

Stockage de C dans les sol



Effets des digestats

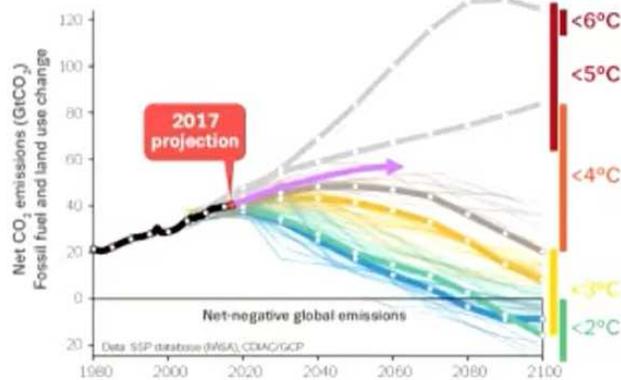
L. Vieublé Gonod (AgroParisTech)



Stockage de C dans les sol

- Stockage de C dans les sols et changement climatique
- MO (C) des sols
- Stockage de C dans les sols
- Comment mesurer et prédire les stocks de C dans les sols ?
- Cartographie des stocks de C dans le monde et en France
- Facteurs de variation des stocks de C dans les sols
- Comment augmenter les stocks de C dans les sols cultivés ?
 - Effet des pratiques : TD
 - Quelques exemples complémentaires
- Avec quelle efficacité ? Evolution des stocks de C au cours du temps
- Stockage de C vs émissions de GES ?
- Limites et compromis

Stockage de C dans les sols et changement climatique

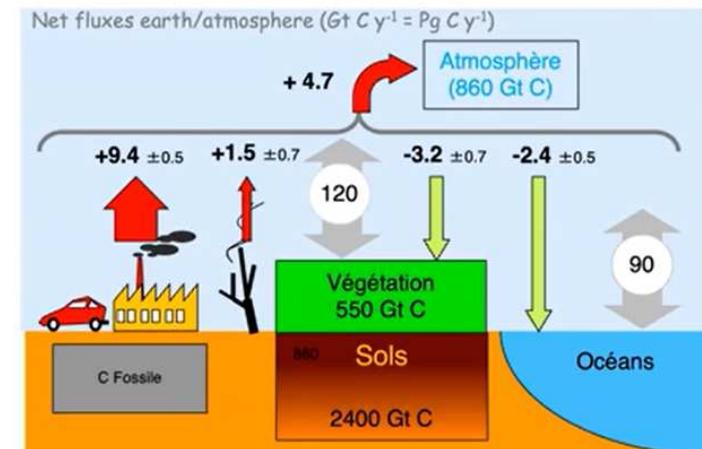


- ↪ Réduction des émissions insuffisante
- ↪ Nécessité de mettre en place des stratégies de stockage de C
- ↪ **Une des solutions : stockage de C dans les sols**

<http://www.globalcarbonproject.org>

Stockage de C dans les sols et changement climatique

- Flux et stocks de C des sols à l'échelle planétaire



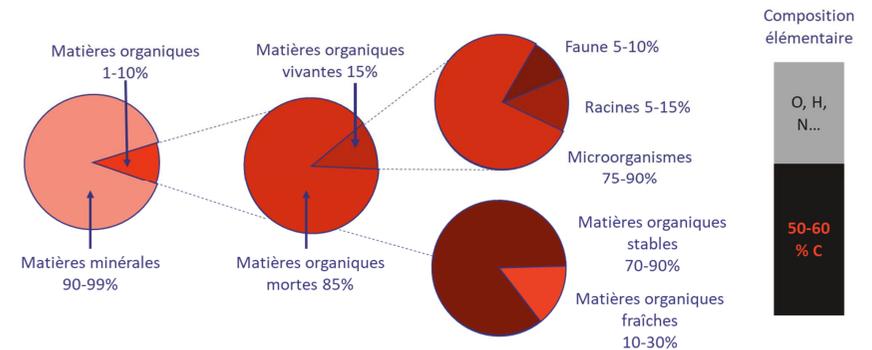
Valeurs moyennes pour 2009-2018 (Le Quéré et al., 2018)
D'après Balesdent (1996)

Stockage de C dans les sols

- Stockage de C dans les sols et changement climatique
- **MO (C) des sols**
- Stockage de C dans les sols
- Comment mesurer et prédire les stocks de C dans les sols ?
- Cartographie des stocks de C dans le monde et en France
- Facteurs de variation des stocks de C dans les sols
- Comment augmenter les stocks de C dans les sols cultivés ?
 - Effet des pratiques : TD
 - Quelques exemples complémentaires
- Avec quelle efficacité ? Evolution des stocks de C au cours du temps
- Stockage de C vs émissions de GES ?
- Limites et compromis

