



Effet d'apports répétés de PROs sur la stabilité structurale des sols

S. Menasseri-Aubry, T. Morvan, S. Busnot, S. Houot et al.

Colloque « Retour au sol des produits résiduaux organiques »
organisé par l'observatoire de recherche SOERE PRO

Campus Agro Paris-Saclay
22 juin 2023

La stabilité structurale des sols

Définition et processus

Stabilité des agrégats: Résistance de l'agrégat aux stress (pluie, vent)

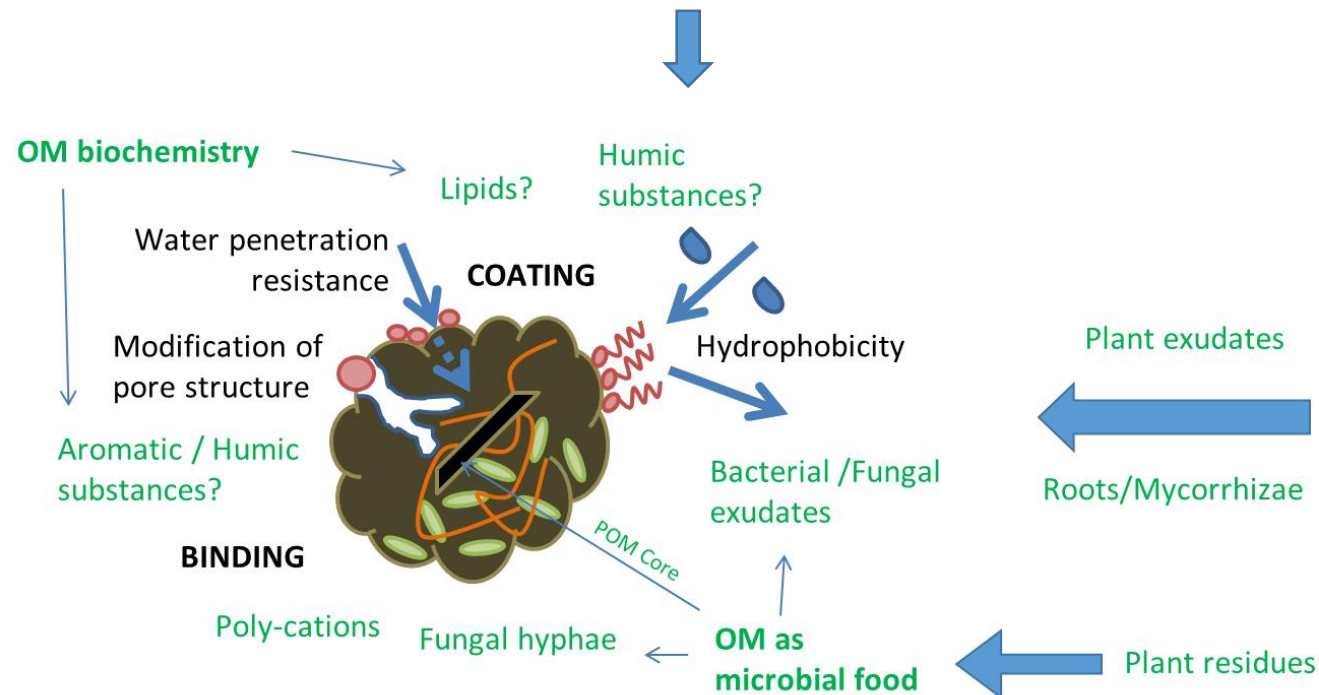
Désagrégation

↳ Erosion

↳ Perte de carbone

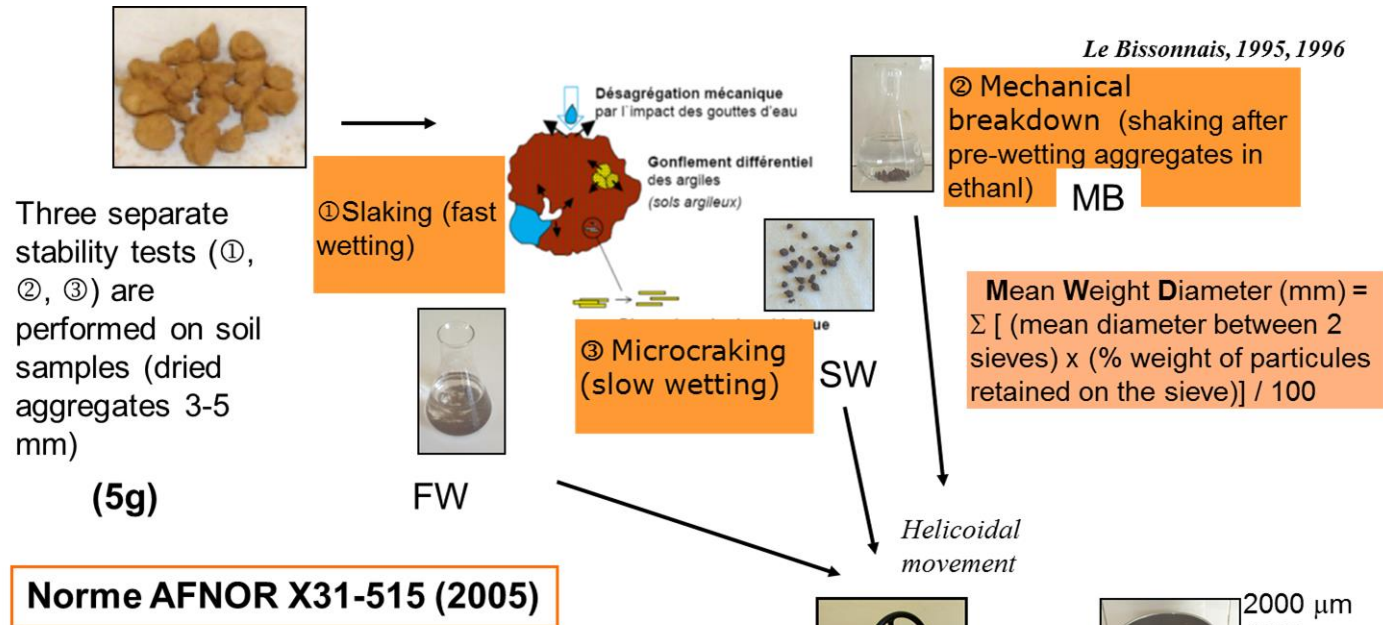
Sensible à l'apport des PROS

- Court et moyen terme, liée à la qualité du C (et microbiologie)
- **long terme**, liée à l'augmentation de la teneur et qualité du C



La stabilité structurale des sols

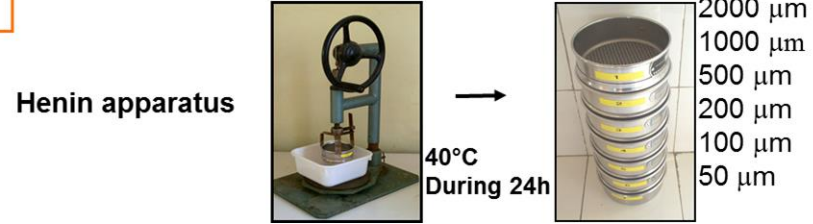
Mesure



FW: Slaking depending on porosity and wettability

MB: Breakdown by raindrop impact

SW: Differential swelling (cohesion between microagregates)



La stabilité structurale des sols

Interprétation



MWD	Stabilité	Battance	Ruissellement et érosion diffuse
<0,4 mm	Très instable	Systématique	Risque important et permanent en toutes conditions topographiques
0,4-0,8 mm	Instable	Très fréquente	Risque fréquent en toute situation
0,8-1,3 mm	Moyennement stable	Fréquente	Risque variable en fonction des paramètres climatiques et topographiques
1,3-2,0 mm	Stable	Occasionnelle	Risque limité
>2,0 mm	Très stable	Très rare	Risque très faible

Le Bissonais et Le Souder, 1995

FW: Slaking depending on porosity and wettability

MB: Breakdown by raindrop impact

SW: Differential swelling (cohesion between microagregates)

