



# 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

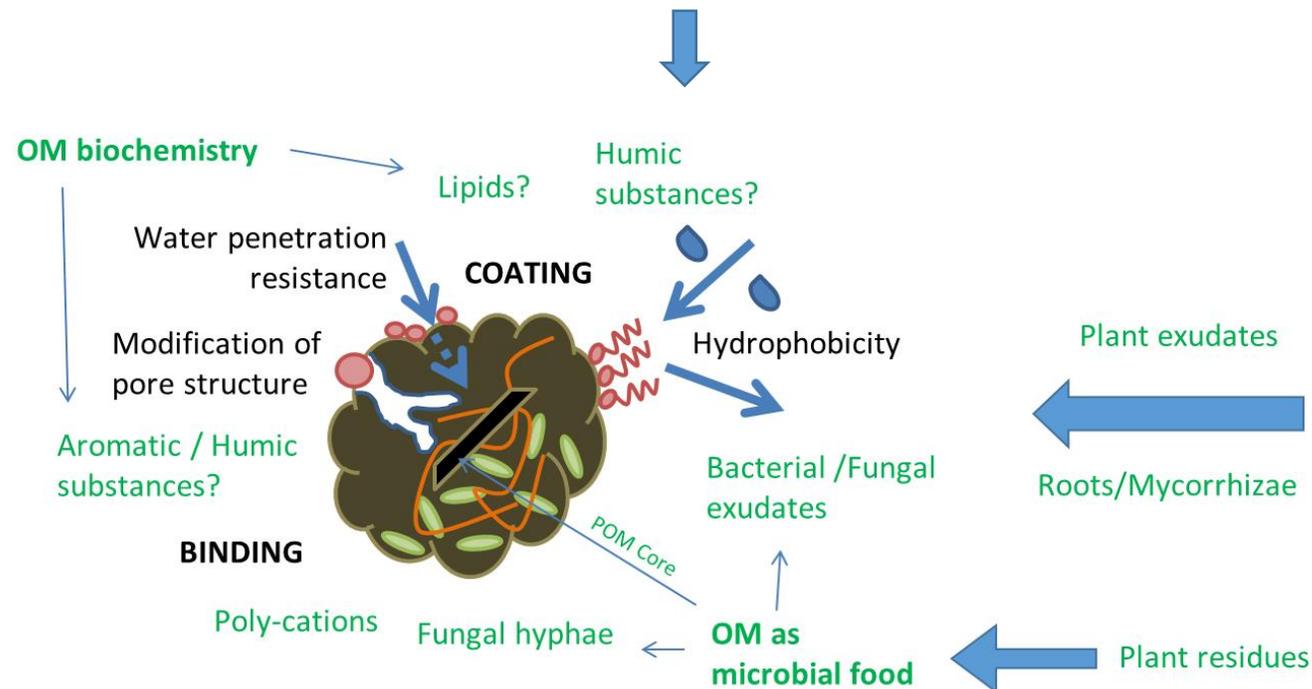
↳ Erosion

↳ Perte de carbone



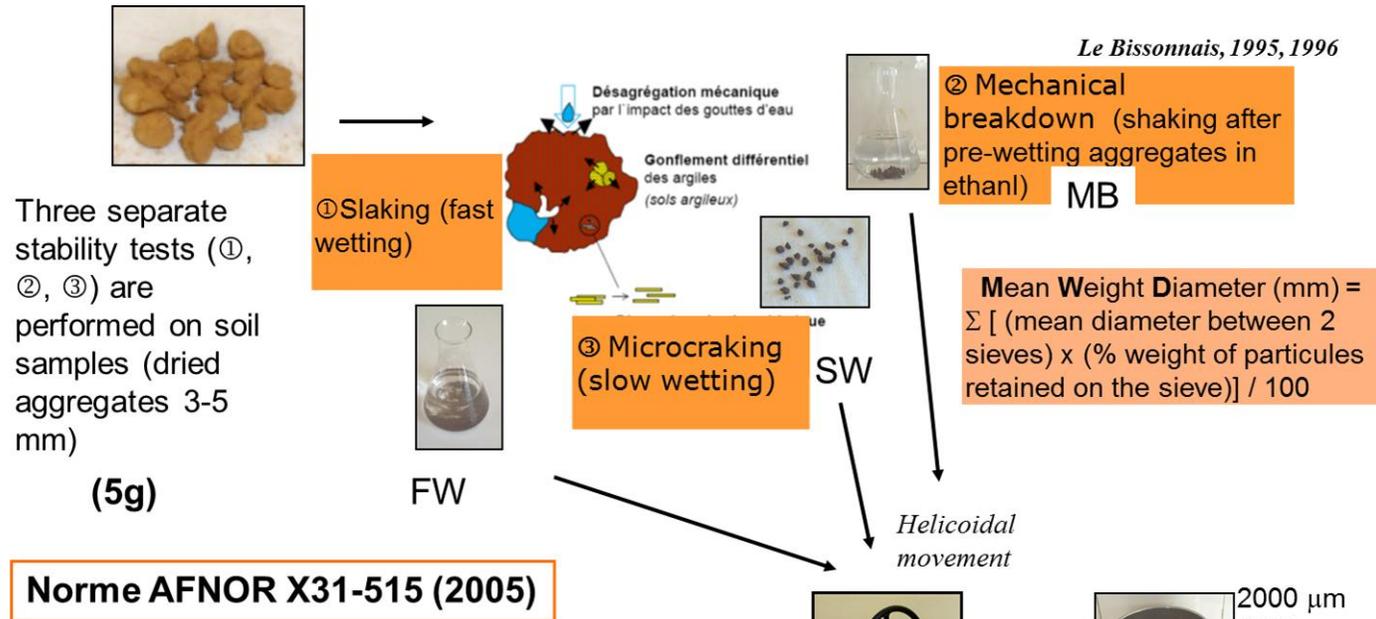
Sensible à l'apport des PROS

- 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

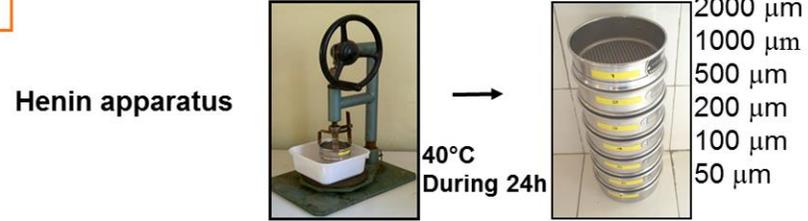
## Mesure



**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

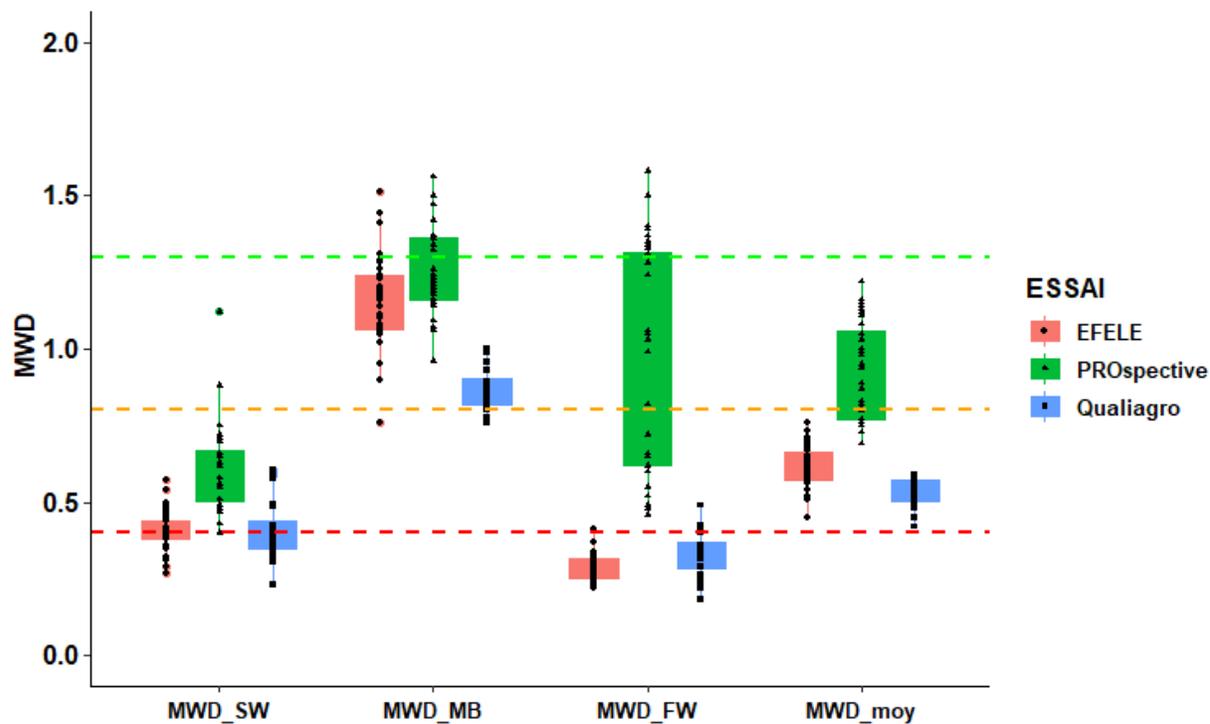
