
Le compactage du sol: des tonnes de raisons et de façons d'agir



Jean Caron, agronome, Ph.D., Professeur en physique des sols, titulaire de la chaire CRSNG en conservation des sols organiques et ex-directeur scientifique du réseau québécois de recherche en agriculture durable (2020-2022),
Conflits d'intérêt: Hortau Inc. (2002) et Édaphis inc. et sa technologie Virgile (2012)



Le compactage du sol: des tonnes de raisons et de façons d'agir

Mandat

- constats en lien avec le compactage des sols
- impacts au niveau des engrais, rendements, rentabilité du maïs, et autres
- les solutions proposées

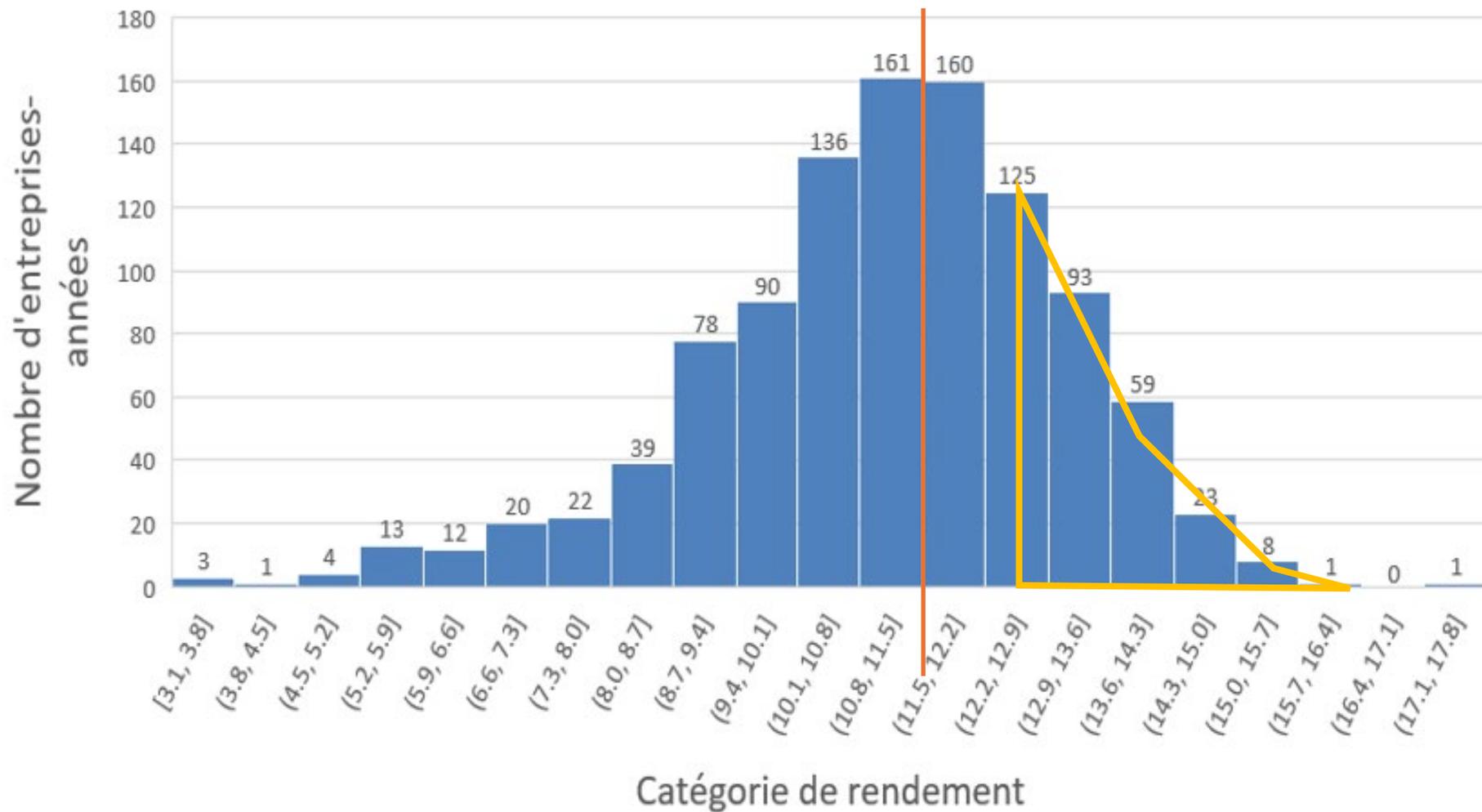


- 1. 12.5 tonnes par ha en Montérégie: un objectif, possible?**
- 2. 3 tonnes et plus à la roue: le risque de compactage**
- 3. 6.5 tonnes d'azote de trop pour une ferme moyenne?**
- 4. Une tonne d'argent en jeu!**
- 5. 10 tonnes de biomasse par hectare sans engrais?**
- 6. 100 \$ la tonne de CO₂ séquestrés**



- 1. 12.5 tonnes par ha en Montérégie: un objectif, possible?**
- 2. 3 tonnes et plus à la roue: le risque de compactage**
- 3. 6.5 tonnes d'azote de trop pour une ferme moyenne?**
- 4. Une tonne d'argent en jeu!**
- 5. 10 tonnes de biomasse par hectare sans engrais?**
- 6. 100 \$ la tonne de CO₂ séquestrés**

Rendement du maïs-grain (T/ha) dans la région 14 (2016-2018)



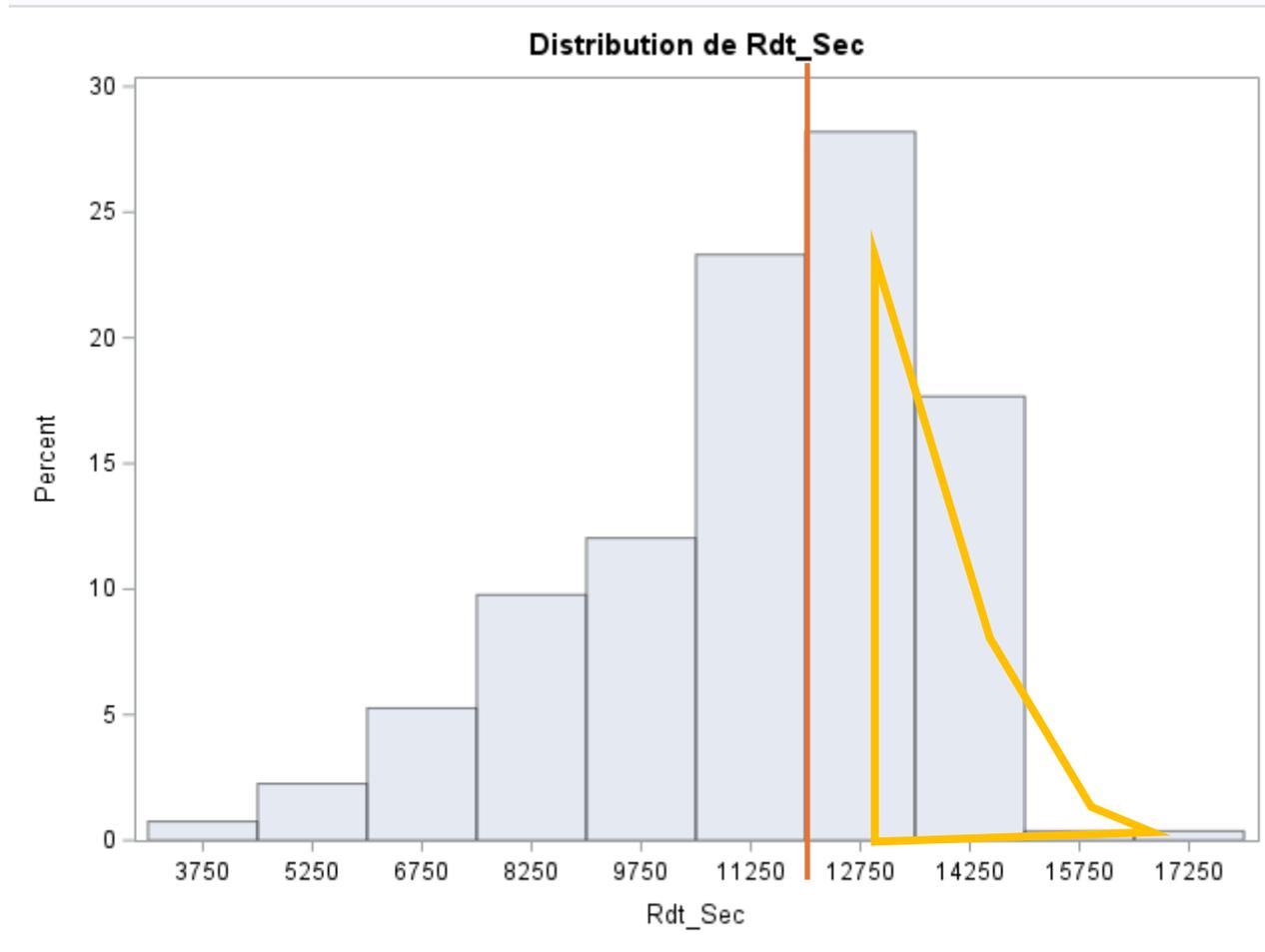
Quantiles (Définition 5)	
Niveau	Quantile
100Max 100%	17.3
99%	14.9
95%	14.0
90%	13.5
75% Q3	12.4
50% Médiane	11.2
25% Q1	10.0
10%	8.5
5%	7.2
1%	5.2
0% Min	3.1

N.B. Données non nominatives et non géoréférencées

Suivis de terrain de 2019-2022

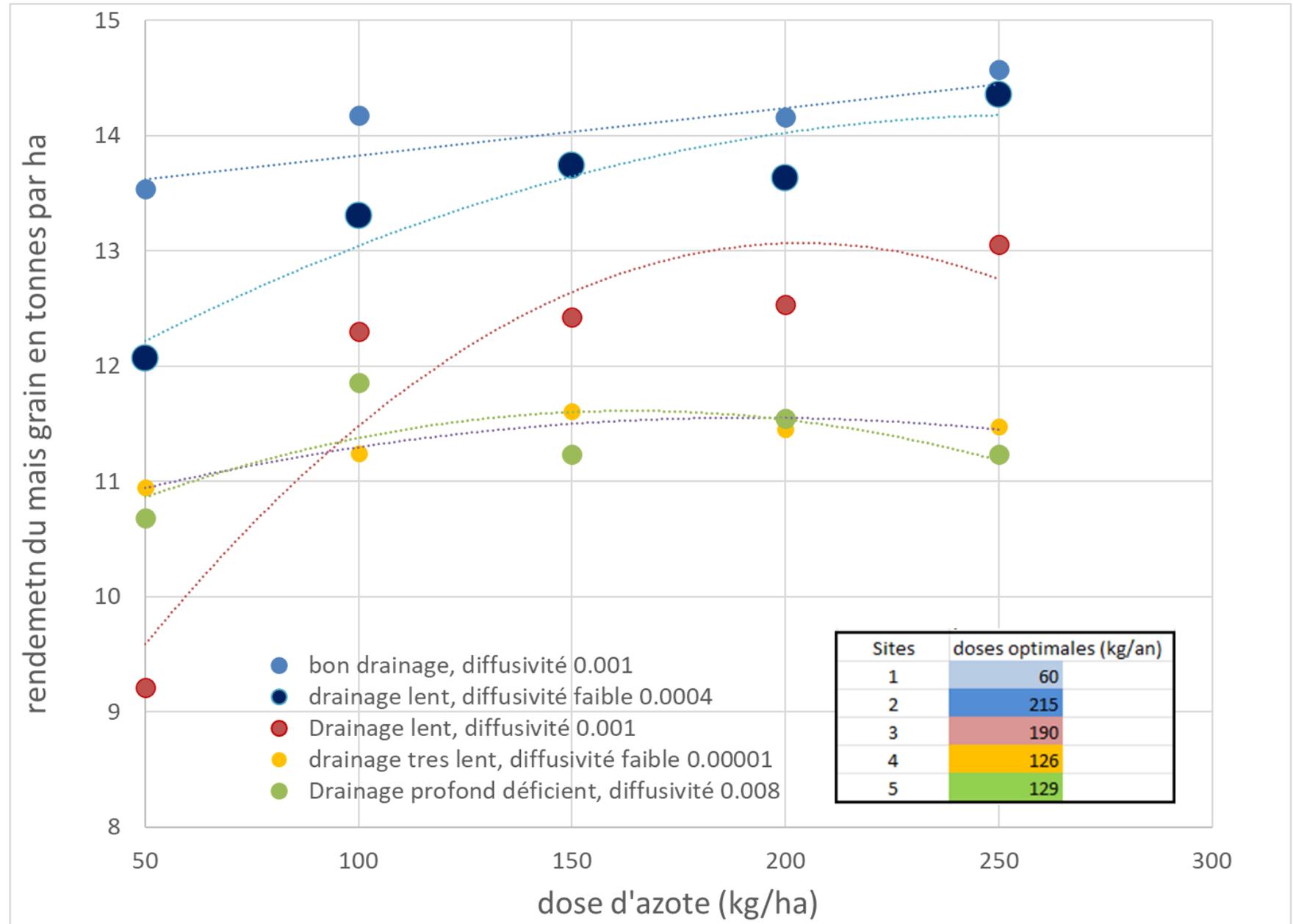
Des travaux ont donc été faits sur une vingtaine de sites en Montérégie sur 3 ans pour mesurer un ensemble d'indicateurs de terrain et évaluer de possibles liens avec la réponse à la fertilisation azotée en production de maïs grain où différentes doses d'azote allant de 50 à 250 kg par ha ont été appliquées





Quantiles (Définition 5)	
Niveau	Quantile
100Max 100%	17277.46
99%	14936.11
95%	14410.45
90%	14064.33
75% Q3	13073.13
50% Médiane	11804.03
25% Q1	9666.35
10%	7796.97
5%	6780.67
1%	4797.24
0% Min	3453.60

Rendement et réponse à l'azote par site

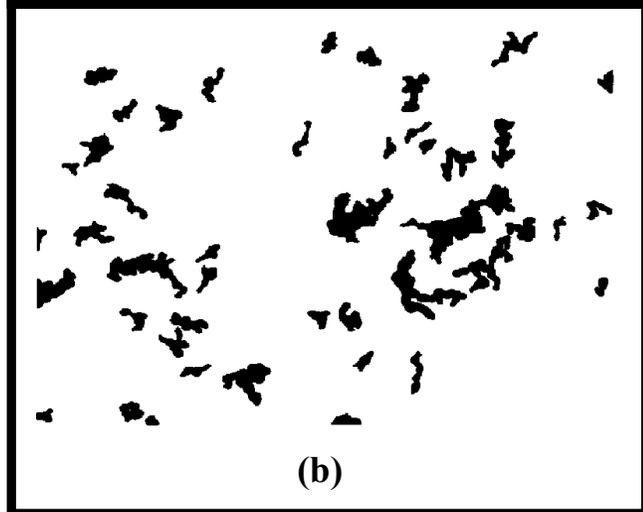
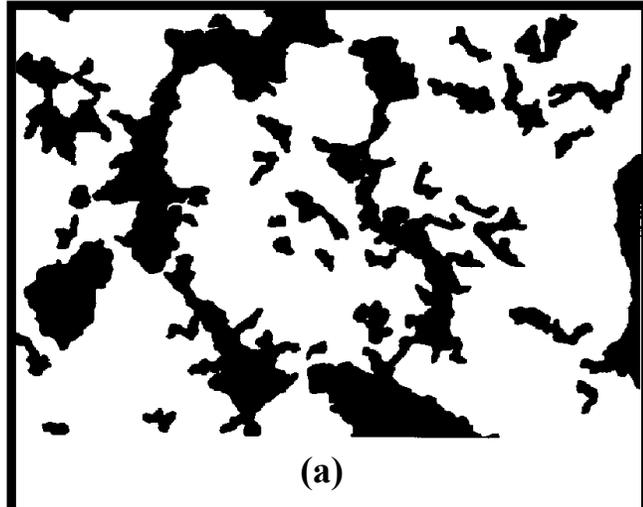




1. **12.5 tonnes par ha en Montérégie: un objectif, possible?**
2. **3 tonnes et plus à la roue: le risque de compactage**
3. **6.5 tonnes d'azote de trop pour une ferme moyenne?**
4. **Une tonne d'argent en jeu!**
5. **10 tonnes de biomasse par hectare sans engrais?**
6. **100 \$ la tonne de CO₂ séquestrés**

Quels devraient être de bons indicateurs?

Analyse d'images d'un profil ouvert et d'un profil compact



- On observe en A des pores plus nombreux, de plus grandes dimensions et mieux connectés ce qui permet des échanges gazeux rapides et un drainage rapide.
- On observe en B des pores beaucoup plus petits, une masse volumique apparente plus élevée, des pores moins bien connectés, ce qui ralentit passablement la vitesse de drainage.

Il faudrait mesurer la diffusivité des gaz et la conductivité saturée pour détecter plus facilement le compactage

- Depuis 50 ans au moins, on suggère d'utiliser des propriétés dynamiques telles que la diffusion des gaz et la conductivité hydraulique en plus des propriétés statiques (masse volumique apparente et porosité d'air) pour faire un suivi de la santé physique des sols dans la zone de 0 à 60 cm de profond.
- Malgré cela, on ne possède pas d'informations à grande échelle sur la valeur des paramètres dynamiques et leur évolution à la suite de la mise en culture des sols.
- Mise à part l'étude de 1990 et les récents travaux du rapport sur la santé des sols, nous disposons de très peu de mesures de conductivité hydraulique saturée et d'aération dans les sols, et encore moins de mesures de diffusivité des gaz bien que ce dernier paramètre soit depuis longtemps suggéré comme très sensible (+50 ans).



SOLS

*Diagnostic
de la dégradation
des propriétés physiques
des sols*

Guide technique
**DIAGNOSTIC ET
DRAINAGE SOUTERRAIN**
DES TERRES AGRICOLES

CPVQ
CONSEIL
DES PRODUCTIONS
VÉGÉTALES
DU QUÉBEC inc.

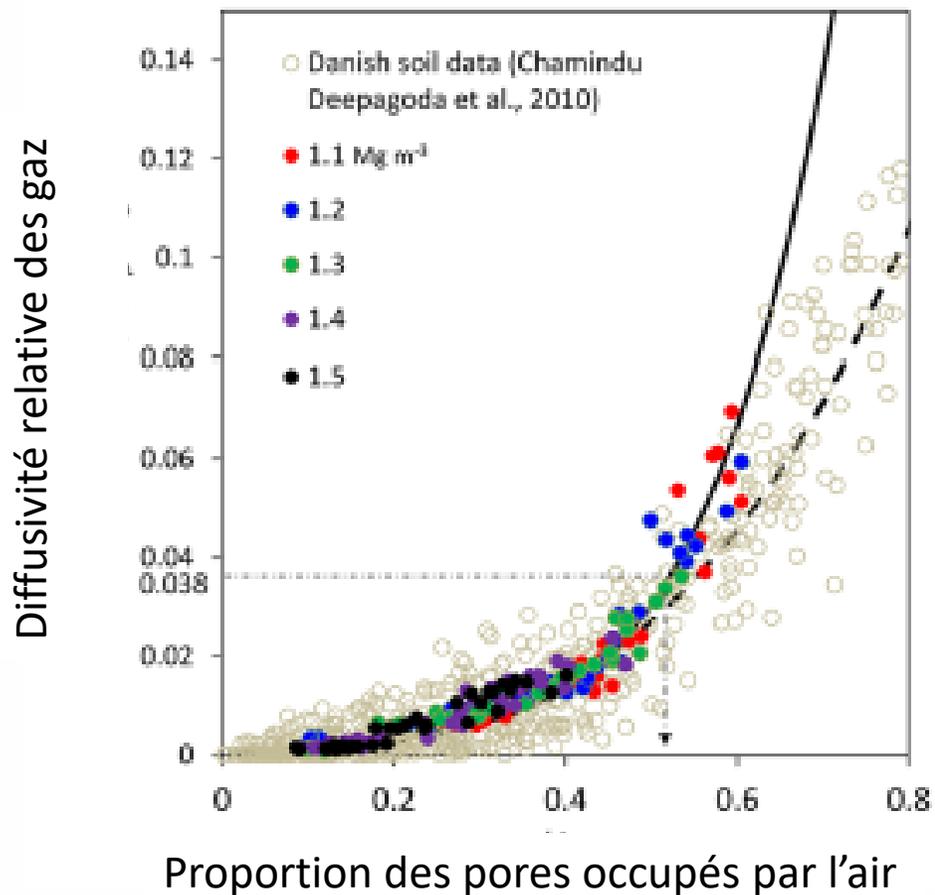
Guide d'évaluation
des systèmes de drainage
Une approche renouvelée



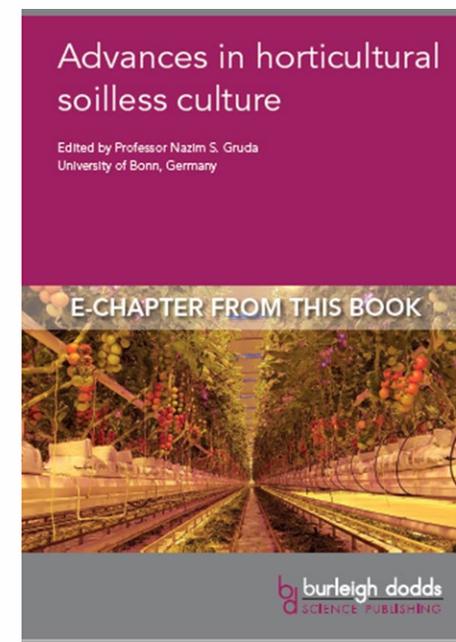
Important de diagnostiquer en profondeur. Quels indices en sols minéraux et quelles valeurs seuils de comparaison?

caractéristiques	paramètres	unité	Valeur seuil minimale	Valeur optimale	Valeur excessive
aération	Porosité d'air	$\text{Cm}^3 \text{ cm}^{-3}$	0,10	0,25	
aération	Diffusivité des gaz	$\text{m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}$	0,005	0,035-0,038	
Localisation de couches compactes	Masse volumique apparente	g cm^{-3}	0,90	1,1	1,5 (sols argileux)
drainage	Conductivité hydraulique saturée	Cm s^{-1}	0,0011 (ou 1 m par jour)		0,010

Charte d'interprétation de la diffusivité relative en fonction de la porosité d'air



Indicateurs recommandés et valeurs critiques (adoptés en 2022 par la société internationale des sciences horticoles)