Caractéristiques des dispositifs du SOERE PRO

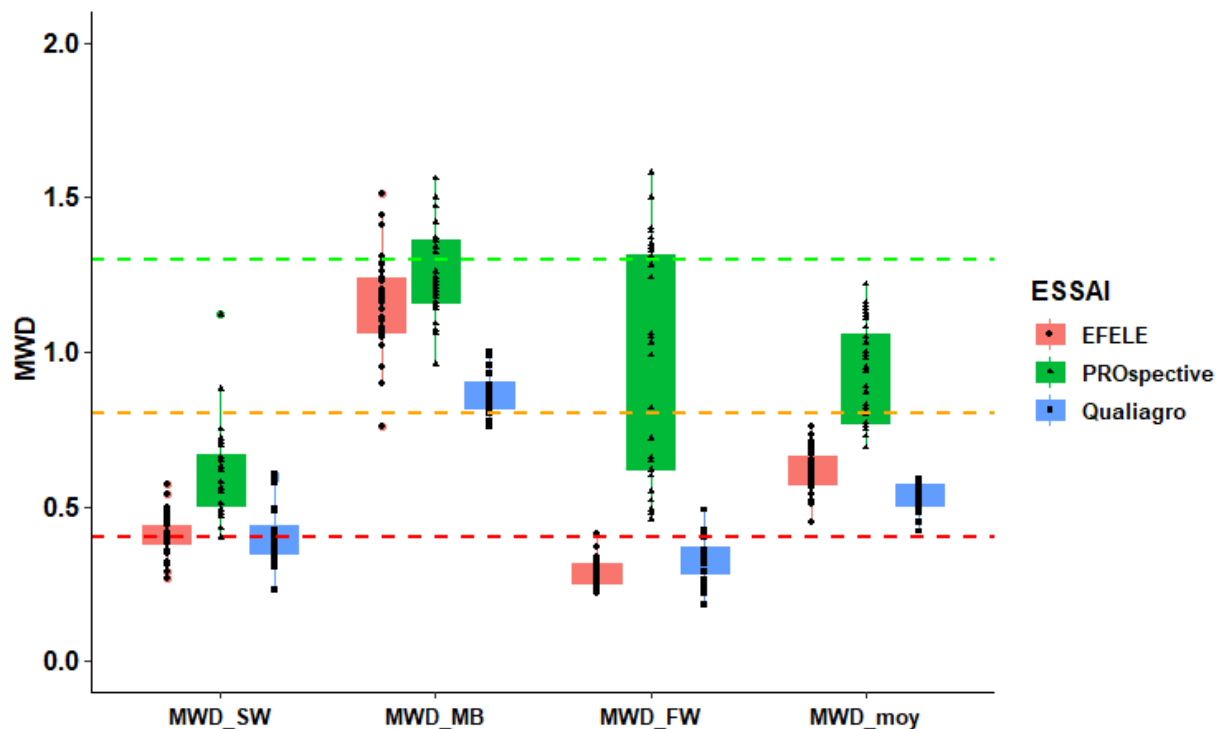
Rappel du contexte

Prélèvements au printemps (mars) sur 0-15 cm – Campagne 2019 (projet PROTERR)

Contexte	QUALIAGRO	PROSPECTIVE	EFELE
Caractéristiques du sol	A : 15% ; L : 79% ; Corg : 0.8-1.8%	A : 18% ; L : 62% ; Corg : 1.3-1.7% ; CaCO ₃	A : 15% ; L : 69% ; Corg : 1-1.3 %
Année de démarrage de l'essai	1998 pour PRO 2016 (Légumineuse)	2000 ; DIG+FB 2014 ; DIG 2015	2012
Succession culturale	Maïs G-blé (résidus de maïs enfouis)	Maïs G/blé/Betterave/orge	Maïs E/Blé (résidus de cultures exportés)
PROs apportées	Composts d'ordures ménagères (OMR), déchets verts+Boue (DVB), biodéchets (BIO), fumier de bovins (FB)	Boue (BOUE), Composts de boues (DVB), biodéchets (BIO) et FB (FUM C), fumier de bovins (FB), mélange de FB et digestat, digestat de boue (DIG)	Compost de fumier de porc (CP), Fumier de volailles (FV), Lisier de porc (LP), Digestat de lisier de porc (DIG-LP), fumier de bovins (FB)

← Apports entre 0,5 et 2 T C/ha/an →

Campagne 2019 - Distribution des MWD sur les 3 sites



- MWD_SW, MWD_FW et MWD_moy comparables et assez homogènes à Qualiagro et EFELE -- > valeurs de stabilité structurale instables
