

## SoléBIOM

Application des modèles AMG et STICS à la conception et à l'évaluation de systèmes de culture innovants

Evaluer les performances des systèmes de culture vis-à-vis du stockage de carbone et des émissions azotées

Jean-Christophe MOUNY <sup>a</sup>, Robert TROCHART <sup>b</sup>,  
Hugues CLIVOT <sup>c</sup>, Annie DUPARQUE <sup>a</sup>

*a* – Agro-transfert R&T

*b* – Arvalis – Institut du végétal

*c* – Terres Inovia

Avec le soutien financier



Partenaires scientifiques et techniques

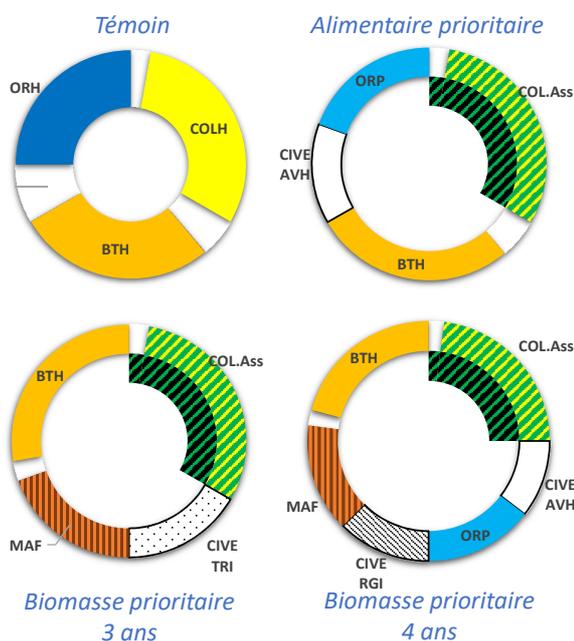


SAS

**PIVERT**

Peut-on concilier exportations de biomasses non-alimentaires et stockage de carbone ?

Exemple de la plateforme SCOP de la Ferme 3.0 (Picardie)



• Sol argilo-calcaire limoneux

Corg initial :	56	t/ha
Corg initial :	12	g/kg
MO initiale	2,06	%
Argile :	241	g/kg
CaCO <sub>3</sub> :	309	g/kg
C/N	9,6	-
C minéralisé	1,1	t.ha <sup>-1</sup> .an <sup>-1</sup>

BTH = Blé tendre

ORH = Orge d'hiver

ORP = Orge de Printemps

MAF = Maïs Fourrage

COL.H/Ass = Colza d'hiver ou associé

AVH = Avoine

TRI = Triticale

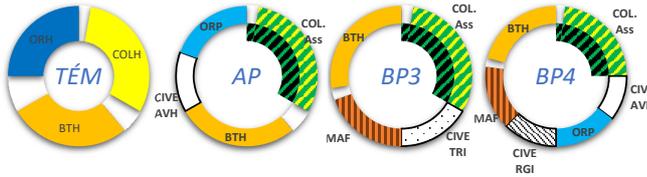
RGI = Raygrass

CIVE = Culture Intermédiaire à

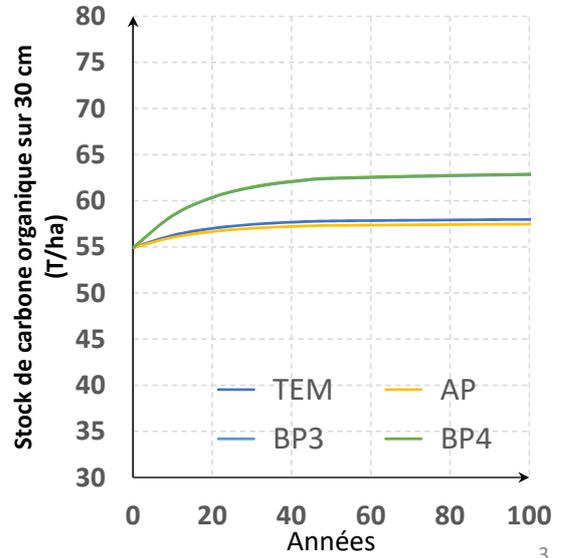
Valorisation Énergétique

# Peut-on concilier exportations de biomasses non-alimentaires et stockage de carbone ?

SCOP Ferme 3.0



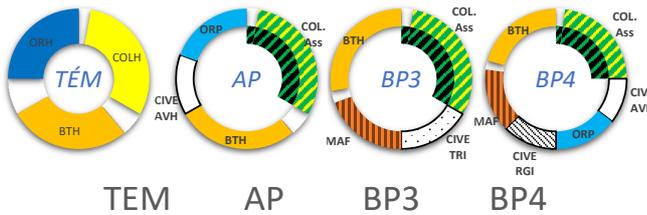
Corg initial :	55,65	t/ha
MO initiale	2,06	%
C minéralisé	1,1	t.ha <sup>-1</sup> .an <sup>-1</sup>
CIVE automne	3	t <sub>MS</sub> /ha
CIVE hiver	10	t <sub>MS</sub> /ha
Couvert ass.	0,8	t <sub>MS</sub> /ha



Colloque Valoriser plus de biomasses agricoles dans les filières de la bioéconomie et stocker du carbone dans les sols : est-ce compatible ? - Paris - 7.12.2018

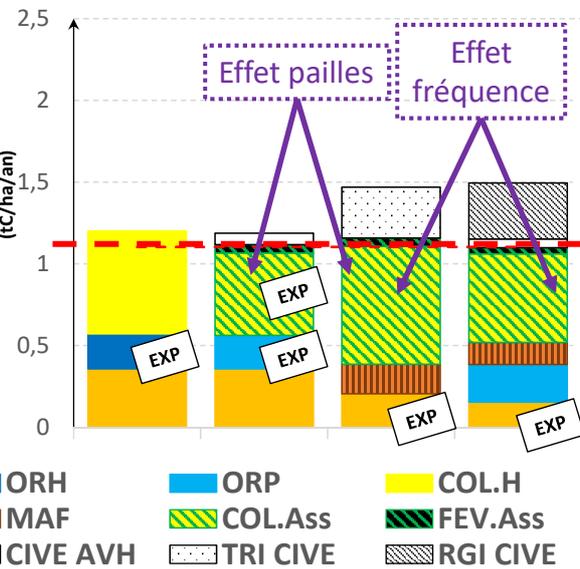
# Peut-on concilier exportations de biomasses non-alimentaires et stockage de carbone ?

SCOP Ferme 3.0



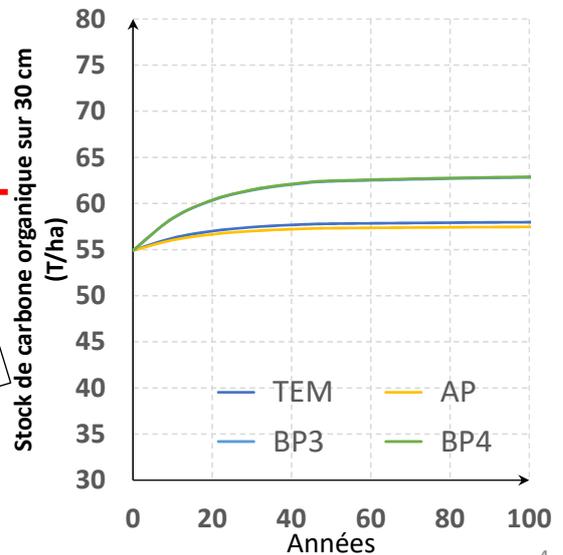
Corg initial :	55,65	t/ha
MO initiale	2,06	%
C minéralisé	1,1	t.ha <sup>-1</sup> .an <sup>-1</sup>
CIVE automne	3	t <sub>MS</sub> /ha
CIVE hiver	10	t <sub>MS</sub> /ha
Couvert ass.	0,8	t <sub>MS</sub> /ha

Carbone humifié (k1.m) apporté chaque année par les résidus de culture pour chaque scénario



- ORH
- MAF
- CIVE AVH
- ORP
- COL.Ass
- TRI CIVE
- COL.H
- FEV.Ass
- RGI CIVE

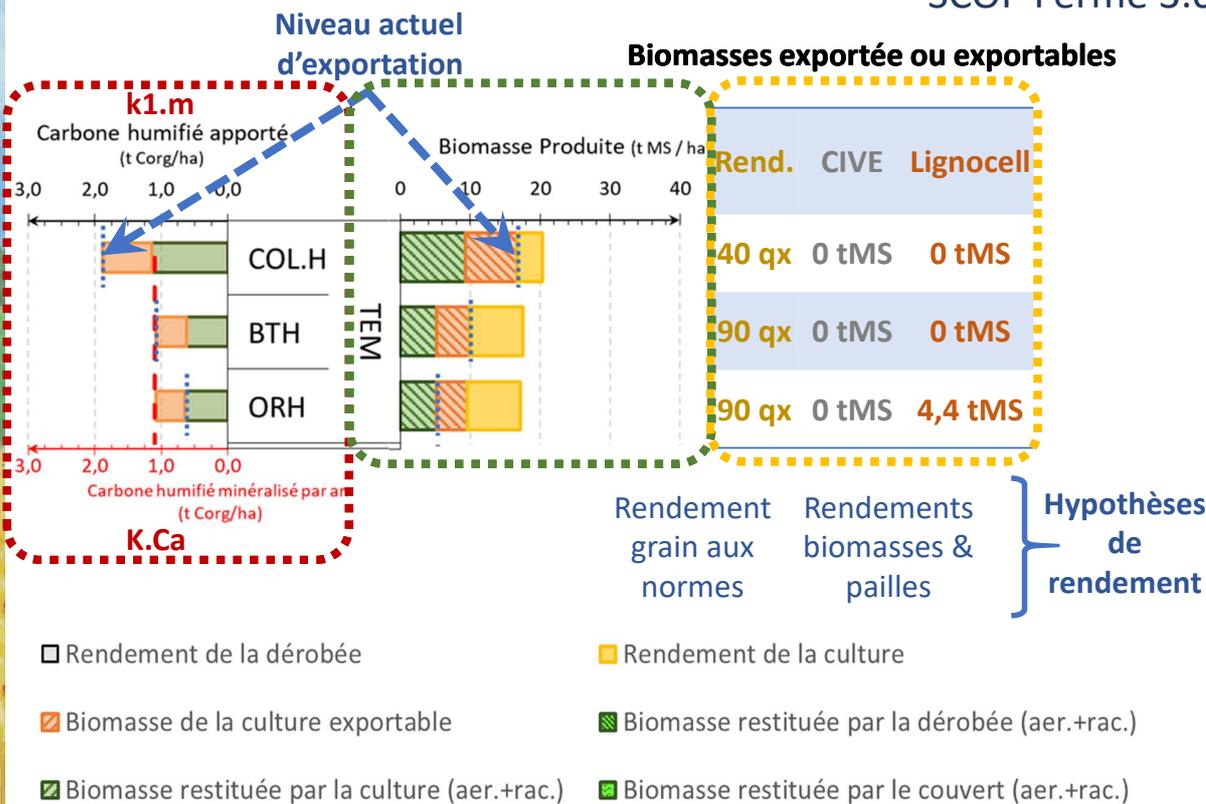
-- COS minéralisé (K.Ca) = 1,1 t<sub>Corg</sub>.ha<sup>-1</sup>



