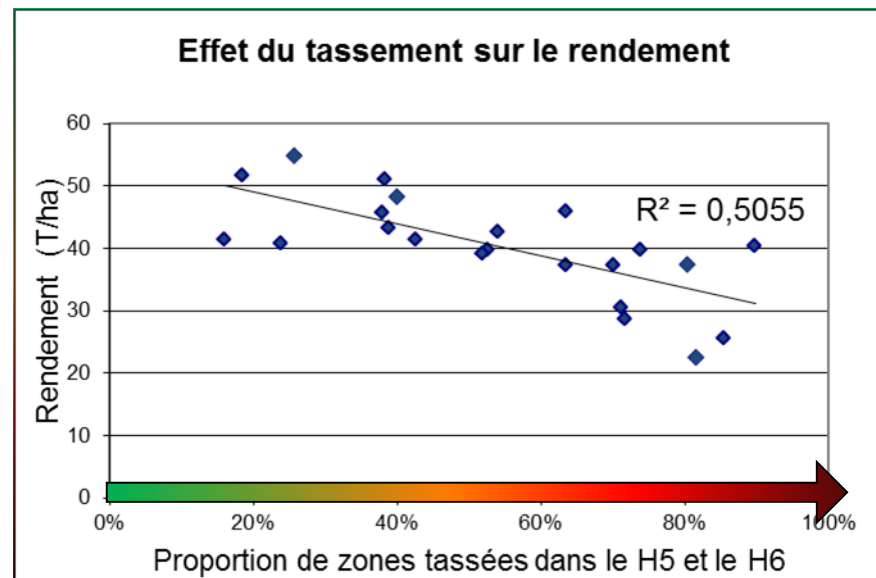
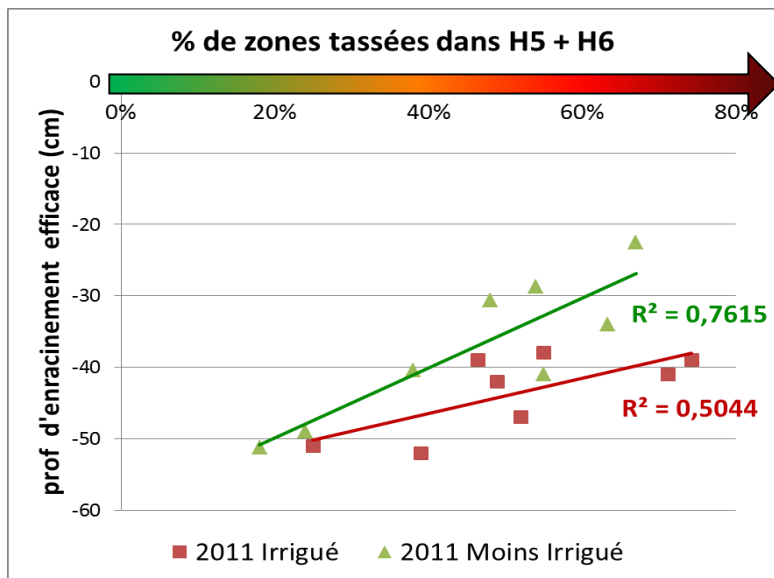
*état structural dégradé*



70  
cm

## Principaux résultats des essais :

Impact du tassement sur l'enracinement et la productivité des pommes de terre :



Variétés Bintje et Lady Claire **irrigué** et **moins irrigué**

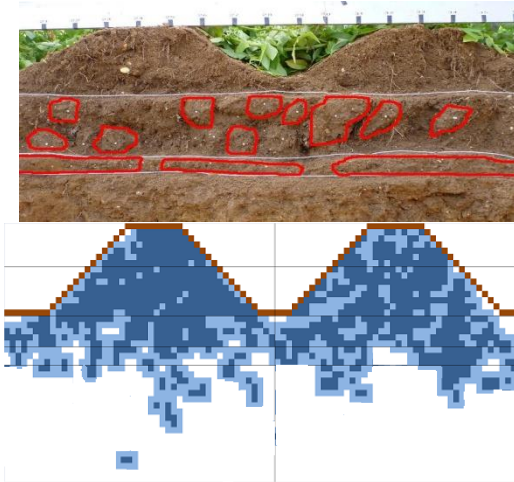
*Essais Sol-D'Phy et EAUPTION PLUS, Agro-Transfert*

- **La profondeur d'enracinement diminue sous les zones tassées, avec effet de l'humidité sur la réponse au tassement : effets renforcés en situations plus sèches**
- **Lien tassement /rendement pas systématique : un impact du climat et de l'irrigation ; des différences significatives de rendement en situations sèches, qui peuvent se retrouver même en situation irriguée**



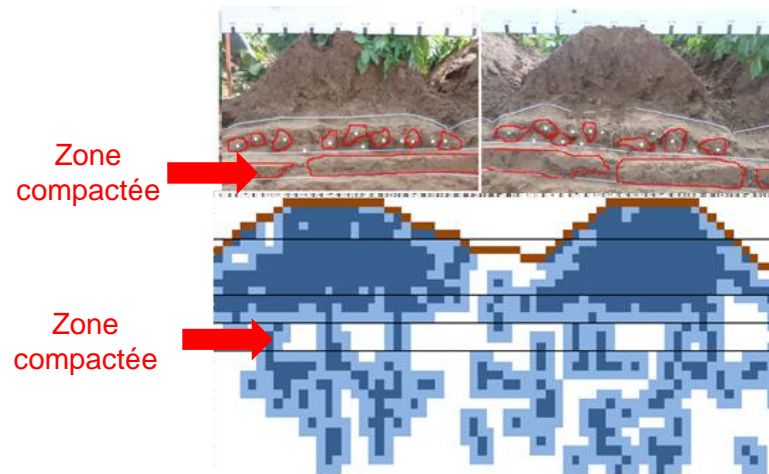
## Effet de la fonctionnalité de la porosité sur l'enracinement en profondeur :