- MWD_MB d'EFELE supérieure à celle de Qualiagro
- PROspective : valeurs plus élevées de MWD pour les 3 tests, en particulier le test MWD_FW

SW : slow wetting
MB : mechanical breakdown
FW : fast wetting

Les valeurs moyennes de MWD se situent dans la gamme des sols **instables** pour QA et EFELE, et dans la gamme des sols **moyennement stables**, en majorité, pour PROspective

QUALIAGRO

Prélèvement sous blé, 14 et 15 mars, H° sol = 28 %

	MWD_SW	MWD_MB	MWD_FW	Corg	P
Qualiagro					
BIO_ON	0.43 ^{ab} (0.08)	0.87 (0.06)	0.35 (0.10)	16.5 ^a (0.87)	
DVB_ON	0.50 ^a (0.11)	0.88 (0.03)	0.31 (0.08)	17.2 ^a (0.47)	*, NS, NS, ***
FB_ON	0.45 ^{ab} (0.09)	0.82 (0.01)	0.31 (0.04)	14.4 ^b (0.54)	
OMR_ON	0.37 ^{ab} (0.02)	0.92 (0.09)	0.37 (0.05)	14.0 ^b (0.36)	
TEM_ON	0.31 ^b (0.05)	0.85 (0.09)	0.28 (0.10)	10.1 ^c (0.47)	
	P<0.05	n.s.	n.s.	P<0.001	

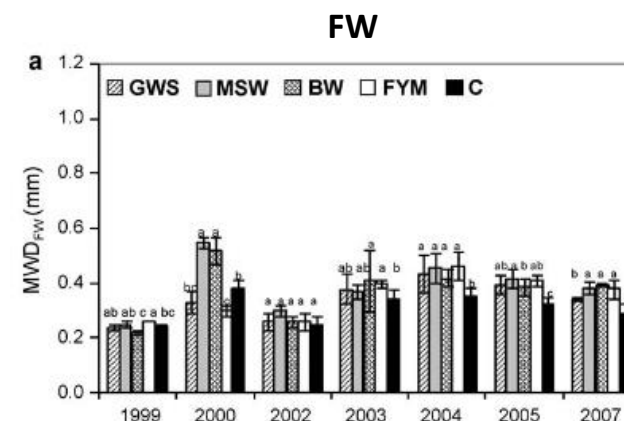
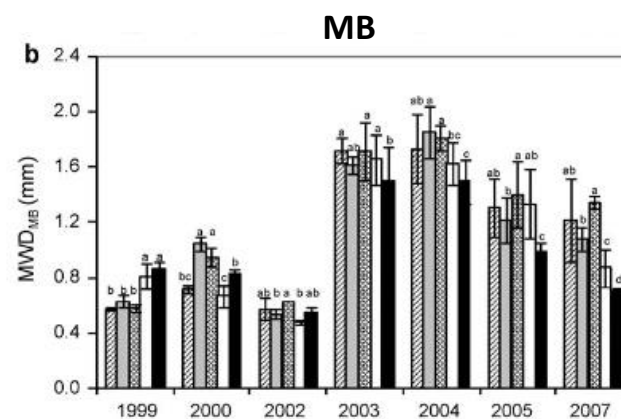
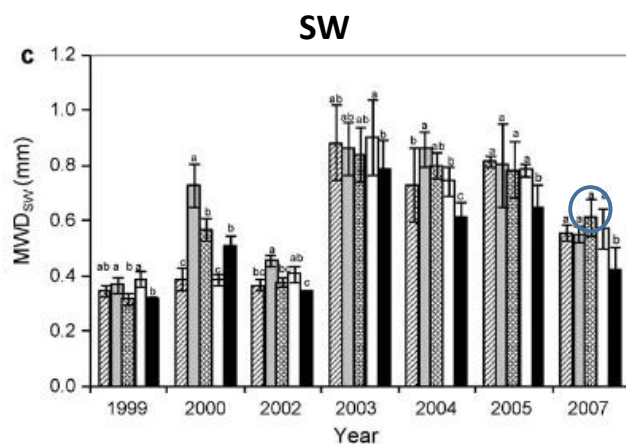
- Différences significatives au niveau du test à humectation lente (SW)
- Stabilités très instables à instables pour SW et FW