## Rappel du contexte

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 <sub>3</sub>	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	<b>Composts</b> d'ordures ménagères (OMR), déchets verts+Boue (DVB), biodéchets (BIO), fumier de bovins ( <b>FB</b> )	<b>Boue</b> (BOUE), <b>Composts</b> de boues (DVB), biodéchets (BIO) et FB (FUM C), fumier de bovins ( <b>FB</b> ), mélange de FB et digestat, digestat de boue ( <b>DIG</b> )	<b>Compost</b> de fumier de porc (CP), Fumier de volailles (FV), Lisier de porc (LP), Digestat de lisier de porc (DIG-LP), fumier de bovins ( <b>FB</b> )

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

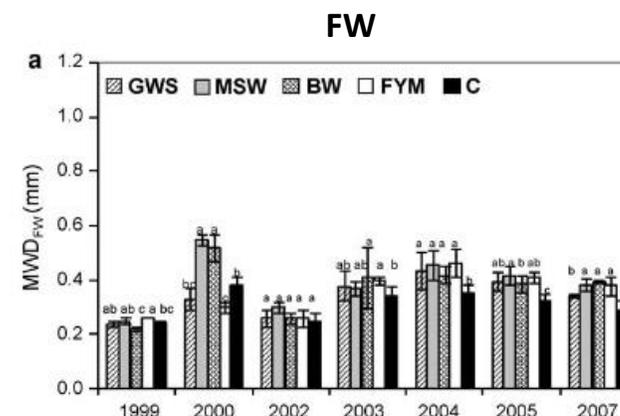
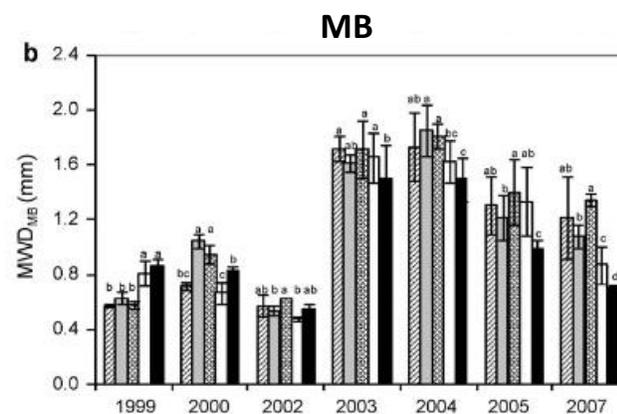
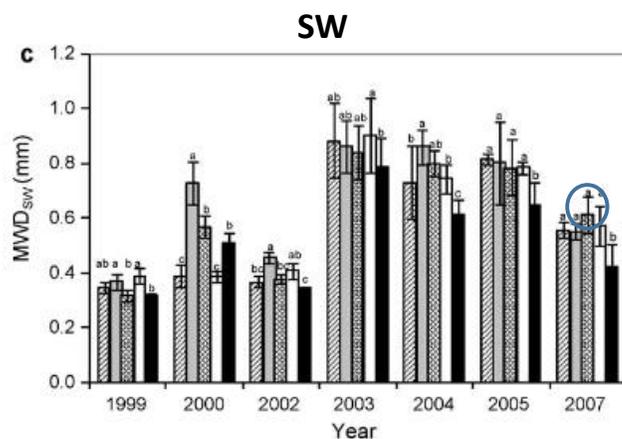
- Différences significatives au niveau du test à humectation lente (SW)
- Stabilités très instables à instables pour SW et FW