### Tassements profonds



Mauvaise exploration racinaire en profondeur

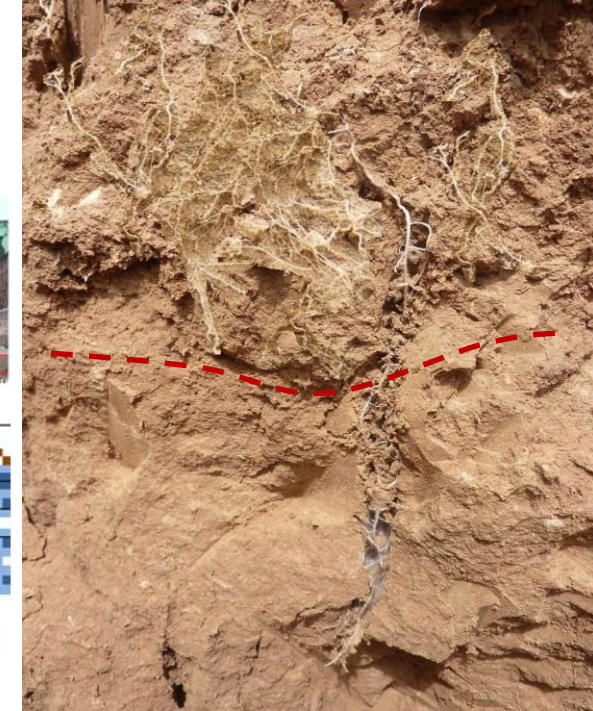
Tassement profond mais de nombreuses galeries de vdt



Zone compactée

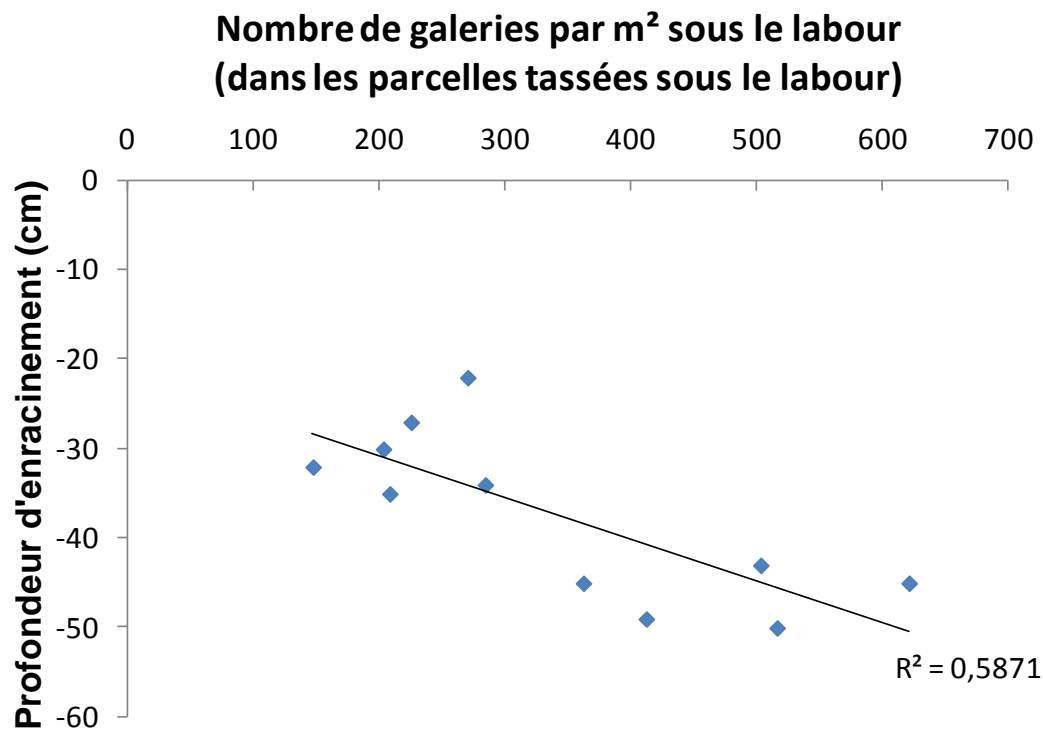
Zone compactée

Voies préférentielles pour le passage des racines (galeries) : colonisation en profondeur



→ Passage des racines dans les galeries pour coloniser les horizons profonds

## Etude des relations entre nombre de galeries sous le labour et passage des racines en profondeur :



- Dans les situations tassées, le nombre de galeries peut expliquer l'exploitation du sous sol par les racines
- Importance de la porosité verticale pour permettre l'enracinement en profondeur

## Etude des relations entre nombre de galeries sous le labour et passage des racines en profondeur :

Importance d'un horizon pédologique non compacté pour permettre l'exploration du sous sol par les racines à partir de la galerie :