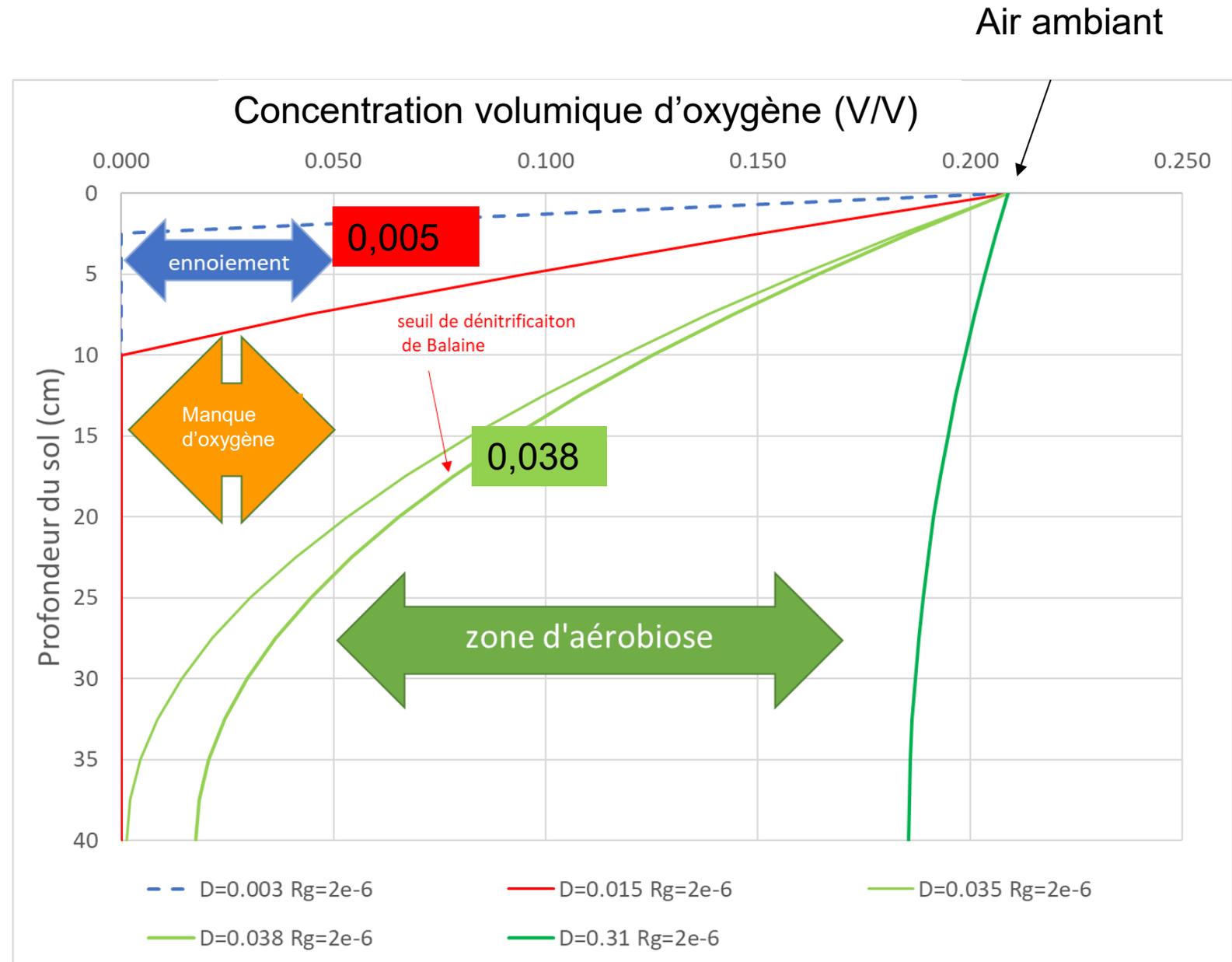


Understanding and optimizing the physical properties of growing media for soilless cultivation

Jean Caron, Université Laval, Canada; and Jean-Charles Michel, l'Institut Agr, France

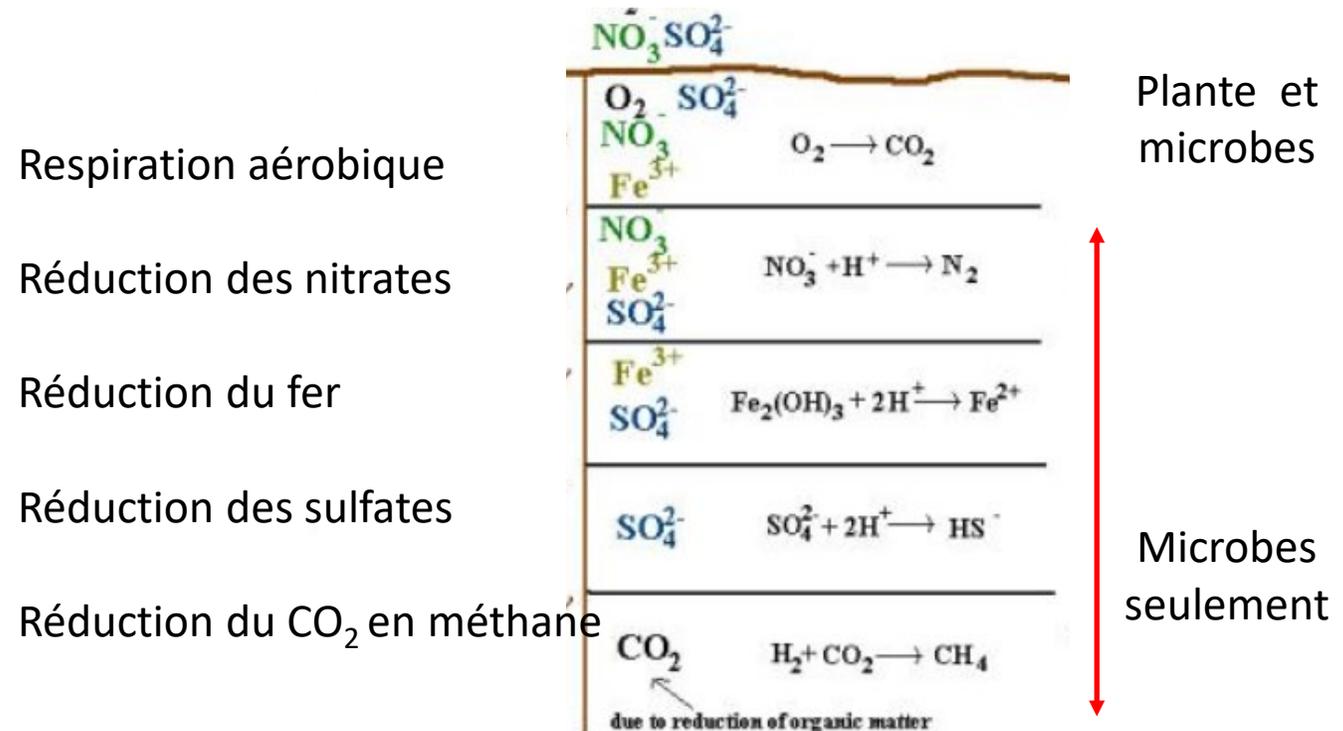
Pourquoi la diffusivité (D_s/D_o)? Pour prédire le risque de manque d'oxygène, lent à se manifester

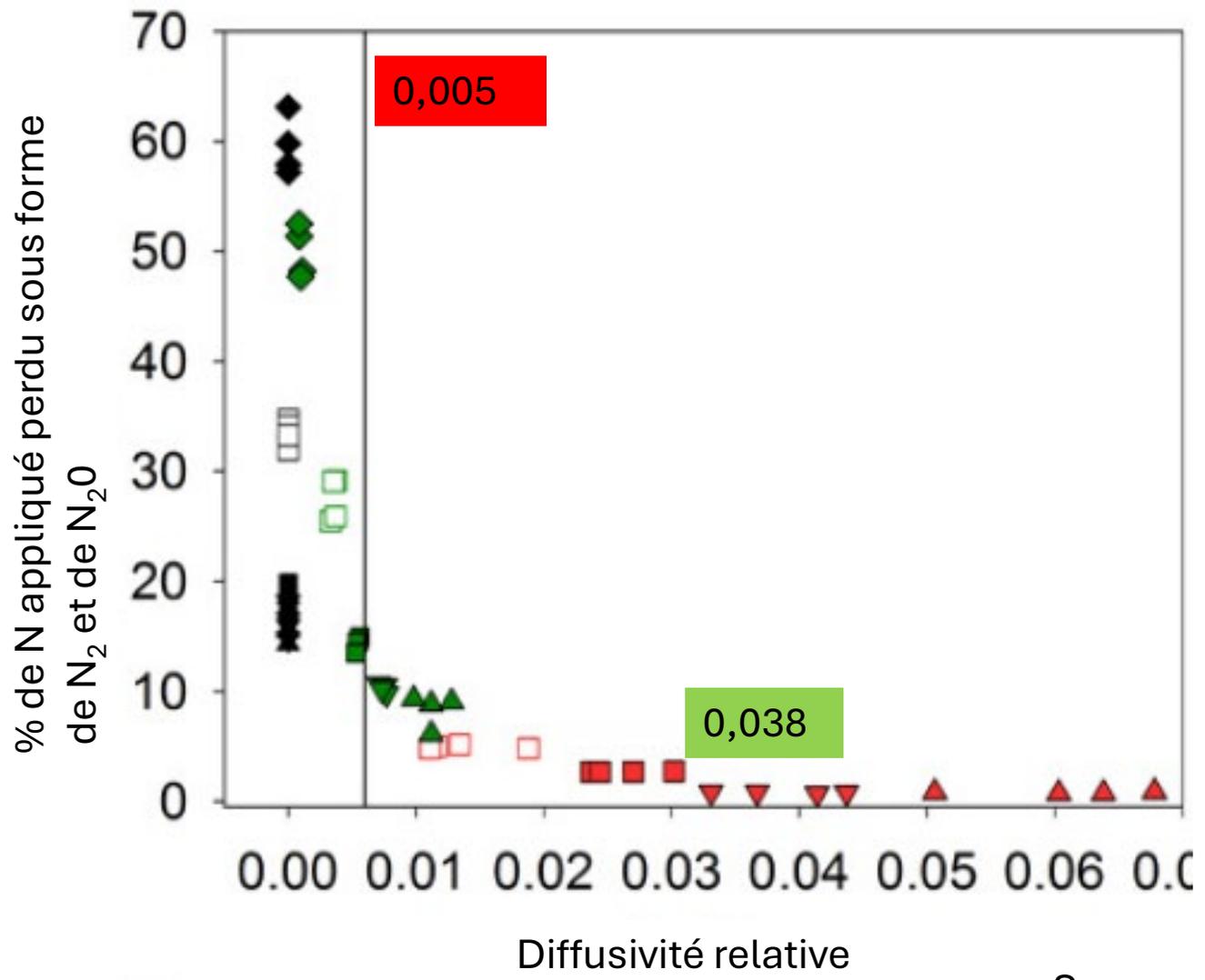
Charte d'interprétation avec valeur de seuil ($D_s/D_o=0.035$).
A partir de cette valeur, les 40 premiers cms vont tomber en stress d'oxygène



Séquence d'utilisation des gaz durant la respiration microbienne

Séquences d'oxydation de la matière organique en fonction du degré d'aérobiose du sol (réaction d'oxydo-réduction dans le sol)





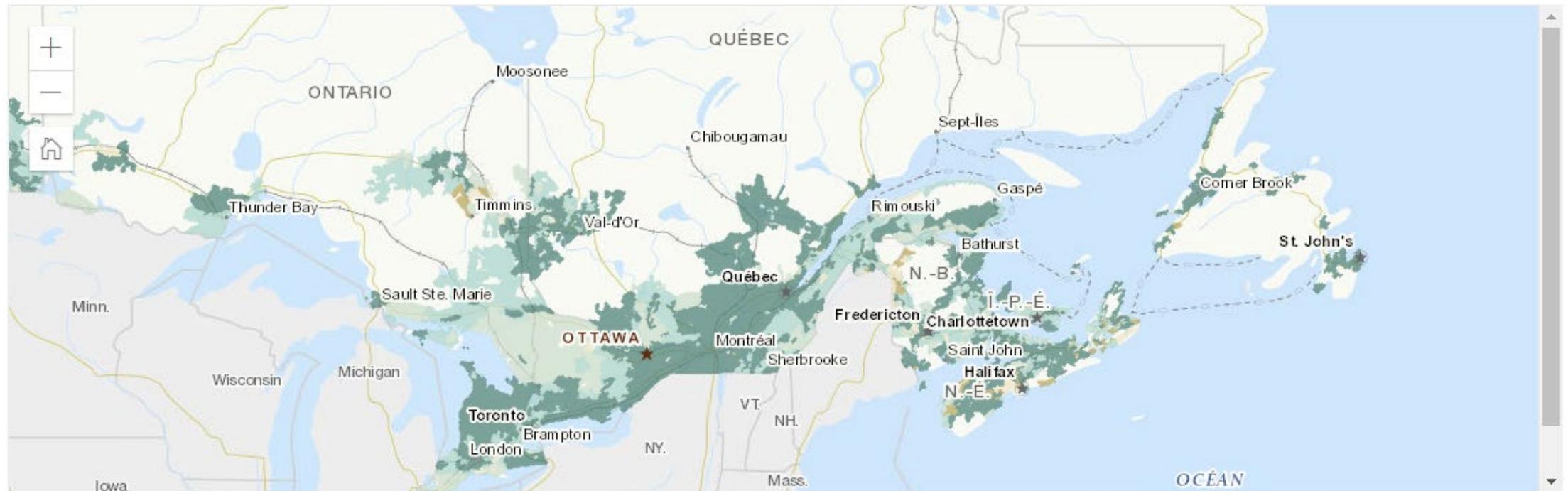
Source : Balaine et coll, 2013



- On parlera de tassement (le sol s'affaisse sous son propre poids) et de compactage (influence du poids des équipements par roue > 3 T)
- On parlera de perte de santé physique en fonction de la profondeur avec une perte d'aération de surface et une perte de capacité de drainage en profondeur

Le carbone organique chute de façon généralisée dans les zones en cultures dans l'Est du Canada

Figure 1: Variation de la teneur en carbone organique du sol (en kilogramme par hectare par année) au Canada en 2016



Légende:

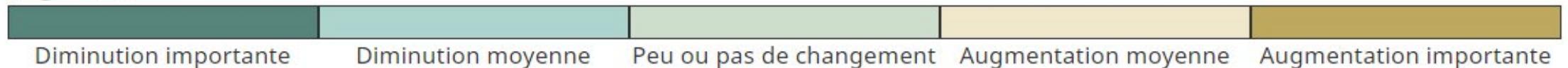
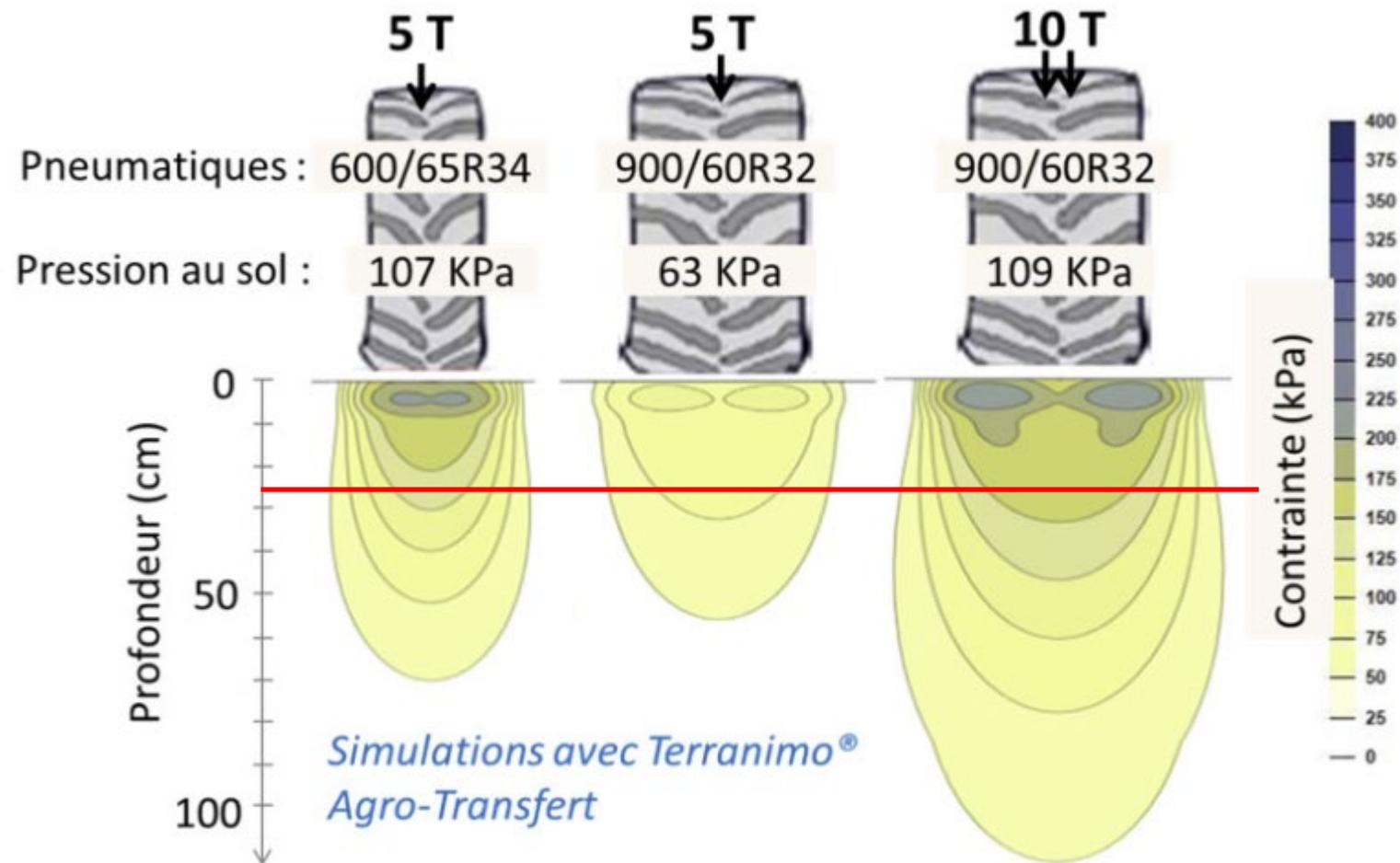


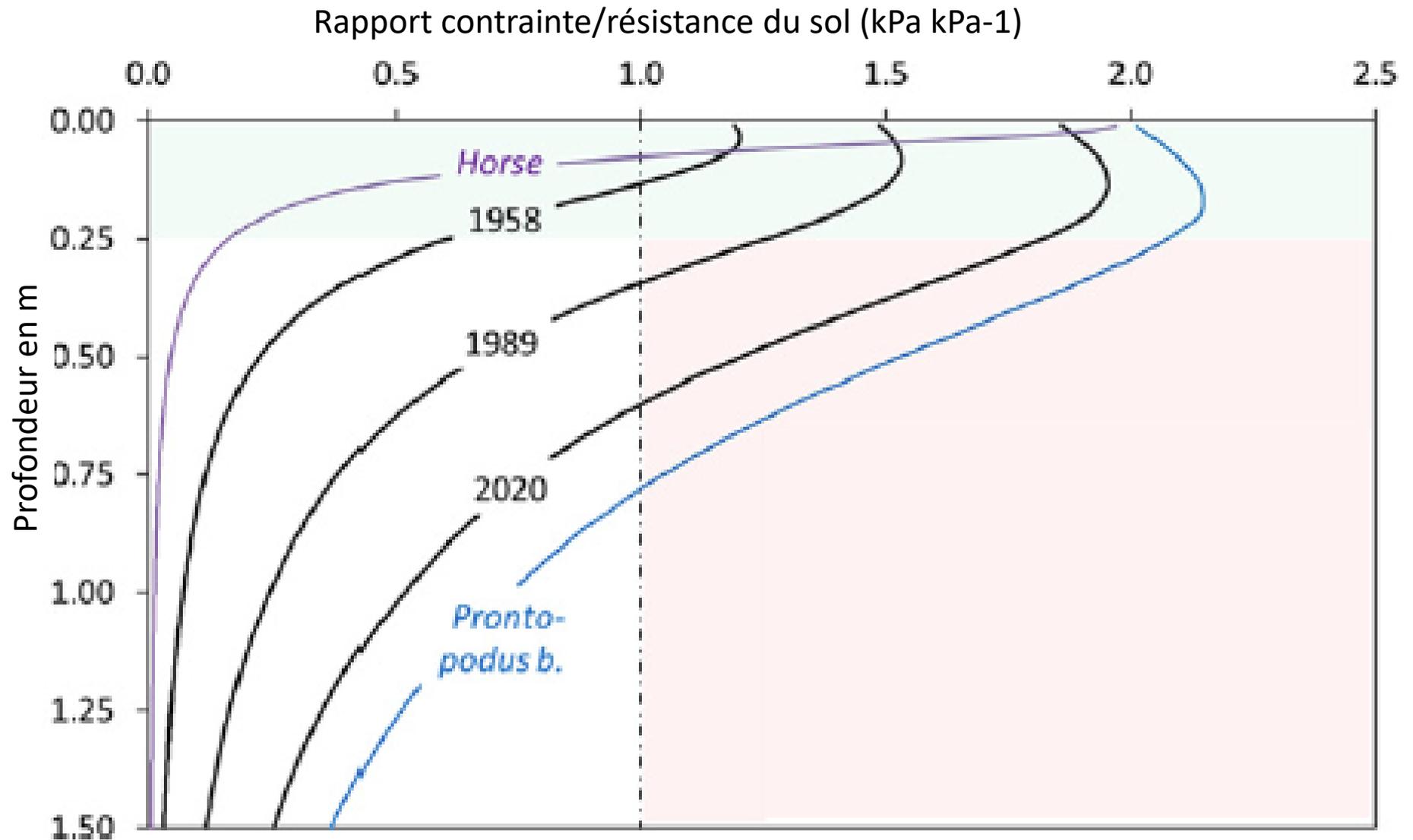
Figure 2 : Représentation des bulbes de compaction sous un pneu étroit ou large en fonction de la charge

Simulation réalisée par Agro-Transfert avec l'outil Terranimo



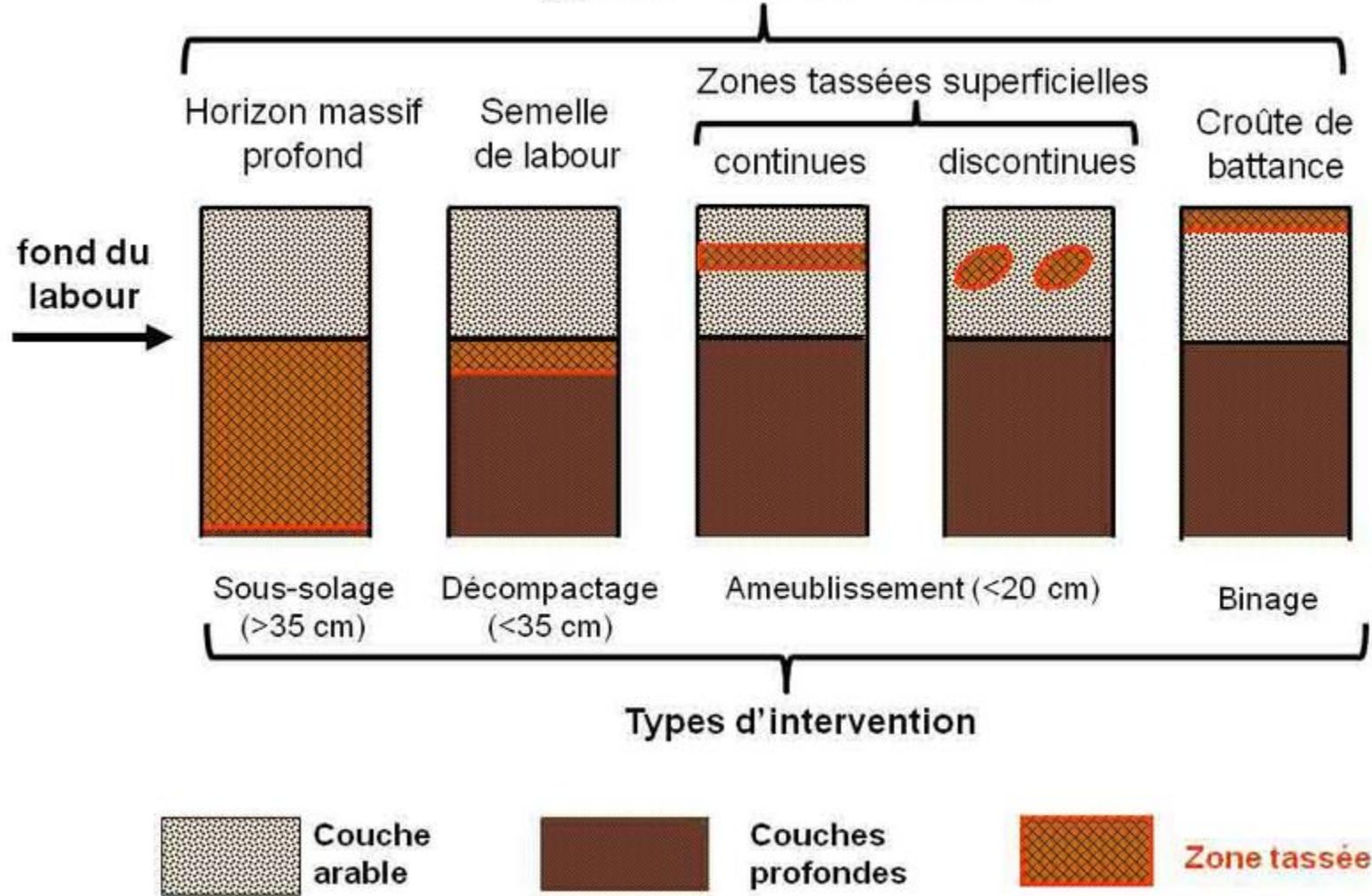


Le compactage est de plus en plus profond à cause du poids des équipements par surface qui se compare à l'empreinte des grands dinosaures!