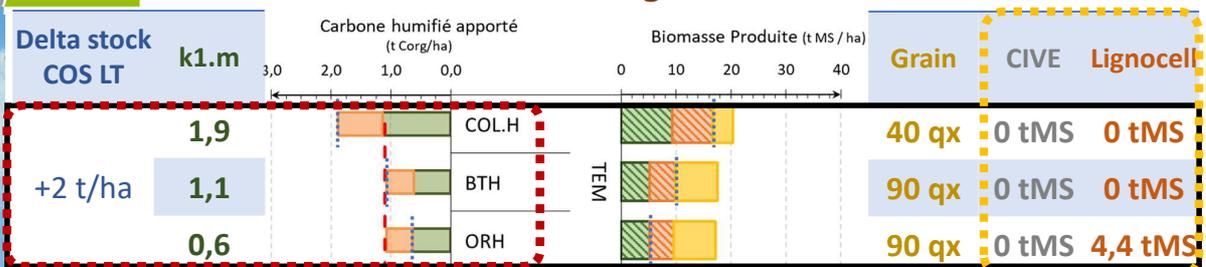
Colloque Valoriser plus de biomasses agricoles dans les filières de la bioéconomie et stocker du carbone dans les sols : est-ce compatible ? - Paris - 7.12.2018

# Peut-on concilier exportations de biomasses non-alimentaires et stockage de carbone ?

SCOP Ferme 3.0

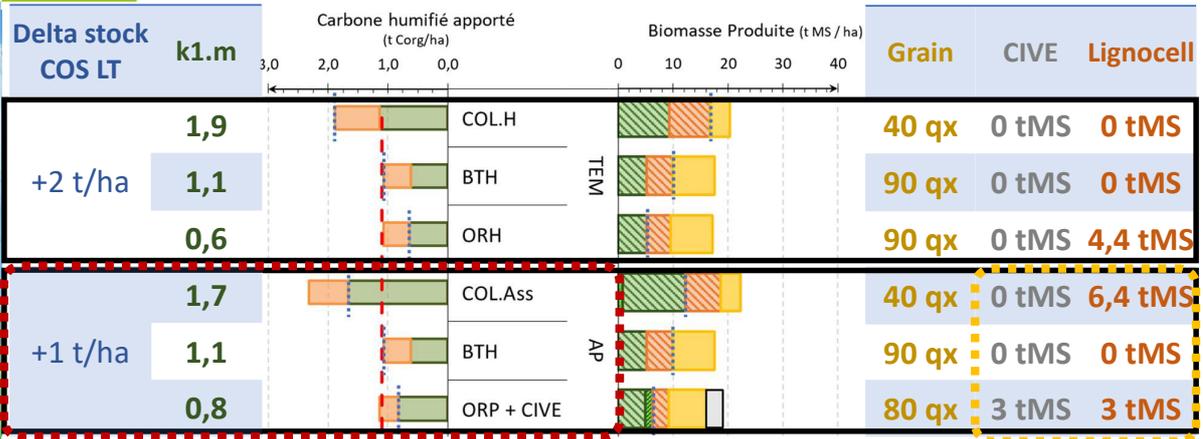


# Concilier biomasses et stockage de carbone ?



Stock ini : 56 t<sub>Corg</sub>/ha

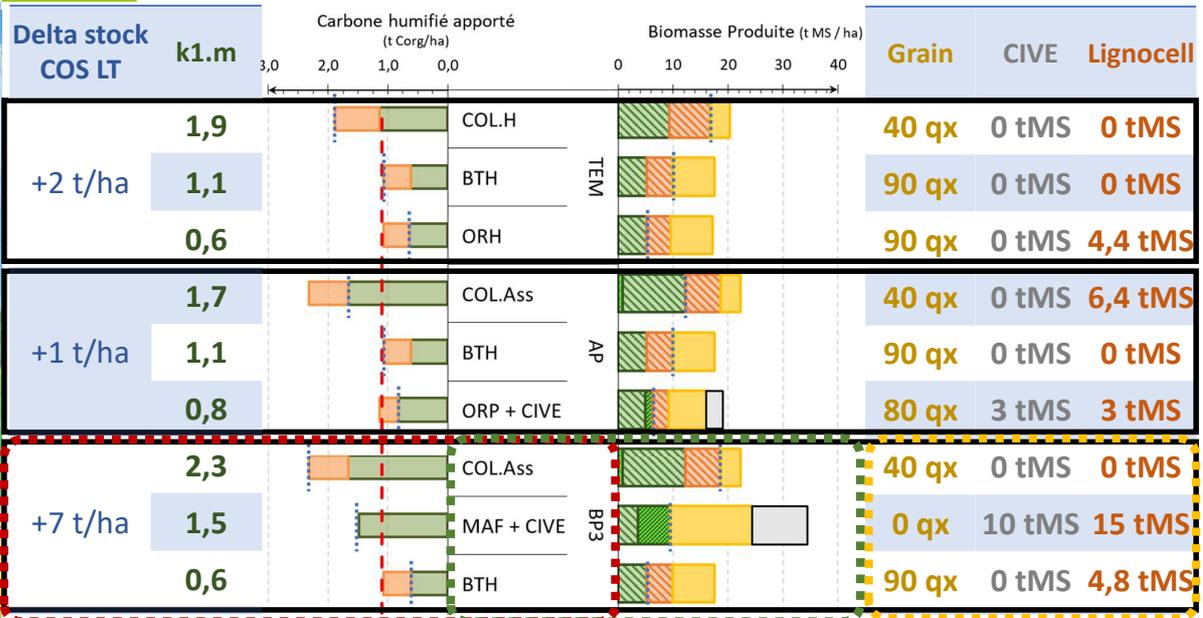
# PIVERT Concilier biomasses et stockage de carbone ?



Stock ini : 56 t<sub>Corg</sub>/ha

Carbone humifié minéralisé par an (t Corg/ha)

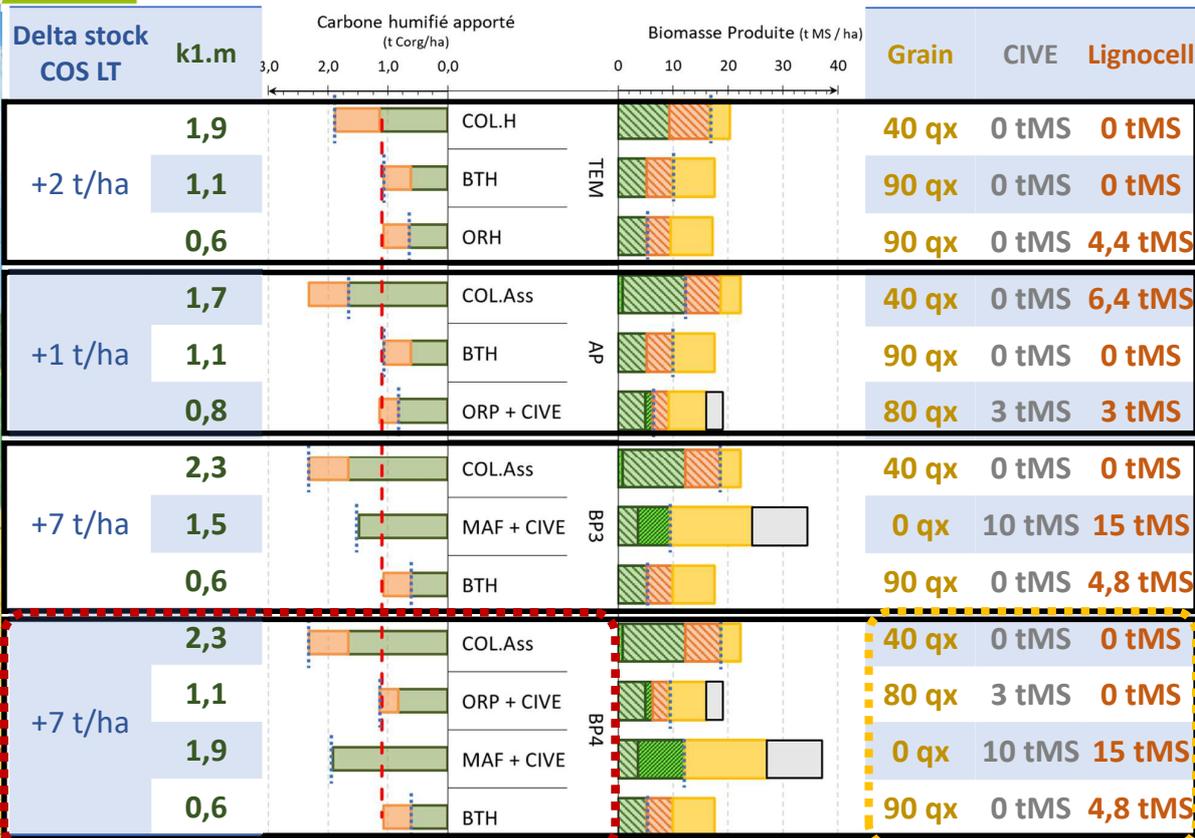
# PIVERT Concilier biomasses et stockage de carbone ?