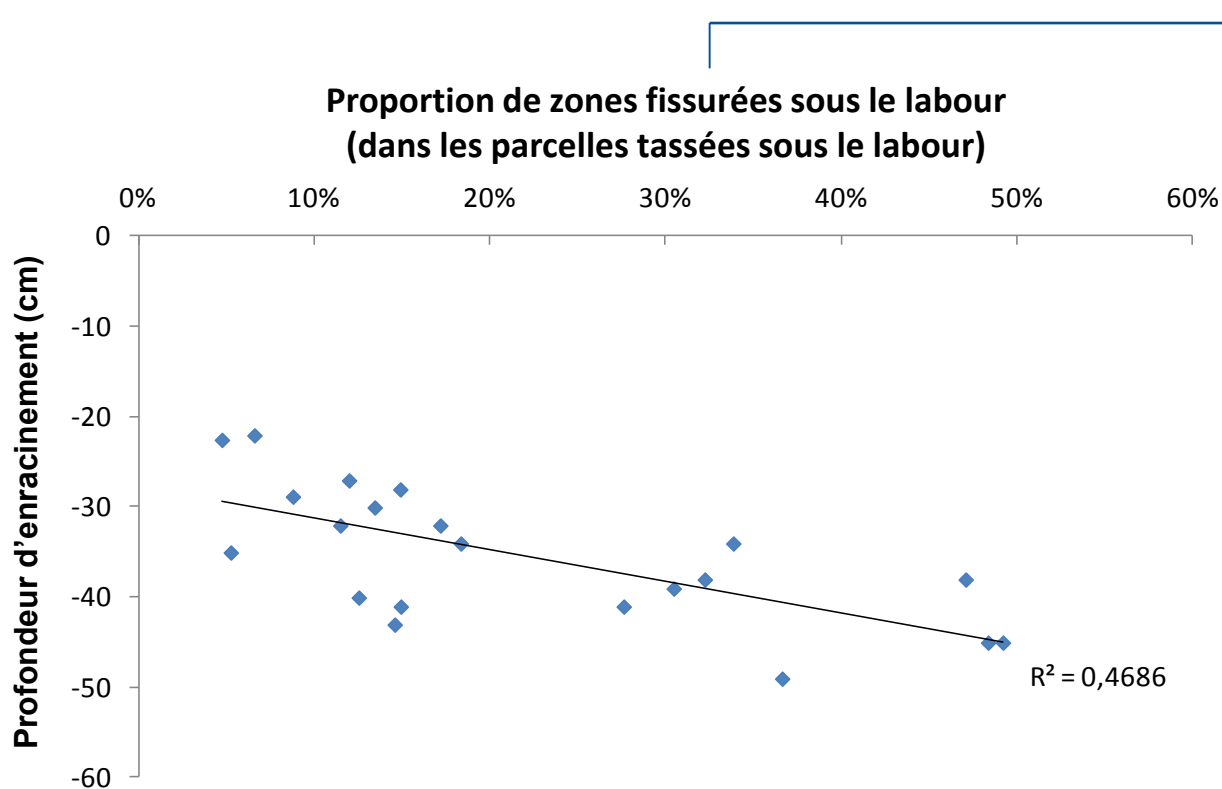


## Etude des relations entre nombre de galeries sous le labour et passage des racines en profondeur :

Possibilité d'appréhender le nombre de galerie en observant le fond de raie lors du labour :



## Etude des relations entre fissuration sous le labour et passage des racines en profondeur :



→ Dans les situations tassées, les fissures favorisent l'enracinement en profondeur (importance de la porosité verticale)

## Les zones tassées limitent l'enracinement :



## Franchissement d'une zone tassée par les racines à 3 conditions :

Sol humide  
(moindre résistance à la pénétration)



Zone fissurée par le climat



Couche perforée de galeries de vers de terre verticales



# Régénération des tassements :

## Comment évolue la structure du sol ?

# La structure du sol et son évolution :

Un sol bien structuré :  
50 % de porosité



Tassement par les engins,  
Reprise en masse, battance

**Diminution de la porosité**



**Augmentation de la porosité**



Régénération par le travail du sol et les  
facteur naturels (climat, biologie du sol)