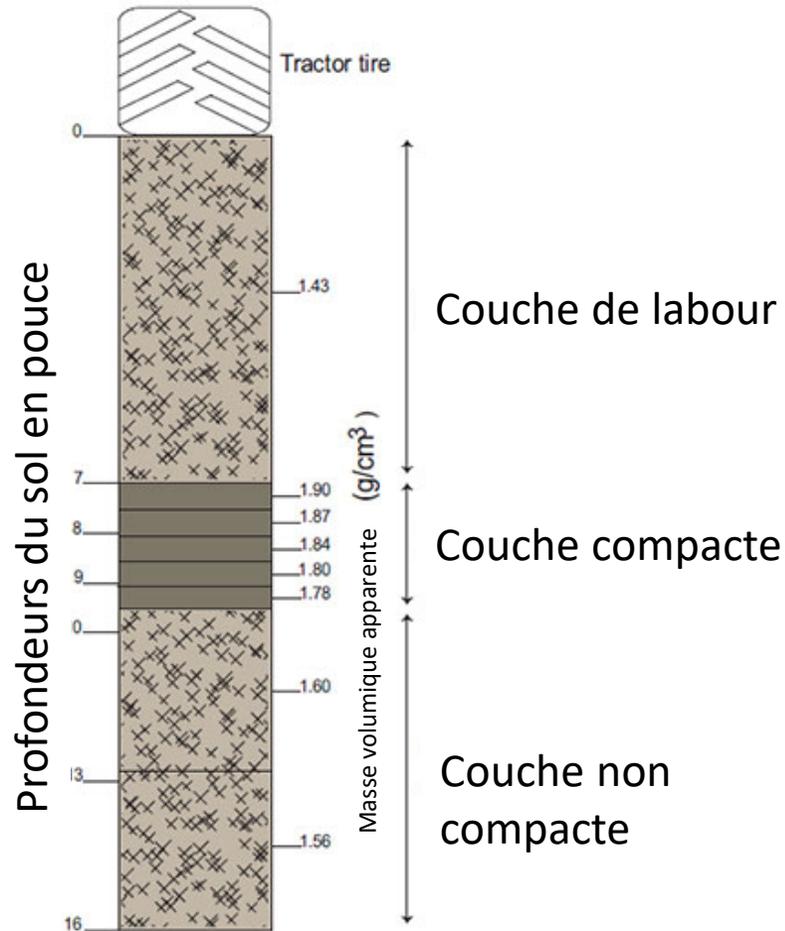


Répartition du rapport contrainte/résistance en fonction de la profondeur et du poids grandissant des équipements. Lorsque le rapport excède 1, il y a compactage du sol. La profondeur de compactage augmente donc avec les années due à l'accroissement du poids à la roue des équipements (Keller et Or, 2022)

Types de tassement



Distribution de la masse volumique apparente en Angleterre montrant la couche compacte en profondeur qui inhibe la croissance racinaire et la distribution de l'eau



Adapted from: *The Nature and Properties of Soils, 10th Edition, Nyle C. Brady, Macmillan Publishing Company.*

On utilise souvent la masse volumique apparente, indice de la densité mais pas de la continuité

Relation générale entre la masse volumique apparente et la croissance racinaire en fonction de la texture

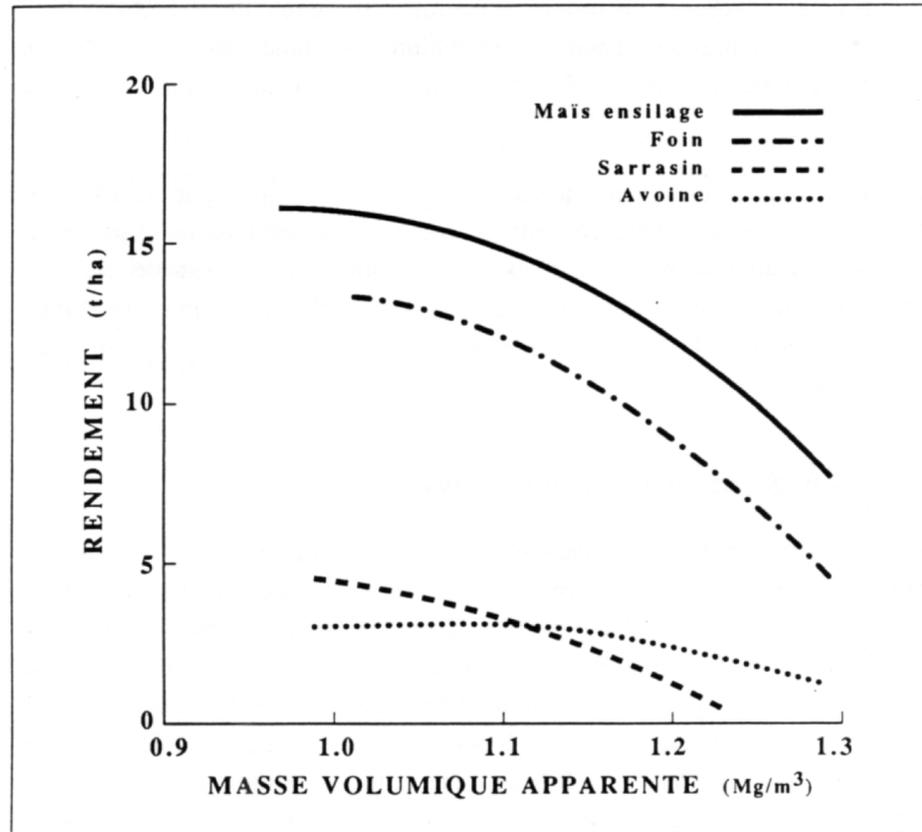
Texture du sol	Masse volumique idéale pour la plante (g cm^{-3})	Masse volumique apparente ou la croissance racinaire s'arrête
sable	< 1,60	> 1,80
limon	< 1,40	> 1,65
argile	< 1,10	> 1,47

Source:

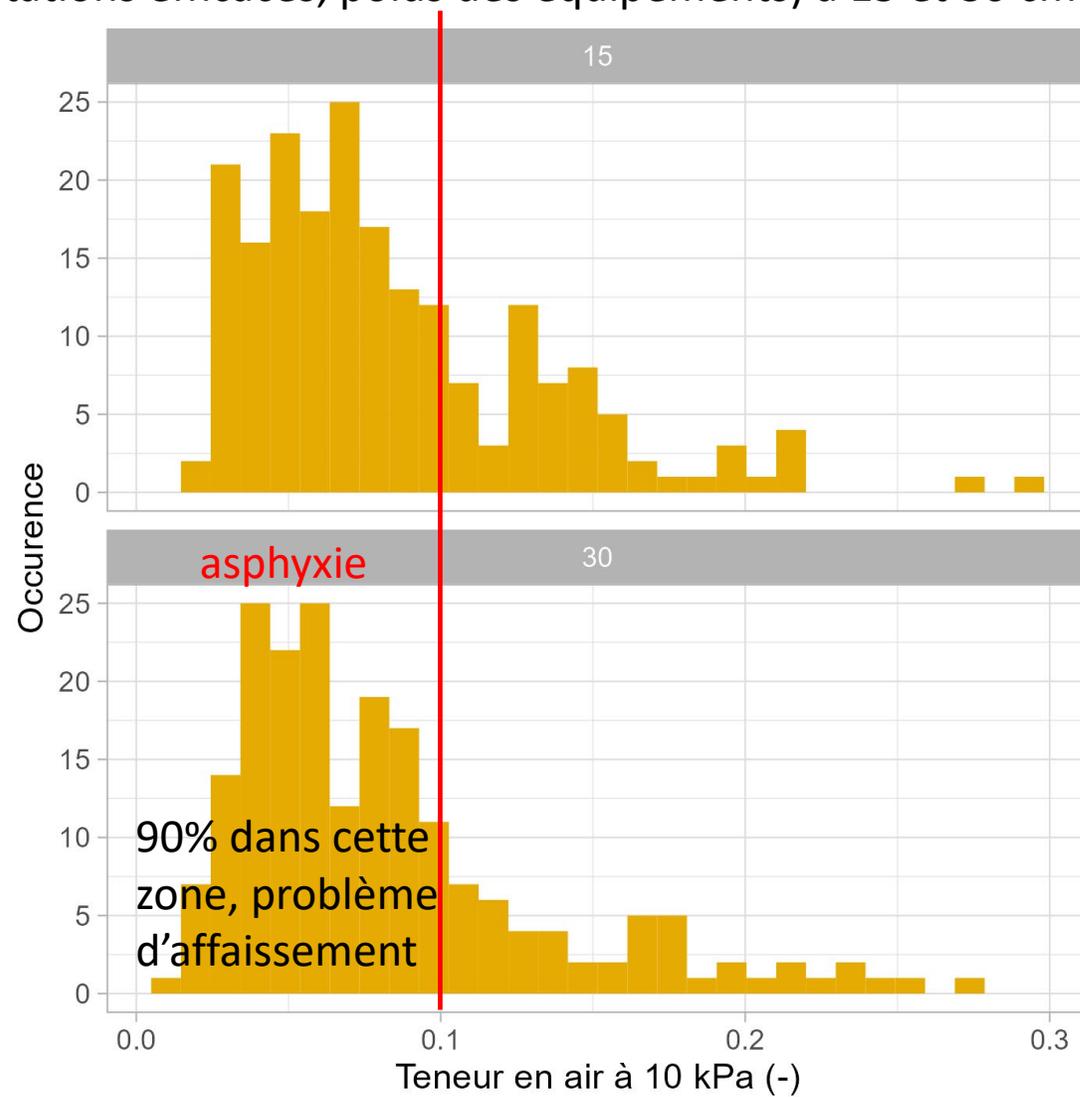
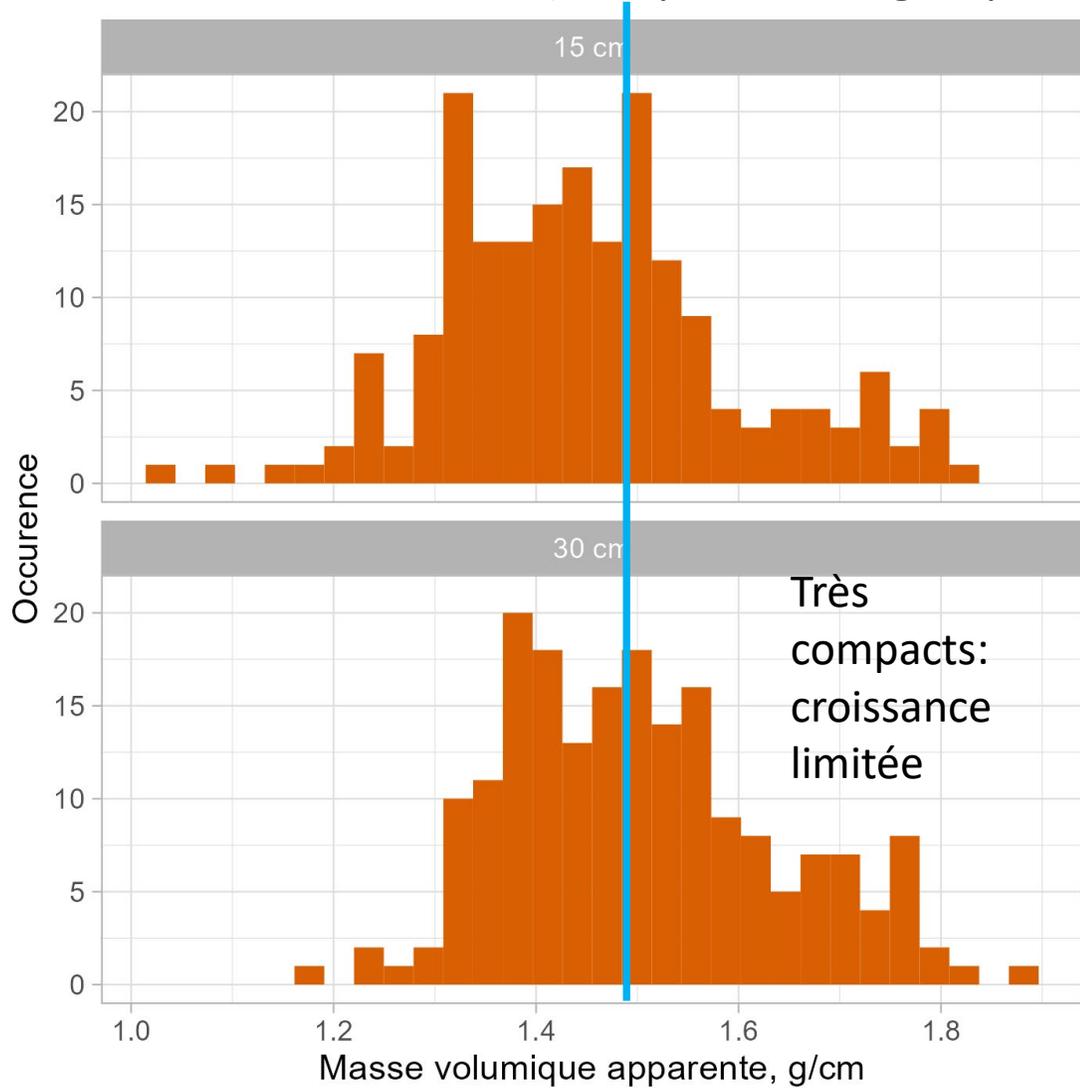
<https://www.sdsoilhealthcoalition.org/technical-resources/physical-properties/bulk-density/>



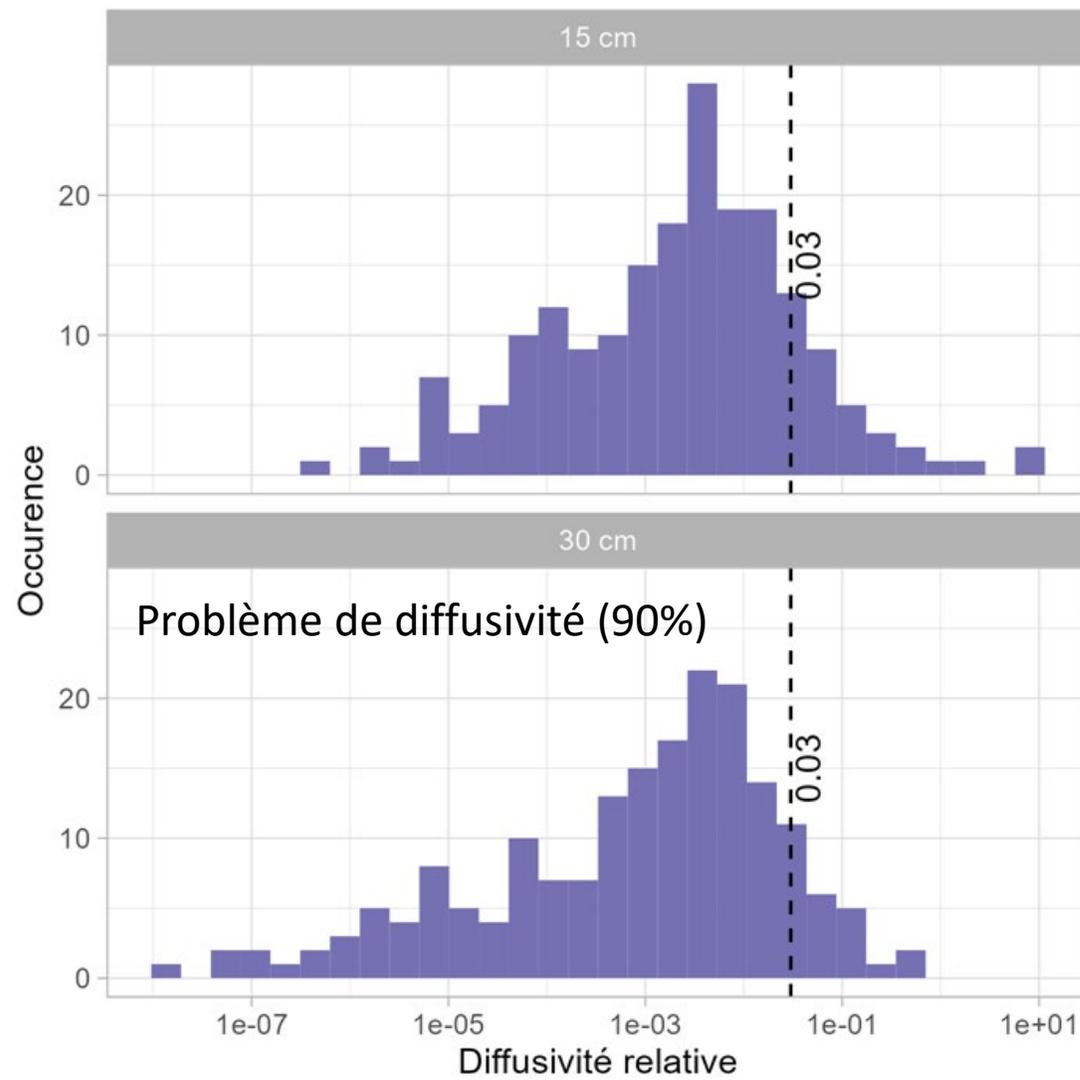
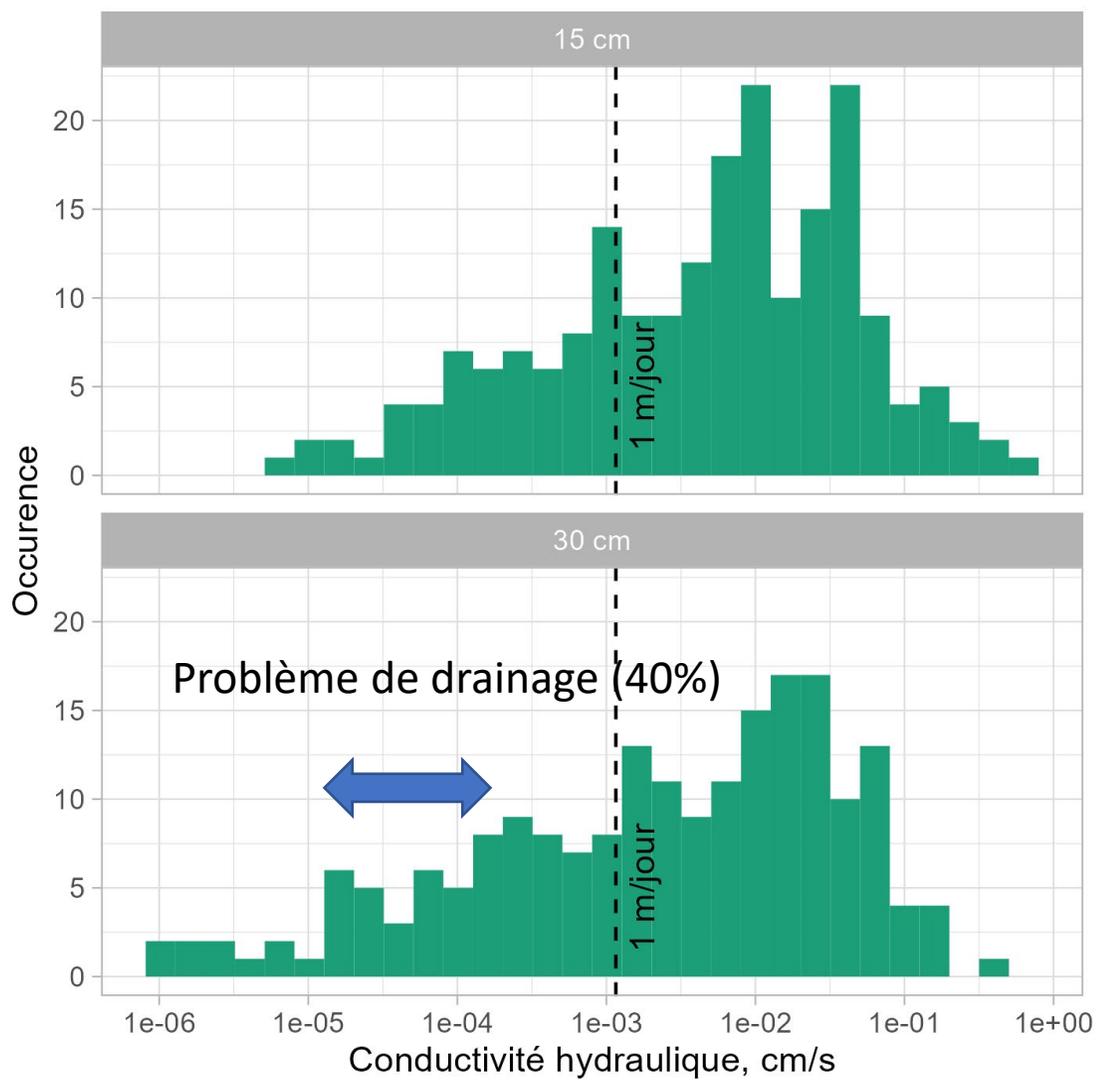
Réponse de différentes cultures à la masse volumique apparente (Mehuys et McKyes, 1980)