Résultats de la campagne de 2019

Qualiagro

Comparaison avec les résultats d'Annabi et al (2011)

	MWD SW	MWD MB	MWD FW	Corg	P
BIO_ON	0.43 (0.08)	0.87 (0.06)	0.35 (0.10)	16.5 (0.87)	
BW = <u>DVB_ON</u>	<u>0.50 (0.11)</u>	0.88 (0.03)	0.31 (0.08)	17.22 (0.47)	*, NS, NS, ***
FB_ON	0.45 (0.09)	0.82 (0.01)	0.31 (0.04)	14.4 (0.54)	
OMR_ON	0.37 (0.02)	0.92 (0.09)	0.37 (0.05)	13.99 (0.36)	
TEM_ON	0.31 (0.05)	0.85 (0.09)	0.28 (0.10)	10.09 (0.47)	



- ✓ Mesure de stabilité structurale caractérisée par une forte variabilité interannuelle --> dépendance aux conditions culturales et environnementales (climat)
- ✓ Possibilité de calculer des ratios, tels que net aggregation index (NAI) (Ojeda et al, 2008), pour rendre compte plus spécifiquement de l'effet (PRO) étudié

Résultats de la campagne 2019

PROspective

Prélèvement après une CIPAN (moutarde broyée le 7/2), le 12 et 13 mars, Hp = 21 %

	MWD_SW	MWD_MB	MWD_FW	Corg	P
PROspective					
BIO_N	0.65 (0.11)	1.30 ^{ab} (0.06)	0.88 ^b (0.21)	15.30 ^a (0.93)	
BOUE_N	0.48 (0.06)	1.16 ^{bc} (0.05)	0.80 ^{bc} (0.18)	13.80 ^{bc} (0.53)	NS, ***, ***,
COMPFB_N	0.56 (0.01)	1.10 ^c (0.11)	1.24 ^a (0.17)	14.62 ^{ab} (0.33)	***
DIG_ON	0.50 (0.02)	1.48 ^a (0.11)	1.46 ^a (0.10)	13.75 ^{bc} (0.62)	
DVB_N	0.58 (0.15)	1.22 ^{bc} (0.15)	0.59 ^{bc} (0.08)	14.65 ^{ab} (0.73)	
FB_N	0.54 (0.10)	1.11 ^c (0.06)	0.52 ^c (0.07)	14.50 ^{ab} (0.42)	
FB_DIG_ON	0.71 (0.12)	1.36 ^{ab} (0.08)	1.32 ^a (0.06)	15.20 ^a (0.52)	
TEM_ON	0.70 (0.30)	1.26 ^{bc} (0.08)	0.62 ^{bc} (0.10)	13.15 ^c (0.39)	

- Différence significative au niveau des tests MB et FW
- Propriétés du sol ? Effet couvert ?

Résultats de la campagne 2019 (...et 2021)

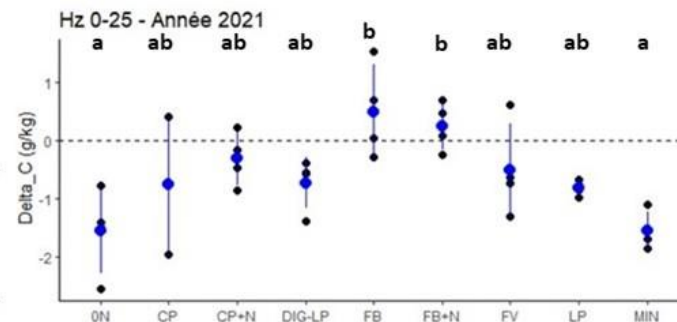
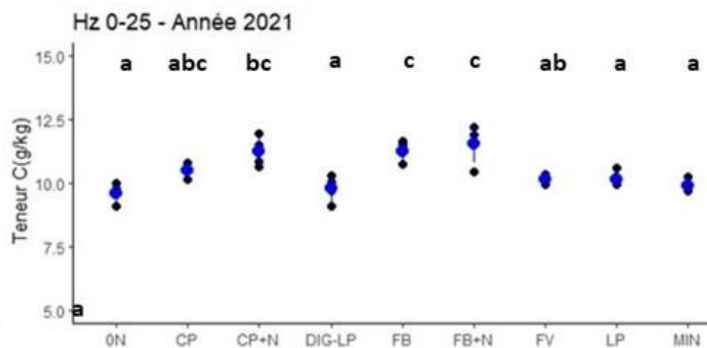
EFELE