Porosité  
d'assemblage



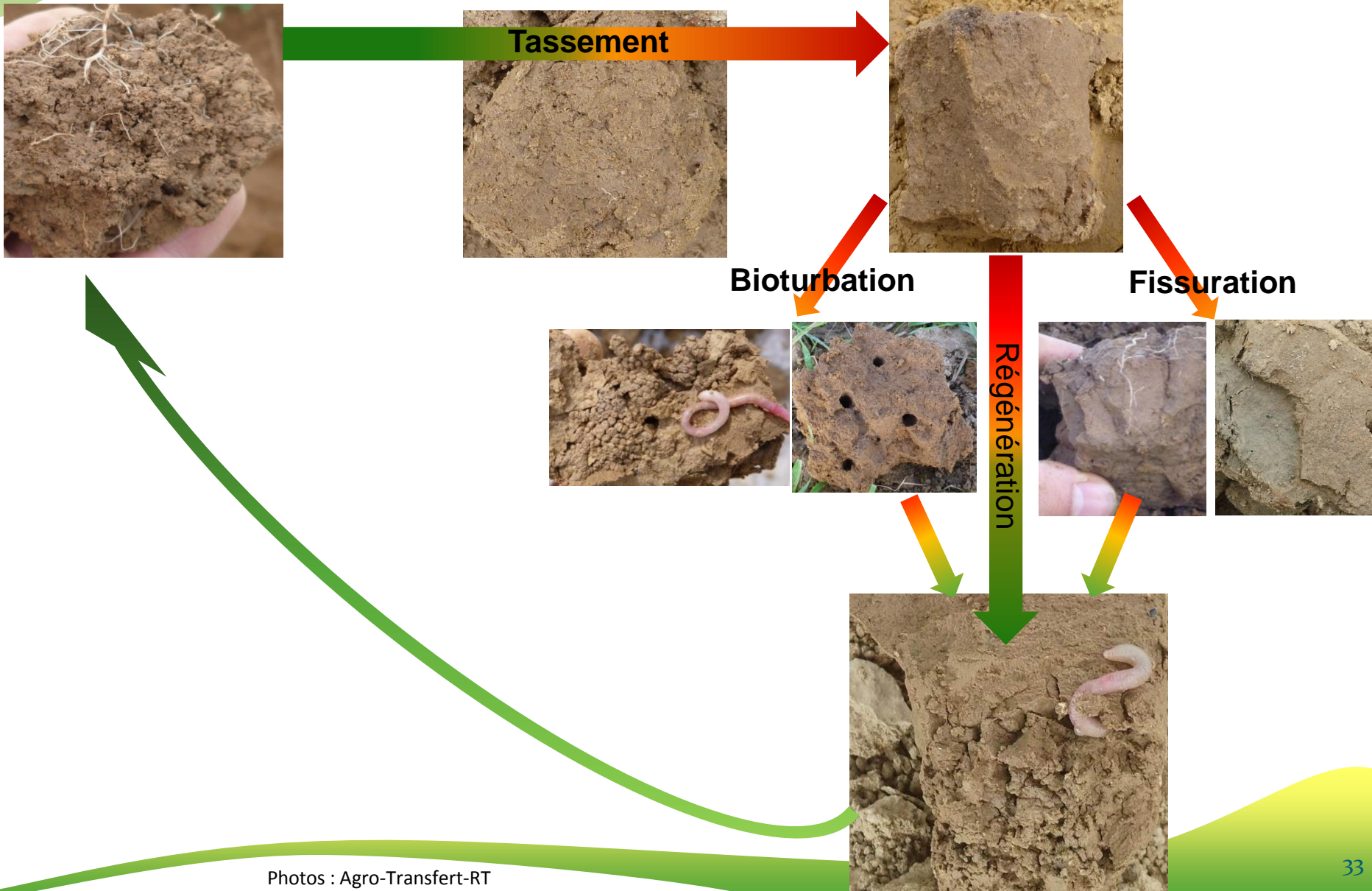
Porosité  
fissurale



Porosité  
tubulaire



# Evolution de la structure du sol :



# Régénération des sols tassés :

## Biologie du sol

vers de terre, racines :



Photo : S. Carruthers

## Climat :

humectation – dessiccation ; gel – dégel

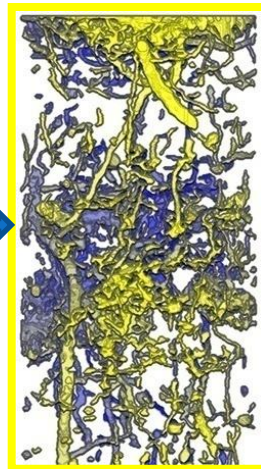
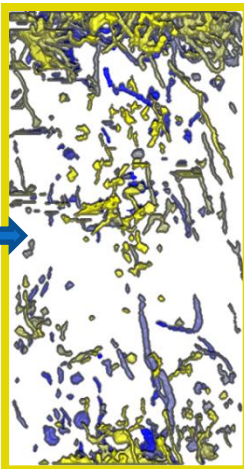
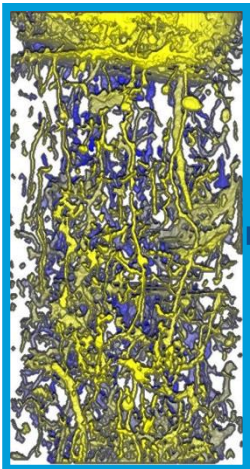


Photo : Agro-Transfert-RT

Témoin :

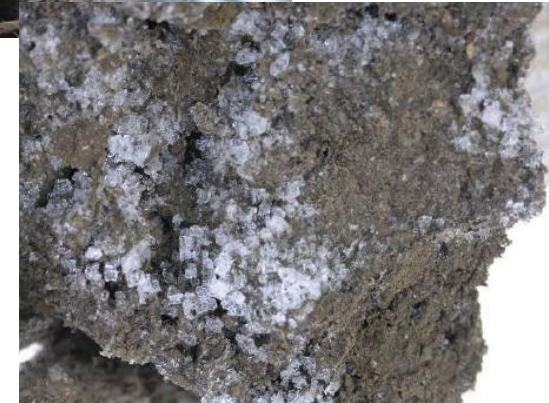
Tassement :

2 ans après :



Capowiez et al., 2008

- Fissuration  
si argile > 15 %
- Effet en surface  
(faible variation  
des conditions  
climatiques en  
profondeur)



→ Régénération d'un tassement possible par l'effet du climat et de la biologie du sol, mais processus lent (> 3 ans)

## Effet des racines

Effet perforation :

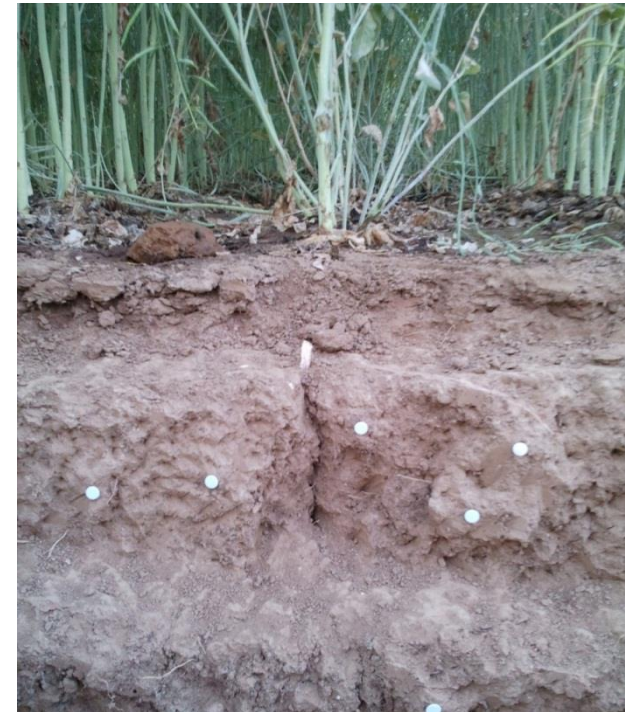


Crédit photo : S. Carruthers

Effet fragmentation :



Effet fissuration :



Les racines ne sont pas des décompacteurs :