Sols affaissés en surface (manque de m. organique, de rotations efficaces, poids des équipements) à 15 et 30 cm



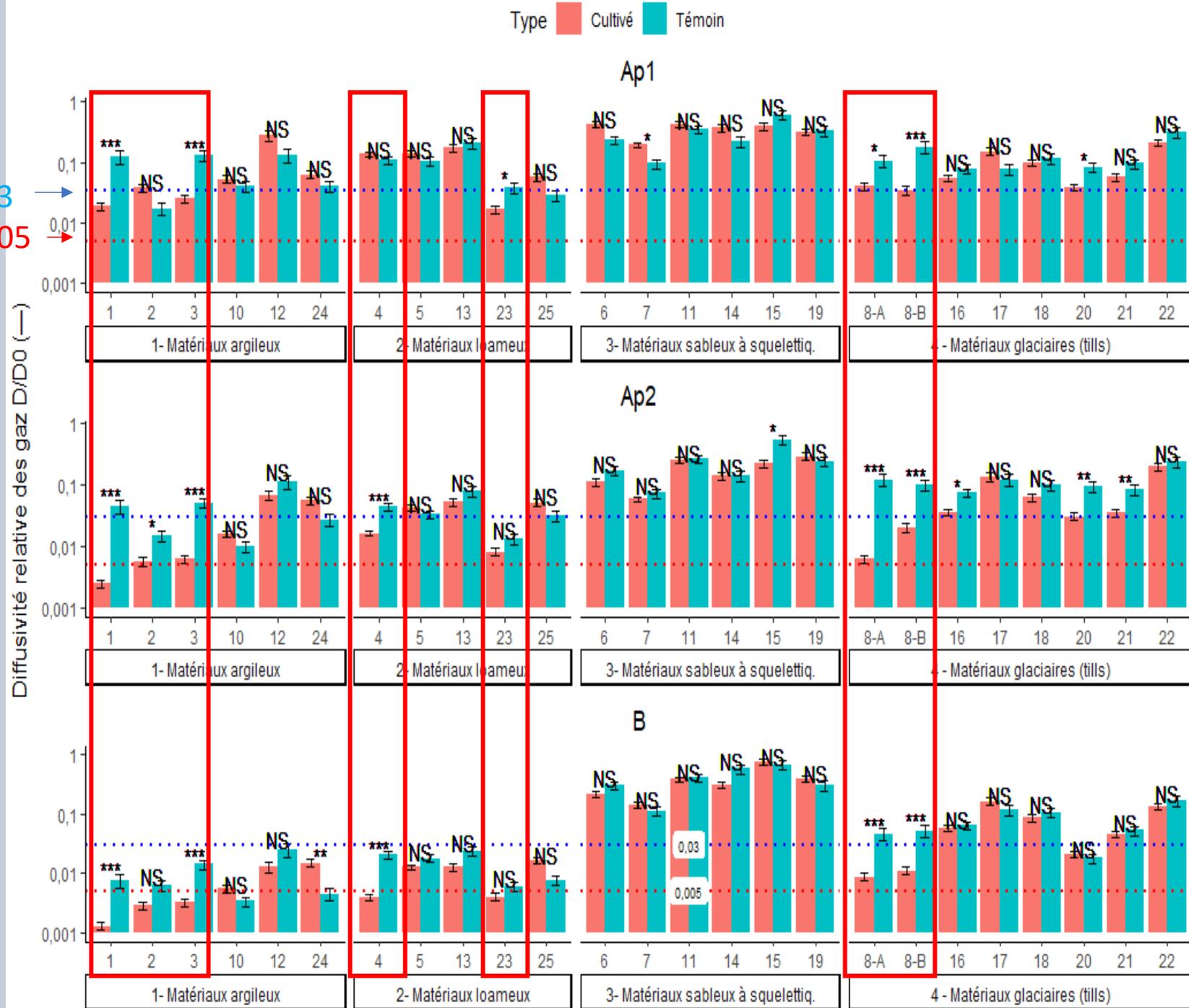
Sols affaissés à risques élevés de dénitrification (10-60% de l'azote perdu)



Diffusivité relative des gaz dans l'étude sur la santé des sols (Gasser, M. 2023)

Les groupes de sols 1, 2, 3, 4, 8-A et 8-B sont dans la plaine de Montréal.
Le groupe 23 est au Lac-Saint-Jean.

Seuil 0,03
Seuil 0,005



Statu quo ou détérioration?

Comparaison des conductivités hydrauliques saturées à 40 cm (cm s^{-1}) dans les principales séries de sols de Montérégie. Les mesures ont été effectuées en 1990 (Tabi et coll, 1990) puis de nouveaux à partir de 2019 (Gasser et coll, 2023).



	années 90			2019-2023		
st Urbain	groupe 1			essaq st-Urbain ste Rosalie		surface (ha)
ksat	20	40	60	20	40	
	20	40	60	20	40	29522
cultive	7.39E-03	3.07E-03	1.06E-03	4.75E-04	1.16E-05	
temoin	1.33E-02	5.36E-03	5.36E-03	3.59E-03	2.55E-04	
ste rosalie						
	20	40	60	20	40	252412
cultive	2.40E-03	5.84E-04	3.17E-04	4.75E-04	1.16E-05	
temoin	2.16E-03	7.27E-04	3.23E-04	3.59E-03	2.55E-04	
	groupe 3			providence rideau chambly st blaise		
	20	40	60	20	40	101122
cultive	3.03E-03	9.37E-04	4.04E-04	6.48E-05	1.50E-05	
temoin	3.91E-03	1.26E-03	4.15E-04	1.57E-03	7.18E-05	
	groupe 2			St-Laurent, Kierkoski et Dalhousie		
	20	40	60	20	40	
cultive	1.64E-03	3.60E-04	3.06E-04	6.71E-05	1.39E-05	41094
temoin	8.43E-04	4.96E-04	1.88E-04	3.32E-04	3.70E-05	

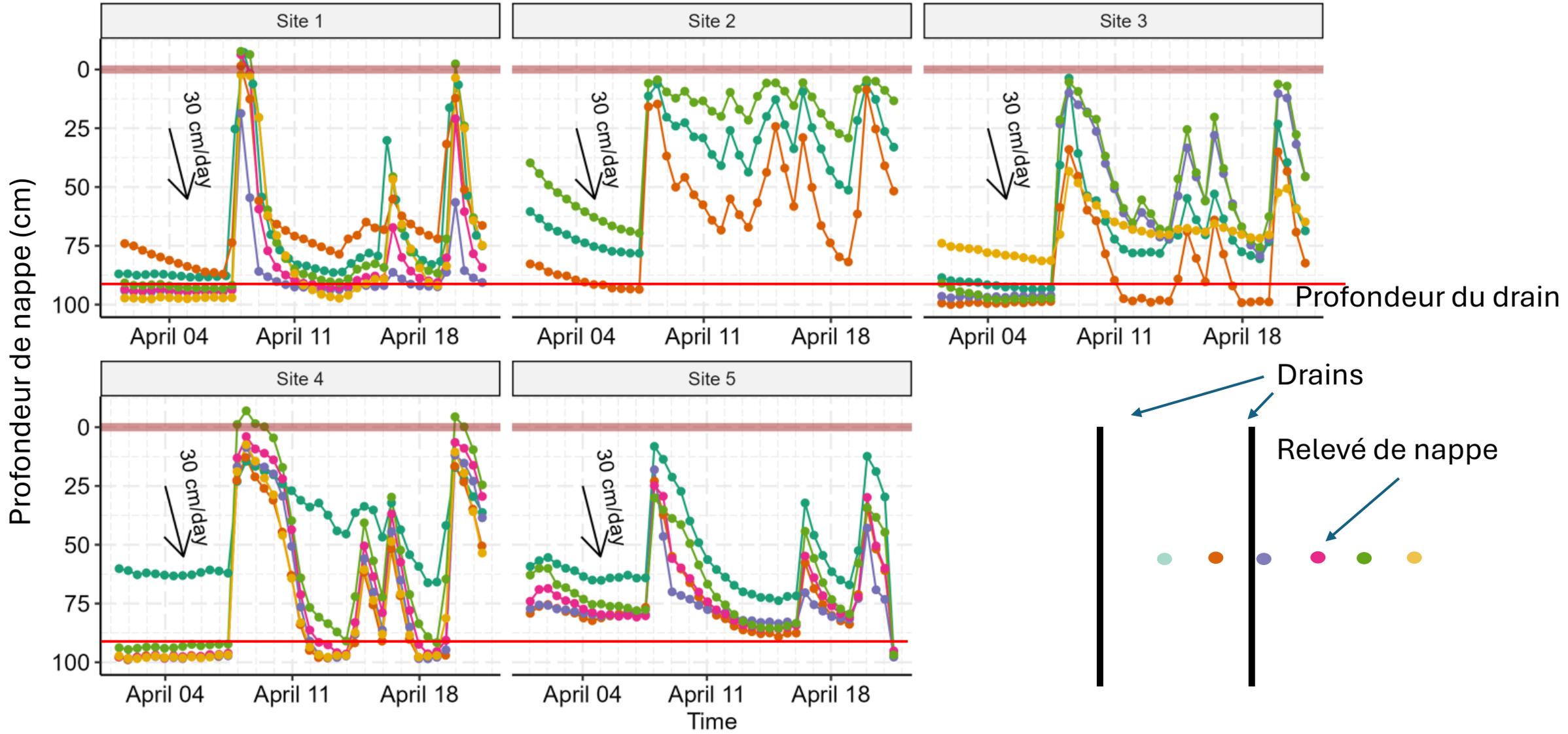
Ça pourrait continuer de se dégrader en profondeur. Les argiles marines ont des conductivités hydrauliques saturées qui peuvent descendre à 10^{-7} à $10^{-9} \text{ cm s}^{-1}$

Impact attendu sur l'espacement des drains: la structure du sol semble revenir vers l'état massif initial, l'espacement des drains devra se rapprocher jusqu'à des valeurs irréalistes (moins de 6 m):

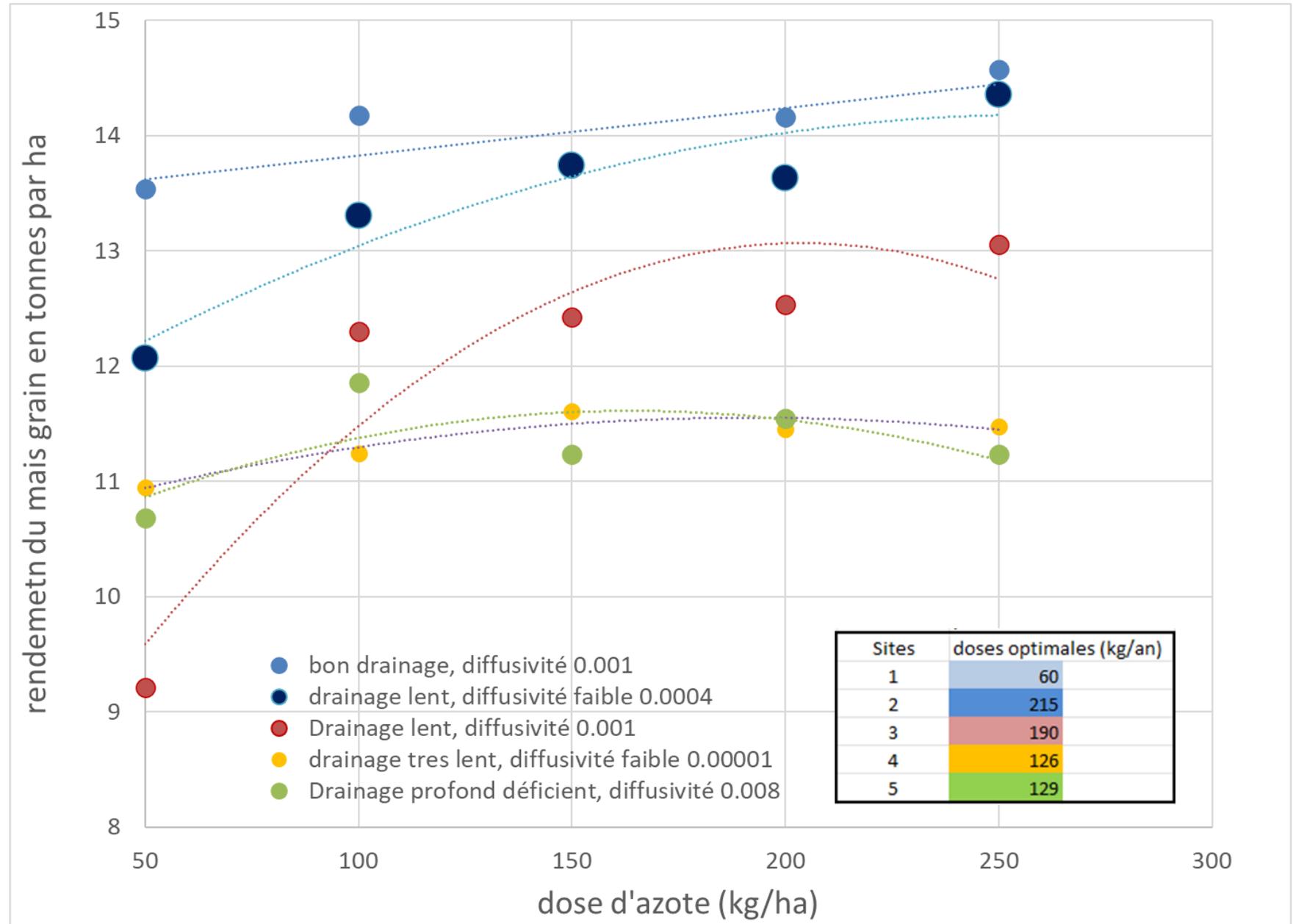
Conductivité hydraulique (cm s ⁻¹)	Espacement entre drains en m (approx. en pieds)
0,01 (10 ⁻²)	62 (200)
0,001 (10 ⁻³)	20 (65)
0,0001 (10 ⁻⁴)	6 (20)
0,00001 (10 ⁻⁵)	2 (6)

Ex: calculs faits pour des drains à 80 cm de profond, une nappe de surface et 70 mm de pluie en 5 jours pour un rabattement de 30 cm par jour

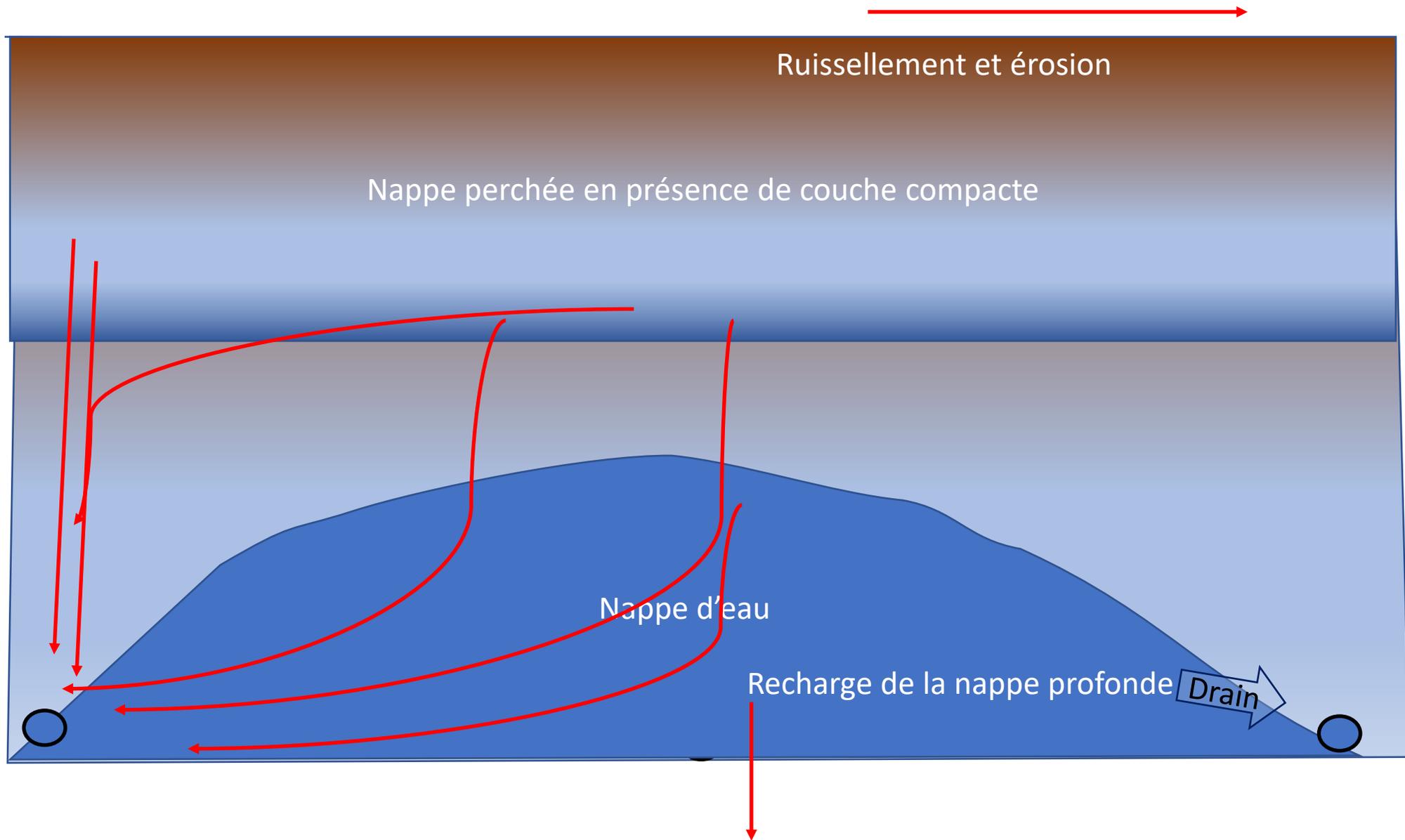
Transect Point
 P1 P3 P5
 P2 P4 P6



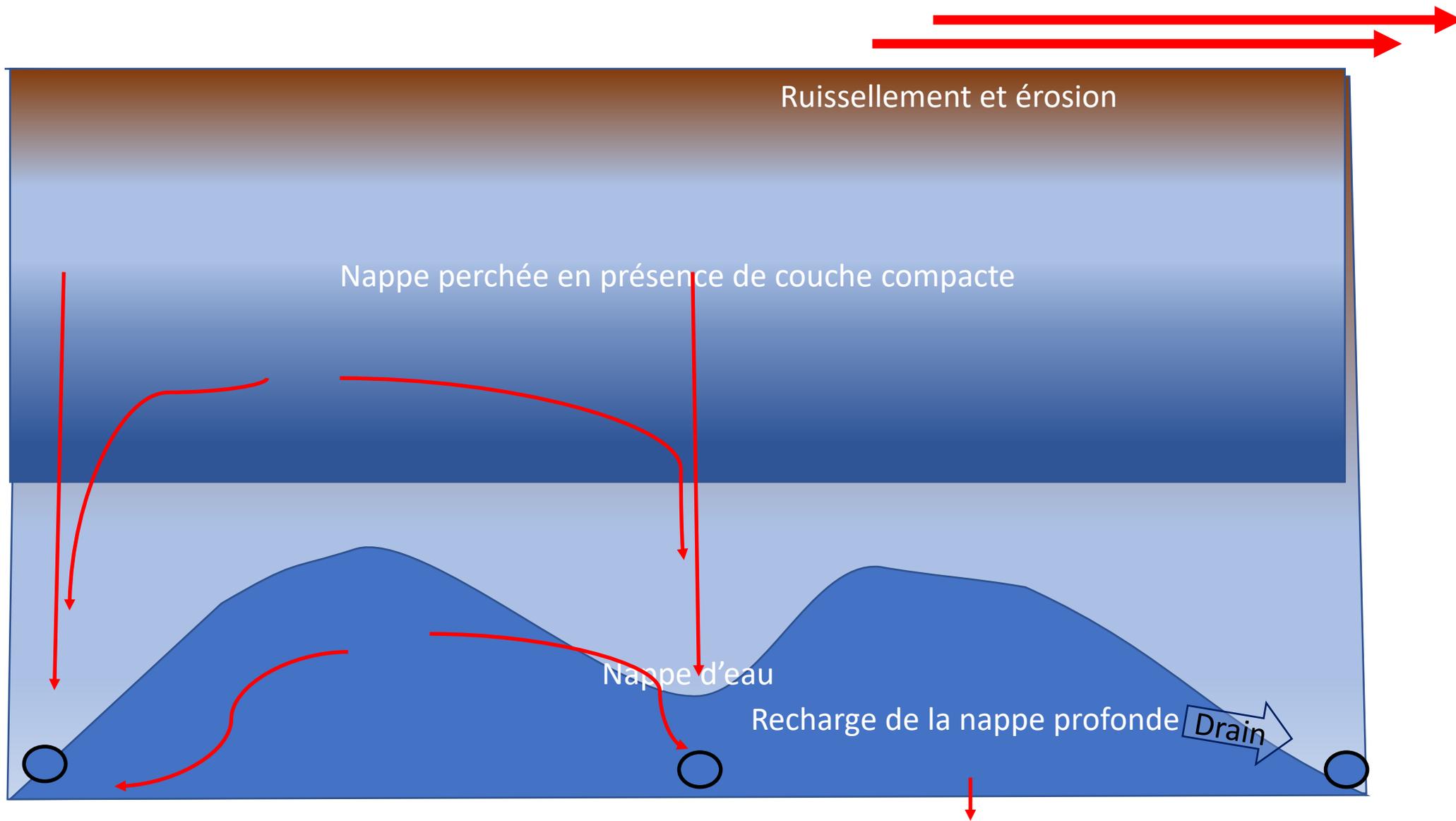
Rendement et réponse à l'azote par site



Lignes d'écoulement d'eau dans un sol sans et avec une couche compacte



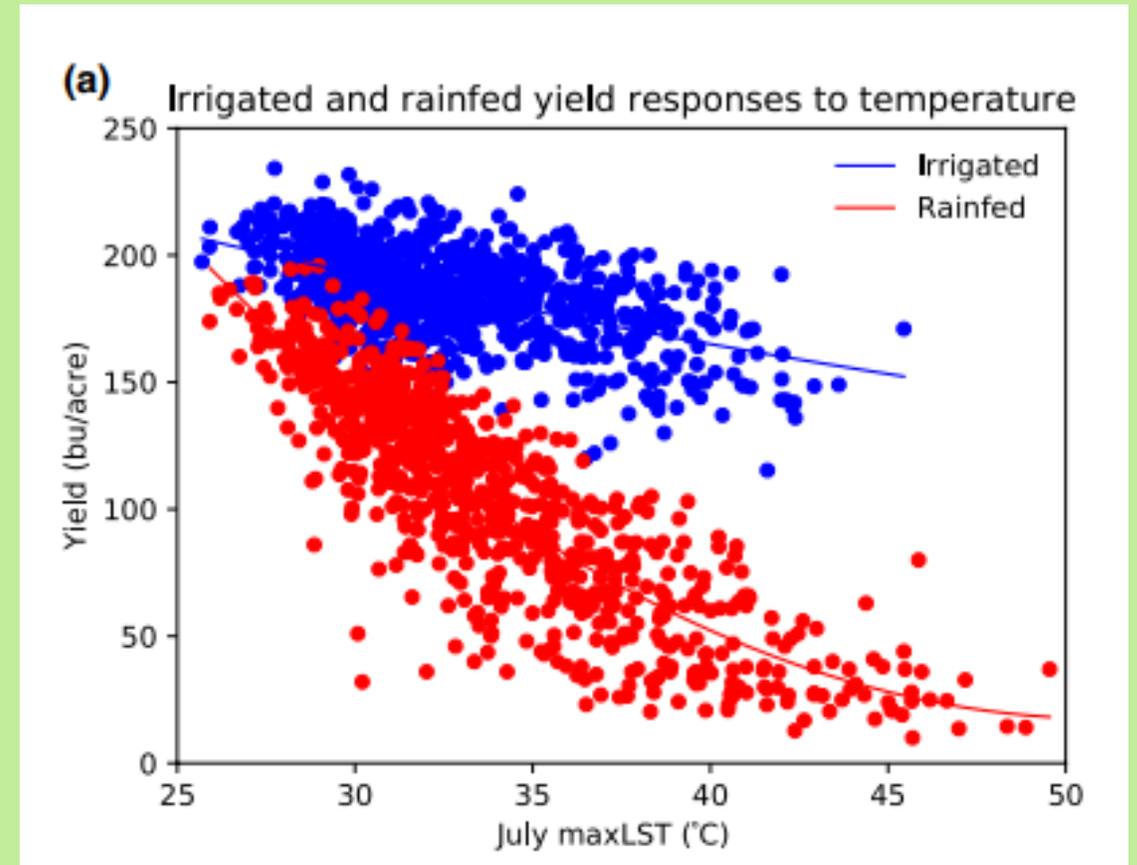
Lignes d'écoulement d'eau dans un sol avec une couche compacte avec doublement des drains