Stock ini : 56 t<sub>Corg</sub>/ha

Carbone humifié minéralisé par an (t Corg/ha)

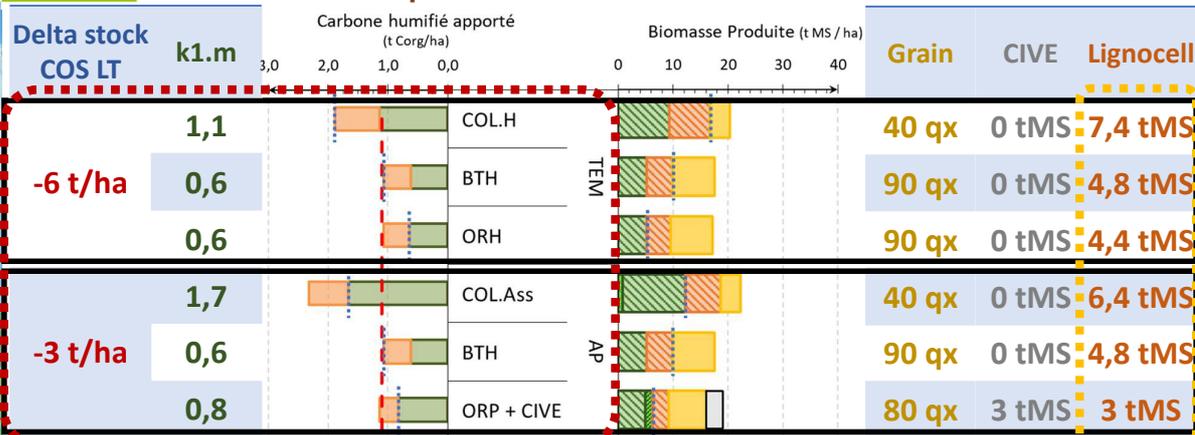
# PIVERT Concilier biomasses et stockage de carbone ?



Stock ini : 56 t<sub>Corg</sub>/ha

Carbone humifié minéralisé par an (t Corg/ha)

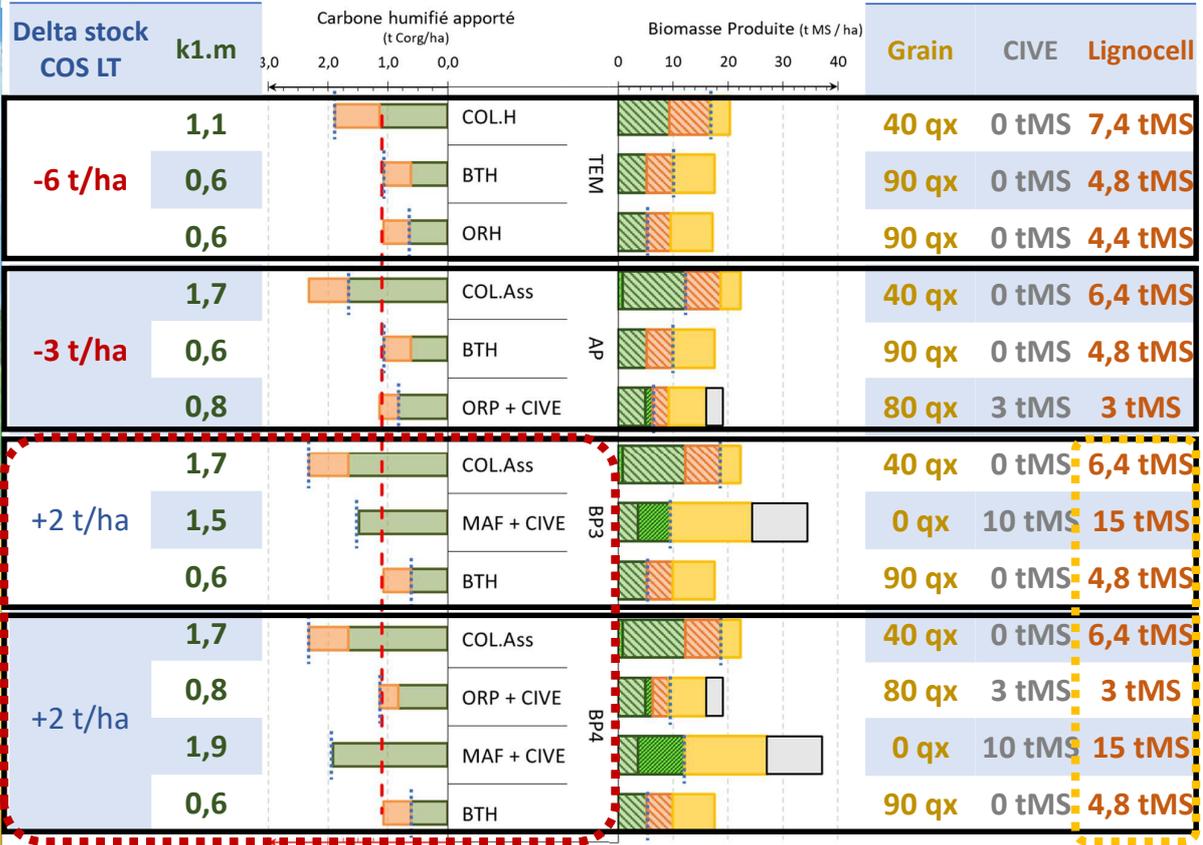
# PIVERT Et si tout est exporté ?



Stock ini : 56 t<sub>Corg</sub>/ha

Carbone humifié minéralisé par an (t Corg/ha)

# SAS PIVERT Et si tout est exporté ?

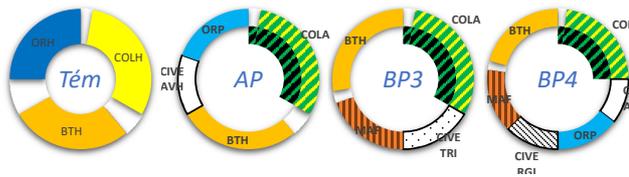


Stock ini : 56 t<sub>Corg</sub>/ha

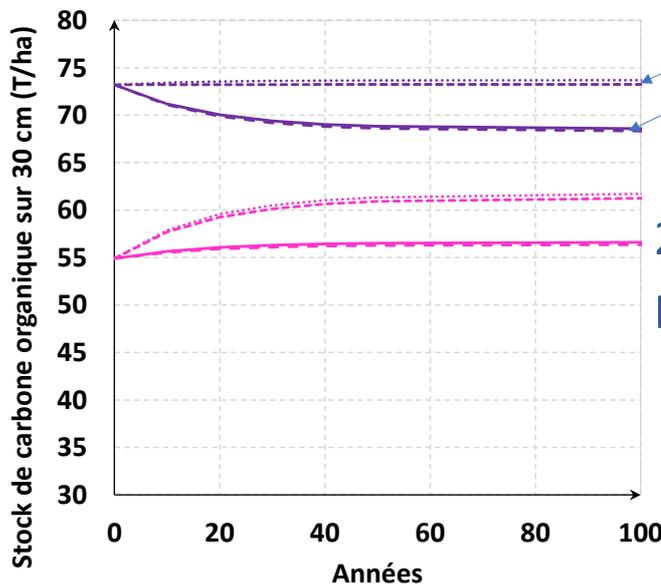
Carbone humifié minéralisé par an (t Corg/ha)

Colloque Valoriser plus de biomasses agricoles dans les filières de la bioéconomie et stocker du carbone dans les sols : est-ce compatible ? - Paris - 7.12.2018

# SAS PIVERT Et si on change de parcelle ?



	Argile (g/kg)	Calcaire (g/kg)	Da	Teneur Corg (g/kg)	C/N
Teneur plus forte	241	309	1,54	16	9,6
Sol initial	241	309	1,54	12	9,6



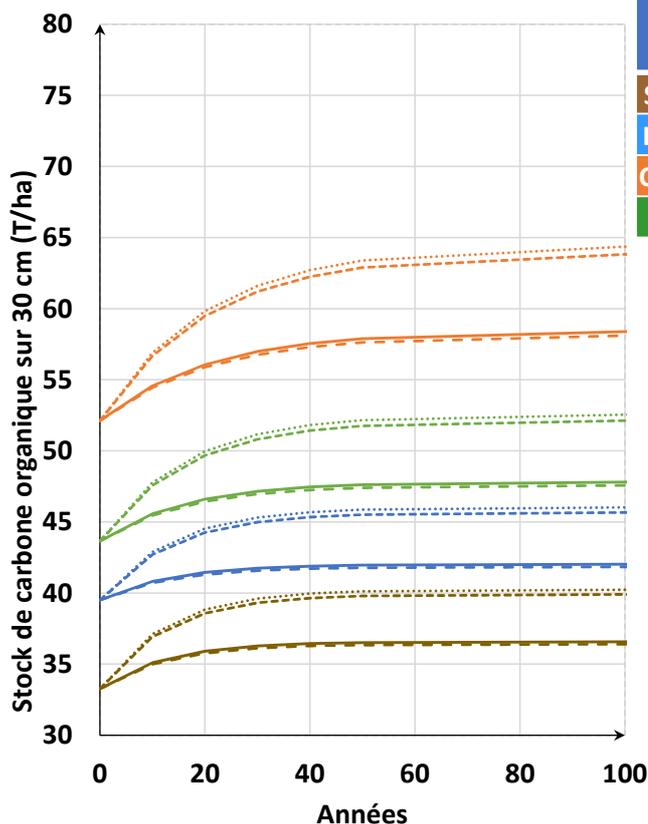
BP3 & BP4  
TEM & AP

2,06 %MO → 2,75 %MO

Mêmes hypothèses rdt

- Inversions de tendances
- Même classement des SdC
- Mêmes écarts

## Et on change de type de sol en région ?



	Argile (g/kg)	Calcaire (g/kg)	Da	Corg (g/kg)	C/N
Sabl. Lim. Pfd	90	80	1,4	8	8,4
Lim. Moy. Pfd	165	10	1,4	9,5	8,4
Cran. sur craie	110	600	1,35	13	8,4
Lim. Arg.	225	30	1,4	10,5	8,1