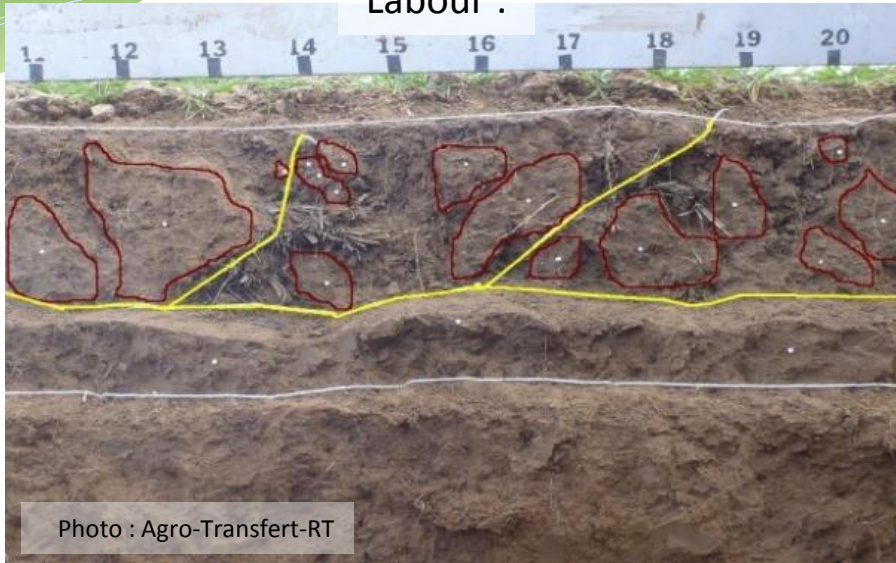


Crédit photo : J. Fuhrer

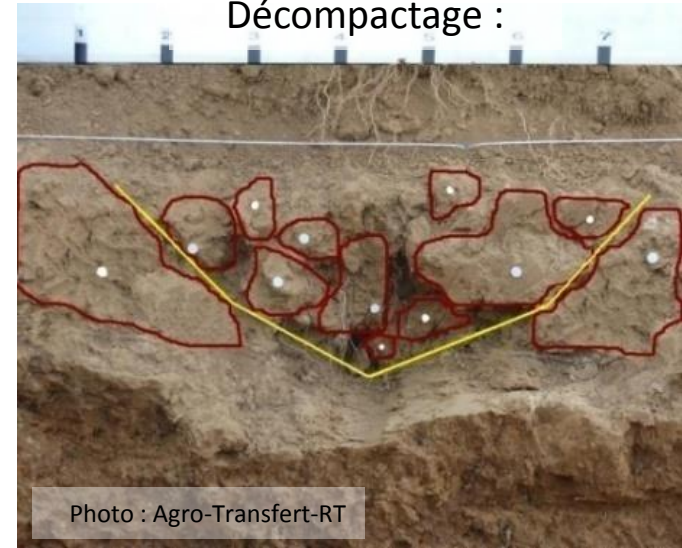
→ Effet globalement positif, mais actuellement, peu de références pour savoir dans quelle mesure les racines permettent d'améliorer l'état structural du sol

# Régénération par le travail du sol

Labour :



Décompactage :



- Régénération d'un tassement en 18 mois dans la couche labourée (Boizard et al., 2002) par l'effet combiné du travail du sol, du climat et de l'activité biologique
- Volume fragmenté plus important en labour

Décompactage en conditions humides :



- Décompactage très sensible aux conditions d'humidité du sol



**Peu de restructuration en cas de travail en conditions humides**

→ **Le tassement limite l'enracinement et la productivité  
pour les cultures sensibles**

# **Quelles solutions pour limiter le tassement ?**

→ Prévention des tassements : conditions d'intervention, pneumatiques, réduction des charges, organisation des chantiers...

# Réduction du tassement de surface → Pneumatiques

Préférer les pneumatiques à carcasse radiale :

## Pneu diagonal :



560/60 - 22,5



→ Pneu rond, empreinte au sol réduite, pic de pression au centre du pneu

## Pneu radial :



560/60 R 22,5



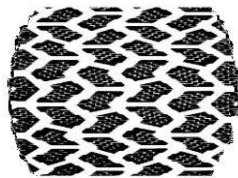
→ Meilleure répartition de la charge au sol

Encore beaucoup de bennes avec des pneus diagonal

→ Des progrès à réaliser sur les pneumatiques des bennes pour limiter le tassement de surface

# Réduction du tassement de surface → Pneumatiques

Préférer les pneus de grand diamètre, pour augmenter la longueur de la surface d'empreinte :



# Réduction du tassement de surface → Pneumatiques

## Adapter la pression de gonflage

- Pour améliorer la répartition des pressions au sol
- Pour augmenter la surface de contact sol-pneu en longueur