Conséquences du changement climatique sur le régime d'alimentation: le maïs-grain est sensible au stress thermique

- Températures plus élevées:
 - Périodes de sécheresse plus longues (importance de la recharge)

Boisseau / acre	Tonne m. /ha
75	4.8
100	6.5
125	8.1
150	9.7
175	11.3
200	12.9
225	14.5
250	16.1



3 tonnes à la roue: diagnostic nécessaire

- Surface est affaissée ou tassée: diffusivité faible et porosité d'air aussi dans 90 % des cas, un excellent drainage compensera en faible part
- Drainage à revoir: conductivité limitante dans 40 % des cas et suivi de rabattement nécessaire pour le diagnostic du drainage de base
 - Drainage en place est-il encore fonctionnel?
 - L'espacement est-il adéquat pour un rabattement de 15 voire 30 cm par jour?
 - Certains drains sont-ils bouchés?
 - Le dimensionnement est-il adéquat?
 - Y a-t-il eu compaction profonde?
 - Y a-t-il une compaction en surface créant une nappe perchée ?
 - Est-ce qu'on a une recharge suffisante de l'aquifère local



1. **12.5 tonnes par ha en Montérégie: un objectif, possible?**
2. **3 tonnes et plus à la roue: le risque de compactage**
3. **6.5 tonnes d'azote de trop pour une ferme moyenne?**
4. **Une tonne d'argent en jeu!**
5. **10 tonnes de biomasse par hectare sans engrais?**
6. **100 \$ la tonne de CO₂ séquestrés**

„, cette rotation bénéficie en plus de l'arrière effet de l'azote d'une amélioration des rendements à cause de meilleures propriétés physiques et de moins d'incidence de maladies et d'insectes... Source: Marralino et Ortiz-Torres, 2006

lbs/acre	Kg N/ha
80	89
120	134
160	179
240	268

Tableau 1. Effet moyen de la rotation et de l'application d'azote sur le rendement du maïs grain au cours de 21 ans de rotation et au cours des 4 dernières années

Rotation	Crop	21-year average yield				Recent 4-year average yield			
		0 N	80 N	160 N	240 N	0 N	80 N	160 N	240 N
----- bushels/acre -----									
1	Corn with spring N	62	121	147	158	88	157	186	198
7	Corn with fall N	60	105	135	146	92	142	182	191
2	Corn (first)	139	163	168	171	178	200	207	209
	Corn (second)	82	135	156	165	114	166	192	197
	Corn (third)	75	119	147	153	106	160	186	191
	Oats	54	63	73	76	67	72	93	96
3	Maïs grain	107	148	167	170	127	179	201	201
	Soya	46	46	46	46	52	52	52	52
4	Corn (after oats)	138	164	172	170	170	198	214	206
	Soybean	50	50	49	49	56	56	55	58
	Corn (after soybeans)	117	158	170	174	149	188	202	209
	Oats	54	65	73	80	61	75	88	106
5	maïs grain après 1 an luzerne	158	165	169	171	194	200	203	203
	maïs grain après 2 ans luzerne	111	144	162	168	143	176	194	203
	Oats*	63	71	73	76	80	84	98	105
6	Corn after 2 years of alfalfa	165	165	173	170	201	196	210	206
	Oats*	81	77	81	79	105	95	104	101

*Oats always was undersown with alfalfa, and this seeding year is not counted for the alfalfa rotation years.

Boisseau / acre	Tonne m. /ha
75	4.8
100	6.5
125	8.1
150	9.7
175	11.3
200	12.9
225	14.5
250	16.1

12.9 avec 200
kg N/ha ou avec
40 kg/N?

Rendement en maïs grain (moyenne trois ans) en production continue de maïs grain ('continuous corn') ou dans une rotation de deux années de luzerne ('rotation corn')

Drury, C. F., et al. (2014). Impacts of 49–51 years of fertilization and crop rotation on growing season nitrous oxide emissions, nitrogen uptake and corn yields. *Canadian Journal of Soil Science*, 94:421-433.

Table 2. Corn grain yields and N uptake for continuous corn and rotation corn with/without fertilization in 2007, 2008, 2009 and for the 3-yr average

Cropping system	Fertilization treatment	2007	2008	2009	3-yr average
<i>Corn grain yields at 15.5% moisture content (t ha⁻¹)</i>					
Continuous corn	Fertilized (F-CC)	5.61 (0.40) ^z	4.94 (0.24)	5.91 (0.54)	5.48 (0.17)
	Not-fertilized (NF-CC)	2.33 (0.18)	0.34 (0.096)	1.49 (0.13)	1.39 (0.08)
Rotation corn	Fertilized (F-RC)	9.35 (0.29)	8.73 (0.41)	11.9 (0.33)	10.0 (0.17)
	Not-fertilized (NF-RC)	3.88 (0.14)	4.40 (0.42)	3.51 (0.11)	3.93 (0.14)
<i>Corn grain N uptake (kg N ha⁻¹)</i>					
Continuous corn	Fertilized (F-CC)	69.8 (5.5)	65.8 (3.6)	63.3 (5.9)	66.3 (2.0)
	Not-fertilized (NF-CC)	19.8 (1.6)	3.8 (1.0)	14.5 (1.2)	12.7 (0.8)
Rotation corn	Fertilized (F-RC)	135.0 (5.5)	120.1 (6.6)	156.0 (6.2)	137.0 (3.4)
	Not-fertilized (NF-RC)	46.8 (2.2)	51.3 (5.1)	39.6 (1.2)	45.9 (1.8)
<i>F value and probability level</i>					
<i>Corn grain yield</i>					
Cropping system		95***	149***	149***	595***
Fertilization		260***	193***	380***	1233***
Cropping system × fertilization		16***	0.2	37***	47***
<i>Corn grain N uptake</i>					
Cropping system		127***	126***	183***	566***
Fertilization		285***	208***	359***	1097***
Cropping system × fertilization		22***	0.6	60***	74***

} Perte de 1.2% par an

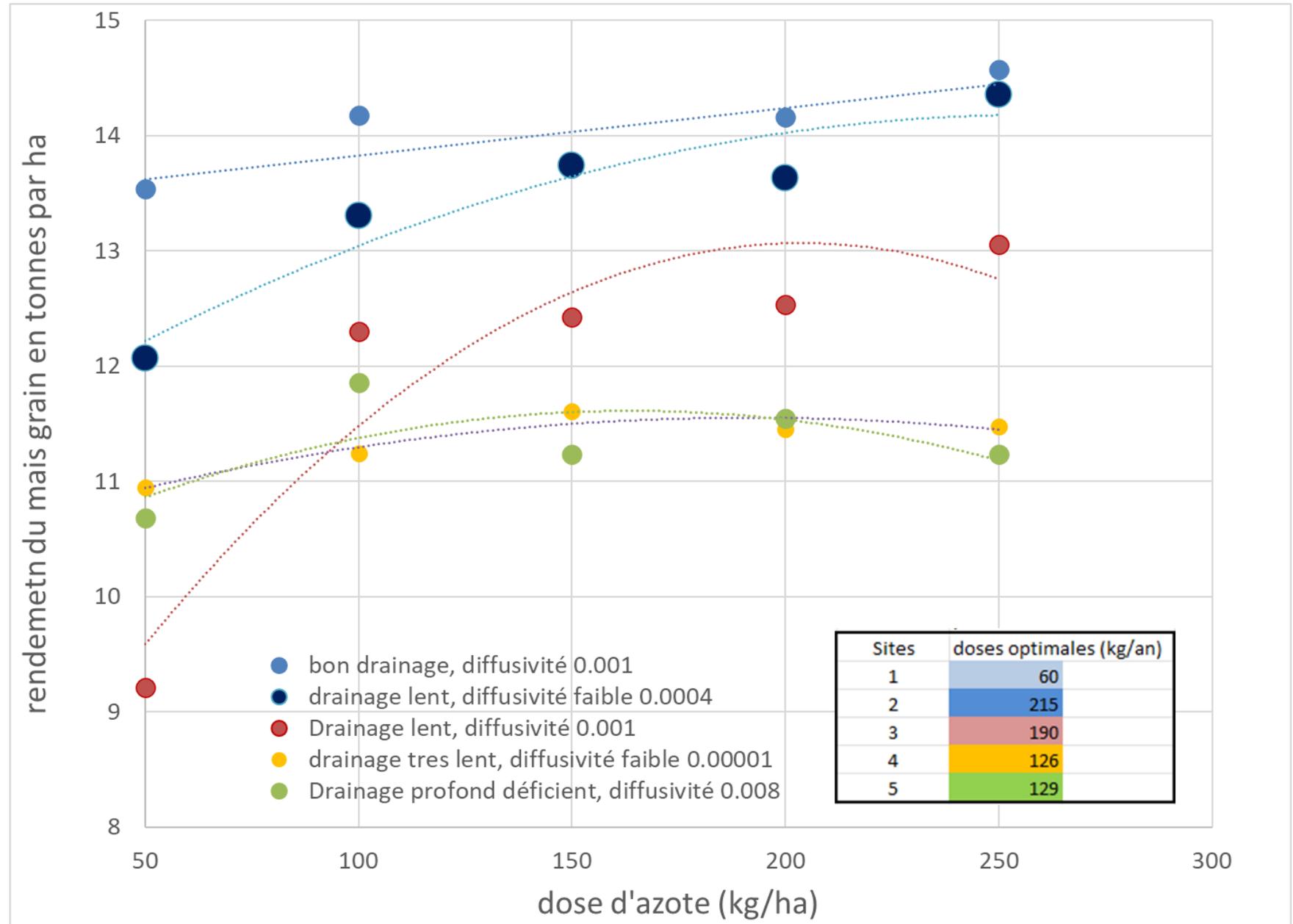
} 70 kg N/ha

^zNumbers in parentheses are standard error ($n=8$).

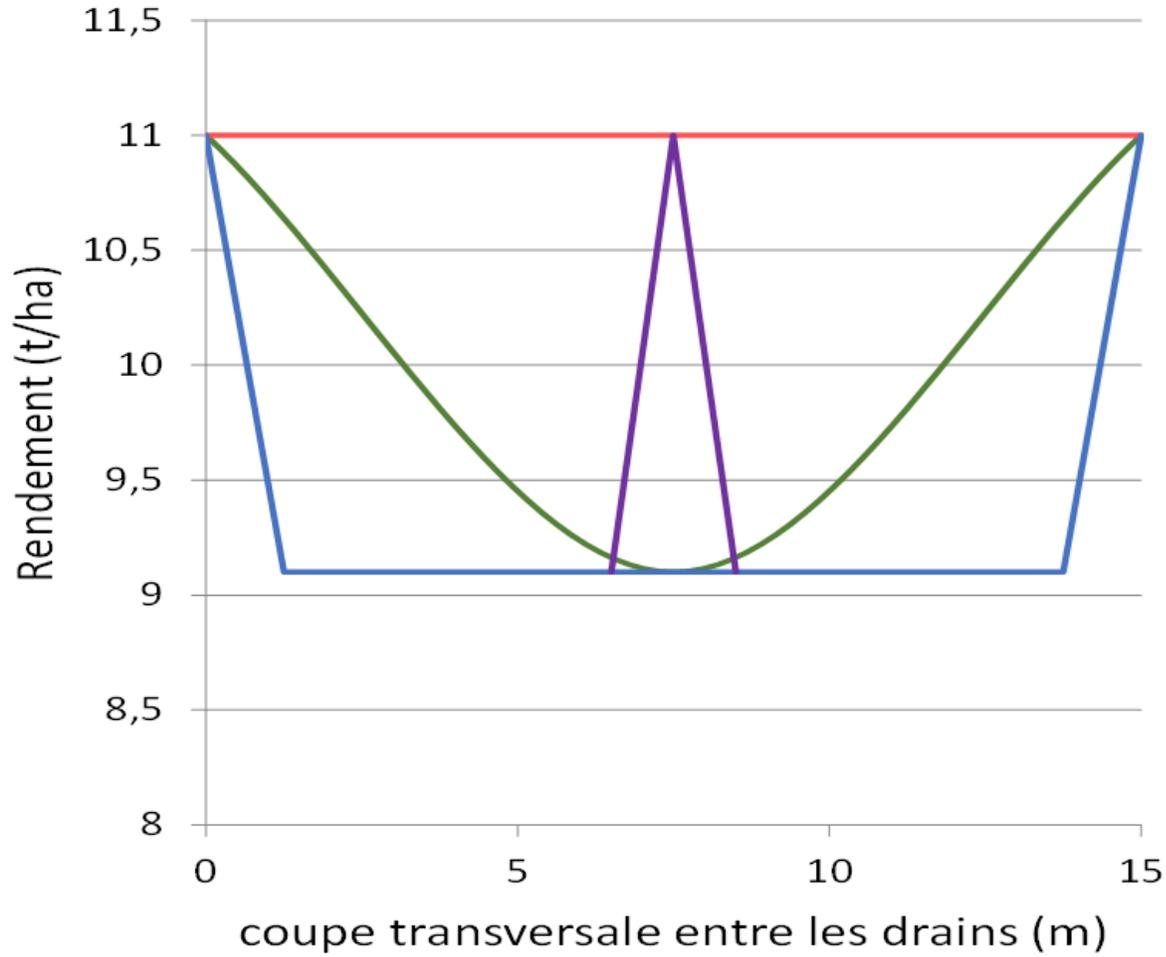
*, **, *** Significant at the 0.05, 0.01 and 0.001 probability levels, respectively.



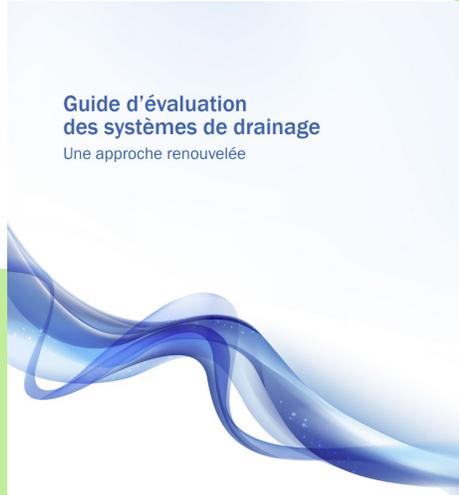
Rendement et réponse à l'azote par site



Distribution de la hauteur des plants de maïs en fonction de la présence de drains agricoles



- mauvais drainage 9,7t/ha
- aucun problème 11t/ha
- compaction 9,1 t/ha
- comp. avec drainage



Les 7 scénarios si le drainage est bien fait :

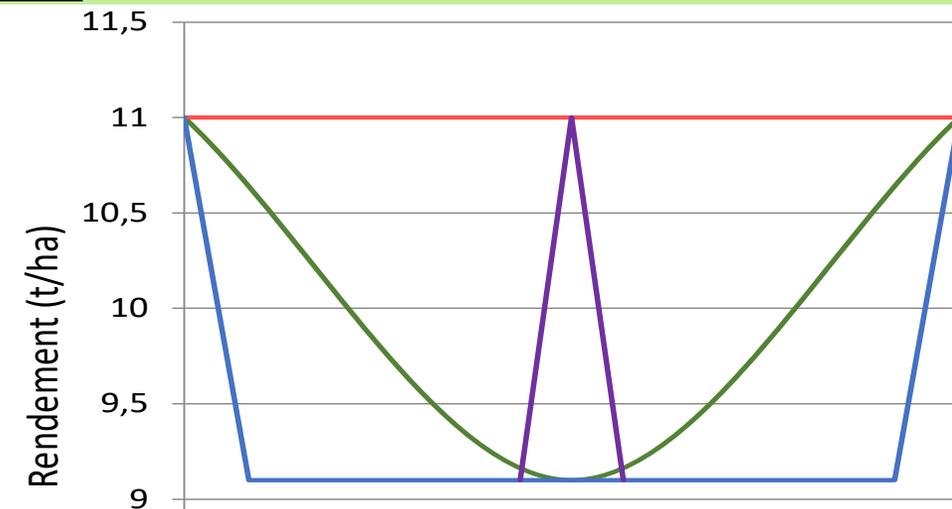
**la compaction est le facteur le plus limitant pour le rendement*

Problématique	Compaction (bleue)	Drainage et compaction (bleue)*	Drainage et compaction (bleue)	Drainage (verte)	Compaction (bleue)	Drainage et compaction (bleue)	Drainage (verte)
Action	Redrainage (mauve)	Redrainage (mauve)	Décompaction (verte)	Décompaction (verte)	Décompaction (rouge)	Décompaction et redrainage (rouge)	Redrainage (rouge)
Rendement départ (t/ha)	9.1	9.1	9.1	9.7	9.1	9.1	9.7
Rendement final (t/ha)	9.3	9.3	9.7	9.7	11.0	11.0	11.0
moy. gain de rendement (t/ha)		0,9**				1,7**	

***Sans diagnostic, il y a 7 possibilités d'actions: 4 mauvaise, 3 bonnes. $(0,2+0,2+0,6+0+1,9+1,9+1,3)/7$*

***Avec diagnostic, il y a 3 possibilités d'actions. $((1,9+1,9+1,3)/3)$*

91% de nos échantillons sont caractéristiques de sols compacts





1. **12.5 tonnes par ha en Montérégie: un objectif, possible?**
2. **3 tonnes et plus à la roue: le risque de compactage**
3. **6.5 tonnes d'azote de trop pour une ferme moyenne?**
4. **Une tonne d'argent en jeu!**
5. **10 tonnes de biomasse par hectare sans engrais?**
6. **100 \$ la tonne de CO₂ séquestrés**

Les sols évoluent et il y a une tonne d'argent en jeu: simulation dans le temps nécessaire