Prélèvement sous blé le 5 mars, Hp = 27 %

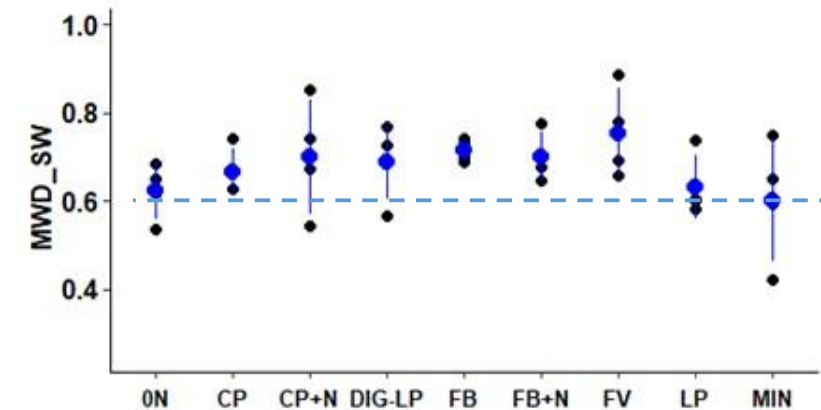
	MWD SW	MWD MB	MWD FW	Corg	P
COMPLP_ON	0.46 (0.06)	1.20 (0.04)	0.29 (0.04)	11.22 (0.69)	
COMPLP_N	0.41 (0.04)	1.18 (0.12)	0.32 (0.02)	11.55 (0.87)	
DIGLP_ON	0.37 (0.07)	1.19 (0.09)	0.30 (0.03)	10.51 (0.87)	
FB_ON	0.40 (0.02)	1.09 (0.04)	0.28 (0.04)	10.95 (0.7)	NS, NS, NS, NS
FB_N	0.43 (0.13)	1.30 (0.21)	0.27 (0.03)	11.27 (0.86)	
FV_ON	0.41 (0.04)	0.98 (0.19)	0.28 (0.06)	10.68 (0.78)	
LP_ON	0.39 (0.08)	1.16 (0.12)	0.26 (0.05)	10.95 (0.44)	
TEM_ON	0.37 (0.07)	1.21 (0.22)	0.31 (0.07)	11.17 (0.93)	
TEM_N	0.41 (0.07)	1.10 (0.11)	0.27 (0.03)	11.45 (0.53)	

- Pas de différence significative après 7 années d'apport à des doses agronomiques

- 2021 : différentiation S* des teneurs C - pas de différentiation S* de MWD_SW et MWD moyenne, mais tendance vers des valeurs de SW légèrement plus élevées avec les traitements PROs



$$\text{Delta_C} = \text{TenC}_{2021} - \text{TenC}_{2012}$$



Résultats de la campagne de 2019

Relations MWD SW = f (Corg)

Annabi et al, 2011 (données Qualiagro)