## Possibilité d'évaluer la surface d'empreinte au sol :

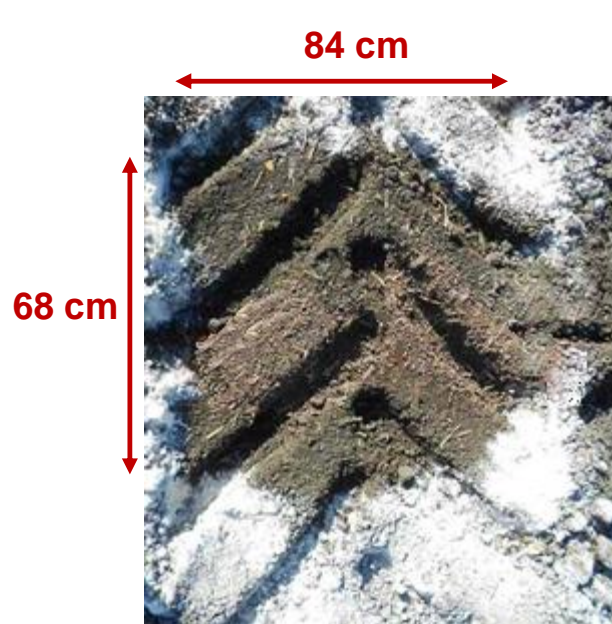




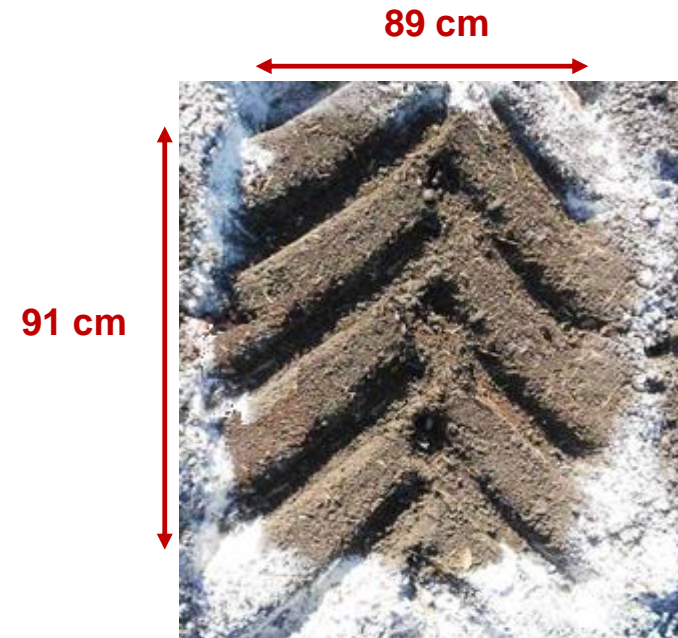
# Réduction du tassement de surface → Pneumatiques

## Adapter la pression de gonflage

- Pour améliorer la répartition des pressions au sol
- Pour augmenter la surface de contact sol-pneu en longueur



**900/60R32**  
**à 2,2 bar**

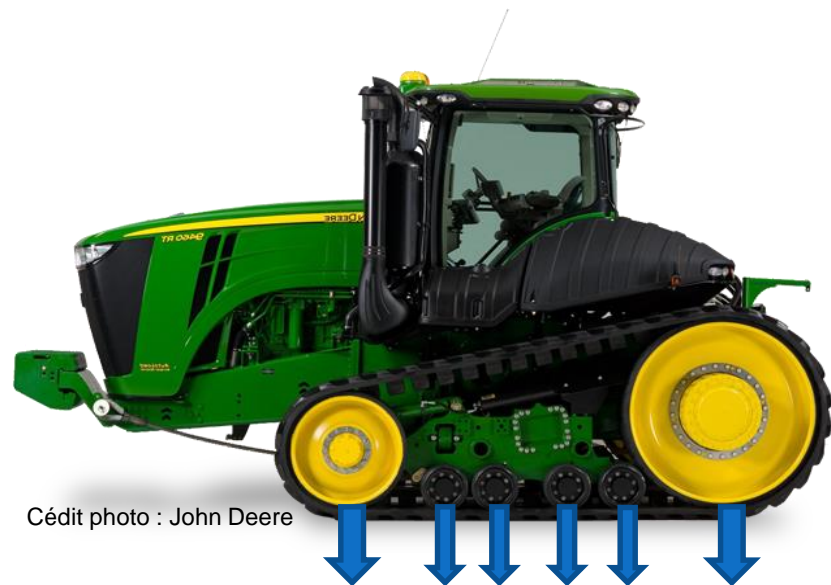


**900/60R32**  
**à 1,2 bar**

- Meilleure répartition de la pression au sol
- Meilleure adhérence au sol
- Réduction du tassement en surface

Utilisation de pneumatiques à **carcasse plus souple** pour favoriser leur **écrasement** :  
technologie **IF et VF** permettent d'augmenter de **20 à 30 % la surface d'empreinte**

## Pneumatiques vs chenilles :

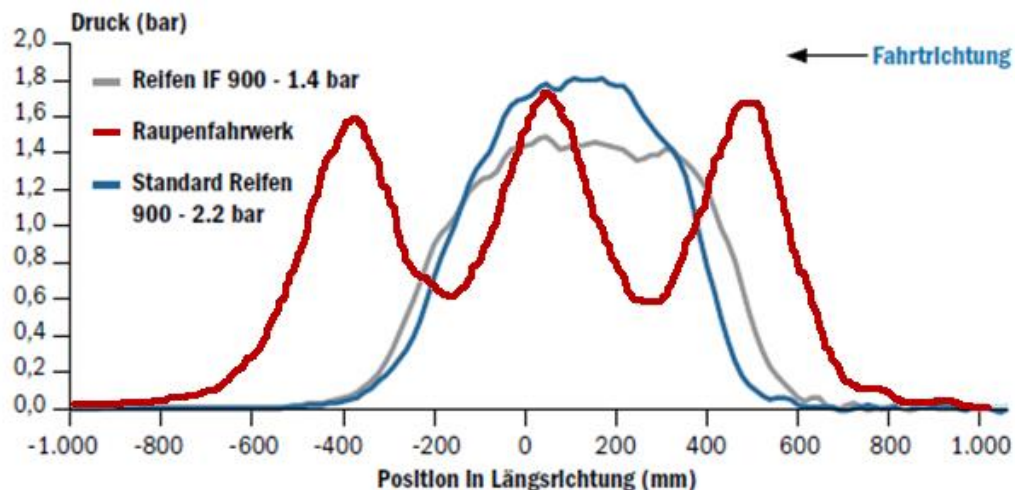


Cédit photo : John Deere

- Pic de pression au niveau des galets
- Effet globalement positif des chenilles sur le tassement, mais très dépendant de l'architecture de la chenille

Pression à 20 cm de profondeur sur sol meuble :