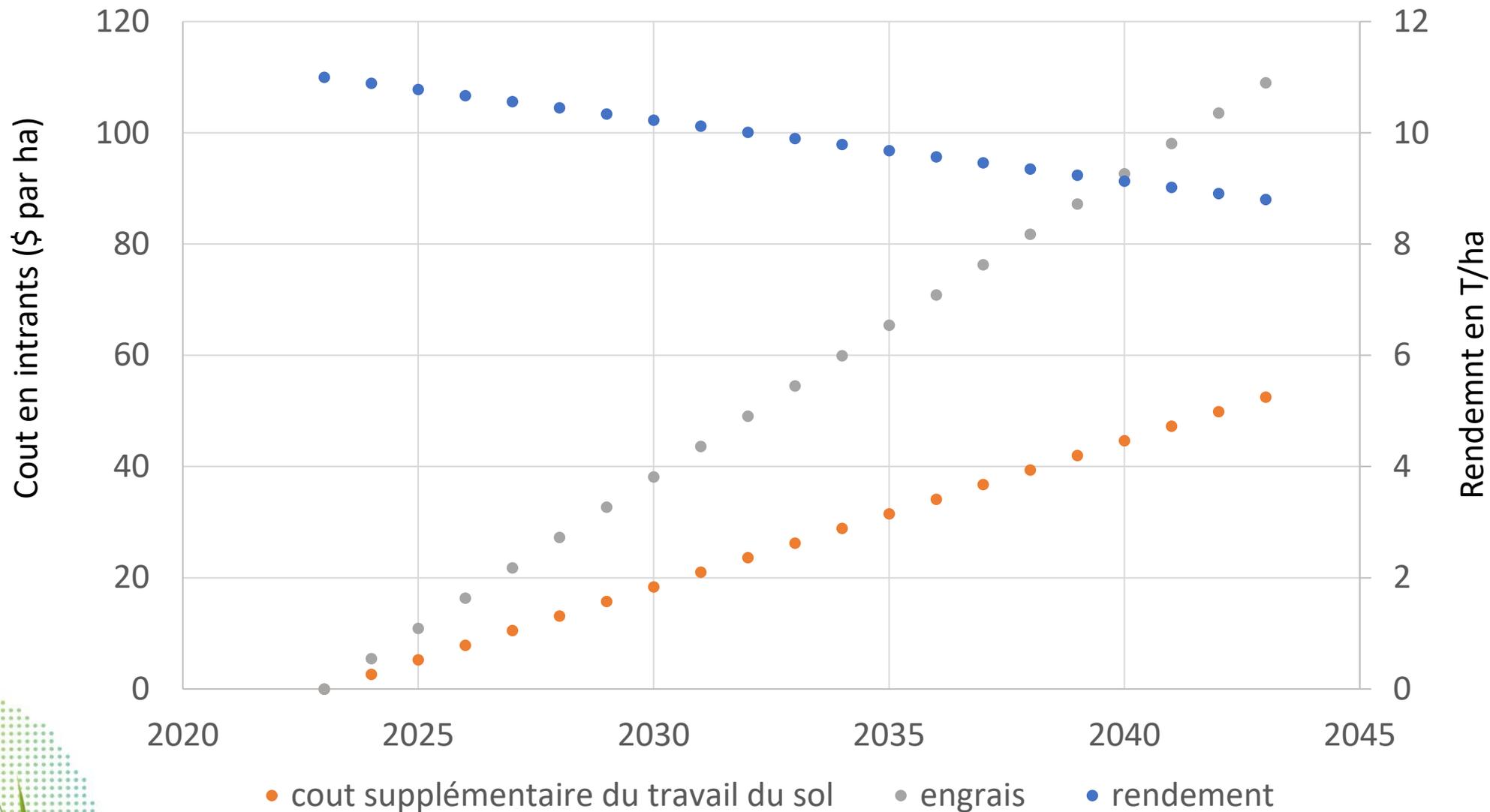
- Culture continue de maïs-grain avec 1.2% de dégradation par an
- 230\$ la tonne de maïs-grain en dollars constant
- 50 kg d'engrais de plus par an pour compenser la dénitrification en sols dégradés (UAN32)
- 3500\$ par ha pour redrainer
- 75L de plus par ha de diesel pour travailler un sol compact à 1.75\$ du L
- Coût de production à 208\$ la tonne constant peu importe le niveau de récolte
- 127 ha de surface en production de maïs-grain
- Ne tient pas compte du gain génétique (source: études techniques ou économiques de secteur- Maïs-grain au Québec-Résultats finaux-CECPA mai 2021)

La dégradation menace à long terme les profits par hectare et les profits totaux sur l'entreprise en production de grains (source: études techniques ou économiques de secteur- Maïs-grain au Québec- Résultats finaux-CECPA mai 2021)

Années en continue en Années	Profits nets/ ha en maïs grain					Total des revenus pour 127 ha en maïs grain		
	Rendement T/ha		+N +energie Dollars cdn \$	doublage de drain Dollars cdn \$			+N +energie Dollars cdn \$	doublage de drain Dollars cdn \$
0	12.5	587 \$	369 \$	401 \$		74 549 \$	46 874 \$	50 938 \$
4	11.9	449 \$	231 \$	263 \$		57 023 \$	29 348 \$	33 412 \$
5	11.75	415 \$	197 \$	229 \$		52 642 \$	24 967 \$	29 031 \$
11	10.85	208 \$	(10) \$	22 \$		26 353 \$	(1 322) \$	2 742 \$
16	10.1	35 \$	(183) \$	(151) \$		4 445 \$	(23 230) \$	(19 166) \$
17	9.95	1 \$	(217) \$	(185) \$		64 \$	(27 611) \$	(23 547) \$
25	8.75	(276) \$	(493) \$	(461) \$		(34 989) \$	(62 663) \$	(58 599) \$

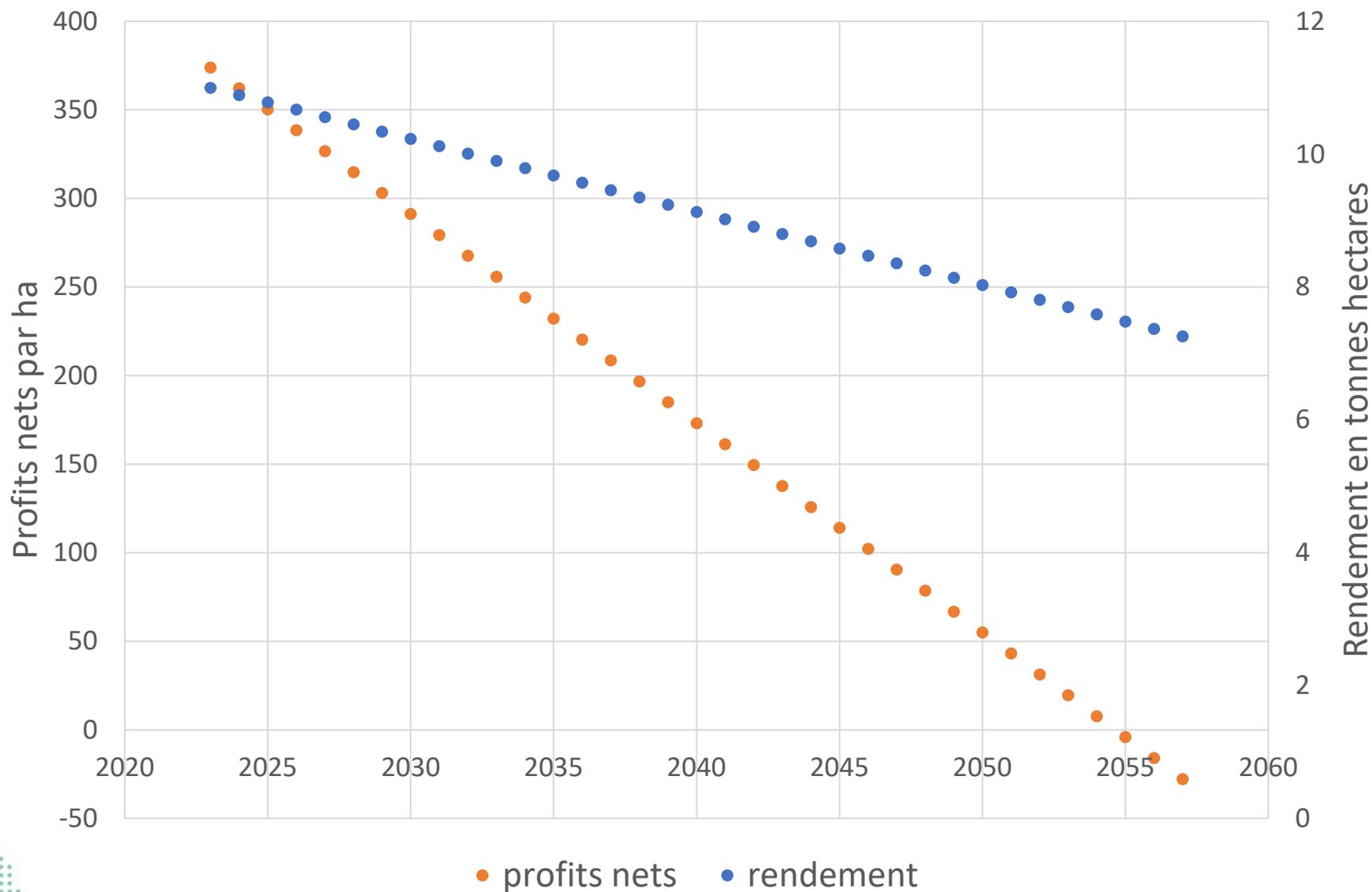


Une ferme avec le rendement de 11 t/ha à 340\$ la tonne et urée à 1000\$ la tonne





Un cas similaire en maïs grain: une ferme avec un rendement moyen initial de 11 t à l'hectare





1. 12.5 tonnes par ha en Montérégie: un objectif, possible?
2. 3 tonnes et plus à la roue: le risque de compactage
3. 6.5 tonnes d'azote de trop pour une ferme moyenne?
4. Une tonne d'argent en jeu!
5. 10 tonnes de biomasse par hectare sans engrais?
6. 100 \$ la tonne de CO₂ séquestrés

Retour à la terre

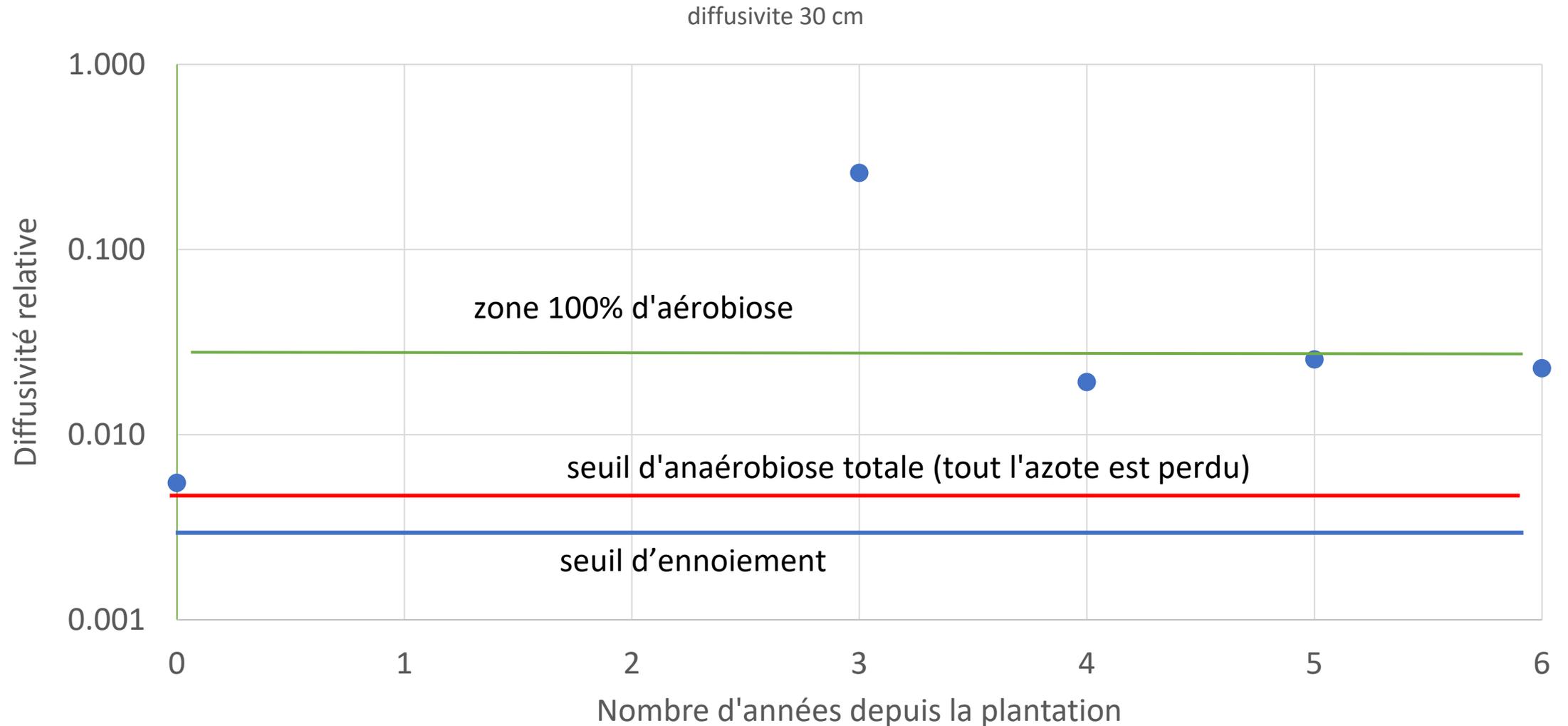
- Devrait-on revenir à une production de luzerne comme avant, restaurer des bosquets, planter des lignes d'arbres (agroforesterie) dans certaines sections du champ?
- Est-ce que ça peut restaurer les sols et améliorer le drainage?
- Est-ce que ça peut décompacter?



Les indicateurs sous fourrages sont intermédiaires ou optimaux! N.B. Aucune informations suffisantes à long terme pour d'autres scénarios (céréales d'hiver, intercalaires et engrais verts)

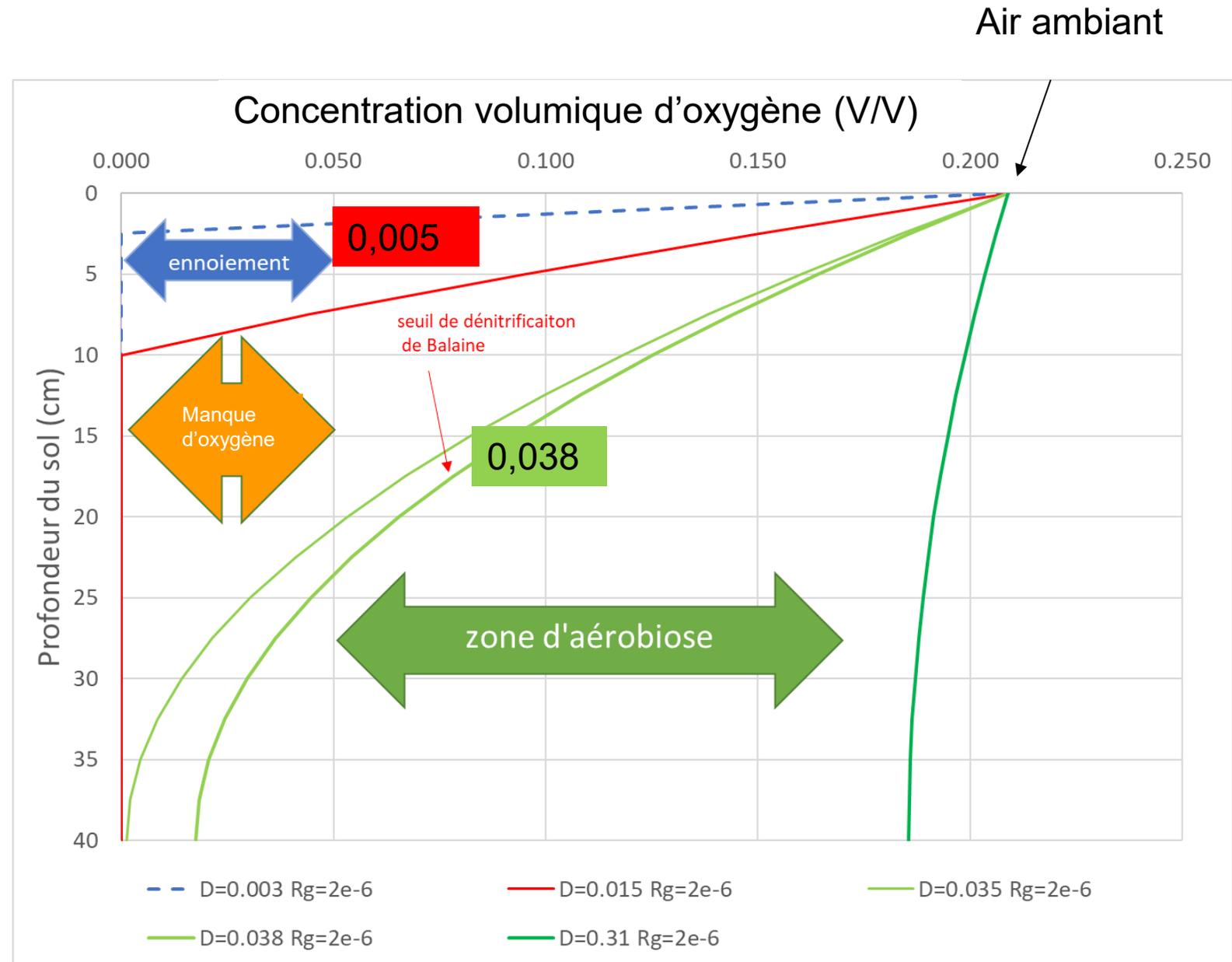
	Moyenne des rapports	Moyenne	Moyenne des rapports	Moyenne des rapports	Moyenne des log	Moyenne des rapports	Moyenne log	Moyenne log gas diffusivité	Moyenne des rapports	
Indicateurs	Masse volumique apparente	Porosité d'air		conductivité hydraulique saturée				diffusivité des gaz		
unités cultures	g cm ³	cm ³ cm ⁻³		cm s ⁻¹	cm s ⁻¹					
mais-grain	1.45	0.05		4.85E-04	-3.31		1.65E-04	-3.78		
fourrages	1.40	0.97	0.10	2.00	2.23E-03	-2.65	16.17	1.03E-03	-2.99	16.20
foret	1.33	0.88	0.25	4.91	1.85E-02	-1.73	30.08	6.54E-03	-2.18	32.97
Probabilité (dl)	0.011	0.003		0.009			0.009			

Rythme d'amélioration de la diffusivité des gaz en fonction du nombre d'années en production de saule



Pourquoi la diffusivité (D_s/D_o)? Pour prédire le risque de manque d'oxygène, lent à se manifester

Charte d'interprétation avec valeur de seuil ($D_s/D_o=0.035$).
A partir de cette valeur, les 40 premiers cms vont tomber en stress d'oxygène



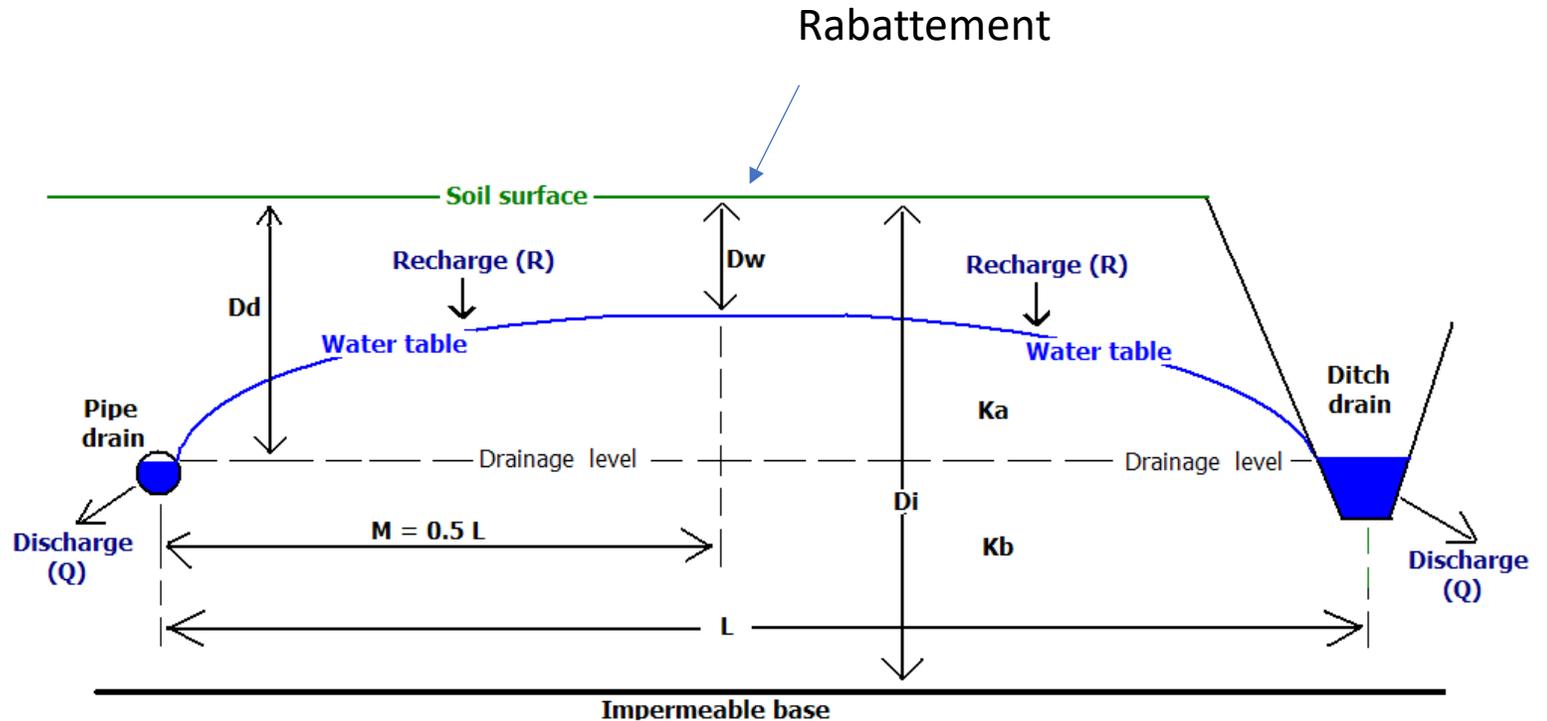
Solutions envisagées

- ✓ Rotations longues (2 ans annuelles): effets éphémères en sol organique
- ✓ Amendements de surface: dose trop faible et très immobilisant
- ✓ Drainage conventionnel: la moitié de l'effet perdu en trois ans
- ✓ Sous-solage: un seul essai non concluant
- ✓ Tranchées drainantes: trop cher et effet sur 25 % des sites seulement
- Haies de saule: le seul qui est montré de véritables améliorations actives plusieurs années (2-6 ans) après la destruction de la haie de saules après deux à quatre ans d'implantation