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

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

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

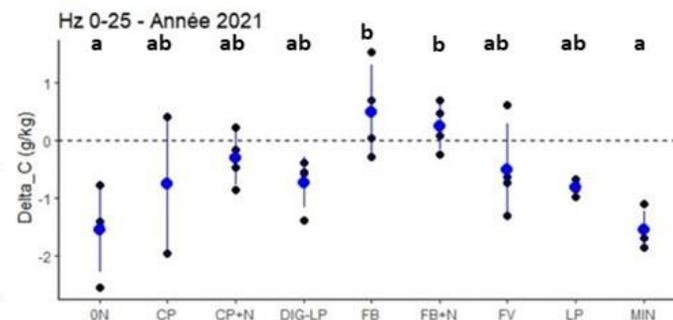
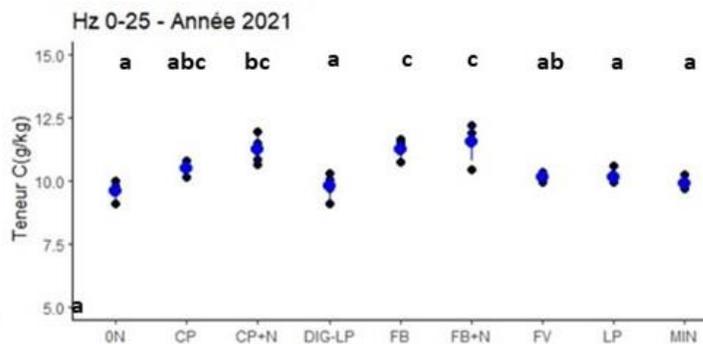
## EFELE

Prélèvement sous blé le 5 mars, Hp = 27 %

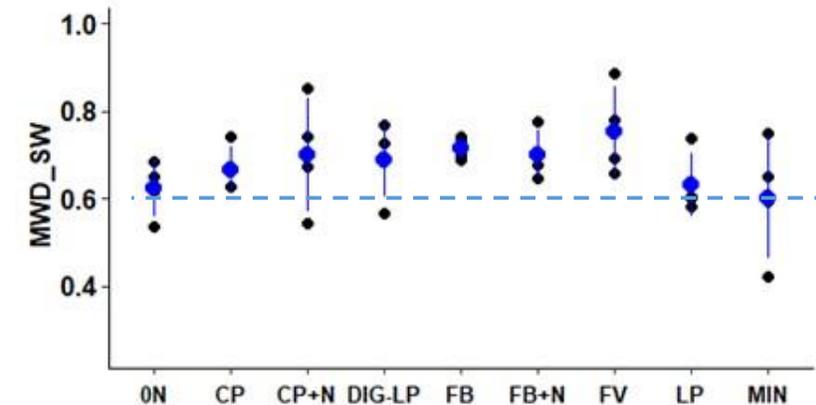
	MWD SW	MWD MB	MWD FW	Corg	P
COMPLP_ON	0.46 (0.06)	1.20 (0.04)	0.29 (0.04)	11.22 (0.69)	
COMPLP_N	0.41 (0.04)	1.18 (0.12)	0.32 (0.02)	11.55 (0.87)	
DIGLP_ON	0.37 (0.07)	1.19 (0.09)	0.30 (0.03)	10.51 (0.87)	
FB_ON	0.40 (0.02)	1.09 (0.04)	0.28 (0.04)	10.95 (0.7)	NS, NS, NS, NS
FB_N	0.43 (0.13)	1.30 (0.21)	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)