- Stockage partout

- Fortes entrées C humifié
  - Résidus du colza
  - Résidus de CI et CIVE (3 cultures en 2 ans)

➤ **Mêmes classements**

**Légères différences des ordres de grandeur des écarts**

## Et vis-à-vis de la teneur et de ses effets ?

- Exemple de la plateforme SYPPRE Picardie

**Système témoin**

betterave  
blé tendre  
pomme de terre  
blé tendre  
colza ou  
pois de conserve  
blé tendre

Corg initial :	39,9	t/ha
Corg initial :	9,5	g/kg
MO initiale	1,6	%
Argile :	180	g/kg
CaCO3 :	12,3	g/kg
DA :	1,4	-
C/N	10,6	-
<b>C minéralisé</b>	<b>1,5</b>	<b>t.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup></b>

*Simulation dans un limon moyen picard classique*

Plusieurs leviers mis en place dont :

- Plus de couverts (associé / CI)
- Maïs pour la biomasse restituée
- P.R.O. pour N et C org



## • Exemple de la plateforme SYPPRE Picardie

### Système témoin

betterave  
blé tendre  
pomme de terre  
blé tendre  
colza ou  
pois de conserve  
blé tendre



<b>Corg initial :</b>	<b>39,9</b>	<b>t/ha</b>
<b>MO initiale</b>	1,6	%
<b>C minéralisé</b>	1,5	t.ha <sup>-1</sup> .an <sup>-1</sup>

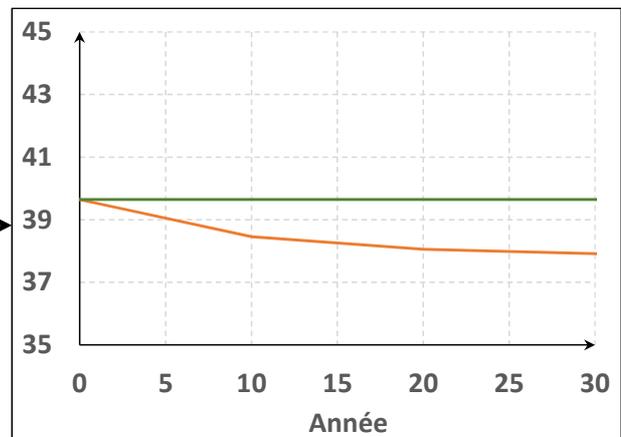
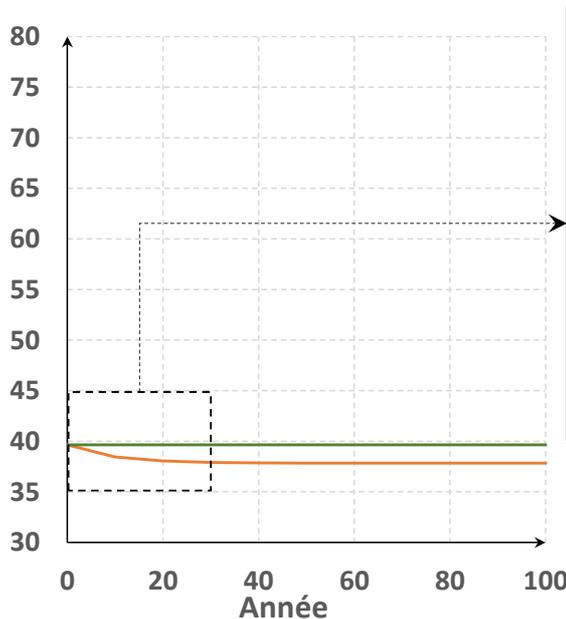
<b>Rdt Cultures</b>	Potentiel Santerre
<b>Pailles</b>	Aucune exp.
<b>Climat</b>	Moyenne 20 ans
<b>Bett. réc. tardive</b>	1 rotation/3



Crédit photos : D. Gassen

## SYPPRE Picardie

Stock de carbone organique sur 30 cm (T/ha)



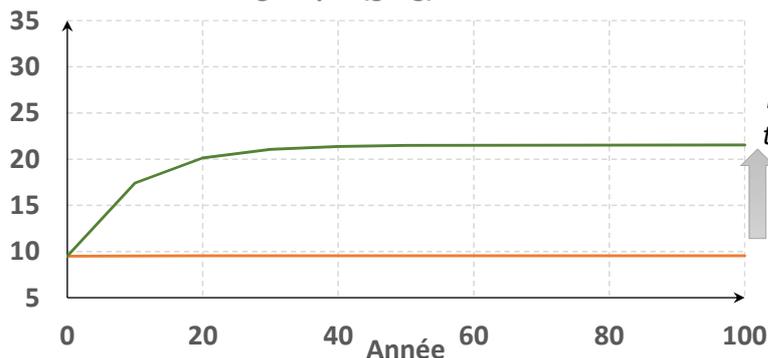
Écarts à 30 ans :

Stock Corg = + 1,7 t<sub>Corg</sub>.ha<sup>-1</sup>

Flux N min = + 18 N.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>

— Systeme Témoin — Prototype Innovant

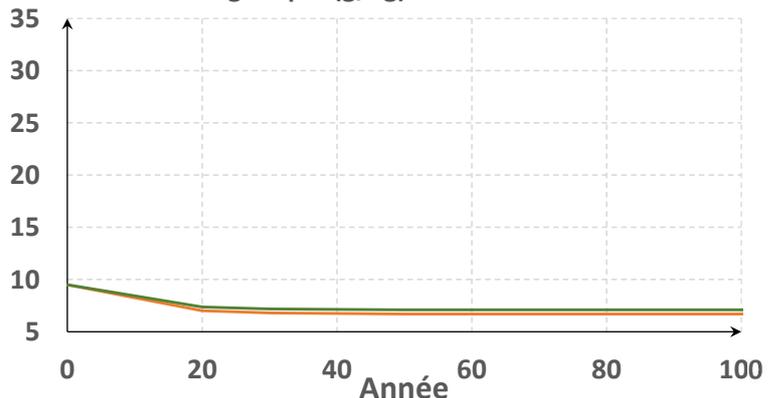
Teneur en carbone organique (g/kg) sur la couche travaillée



Mélange sur 5cm pour un travail du sol avec un outil à dents sur 10cm

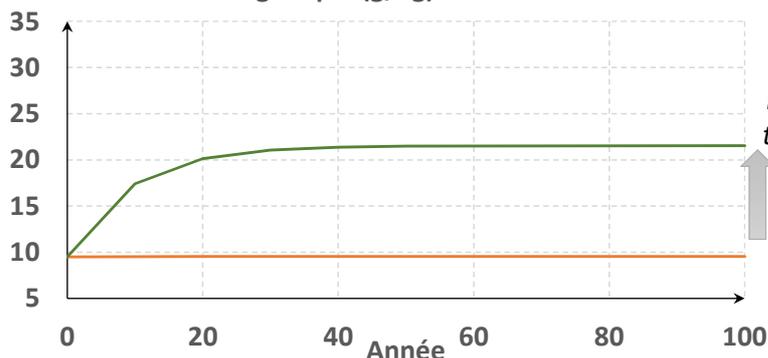
Labour 25cm

Teneur en carbone organique (g/kg) sur la couche non-travaillée



— Système de référence  
— Prototype Innovant

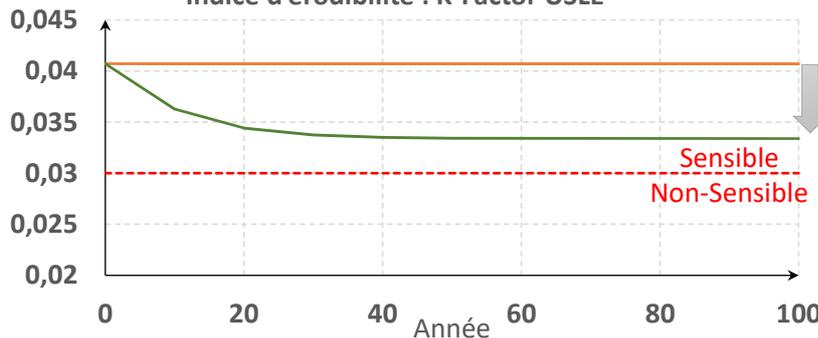
Teneur en carbone organique (g/kg) sur la couche travaillée



Mélange sur 5cm pour un travail du sol avec un outil à dents sur 10cm

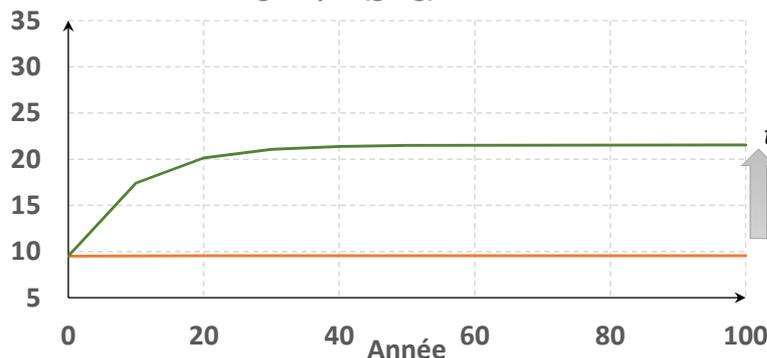
Labour 25cm

Indice d'érodibilité : K-Factor USLE



Sensible  
Non-Sensible

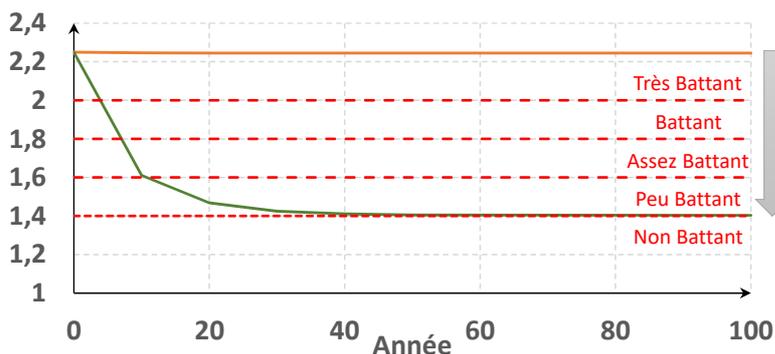
Teneur en carbone organique (g/kg) sur la couche travaillée