Deux critères de comparaisons

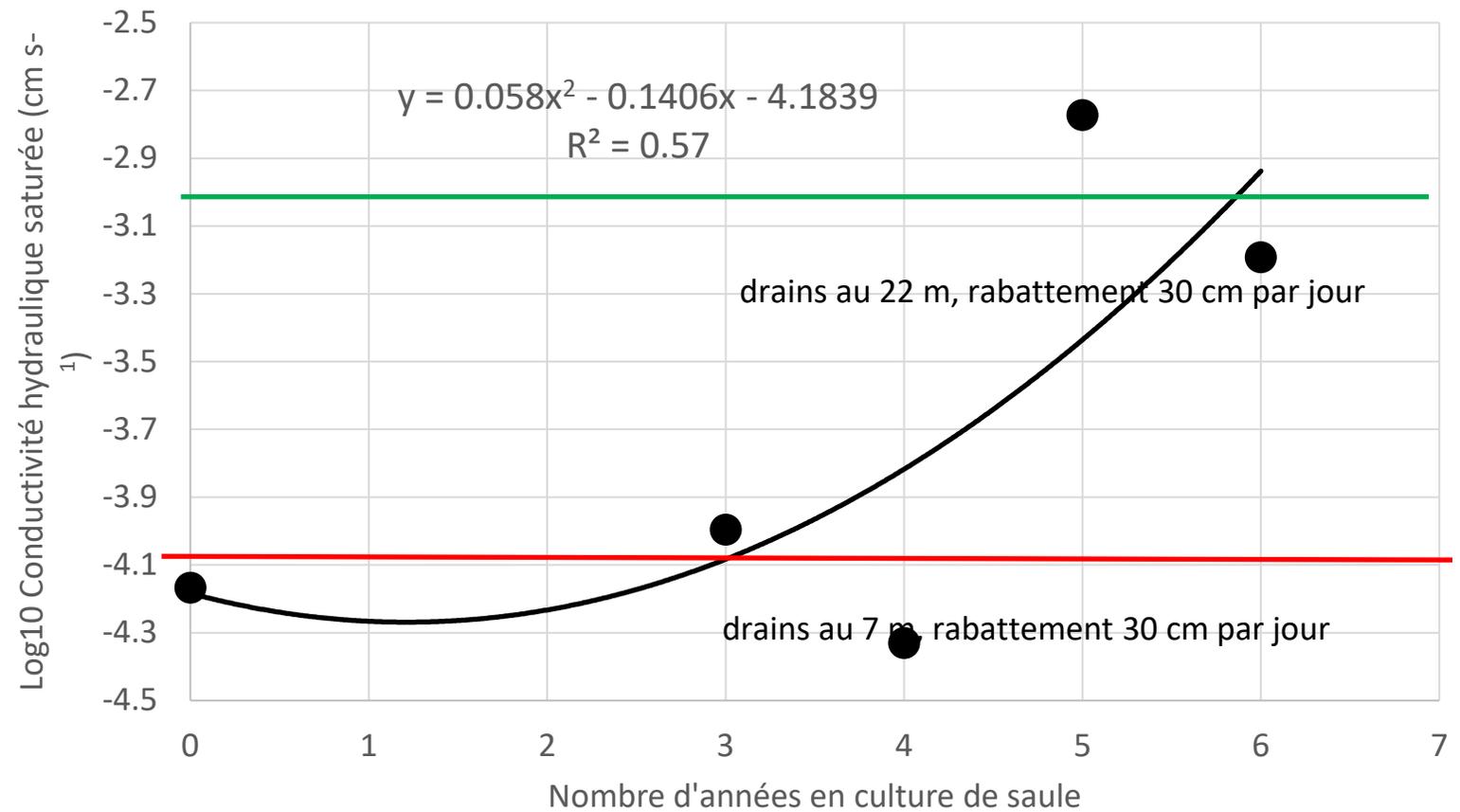
- Le rabattement de la nappe
- La conductivité hydraulique saturée (K_{sat} ou K_a)



Geometry subsurface drainage system by pipes or ditches

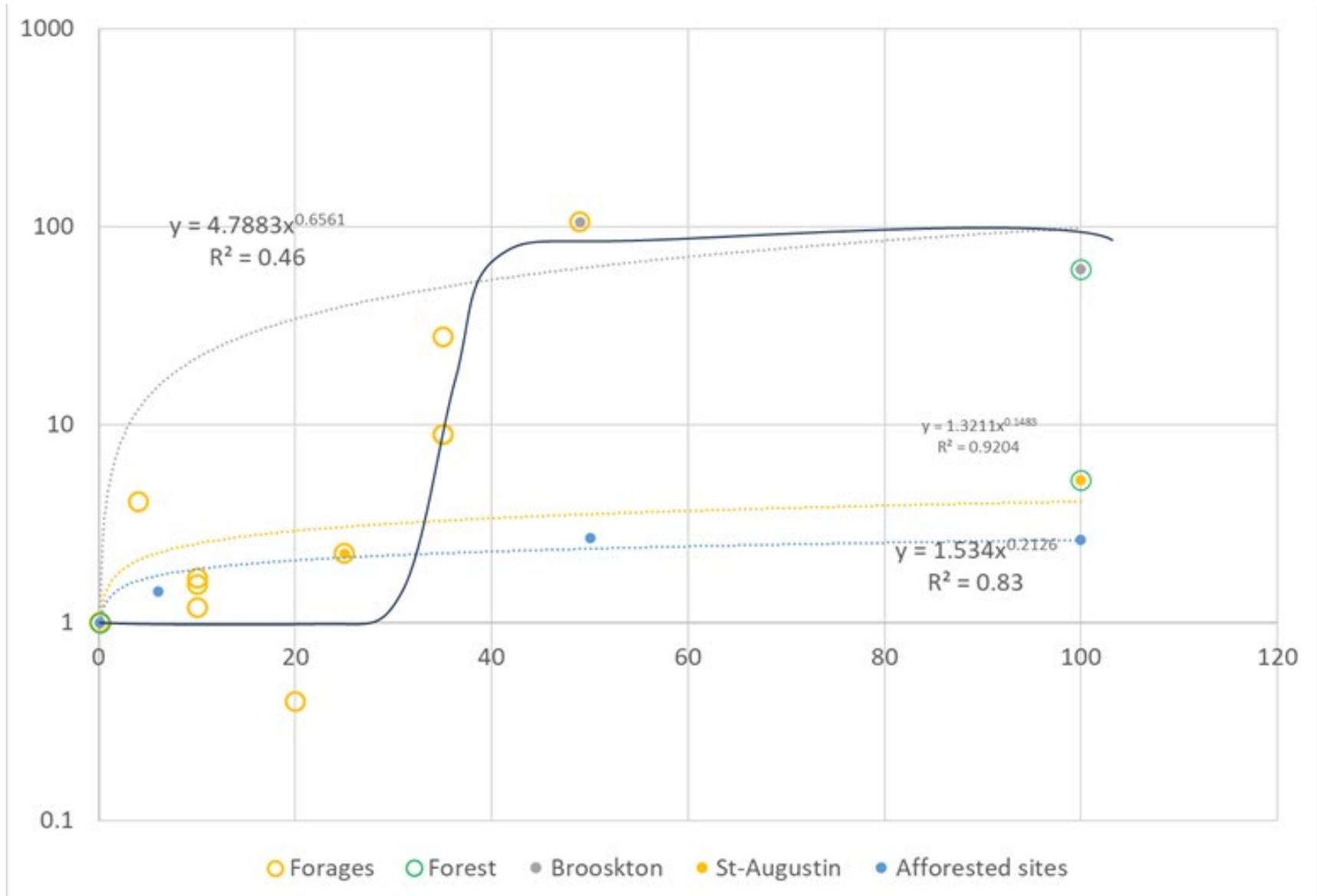
D = depth K = hydraulic conductivity L = Drain spacing

By R.J.Oosterbaan at English Wikipedia - Transferred from en.wikipedia to Commons., Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8962969>



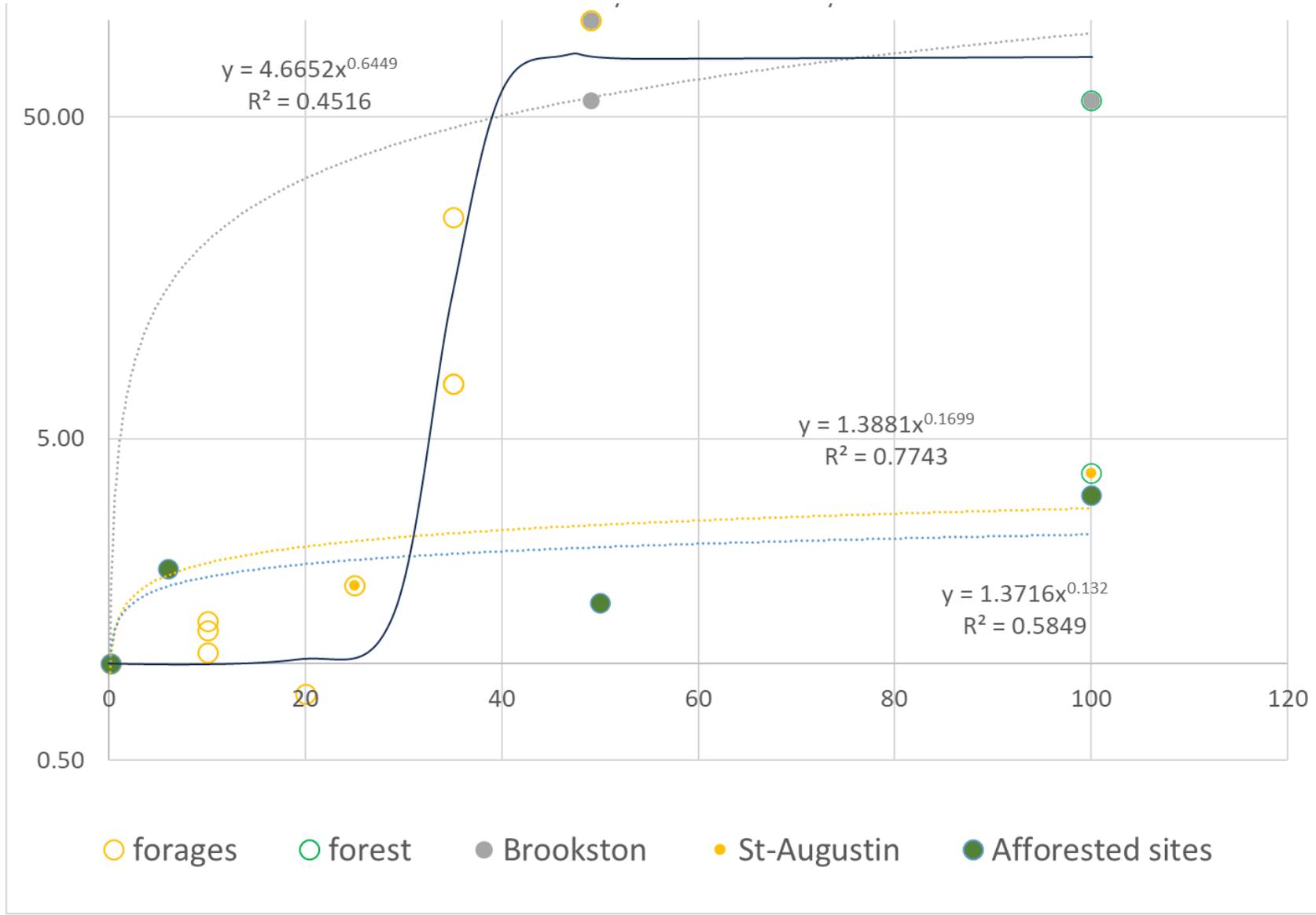
Evolution du ratio de la diffusivité (traitement sur témoin) en fonction du temps et du type de culture (Caron et coll, 2024)

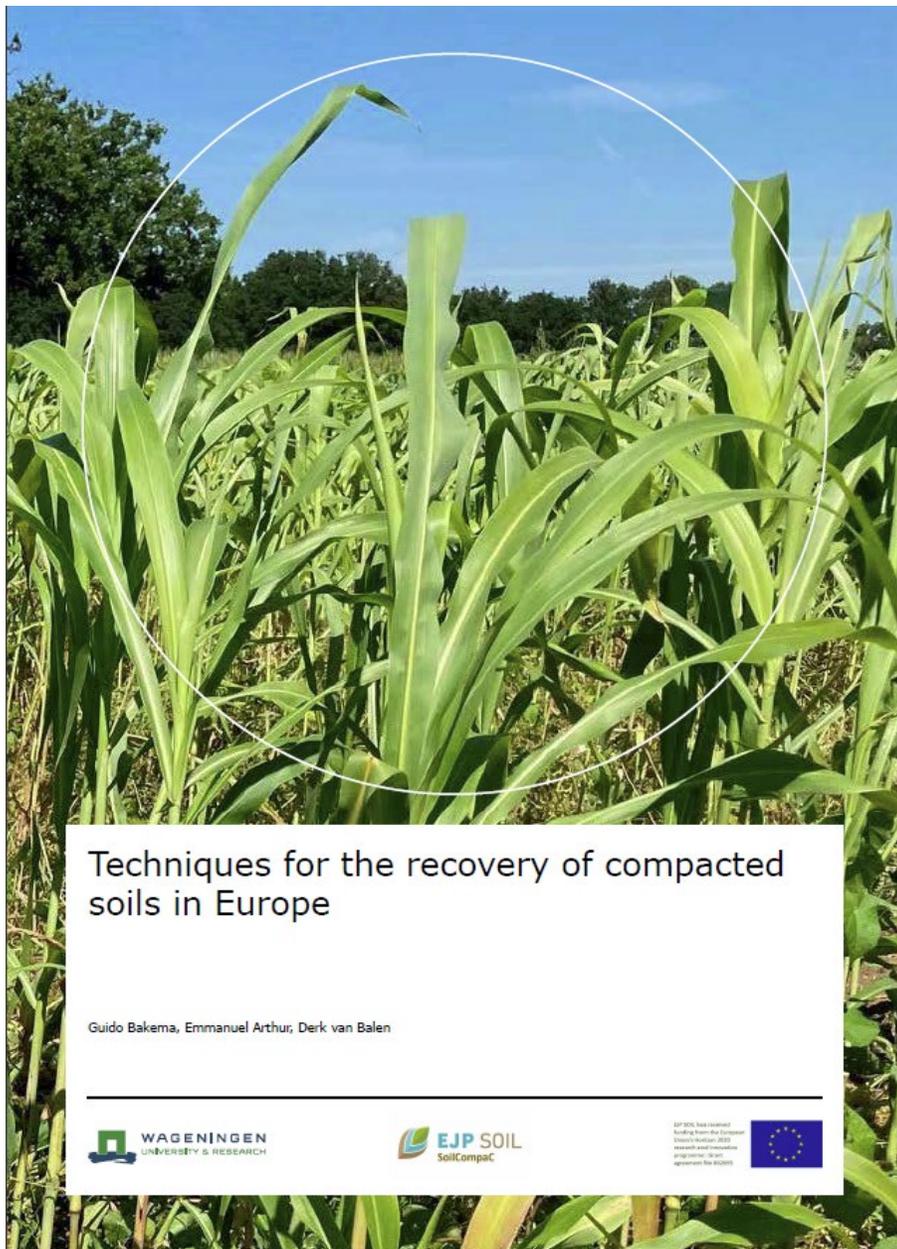
↑
amélioration



Evolution du ratio de conductivité hydraulique (traitement sur témoin) en fonction du temps et du type de culture (Caron et coll, 2024)

↑
amélioration





How to measure recovery rate and soil compaction?

Most studies emphasize measuring soil mechanical parameters to determine recovery rate. Dry bulk density and penetration resistance are the most commonly measured parameters in this regard. However, it is known that these parameters are strongly influenced by the prevailing moisture conditions and the tillage activities performed. It might be better to also look at the conditions that influence root growth and thus directly affect crop yield. This means paying more attention to the influence a compacted layer has on air and water flow and retention. By reasoning more from the conditions of the plant and less from the soil mechanics perspective, a more precise picture of the degree of soil compaction and the effectiveness of a recovery technique can be obtained. Understanding this process properly requires more research that

Comment faire le suivi de la compaction?

... mettre moins d'accent sur la résistance mécanique du sol (masse volumique apparente et résistance à l'enfoncement) et plus sur le stockage et les échanges d'eau et d'air (eau disponible, porosité d'air, diffusion des gaz et conductivité hydraulique saturée)

Which recovery technique is preferred?

In the past, the choice was often made to mechanically crack of the compacted soil. This resulted in short-term improvement but often recompaction occurred several years later. The main disadvantage of mechanical methods is that often the complete soil structure is disturbed, which strongly reduces the mechanical strength and moisture delivery capacity. The mechanical method is useful for certain soils if executed with the right equipment and under not-too-wet conditions. However, its loosening effect will only be preserved if afterwards traffic loads are strongly reduced and cover crops with high belowground biomass are used.

However, to prevent disruption of natural structures and fast recompaction, it is better to choose more natural recovery methods. For especially some of the heavier soils, dehydration and freezing can restore the soil structure but the effect on the subsoil (> 25 cm bs.) seems generally limited. The most promising is the use of deep-rooting plants: biosubsoilers. This is because they have an effect right down to the subsoil and also have a limited negative influence on the topsoil.

Quelle est la technique à privilégier pour éliminer la compaction?

...Dans le passé, on a préféré les méthodes mécaniques mais on recommande maintenant l'utilisation de systèmes racinaires profonds qui atteignent rapidement les horizons profonds...



10 tonnes de biomasse par hectare sans engrais?

- Rotations longues nécessaires dans certains cas: prairies sur plusieurs années, ou systèmes à forts retours de matières organiques et à enracinement profond. Peu de données de long termes disponibles.
- Parfois des rotations de luzerne sur deux ans suffiront. Pas suffisamment de résultats pour des scénarios d'intercalaires ou de l'effet d'une troisième culture
- Parfois des haies de saules, des brise-vent, d'autres systèmes agro forestiers pourront être une solution
- **Les engrais verts sont insuffisants** d'un point de vue de la santé physique du sol et surtout du compactage profond, **clairement....**

Où suis-je? Où vais-je? 1 tonne d'argent en jeu!

Années en continue en Années	Profits nets/ ha en mais grain						Total des revenus pour 127 ha en mais grain				
	Rendement T/ha	+N +energie Dollars cdn \$	doublage de drain Dollars cdn \$	2 ans de luzerne Dollars cdn \$	2 ans de luzerne + haies Dollars cdn \$		pour 127 ha en mais grain		pour 63.5 ha/63.5 ha en mais grain/luzerne		
							+N +energie Dollars cdn \$	doublage de drain Dollars cdn \$	2 ans de luzerne Dollars cdn \$	2 ans de luzerne + haies Dollars cdn \$	
0	12.5	587 \$	369 \$	401 \$	525 \$	371 \$	74 549 \$	46 874 \$	50 938 \$	33 306 \$	23 566 \$
4	11.9	449 \$	231 \$	263 \$	525 \$	371 \$	57 023 \$	29 348 \$	33 412 \$	33 306 \$	23 566 \$
5	11.75	415 \$	197 \$	229 \$	525 \$	371 \$	52 642 \$	24 967 \$	29 031 \$	33 306 \$	23 566 \$
11	10.85	208 \$	(10) \$	22 \$	525 \$	371 \$	26 353 \$	(1 322) \$	2 742 \$	33 306 \$	23 566 \$
16	10.1	35 \$	(183) \$	(151) \$	525 \$	371 \$	4 445 \$	(23 230) \$	(19 166) \$	33 306 \$	23 566 \$
17	9.95	1 \$	(217) \$	(185) \$	525 \$	371 \$	64 \$	(27 611) \$	(23 547) \$	33 306 \$	23 566 \$
25	8.75	(276) \$	(493) \$	(461) \$	525 \$	371 \$	(34 989) \$	(62 663) \$	(58 599) \$	33 306 \$	23 566 \$

Le rendement reste à 12.5 T/ha avec rotations

On ne gère pas ce qu'on ne mesure pas! Lord Kelvin



Combien êtes-vous prêts à payer pour un service-conseil sur la santé physique du sol (visuelle, compaction, drainage, aération et rétention d'eau) ?

Choix de réponses:

- a) 0 \$, je le fais moi-même
- b) 10-15 \$/acre (25-38 \$/ha), une fois aux trois ans
- c) 40-60 \$/acre (100-150 \$/ha), une fois aux 10 ans
- d) 100-150 \$/acre (250-370 \$/ha) lors du drainage donc pour 20 ans
- e) 100-150 \$/acre (250-370 \$/ha), une fois au 5 ans

Plan de drainage (250-370\$/ha)+caractérisation: 250\$/ha

Drainage 3500-5000 \$/ha

Spatialisation des interventions génèrent des économies d'environ 30-50%

Bénéficiez de services-conseils diversifiés!



Domaines d'intervention	Thématiques d'intervention	Taux d'aide financière ¹	Aide financière maximale par entreprise par domaine d'intervention pour la durée du programme	Enveloppe budgétaire maximale par entreprise pour la durée du programme	
				Entreprise agricole ou agroalimentaire	Entreprise de la relève ou détenant une certification biologique ou une précertification biologique
Agroenvironnement	Diagnostiques y compris le Plan d'accompagnement environnemental	75 %	19 000 \$	30 000 \$	40 000 \$
	Suivis en agroenvironnement				
Technique	Pratiques culturales	50 %	17 000 \$		
	Pratiques d'élevage				
	Transformation et commercialisation				
Gestion	Diagnostiques	50 %	20 000 \$		
	Analyse financière et technico-économique				
	Plans d'action				
	Plans de transfert et de démarrage				
	Suivis en gestion				
	Organisation de données				
Gestion des ressources humaines					

¹ Les pourcentages et les sommes maximales de l'aide financière pourraient être majorés selon des priorités régionales déterminées par chaque réseau Agriconseils ou en fonction d'initiatives stratégiques mises en œuvre.

Où suis-je? 1. Le plan d'accompagnement agroenvironnemental peut vous aider!

Années en continue en Années	Profits nets/ ha en maïs grain						Total des revenus pour 127 ha en maïs grain				
	Rendement T/ha	+N +energie Dollars cdn \$	doublage de drain Dollars cdn \$	2 ans de luzerne Dollars cdn \$	2 ans de luzerne + haies Dollars cdn \$		pour 127 ha en maïs grain		pour 63.5 ha/63.5 ha en maïs grain/luzerne		
							+N +energie Dollars cdn \$	doublage de drain Dollars cdn \$	2 ans de luzerne Dollars cdn \$	2 ans de luzerne + haies Dollars cdn \$	
0	12.5	587 \$	369 \$	401 \$	525 \$	371 \$	74 549 \$	46 874 \$	50 938 \$	33 306 \$	23 566 \$
4	11.9	449 \$	231 \$	263 \$	525 \$	371 \$	57 023 \$	29 348 \$	33 412 \$	33 306 \$	23 566 \$
5	11.75	415 \$	197 \$	229 \$	525 \$	371 \$	52 642 \$	24 967 \$	29 031 \$	33 306 \$	23 566 \$
11	10.85	208 \$	(10) \$	22 \$	525 \$	371 \$	26 353 \$	(1 322) \$	2 742 \$	33 306 \$	23 566 \$
16	10.1	35 \$	(183) \$	(151) \$	525 \$	371 \$	4 445 \$	(23 230) \$	(19 166) \$	33 306 \$	23 566 \$
17	9.95	1 \$	(217) \$	(185) \$	525 \$	371 \$	64 \$	(27 611) \$	(23 547) \$	33 306 \$	23 566 \$
25	8.75	(276) \$	(493) \$	(461) \$	525 \$	371 \$	(34 989) \$	(62 663) \$	(58 599) \$	33 306 \$	23 566 \$

2. Rétribuer les services écosystémiques avec des mesures réelles d'efficacité (% de carbone, utilisation d'azote, etc.)

3. Réfléchir à un accompagnement financier pour amorcer la transition (le temps de retrouver la santé de sol optimale)



1. 12.5 tonnes par ha en Montérégie: un objectif, possible?
2. 3 tonnes et plus à la roue: le risque de compactage
3. 6.5 tonnes d'azote de trop pour une ferme moyenne?
4. Une tonne d'argent en jeu!
5. 10 tonnes de biomasse par hectare sans engrais?
6. 100 \$ la tonne de CO₂ séquestrés

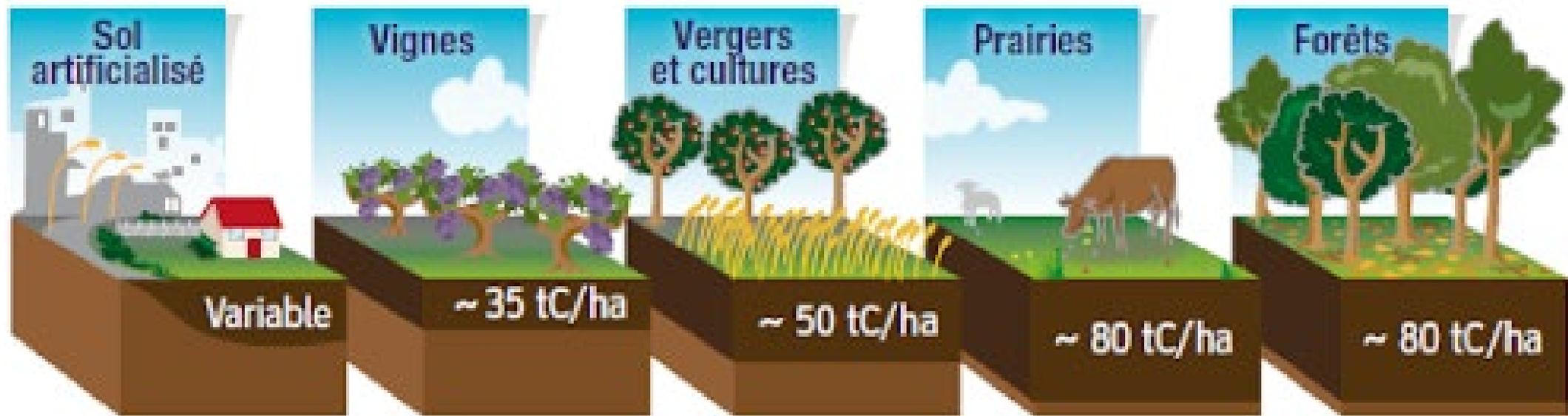
Initiative 4 pour 1000

L'initiative internationale « **4 pour 1000** » a été lancée par la France le 1er décembre 2015 lors de la COP 21. Elle se veut fédératrice de tous les acteurs volontaires du public et du privé dans le cadre du Plan d'action Lima-Paris. Son objectif est de mettre en place des **actions concrètes** en faveur du stockage du carbone dans les sols ainsi que de **partager les pratiques spécifiques** pour y parvenir.