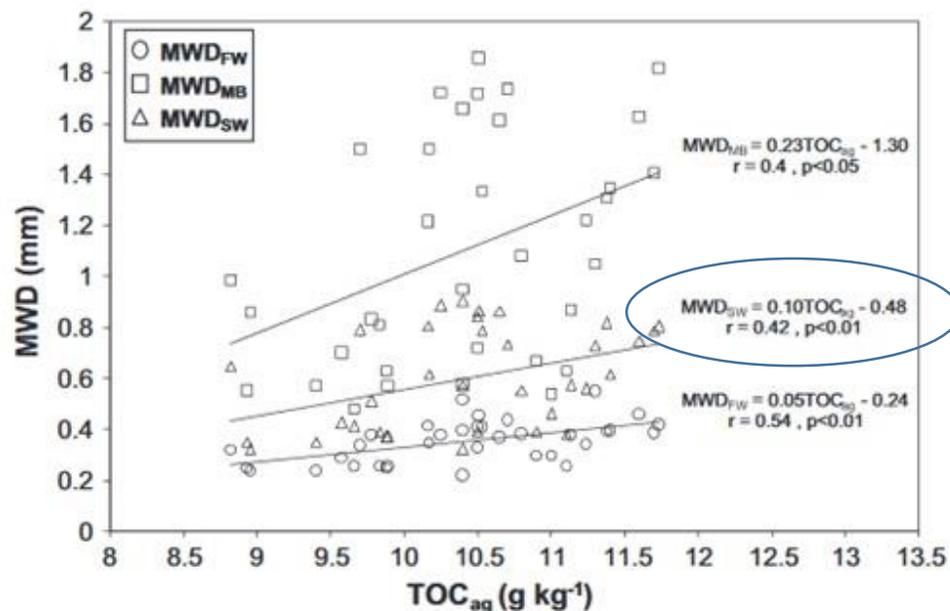
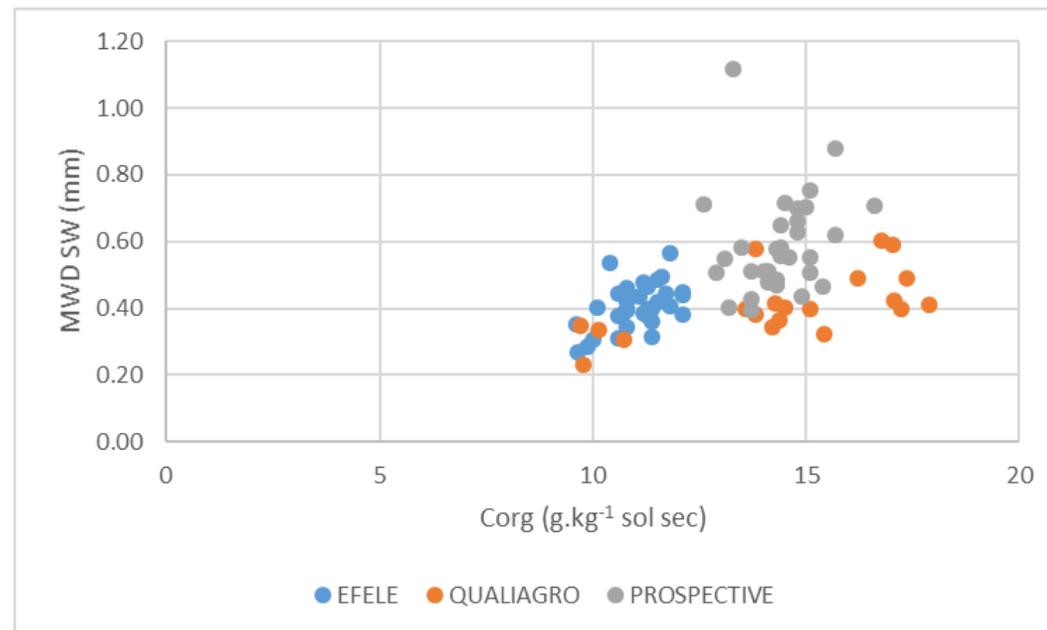