Mélange sur 5cm pour un travail du sol avec un outil à dents sur 10cm

Labour 25cm

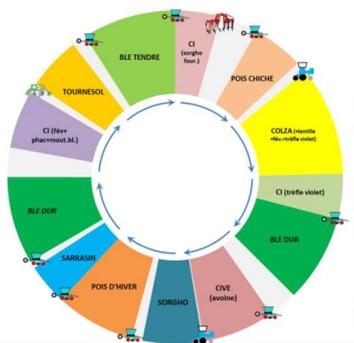
Indice de Battance



## Quel impact des CIVE ou du digestat sur le C org du sol ?

### Coteaux argilo-calcaires du Lauragais

« Produire plus avec de la qualité et sur un sol fertile (↘ érosion) »



ETP moyenne annuelle mm	Pluies annuelles mm	Température moyenne annuelle °C
950,3	625,6	13,9

Stock initial très faible en coteaux

- Erosion lors de fortes pluies
- Horizons pédologiques argilo-calcaires appauvris

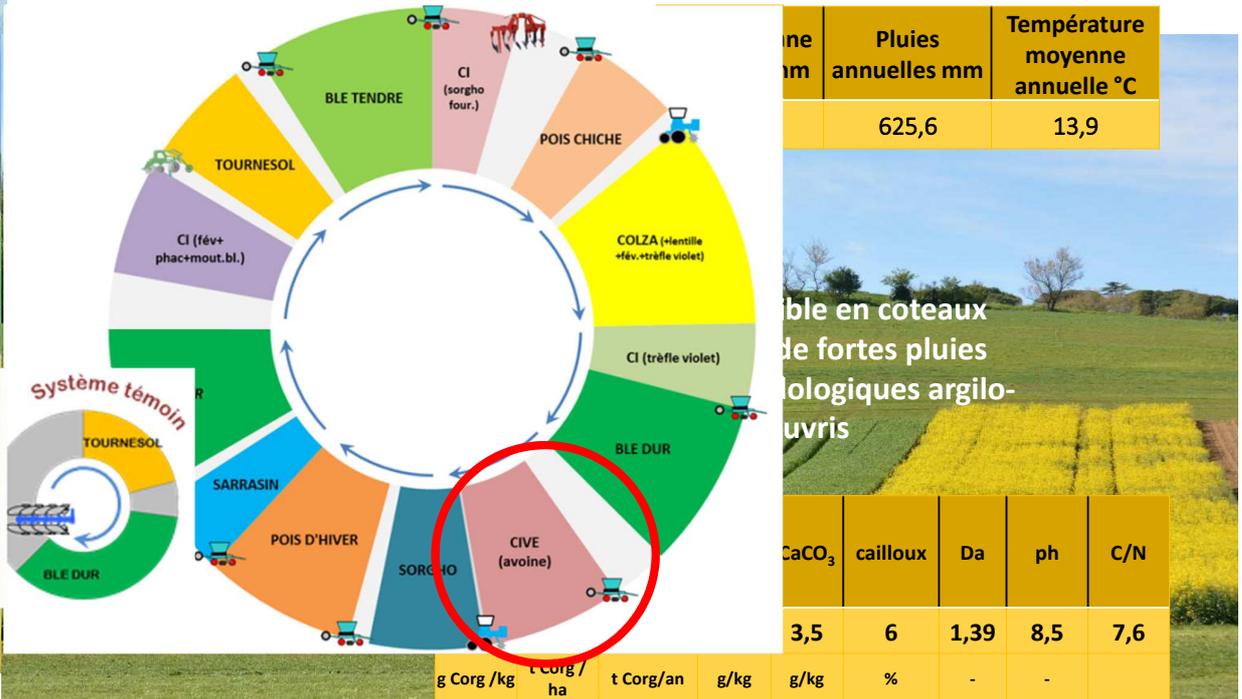


Teneur C org ini	Stock C org ini	Minéralisation carbone K.ca	argile	CaCO <sub>3</sub>	cailloux	ph	C/N
7,6	38.32	1.1	280	3,5	6	8,5	7,6
g Corg /kg	t Corg / ha	t Corg/an	g/kg	g/kg	%	-	

# Quel impact des CIVE ou du digestat sur le C org du sol ?

## Coteaux argilo-calcaires du Lauragais

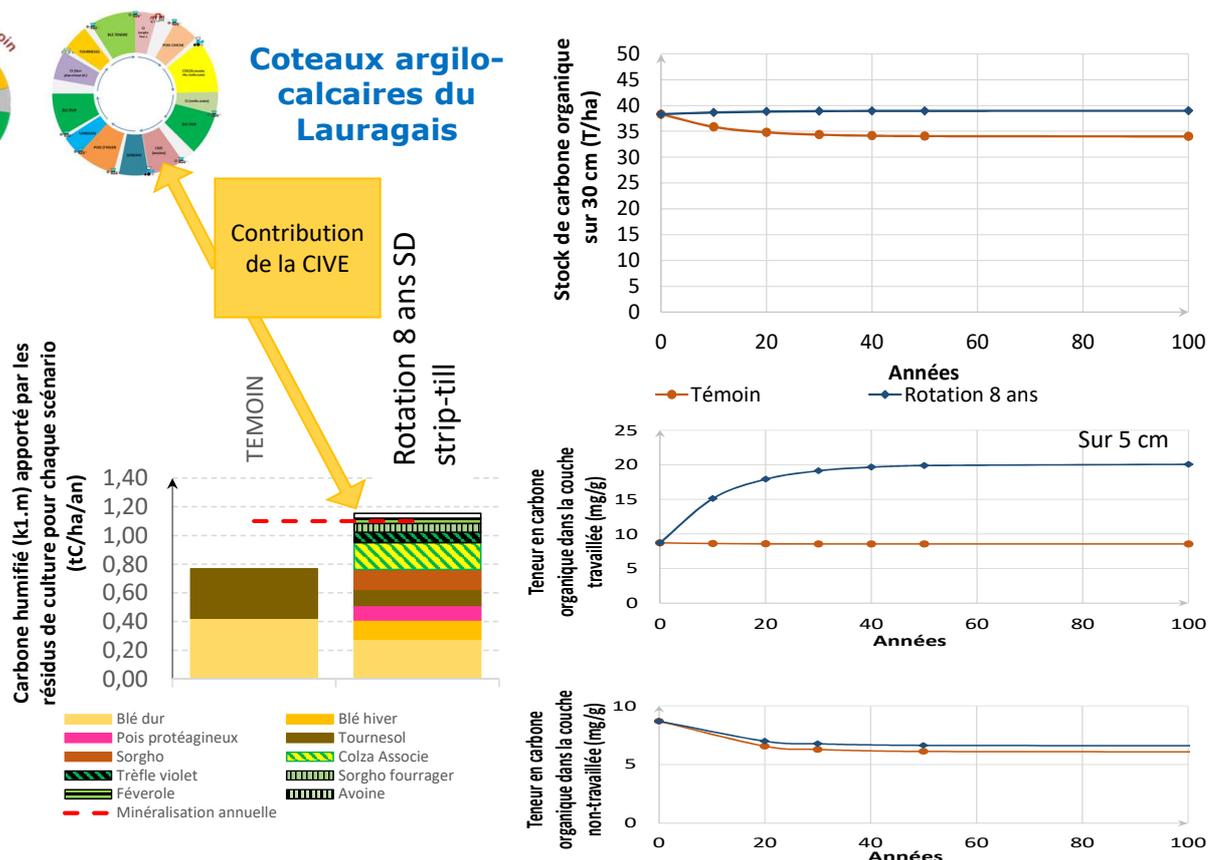
« Produire plus avec de la qualité et sur un sol fertile (↘ érosion) »



Colloque Valoriser plus de biomasses agricoles dans les filières de la bioéconomie et stocker du carbone dans les sols : est-ce compatible ? - Paris - 7.12.2018

# Quel impact des CIVE ou du digestat sur le C org du sol ?

## Coteaux argilo-calcaires du Lauragais



Colloque Valoriser plus de biomasses agricoles dans les filières de la bioéconomie et stocker du carbone dans les sols : est-ce compatible ? - Paris - 7.12.2018

# Quel impact des CIVE ou du digestat sur le C org du sol ?

## Les digestats utilisables

	ISMO %MO	MO %MB	N total g/kg	N-NH4 g/kg	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> g/kg	K <sub>2</sub> O g/kg
776966: lisier porc+ déchets verts+CIVES+déchets abattoir	71	3.7	4.2	1.29 (31%)	1.6	4.5
777054: CIVES+ mâles maïs semence	62	4.3	5.4	3.24 (60%)	3.1	2.0
1: Boue (35%) et déchet (20%) d'IAA+ déchets alimentaires (20%)+effluents d'élevages (20%)	56	1.8	4.3	3.1 (72%)	2.52	0.99
2: Lisier bovins (22%) et canard (50%) + CI (12%)+déchets IAA (16%)	67	3.9	4.5	2.29 (51%)	1.47	3.15
3: Fumier+un peu lisier (75%)+ boue IAA (8%)+déchets silos (11%)+Herbe et maïs ensilé (6%)	68	9.2	6	2.1 (35%)	3.6	4.5