Elle a été appelée ainsi car un **taux de croissance annuel de 0,4% des stocks de carbone du sol (4‰ par an), dans les premiers 30 à 40 cm de sol**, pourrait permettre de réduire significativement la concentration de CO₂ liée aux activités humaines dans notre atmosphère, et notamment les émissions issues des énergies fossiles utilisées en agriculture.



Elle dispose d'un énorme soutien de la part de : 42 pays et régions, 12 organisations internationales, 14 fondations et banques de développement, 110 ONG, 80 instituts de recherche et d'enseignement, 40 organisations d'agriculteurs et 61 entreprises privées.



www

source GIS sol

G. Cartagnon

CHAPITRE 2

Pratiques agricoles : santé et conservation des sols

Application de la *Loi sur le développement durable* : 2023

Audit de performance

Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation
La Financière agricole du Québec

Recommandations au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation

- 1 Acquérir les connaissances nécessaires quant à l'état de santé des sols et son évolution ainsi qu'aux pratiques agricoles qui ont cours, pour être en mesure de mieux identifier les enjeux, établir les priorités et soutenir ses décisions.
- 2 Orienter de manière plus efficace les producteurs agricoles pour les amener à adopter plus rapidement des pratiques agricoles durables favorisant la santé et la conservation des sols.
- 3 S'assurer que les mesures mises en place pour accélérer l'adoption de pratiques agricoles durables favorisant la santé et la conservation des sols sont efficaces, et qu'il fait un suivi suffisant de ces mesures.

Recommandation à La Financière agricole du Québec

- 4 Inclure dans ses programmes de soutien financier des conditions suffisantes pour accélérer l'adoption de pratiques agricoles durables favorisant la santé et la conservation des sols.



JUIN 2024

TERRAIN CRITIQUE :

Pourquoi le sol est essentiel à la santé économique, environnementale, humaine, et sociale du Canada

Rapport du Comité sénatorial permanent
de l'agriculture et des forêts

L'honorable Robert Black, président
L'honorable Paula Simons, vice-présidente

Les témoins de notre étude des sols ont exhorté le gouvernement du Canada à :

- reconnaître les différences régionales liées aux climats, aux types de sol et aux pratiques de gestion bénéfiques;
- appliquer une optique économique et sociale aux politiques et aux programmes;
- mieux reconnaître et récompenser les pionniers pour leurs pratiques durables;
- encourager l'innovation scientifique et technique;
- améliorer la collecte de données sur les sols, la gestion des données sur les sols et le transfert des connaissances sur les sols dans tout le pays

L'amélioration, la protection et la préservation des sols, aujourd'hui et pour l'avenir, doivent être une priorité du gouvernement du Canada et de tous les Canadiens et doivent être intégrées dans les politiques d'aménagement du territoire.

Notre agriculture à la dérive: un livre de 3 administrateurs de L'Institut Jean-Garon chez Léméac

13A — 3 OCTOBRE 2024 • 0 COMMENTAIRE

[Tweeter sur Twitter](#) [Partager sur Facebook](#) [Partager sur Pinterest](#)



- ...Données claires et rarement publiées à l'appui, les trois auteurs décortiquent la crise que traverse actuellement notre agriculture en nommant les dysfonctionnements de ces politiques désuètes,... et en proposant des solutions qui nous permettraient de diversifier notre agriculture tout en mettant en valeur le potentiel agricole de chaque région...



Report to Congress:

A General Assessment of the Role of Agriculture and Forestry in U.S. Carbon Markets

Written in support of the Greenhouse Gas Technical Assistance Provider and Third-Party Verifier Program

October 2023

- ...L'agriculture et surtout la foresterie ont un rôle majeur à jouer dans les services écosystémiques
- Les crédits de carbone réels en agriculture sont variables et demandent à être quantifiés.
- Ils sont en partie reliés à une meilleure productivité..

10 tonnes de biomasse par hectare sans engrais?

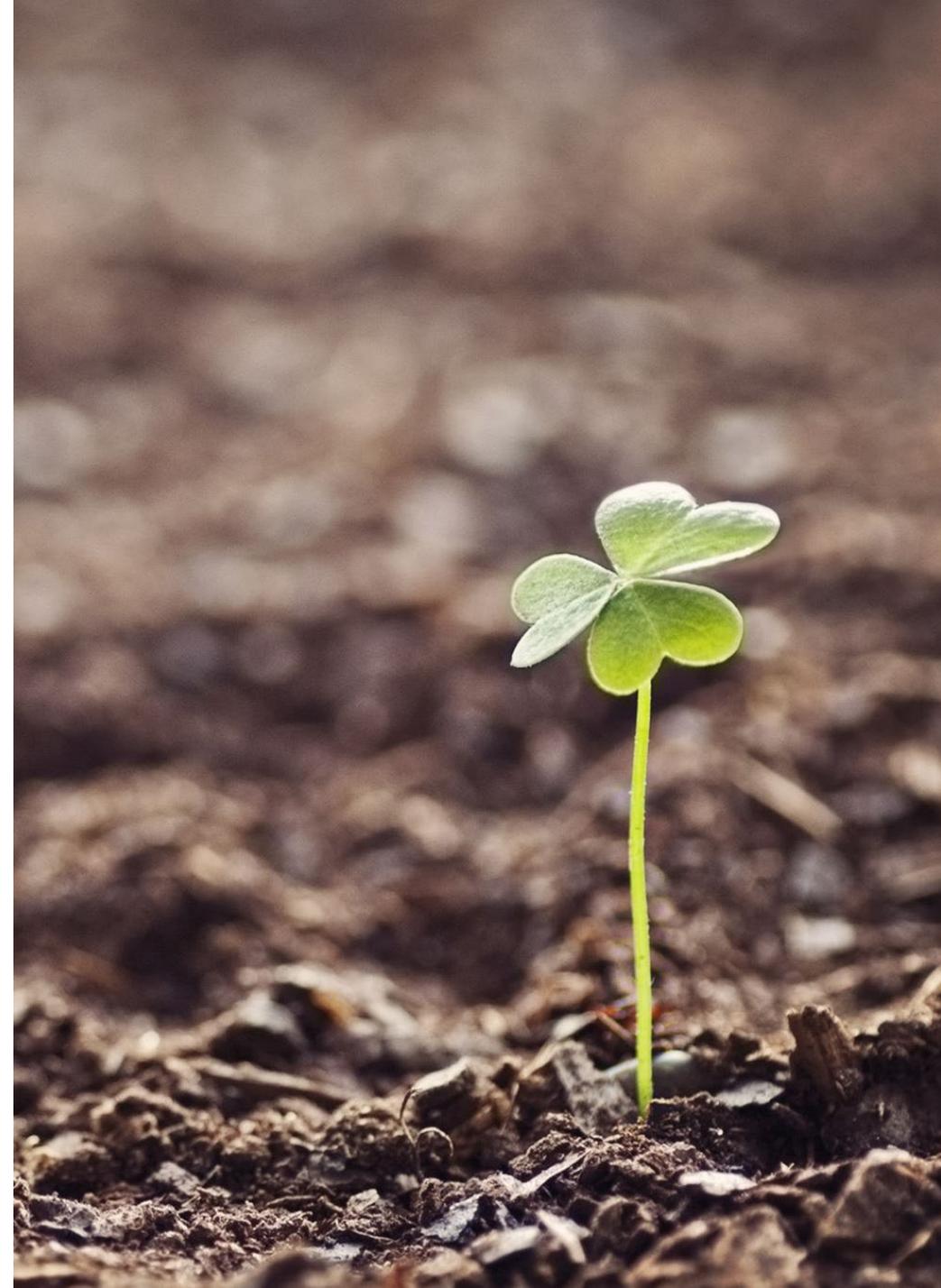
100 \$ la tonne de CO₂ séquestrés?

Quelle est cette troisième culture?

- Les résultats sont très clairs en ce qui concerne la santé physique des sols: les rotations de long terme sont nécessaires, parfois insuffisantes
- La rémunération viendra des économies réalisées, de l'arrière-effet azoté et de la productivité maintenue.
- La rémunération de demain va venir des services écosystémiques réels rendus, donc mesurés, ce qui se met déjà en place dans plusieurs pays
- Le modèle de production classique de rotation maïs soya ou maïs soya blé est à revoir et **est une voie sans issue à long terme**, même avec une augmentation attendue des surfaces en culture et ce à cause de la dégradation des sols
- **Des expériences et des essais supplémentaires** sont nécessaires pour évaluer correctement les impacts financiers, agronomiques et écosystémiques de cultures alternatives d'une transition nécessaire, de systèmes de culture intercalaires, de céréales grainées ou de céréales d'automne pour vérifier si la dégradation est aussi marquée mais les données ne sont malheureusement pas disponibles et demandent des scénarios implantés sur des durées minimales de 10 à 20 ans pour qu'on y voit des essais. Efforts supplémentaires à prévoir dans cette direction.

RECOMMANDATIONS ASSOCIÉES SUR LA SANTÉ PHYSIQUE DES SOLS: PRIORITÉS D'ACTION, PAR ORDRE D'IMPORTANCE

- Agir maintenant
- Reconnaître le coût inhérent de la dégradation des sols et le besoin de l'inclure dans la planification
- Faire caractériser ses sols et son environnement de production **pour faire de l'intervention localisée pour la conservation des sols et l'utilisation optimale de l'eau**
- Revoir les séquences de rotations longues et la pertinence des systèmes agroforestiers pour sortir de la spirale de dégradation
- Explorer les systèmes agroforestiers et des pratiques alternatives au scénario maïs soya
- Revoir le poids et les patrons de circulation des équipements de récolte et d'épandage.



Important de diagnostiquer. Quels indices en sols minéraux et quelles valeurs seuils de comparaison?

caractéristiques	paramètres	unité	Valeur seuil minimale	Valeur optimale	Valeur excessive
aération	Porosité d'air	$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$	0,10	0,25	
aération	Diffusivité des gaz	$\text{m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}$	0,005	0,035	
Localisation de couches compactes	Masse volumique apparente	g cm^{-3}	0,90	1,1	1,5 (sols argileux)
drainage	Conductivité hydraulique saturée	cm s^{-1}	0,0011 (ou 1 m par jour)		0,010

Caractérisation sur le terrain: échantillonnage à différentes profondeurs (mva, teneur en eau et en air, courbe de rétention)



- on creuse
- on recueille un cylindre
- on pèse humide
- on pèse sec (24 h 105°C)
- on met en marmite, sur table ou en cellule
- on repese périodiquement après équilibre
- on calcule
- on interprète

Caractérisation sur le terrain: conductivité saturée



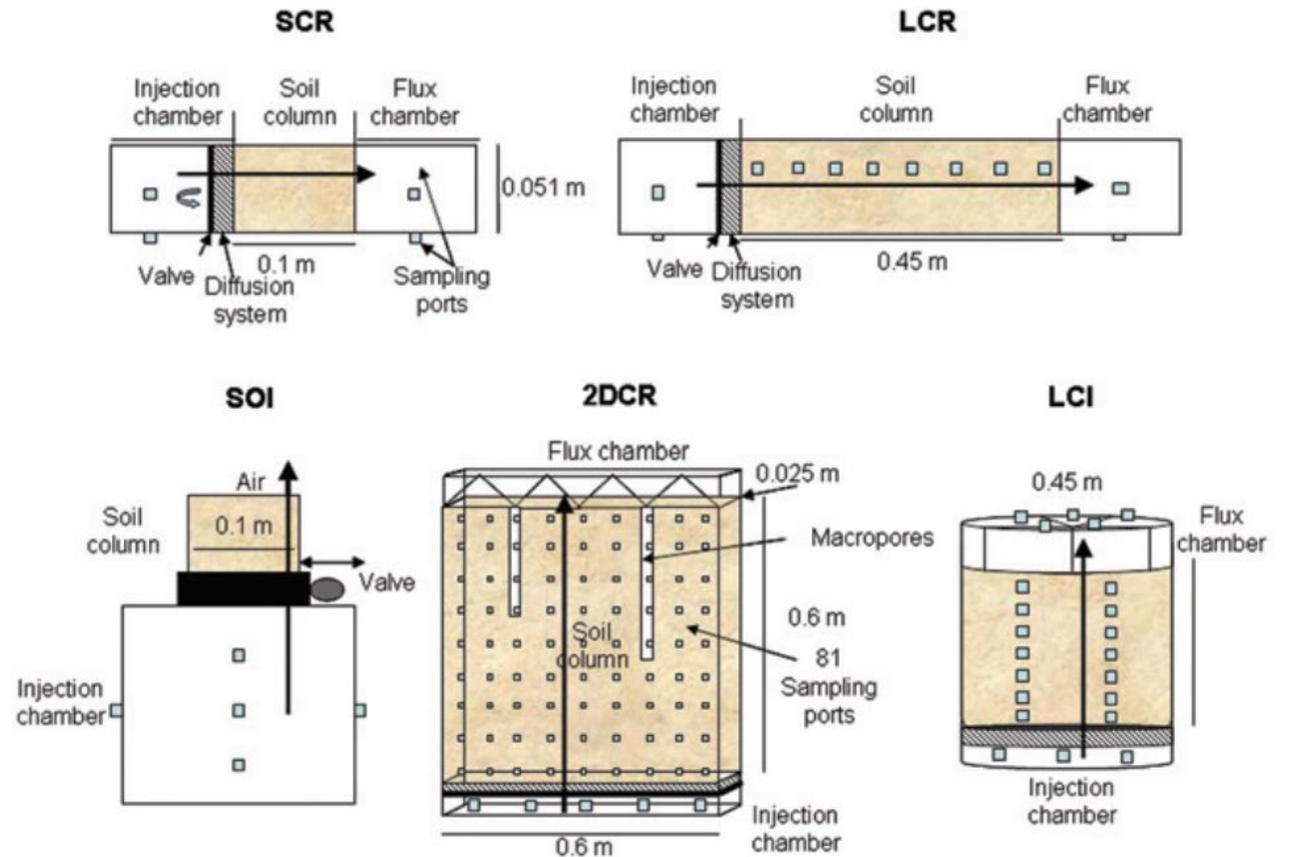
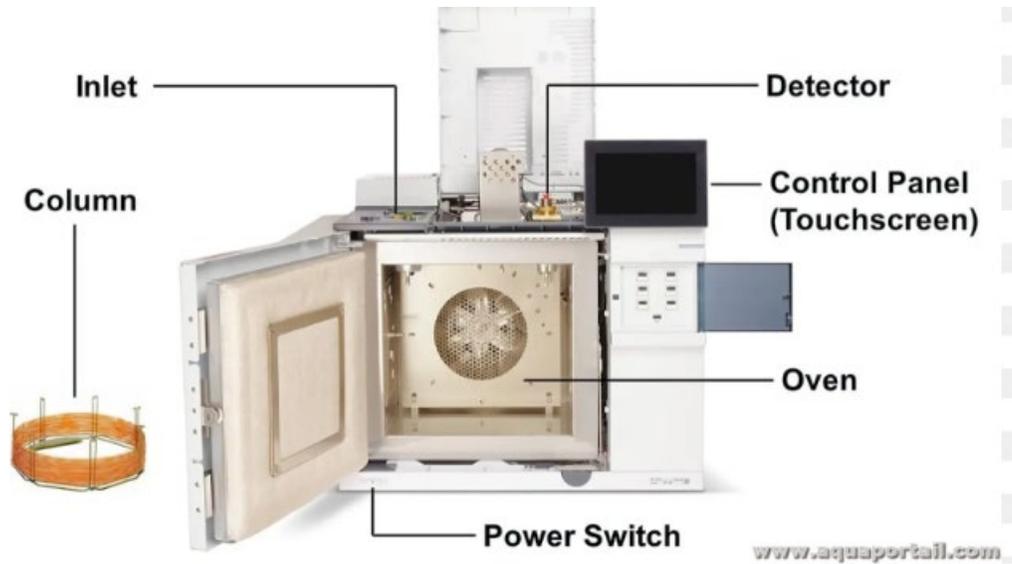
- On dégage une zone et une profondeur (15, 30, 50) ou on fore un trou (15, 30, 50, 80)
- On prélève un cylindre ou on mesure directement dans le trou
- On calcule
- On interprète ($0,001 \text{ cm s}^{-1}$)
- Méthode in situ (perméamètre de Guelph, infiltromètre de Côté)



Diffusivité des gaz et taux respiratoire

- Laboratoire: Allaire, S. E., Lafond, J. A., Cabral, A. R., & Lange, S. F. (2008). Measurement of gas diffusion through soils: comparison of laboratory methods. *Journal of Environmental Monitoring*, 10(11), 1326-1336.
- Champ:
 - flux (chambre à gaz), concentration et diffusivité (mesure qui demande plusieurs heures voire même plusieurs jours en régime permanent (van Bochove et coll, 1998, plusieurs mesures de caractérisation disponible (Rolston, D.E., Moldrup, P., 2002. Gas diffusivity. In *Methods of Soil Analysis*. pp. 1113–1139.
 - Méthodes transitoires rapides Virgile (2 heures) (réduisent les risques de fuite)

Les laboratoires peuvent le faire



Exemple de différents dispositifs de montage en laboratoire pour caractériser la diffusivité des gaz (à droite) précédé à gauche du chromatographe gazeux.

Source : Allaire, S. E., Lafond, J. A., Cabral, A. R., & Lange, S. F. (2008). Measurement of gas diffusion through soils: comparison of laboratory methods. *Journal of Environmental Monitoring*, 10(11), 1326-1336.

Systèmes mobiles existent aussi





Important de mesurer les bons paramètres!

- Sessions de formation qui existent (réseau québécois de recherche en agriculture durable (RQRAD), formation continue à l'université Laval, ...)
- Les technologies et les protocoles pour le faire existent aussi
- Laboratoires qui font des analyses des cylindres recueillis (IQDHO)
- Prisme évalue en ce moment la possibilité d'offrir un service aux producteurs de sols organiques(?)
- Vos clubs conseils?
- Firmes de génie conseils?
- Compagnies privées en drainage et des grosses entreprises qui ont des technologies adaptées pour faire ce genre de caractérisation
- Formation, instrumentation et conseil spécialisé (www.edaphis.com) en soutien 2^e ligne

Des tonnes de raisons et de façons d'agir

1. 12.5 tonnes par ha en Montérégie: possible et souhaitable
2. 3 tonnes et plus à la roue:
 - compactage et affaissement déjà présents en forte proportion (90% en Montérégie),
 - à mesurer en profondeur (0-100 cm) avec la diffusivité des gaz, la conductivité saturée, la porosité d'air et la MVA en dernier
 - à prévenir par tous les moyens et à corriger par le travail du sol et les rotations fourragères ou les systèmes agroforestiers
 - affecte déjà les rendements et affectera la rentabilité a long terme de plus en plus
3. 6.5 tonnes d'azote de trop pour une ferme moyenne:
 - les rendements moyens de 12,5 t et plus s'obtiennent avec 140 kg de N/ha mais plus si compactage.
 - Arrières-effets des rotations de 50 à 70 kg N/ ha
4. Une tonne d'argent en jeu!
5. 10 tonnes de biomasse par hectare sans engrais?
6. 100 \$ la tonne de CO₂ séquestrés

Des tonnes de raisons et de façons d'agir

1. 12.5 tonnes par ha en Montérégie: possible et souhaitable
2. 3 tonnes et plus à la roue: agir!
3. 6.5 tonnes d'azote de trop pour une ferme moyenne:
4. Une tonne d'argent en jeu! Rentabilité à long terme menacée par la dégradation
5. 10 tonnes de biomasse par hectare sans engrais: rotations **nécessaires (luzerne, retour de haie)** pour maintenir la viabilité économique de long terme
6. 100 \$ la tonne de CO₂ séquestrés. Les notions de durabilité et d'écoconditionnalité font partie de l'économie nouvelle et sont une voie de passage pour sortir de la spirale de dégradation

CONCLUSIONS: UNE QUESTION D'HORIZON

2023
2024
2025
2026
2027

On veut rester à 12.5 et on est producteur laitier: on garde la luzerne et on restaure des bosquets si nécessaires.

On est à 12 t aujourd'hui en maïs soya et avec une bonne santé de sol, on réintroduit graduellement des rotations pour maintenir les profits

On est à 10 t et on veut améliorer la santé du sol: on introduit graduellement des rotations pour atteindre 12 T ou se maintenir

On veut juste grossir avant de vendre? 5-10 ans.

Bref, des tonnes de raisons et de façons d'agir!

**MERCI DE VOTRE
PRESENCE, DE VOTRE
PARTICIPATION ET DE
VOTRE INVITATION!**