- Chenille 760 (3 galets)
- Pneu 900 gonflé à 2,2 bar
- Pneu 900 à 1,4 bar



Source : IRSTEA, Rapport d'étude, 2012

# Réduction du tassement de surface → Chenilles

## Pneumatiques vs chenilles :



### Essai Sol-D'Phy sur l'effet des chenilles Comparaison Maxtron / rexor (novembre 2014) :



## Essai Sol-D'Phy sur l'effet des chenilles (novembre 2014) : ITB, CETA de Ham, Agro-Transfert



Surface d'empreinte



Pesée des machines



Mesures propriétés du sol



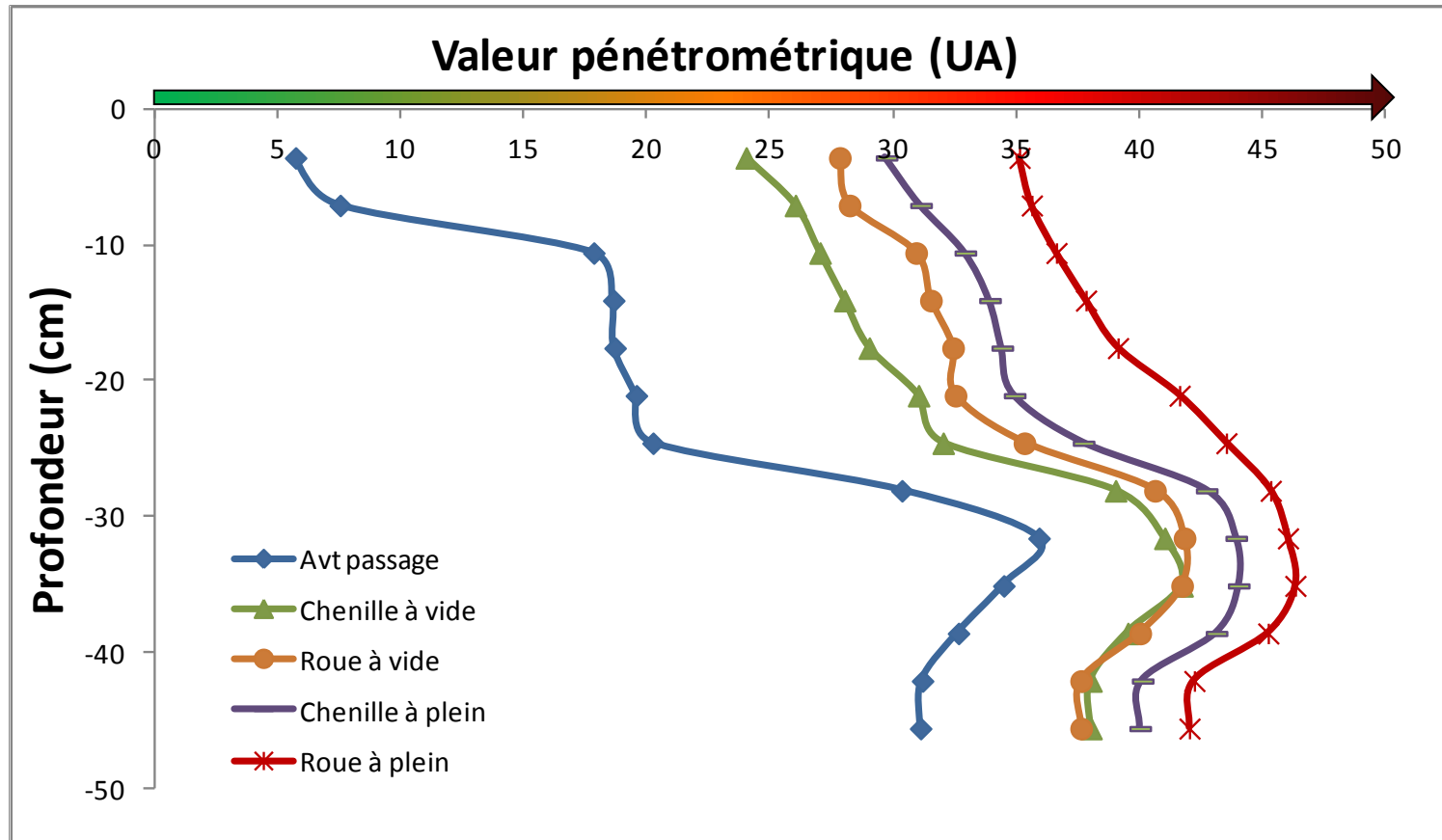
## Comparaison intégrale à chenille / pneu :

Poids des machines mesurés :

		Vide	Plein		
		Poids (t)	Poids (t)	Surface empreinte (cm <sup>2</sup> )	Contrainte (Kg/cm <sup>2</sup> )
<b>Maxtron</b>	Chenille gauche	15,32	18,42	18 988	0,97
	Chenille droite	11,68	17,98	19 030	0,94
	<b>Essieu avant</b>	<b>27</b>	<b>36,4</b>		
	Arrière gauche	4,66	10,24	7 875	1,30
	Arrière droite	4,14	10,38	8 104	1,28
	<b>Essieu arrière</b>	<b>8,8</b>	<b>20,62</b>		
	<b>Total</b>	<b>35,78</b>	<b>57,02</b>		
<b>Rexor</b>	Avant gauche		10,44	7 792	1,34
	Avant droite		10,7	7 874	1,36
	<b>Essieu avant</b>	<b>13,96</b>	<b>21,14</b>		
	Arrière gauche		14,3	10 031	1,43
	Arrière droite		14,56	10 224	1,42
	<b>Essieu arrière</b>	<b>14,98</b>	<b>28,86</b>		
	<b>Total</b>	<b>28,9</b>	<b>49,98</b>		

# Réduction du tassement de surface → Chenilles

## Comparaison intégrale à chenille / pneu :



Source : essais Sol-D'Phy 2014 Agro-Transfert, ITB, Ceta Ham

→ Effet bénéfique des chenilles

## Réduction du tassement en profondeur → Charge à l'essieu

### Limitation du poids des machines :

- **Utilisation de matériel léger** : doit être un critère lors de l'achat d'un matériel
- **Techniques innovantes pour limiter les charges inutiles au champ**