1,2,3 digestats Vadimethan 2014

552 kg/ha  
453 kg/ha  
90u/4.2=21tMB/ha  
90u/5.4=17tMB/ha

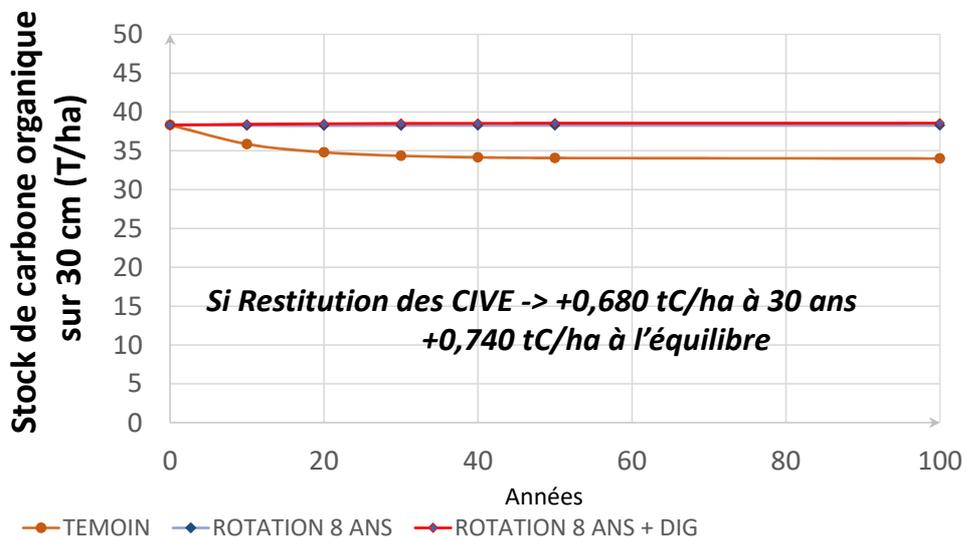
26/01/2019

# Quel impact des CIVE ou du digestat sur le C org du sol ?

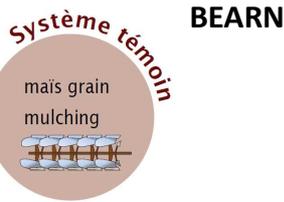
## Retours de digestats :

Coteaux argilo-calcaires du Lauragais

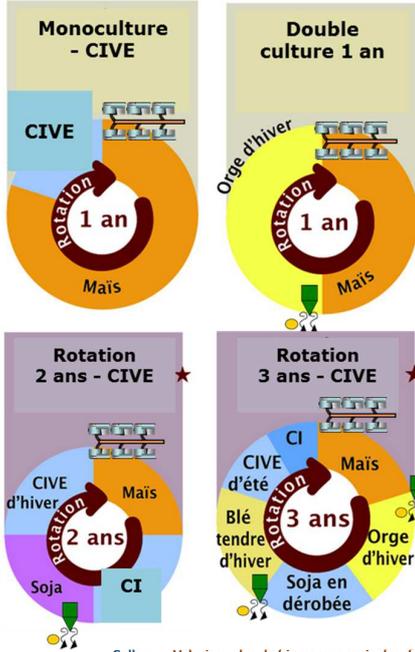
Apport 90u Ntotal digestat sur CIVE



# Quel impact des CIVE ou du digestat sur le C org du sol ?



ETP moyenne annuelle mm	Pluies annuelles mm	Température moyenne annuelle °C
868	1069,9	13,5



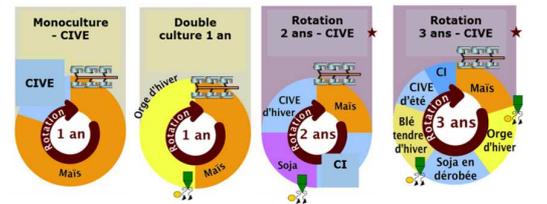
Teneur C org ini	Stock C org ini	Minéralisation carbone	argile	CaCO <sub>3</sub>	cailloux	ph	Azote total
26,6	96	1.11	204	0	0,31	5,74	1,8
g Corg /kg	t Corg /ha	t Corg/an	g/kg	g/kg	%	-	g/kg

Stock initial très élevé  
MOS récalcitrante à fort C/N (14,7)  
pH très acide <6  
Par ailleurs, climat propice à de très forts rendements

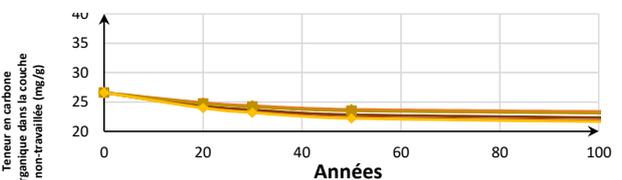
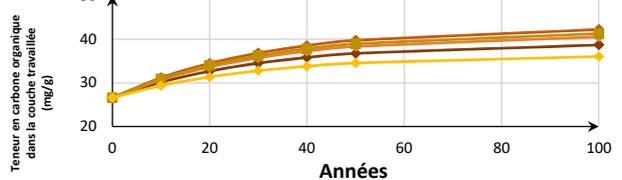
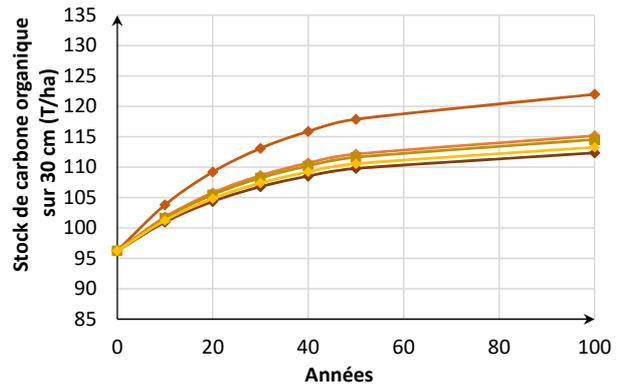
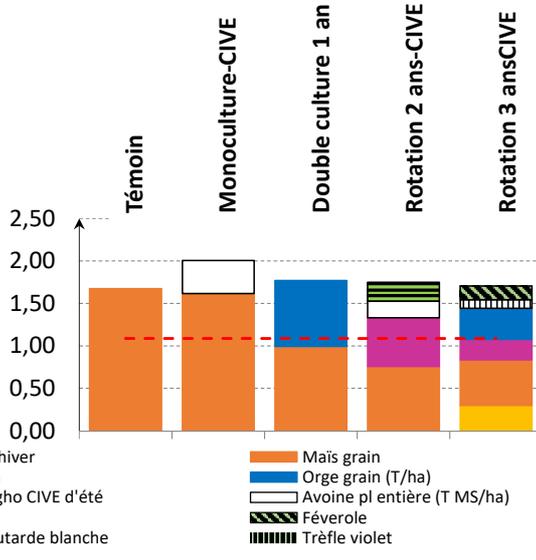
Colloque Valoriser plus de biomasses agricoles dans les filières de la bioéconomie et stocker du carbone dans les sols : est-ce compatible ? - Paris - 7.12.2018

# Quel impact des CIVE ou du digestat sur le C org du sol ?

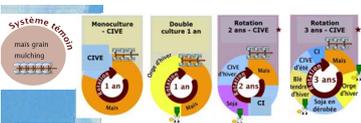
## BEARN



Carbone humifié (k1.m) apporté par les résidus de culture pour chaque scénario (tC/ha/an)



Colloque Valoriser plus de biomasses agricoles dans les filières de la bioéconomie et stocker du carbone dans les sols : est-ce compatible ? - Paris - 7.12.2018



# Quel impact des CIVE ou du digestat sur le C org du sol ?

## BEARN

Delta stock COS LT		k1.m		Carbone humifié apporté (t Corg/ha)		Biomasse Produite (t MS / ha)			Grain	CIVE	Lignocell
+pailles	- pailles	+ p.	- p.	←	→	Grain	CIVE	Lignocell			
+17 t/ha	-5,5 t/ha	1,7	0,9	1,5	1,0	MGr	116 qx	0 tMS	7,2 tMS		
+27 t/ha	+5,3 t/ha	2,0	1,3	1,5	1,0	MGr+CIVE	112 qx	5,5 tMS	6,9 tMS		
+20 t/ha	-2,4 t/ha	1,8	1,0	1,5	1,0	MGr/O	69 qx 60 qx	0 tMS	4,3 tMS 3,1 tMS		
+19 t/ha	+0,9 t/ha	1,9	1,2	1,5	1,0	CIVE+MGr	105 qx	5,5 tMS	6,5 tMS		
		1,6	1,1	1,5	1,0	/Cl+SOJr	40 qx	0 tMS	4,4 tMS		
+18 t/ha	-0,8 t/ha	2,1	1,4	1,5	1,0	Cl+MGr	112 qx	0 tMS	6,9 tMS		
		1,8	1,1	1,5	1,0	/O+SOJr	85 qx 25 qx	0 tMS	4,3 tMS 2,7 tMS		
		1,2	0,8	1,5	1,0	/Br+CIVE	75 qx	5,5 tMS	4,0 tMS		

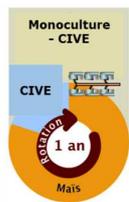
3,0 2,0 1,0 0,0  
Carbone humifié minéralisé par an (t Corg/ha)

# Quel impact des CIVE ou du digestat sur le C org du sol ?

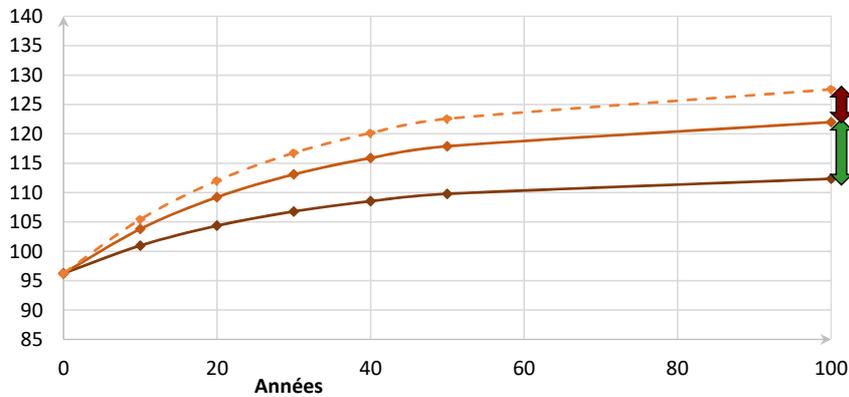
## BEARN Retours de digestats :