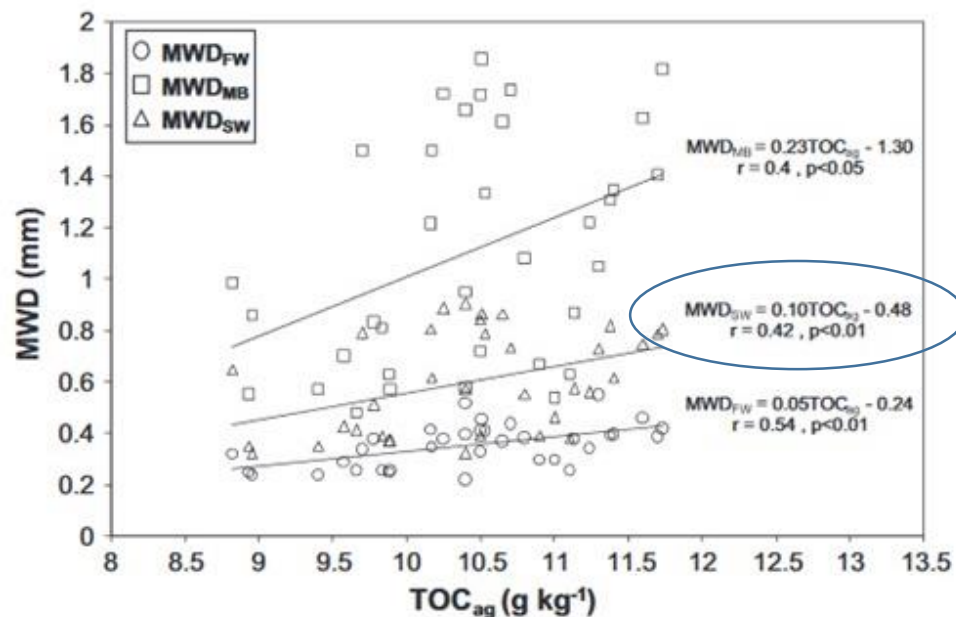
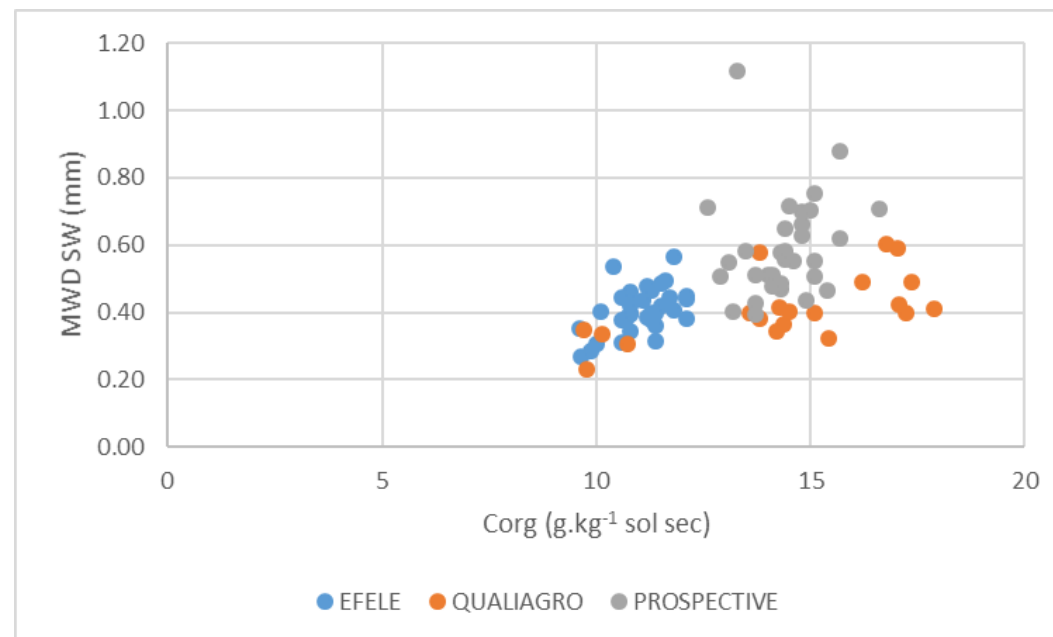


Fig. 5. Relationship between total organic carbon in aggregates (TOC_{ag}) and the mean weight diameters (MWD in mm) for the three aggregate stability tests. MWD_{FW} : MWD of the fast wetting test, MWD_{MB} : MWD of the mechanical break-down test and MWD_{SW} : MWD of the slow wetting test are presented.

Données 2019



- Corrélation S^* pour Qualiagro
- Tendance pour les 2 autres sites

Evolution temporelle sur EFELE

2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Maïs	Blé	Maïs	Blé	Maïs	Blé	Maïs	Blé	Maïs	Maïs
	CIPAN		CIPAN		CIPAN		CIPAN	CIPAN	

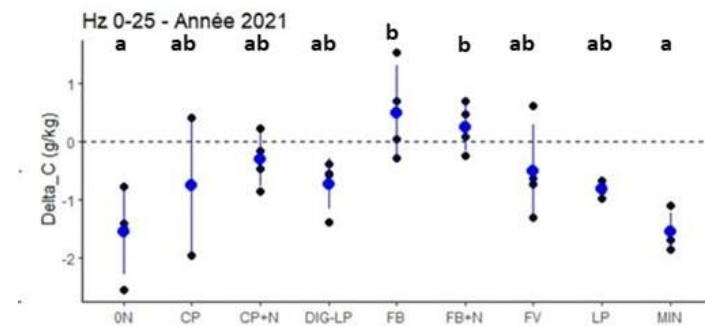


Raisonnement des doses d'apport de PROs :

- FB : 50 t/ha (biannuel)
- CP : 25 t/ha (biannuel)
- FV : 3.4 t/ha (annuel)
- LP et DIG-LP : entre 22 et 40 m3/ha (annuel)