Exemple : Epandage de lisier ou boues de STEP sans tonne pour supprimer le passage de la tonne dans le champ



Crédit photo : LoirAgri

## Réduction du tassement en profondeur → Charge à l'essieu

- Limitation des charges
- **Répartition / décomposition des charges pour diminuer la contrainte max**
  - Contrainte maximale déterminante pour le tassement : préférer plusieurs passages avec de faibles charges plutôt qu'un seul passage avec des charges lourdes
  - Pour un même poids total, préférer un nombre important d'essieux pour limiter le poids /essieu :

Trois transbordeurs de 30 m<sup>3</sup> :



Crédit photo : Terre Net



Crédit photo : PleinChamp



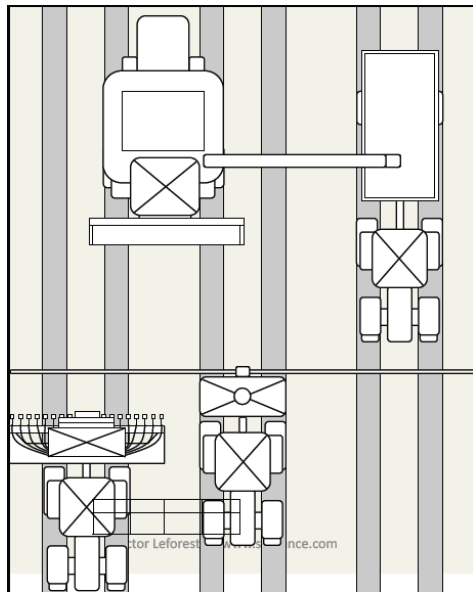
Crédit photo : Farmingtalk.uk



## Réduction de la surface affectée par les tassements

### Localisation du trafic sur les parcelles :

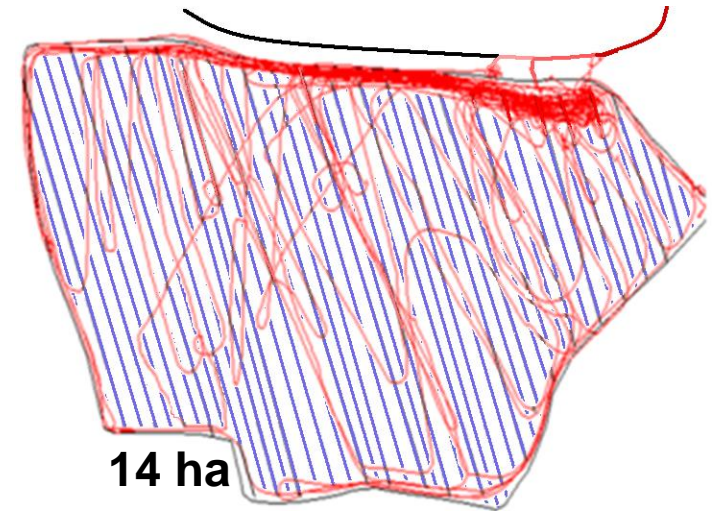
- Parcours des bennes dans la parcelle
- Controlled Traffic Framing (CTF) :
  - Utilisation du GPS pour localiser les passages de roues au même endroit
  - Adaptation de la voie des tracteurs et de la largeur des outils



Source : Agroscope



Parcours de la benne non optimisé :



14 ha

Crédit photos : P. Havard, CA Bretagne

— Moissonneuse  
— Tracteur + benne

## L'observation du sol reste indispensable

- Observer l'état structural en profondeur après chaque chantier lourd pour se sensibiliser aux risques de tassements
- Accompagner le changement des pratiques de travail du sol



Photo : Agro-Transfert-RT

Utilisation complémentaire de méthodes de diagnostic simplifiées sur le terrain, à combiner pour répondre aux questions du terrain

## Pénétrométrie

Tige métallique



→ Exploration de la variabilité spatiale et repérage des tassements en profondeur

## La « méthode bêche »

Extraction d'un bloc à la bêche :



→ Observation de l'état structural du sol sur l'horizon 0-25 cm

## Le mini profil télescopique

Extraction d'un bloc avec les palettes :



→ Observation de l'état structural des horizons superficiels et profonds (jusqu'à 70 cm)

→ Méthodes testées et adaptées dans le projet Sol-D'Phy

Exemples de méthodes :

## Le mini- Profil au « télescopique »

Extraction d'un bloc avec les palettes d'un télescopique :



**Evaluation sur le bloc :**

- horizons de travail du sol
- état structural de chaque horizon
- enracinement et traces d'activité biologique (galeries)

**Possibilité de compter les galeries sur un plan horizontal →**



# Conclusion :

- **Ne pas se fier uniquement aux ornières pour porter un jugement sur l'état structural du sol** : utiliser la bêche, la tige pénétromètre ou le chargeur frontal pour observer les éventuels tassements, notamment en profondeur
- **Régénération assez rapide (18 mois) des tassements superficiels**, par l'effet combiné du travail du sol, du climat et de l'activité biologique
- **Régénération très lente et difficile des tassements en profondeur**
  - Attention à la répétition des tassements en profondeur : **limiter le poids par essieu et le plan de charge des machines de récolte d'automne**
  - Importance de la **porosité verticale** (galeries, fissures) pour permettre l'enracinement en profondeur
- En cas de réduction du travail du sol :
  - **Prévenir les tassements**
  - Mettre en œuvre des **pratiques favorisant la régénération biologique** (vers de terre)



<http://www.agro-transfert-rt.org>

[v.tomis@agro-transfert-rt.org](mailto:v.tomis@agro-transfert-rt.org)