Apport 90u Ntotal digestat sur CIVE → apport annuel

Mono culture de maïs grain (MGr)  
CIVE: avoine



Stock de carbone organique sur 30 cm (T/ha)



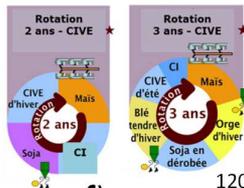
◆ TEMOIN    ◆ monoculture maïs grain + CIVE    ◆ monoculture maïs grain + CIVE + DIG

Impact digestat  
Impact CIVE

# Quel impact des CIVE ou du digestat sur le C org du sol ?

BEARN

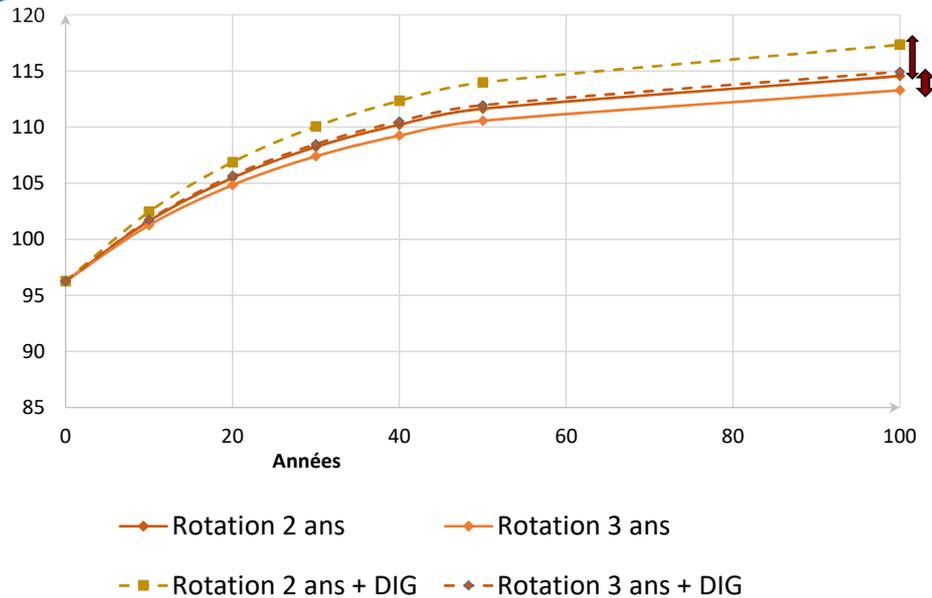
Retours de digestats :



Stock de carbone organique sur 30 cm (T/ha)

Apport 90 ou Ntotal digestat sur CIVE

Impact digestat



Colloque Valoriser plus de biomasses agricoles dans les filières de la bioéconomie et stocker du carbone dans les sols : est-ce compatible ? - Paris - 7.12.2018

SAS PIVERT

## Evaluer les impacts des SdC sur le carbone du sol à long terme : que peut-on retenir ?..

- Examen des stocks de Corg pour comparer les performances de SdC différents :

Attention :

- les valeurs absolues des Stocks Corg atteints pour une date donnée (tx ou à l'équilibre) et les  $\Delta$ Stocks entre t0 et tx **varient sensiblement en fonction des caractéristiques du milieu sol x climat**  
« dépendance k.Ca »

En particulier, **forte dépendance vis-à-vis de la valeur du stock initial**, dont la détermination mérite une grande rigueur (mesures de terrain) + approfondissements nécessaires pour paramétrer Ca/Cs (Cactif/Cstable)

- Les **écarts entre SdC comparés** sur les stocks atteints ou les  $\Delta$ Stocks varient aussi avec ces facteurs, mais de façon plus atténuée
- **Le classement des SdC sur ces critères est conservé d'un milieu à un autre**

Colloque Valoriser plus de biomasses agricoles dans les filières de la bioéconomie et stocker du carbone dans les sols : est-ce compatible ? - Paris - 7.12.2018

## Evaluer les impacts des SdC sur le carbone du sol à long terme : que peut-on retenir ?..

- **Analyse des entrées de carbone humifié (k1.m)**
  - **Ce sont les entrées de Corg qui conditionnent le classement des SdC**  
= leviers d'optimisation de la gestion de l'état organique du sol
  - => **Développer le raisonnement stratégique :**
    - de la **production primaire de biomasses à l'échelle globale du système** : maximiser l'occupation du sol et l'utilisation de l'énergie solaire par la photosynthèse
    - de la **gestion des parts de cette biomasse qui reviennent au sol**
      - Exemple : Exportation de pailles pas totalement compensées par un couvert associé (colza), mais peut l'être à l'échelle de la rotation par une plus grande couverture du sol (CIVE en période hivernale & développement racinaire)* (nature /quantité)
    - de la **gestion des apports de PRO**, en particulier digestats de méthanisation



## Evaluer les impacts des SdC sur le carbone du sol à long terme : que peut-on retenir ?..

- **Concilier biomasses non-alimentaires et stockage Corg, c'est possible concrètement dans certains cas !**  
+/- « naturellement » : Sols argilo-calcaires x sdC Scop : ++  
Limons x Sdc Betteraviers mixte s : ??
- **Se préoccuper uniquement du stock de Corganique du sol, est-ce judicieux ?**  
importance de la teneur en C organique du sol vis-à-vis de ses propriétés physiques (résistance à la battance, à l'érosion)  
=> **considérer aussi l'effet des systèmes sur la teneur en C organique du sol**  
Notamment, 1<sup>er</sup> effet de la réduction de profondeur de travail du sol = concentration du Corg en surface
- **Et au-delà du Corg...**  
examiner les impacts de systèmes de culture sur le carbone du sol appelle assez logiquement à **se préoccuper des questions relatives à la gestion de l'azote du et dans le sol**

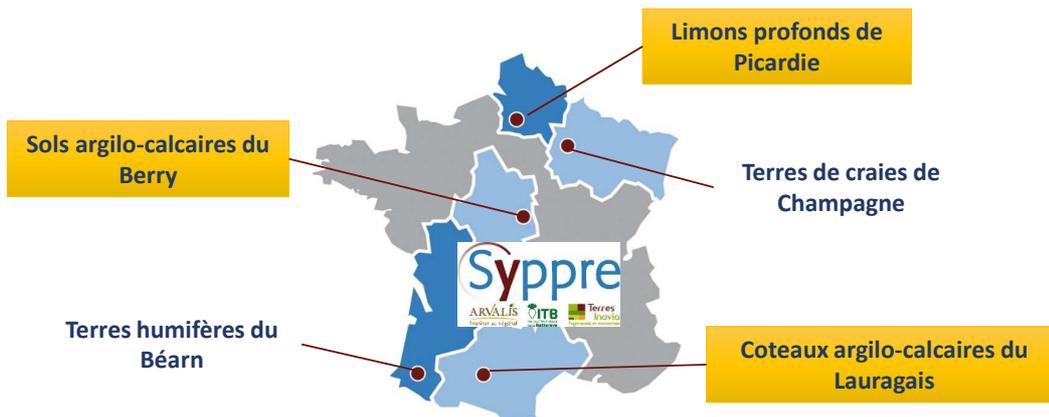


# Evaluation environnementale de systèmes de culture avec le modèle STICS

Simulations de scénarios de systèmes témoins vs innovants

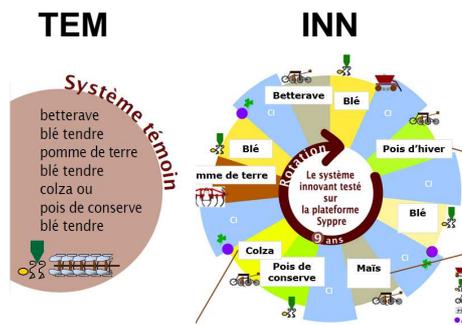
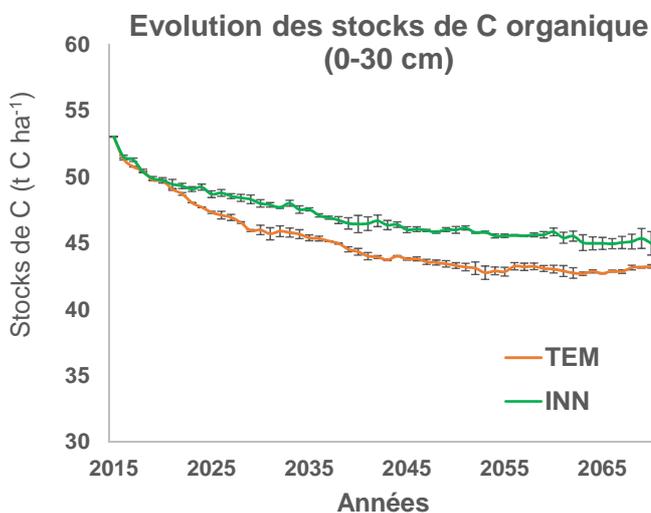


Stockage de carbone & pertes azotées



## Limon profond de Picardie

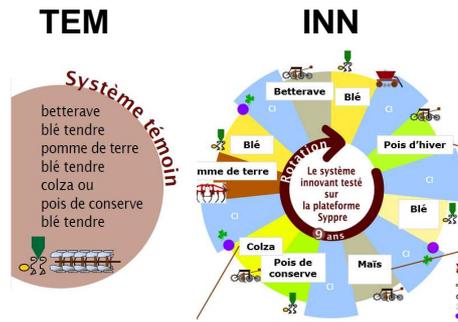
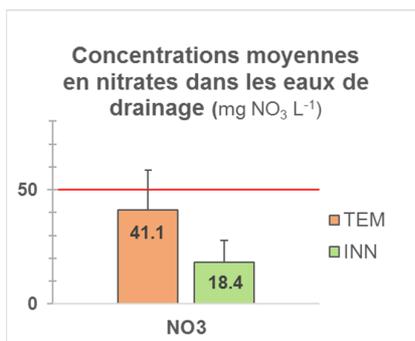
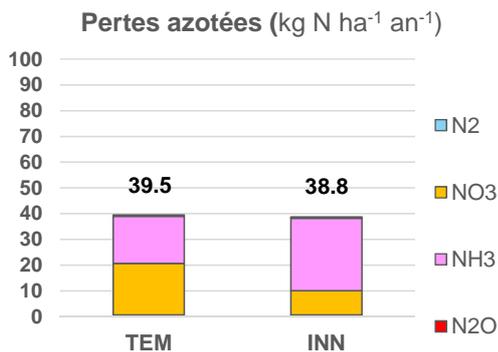
### Evolution des stocks de C