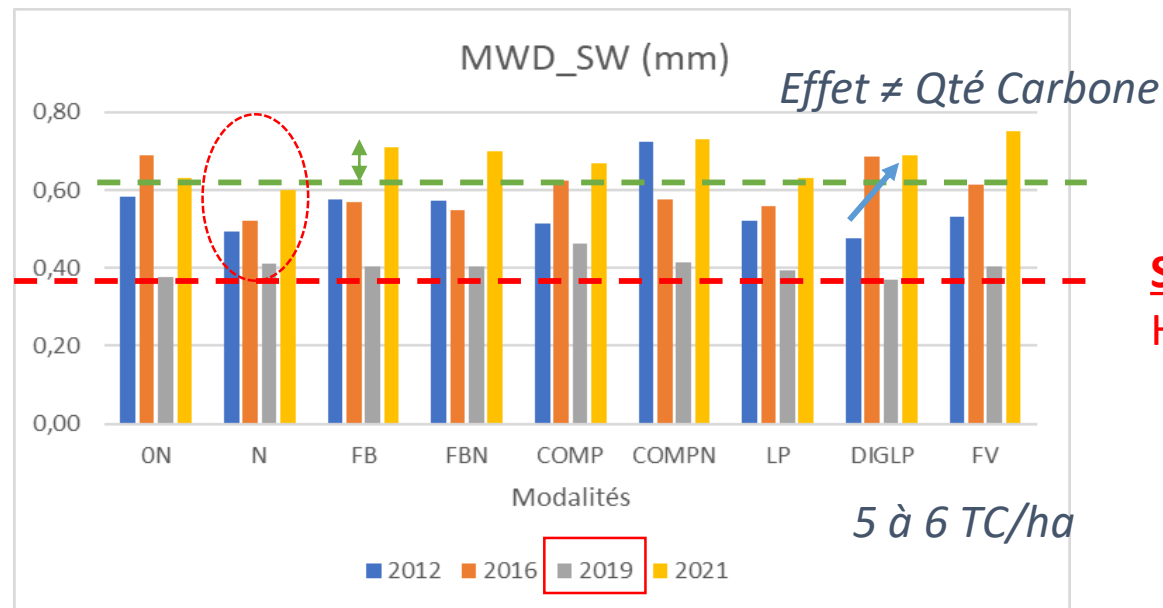
Apports cumulés
de C (t C/ha)

	Cumul [2012 ; 2020]
FB	22.0
FV	5.6
CP	11.8
LP	6.6
DIG-LP	5.5



$$\text{Delta_C} = \text{TenC}_{2021} - \text{TenC}_{2012}$$

Dynamique de la stabilité structurale sur EFELE



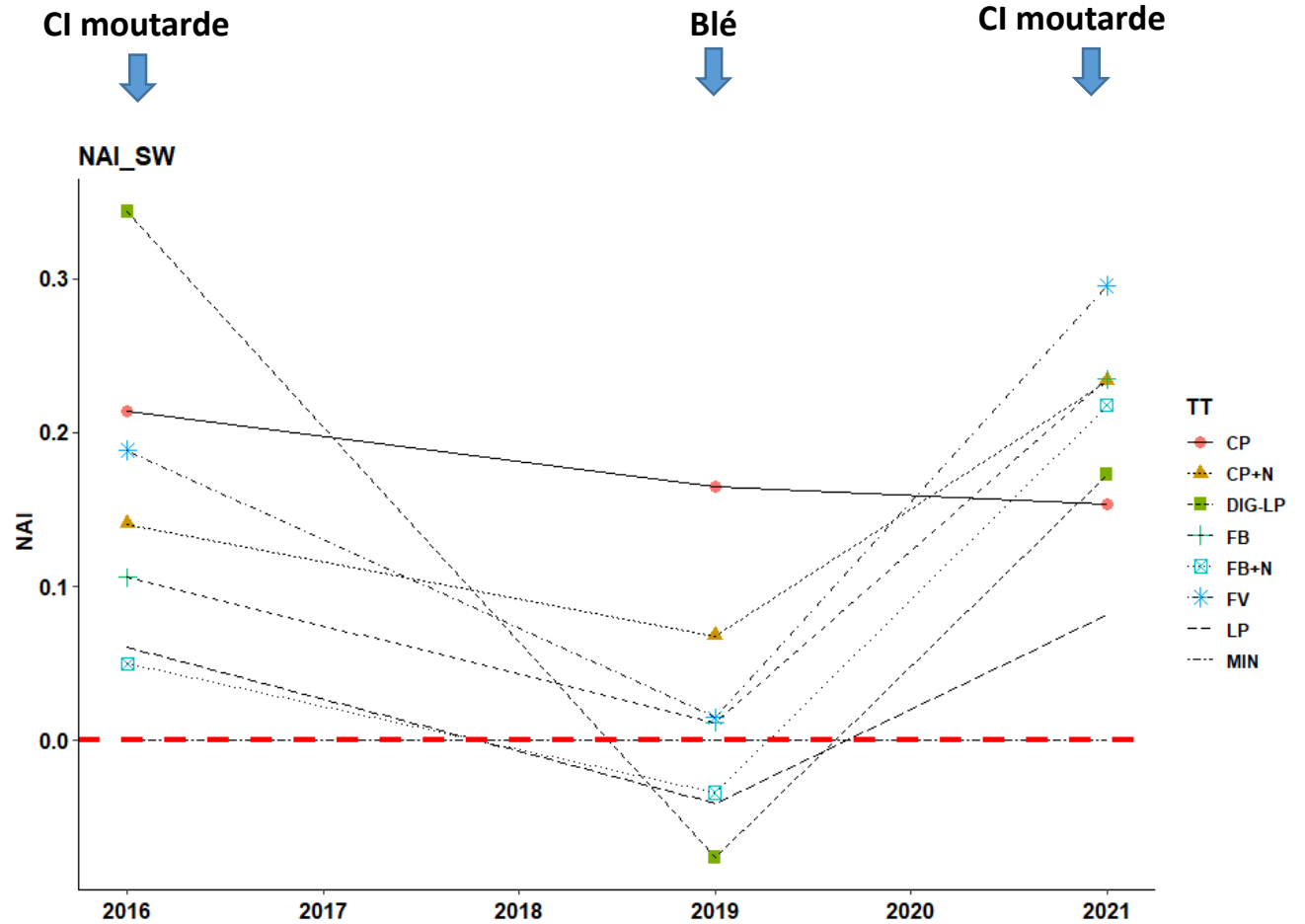
- Variabilité temporelle sur traitements N (MIN) et ON
- Valeurs faibles de MWD_SW en 2019 :
 - Prélèvement sous un blé en début de végétation
 - Sol saturé