Fig. 5. Relationship between total organic carbon in aggregates ( $TOC_{ag}$ ) and the mean weight diameters (MWD in mm) for the three aggregate stability tests.  $MWD_{FW}$ : MWD of the fast wetting test,  $MWD_{MB}$ : MWD of the mechanical break-down test and  $MWD_{SW}$ : MWD of the slow wetting test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

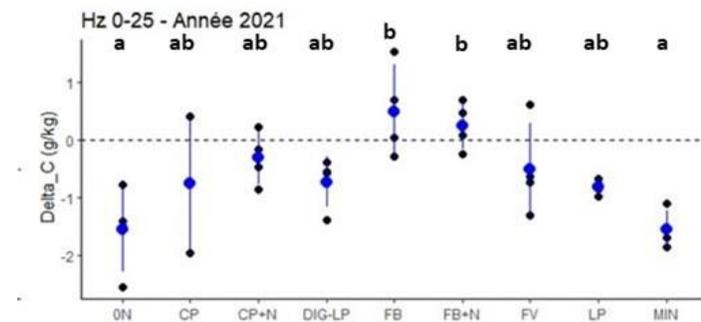


## Raisonnement des doses d'apport de PROs :

- 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)

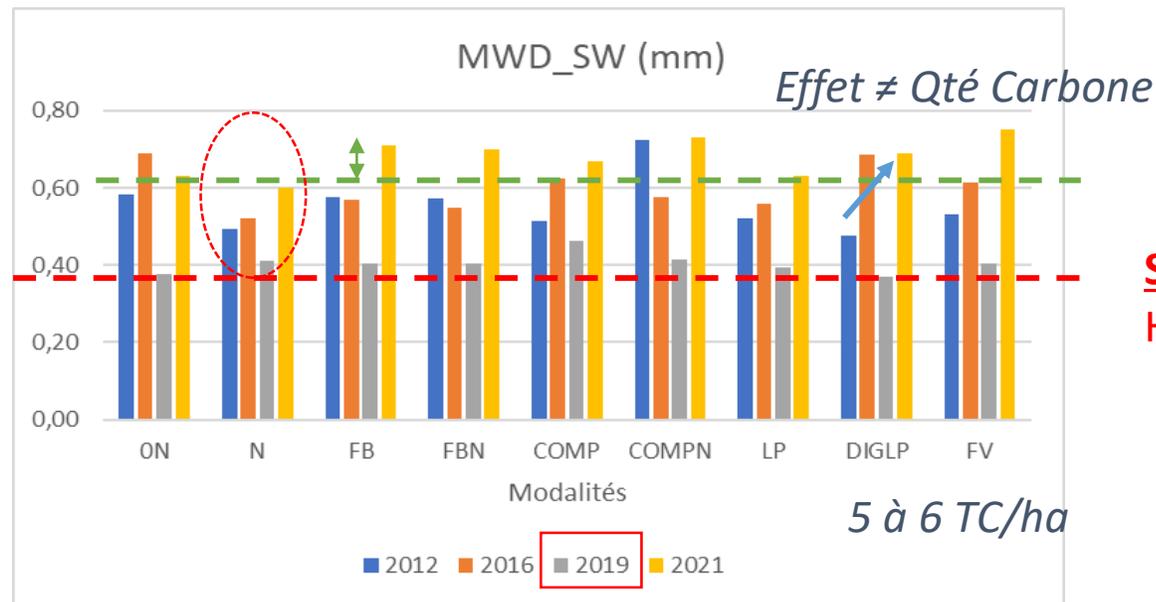
Apports cumulés  
de C (t C/ha)

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



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

# 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



# 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)**