	$\Delta$ final INN-TEM (t C ha <sup>-1</sup> )
<b>STICS</b>	+ 1.7
<b>AMG</b>	+ 1.0

# Limons profonds de Picardie

## Pertes azotées et bilan GES

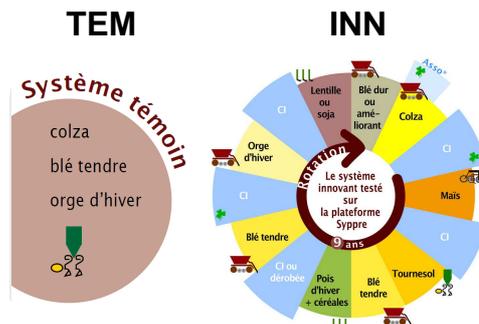
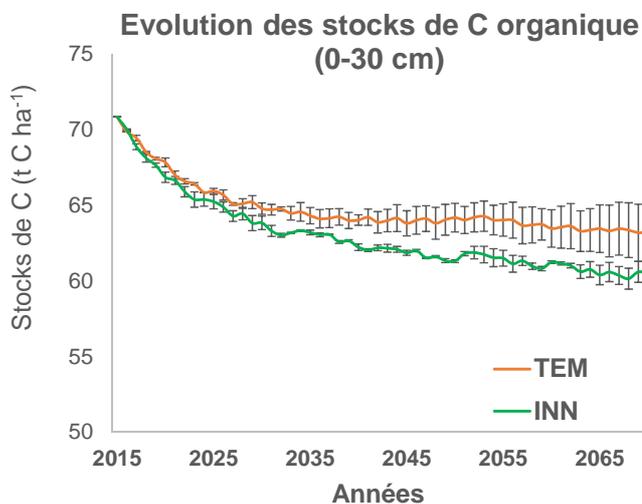


	TEM	INN
N minéralisé (kg N ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup> )	102	142
Nmin apporté (kg N ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup> )	121	88

INN vs TEM (kg eqCO <sub>2</sub> ha <sup>-1</sup> )	
Stock de C (0-30 cm)	-6387
Emissions N <sub>2</sub> O directes	358
Emissions N <sub>2</sub> O indirectes	433
<b>Bilan GES</b>	<b>-5596</b>
<b>Bilan GES annuel</b>	<b>-102</b>

# Argilo-calcaires du Berry

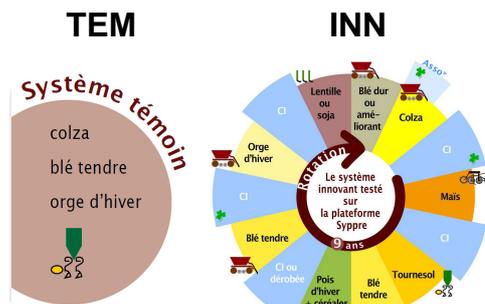
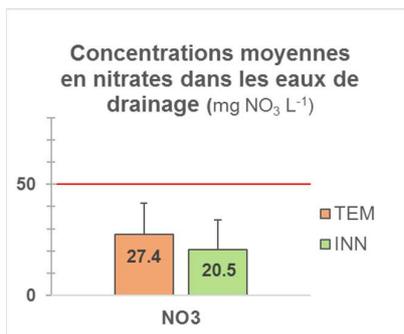
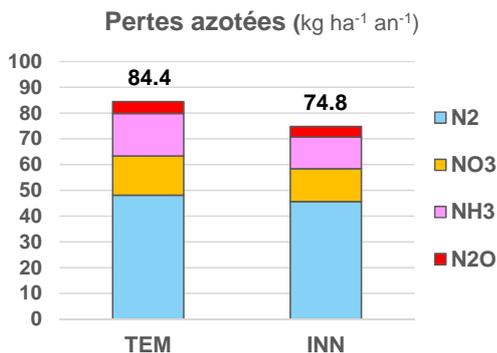
## Evolution des stocks de C



	Δfinal INN-TEM (t C ha <sup>-1</sup> )
<b>STICS</b>	- 2.8
<b>AMG</b>	- 1.9

# Argilo-calcaires du Berry

## Pertes azotées et bilan GES

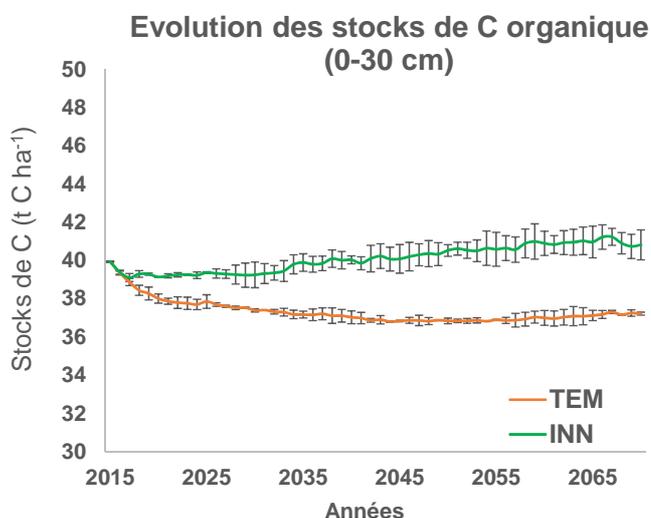


	TEM	INN
<b>N minéralisé (kg N ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>)</b>	145	143
<b>Nmin apporté (kg N ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>)</b>	171	112

INN vs TEM (kg eqCO2 ha <sup>-1</sup> )	
Stock de C (0-30 cm)	+10094
Emissions N <sub>2</sub> O directes	-10790
Emissions N <sub>2</sub> O indirectes	-1387
<b>Bilan GES</b>	<b>-2083</b>
<b>Bilan GES annuel</b>	<b>-38</b>

# Coteaux du Lauragais

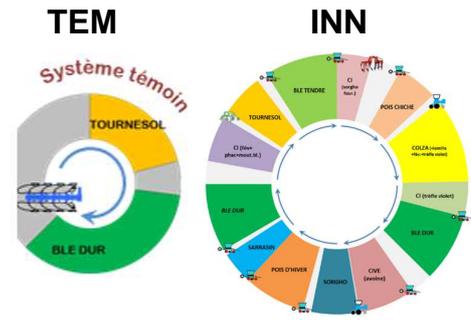
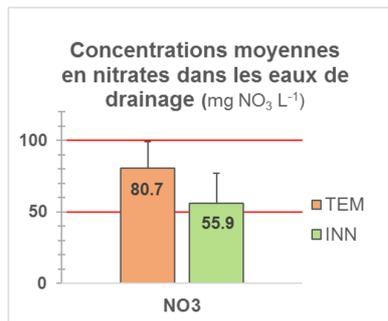
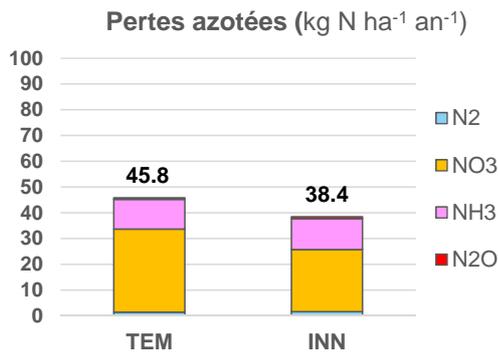
## Evolution des stocks de C



	<b>Δfinal INN-TEM (t C ha<sup>-1</sup>)</b>
<b>STICS</b>	<b>+ 3.6</b>
<b>AMG</b>	<b>+ 4.8</b>

# Coteaux du Lauragais

## Pertes azotées et bilan GES



	TEM	INN
<b>N minéralisé (kg N ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>)</b>	48	97
<b>Nmin apporté (kg N ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>)</b>	110	97

INN vs TEM (kg eqCO <sub>2</sub> ha <sup>-1</sup> )	
Stock de C (0-30 cm)	-13189
Emissions N <sub>2</sub> O directes	2003
Emissions N <sub>2</sub> O indirectes	-1275
<b>Bilan GES</b>	<b>-12461</b>
<b>Bilan GES annuel</b>	<b>-227</b>

# Conclusion

## Simulations de scénarios avec STICS

✓ **3 situations différentes :**

- Picardie : ↘ stocks C avec INN > TEM
- Berry : ↘ stocks C avec INN < TEM
- Lauragais : ↗ stocks C avec INN > TEM

✓ **Systèmes innovants : meilleurs bilans GES**

- Compromis entre stockage de C et pertes N
- Moins d'intrants et pertes azotées
- Meilleure fourniture en N (2/3)

✓ **STICS et AMG**

- Simulations de stocks de C cohérentes
- STICS => bilan plus complet mais modèle plus complexe
- 2 modèles complémentaires qui évoluent conjointement

# Merci pour votre attention

## Remerciements à :

*AS Perrin, B. Mary, S. Cadoux, S. Marsac, R. Clément, M. Tison,  
et aux équipes chargées des suivis des plateformes  
expé Syppre et Réseau de Sites Démonstrateurs IAR*

*Colloque Valoriser plus de biomasses agricoles dans  
les filières de la bioéconomie et stocker du carbone  
dans les sols : est-ce compatible ? - Paris - 7.12.2018*

Avec le soutien financier



Picardie Innovations Végétales,  
Enseignements et  
Recherches Technologiques



Partenaires scientifiques  
et techniques