Dynamique du net aggregation index (NAI) - EFELE

$$\text{NAI} = (\text{MWD}_{\text{tt}} - \text{MWD}_{\text{ref}}) / \text{MWD}_{\text{ref}}$$

ref = MIN

- ✓ Effet positif de tous les PROs sur la valeur de MWD SW, en 2016 et en 2021, avec une amélioration (n.s.) de la stabilité structurale de 5 à 30 %
- ✓ Pas d'augmentation des valeurs de l'indice en 2021, par rapport à 2016,
- ✓ 'Effacement' de l'effet PROs sur les valeurs de stabilité structurale, en 2019, sauf pour CP et CP +N -- > conditions précédant le prélèvement très défavorables à l'agrégation (labour réalisé avant l'hiver, système racinaire très limité du blé en sortie d'hiver, conditions météo...)



Discussion

- L'effet des PROs apportés à des doses agronomiques sur la stabilité structurale est visible sur le long-terme (> 10 ans)
 - Il est à relier à la quantité de carbone apporté mais aussi la qualité du carbone : en effet on observe des mêmes niveaux de stabilité structurale pour des produits dont les quantités de carbone apportée sont différentes
 - Les écarts liés à la dynamique temporelle de cette propriété sont souvent supérieurs aux écarts liés à l'effet des produits organiques (Annabi et al., 2011; Bottinelli et al., 2017; CsitAri et al., 2021)





Discussion

- L'effet des PROs apportés à des doses agronomiques sur la stabilité structurale est visible sur le long-terme (> 10 ans)
 - Il est à relier à la quantité de carbone apporté mais aussi la qualité du carbone : en effet on observe des mêmes niveaux de stabilité structurale pour des produits dont les quantités de carbone apportée sont différentes
 - Les écarts liés à la dynamique temporelle de cette propriété sont souvent supérieurs aux écarts liés à l'effet des produits organiques (Annabi et al., 2011; Bottinelli et al., 2017; CsitAri et al., 2021)
- Les effets significatifs de l'apport de PROs retrouvés dans la littérature sont liés à
 - des quantités apportées élevées (> aux doses agronomiques)
 - Une durée d'essai > 10 ans (+ 4,4 % d'augmentation au bout de 20 ans d'apport (Meena et al., 2020))

Discussion

- L'effet des PROs apportés à des doses agronomiques sur la stabilité structurale est visible sur le long-terme (> 10 ans)
 - Il est à relier à la quantité de carbone apporté mais aussi la qualité du carbone : en effet on observe des mêmes niveaux de stabilité structurale pour des produits dont les quantités de carbone apportée sont différentes
 - Les écarts liés à la dynamique temporelle de cette propriété sont souvent supérieurs aux écarts liés à l'effet des produits organiques (Annabi et al., 2011; Bottinelli et al., 2017; CsitAri et al., 2021)
- Les effets significatifs de l'apport de PROs retrouvés dans la littérature sont liés à
 - des quantités apportées élevées (> aux doses agronomiques)
 - Une durée d'essai > 10 ans (+ 4,4 % d'augmentation au bout de 20 ans d'apport (Meena et al., 2020))
- L'effet des PROs apportés à des doses agronomiques dans des sols limoneux est accentué lorsque l'apport est combiné à la réduction du travail du sol (*données EFELE non présentées*)

Perspectives

- Etablir des relations avec les **caractéristiques des produits** en plus des quantités cumulées apportées (Abiven et al. 2007) en valorisant les données acquises poursuivant
 - les mesures/analyses dans chaque « famille » de produits
 - l'acquisition d'autres informations sur régimes hydrique et thermique



Perspectives

- Etablir des relations avec les **caractéristiques des produits** en plus des quantités cumulées apportées (Abiven et al. 2007) en valorisant les données acquises poursuivant
 - les mesures/analyses dans chaque « famille » de produits
 - l'acquisition d'autres informations sur régimes hydrique et thermique
- Caractériser les effets indirects nombreux via :
 - la culture et l'interculture
 - l'activité biologique dans le sol



Perspectives

- Etablir des relations avec les **caractéristiques des produits** en plus des quantités cumulées apportées (Abiven et al. 2007) en valorisant les données acquises poursuivant
 - les mesures/analyses dans chaque « famille » de produits
 - l'acquisition d'autres informations sur régimes hydrique et thermique
- Caractériser les effets indirects nombreux via :
 - la culture et l'interculture
 - l'activité biologique dans le sol
- **Etablissement d'une typologie des PROs vis-à-vis de leur effet sur la stabilité structurale du sol, sur le court, moyen et long-terme (poursuite des travaux de M. Annabi et S. Abiven), en intégrant des facteurs de modulation = f(occupation du sol, état hydrique)**