Matières organiques des sols

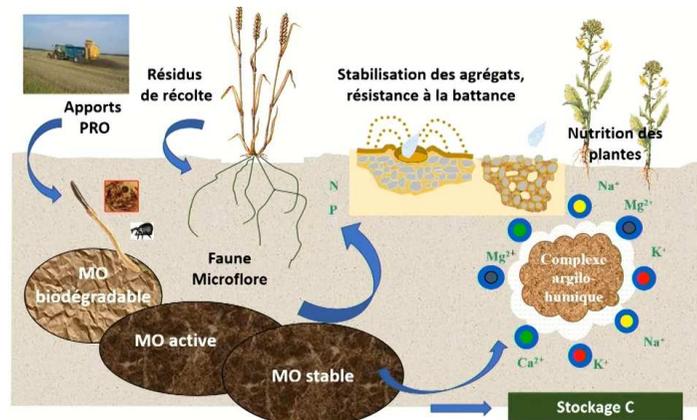
➤ Proportions et composition élémentaire des MO dans les sols



D'après Van-Camp et al. (2004)

Matières organiques des sols

➤ Importance de la MO dans les sols



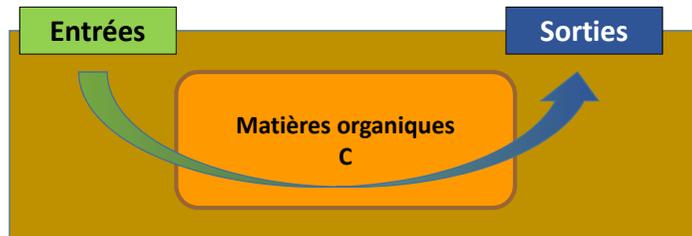
- ↳ Fertilité biologique, chimique, physique
- ↳ Rôle environnemental : **stockage de C**

Houot et al (2023)

Stockage de C dans les sols

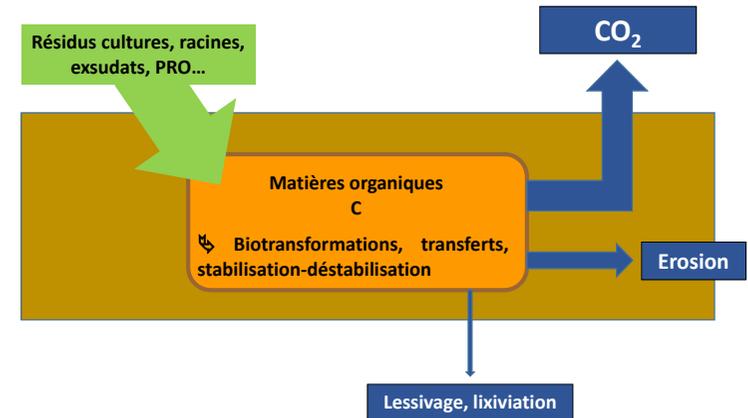
- Stockage de C dans les sols et changement climatique
- MO (C) des sols
- **Stockage de C dans les sols**
- Comment mesurer et prédire les stocks de C dans les sols ?
- Cartographie des stocks de C dans le monde et en France
- Facteurs de variation des stocks de C dans les sols
- Comment augmenter les stocks de C dans les sols cultivés ?
 - Effet des pratiques : TD
 - Quelques exemples complémentaires
- Avec quelle efficacité ? Evolution des stocks de C au cours du temps
- Stockage de C vs émissions de GES ?
- Limites et compromis

Stockage de C dans les sols



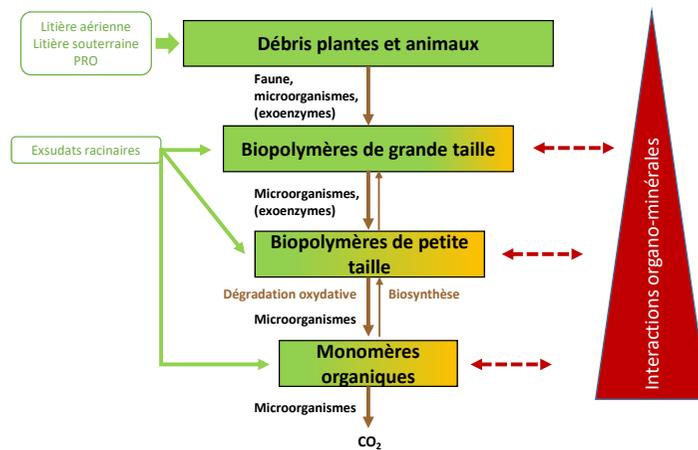
↳ Bilan entrées-sorties

Stockage de C dans les sols



Stockage de C dans les sols

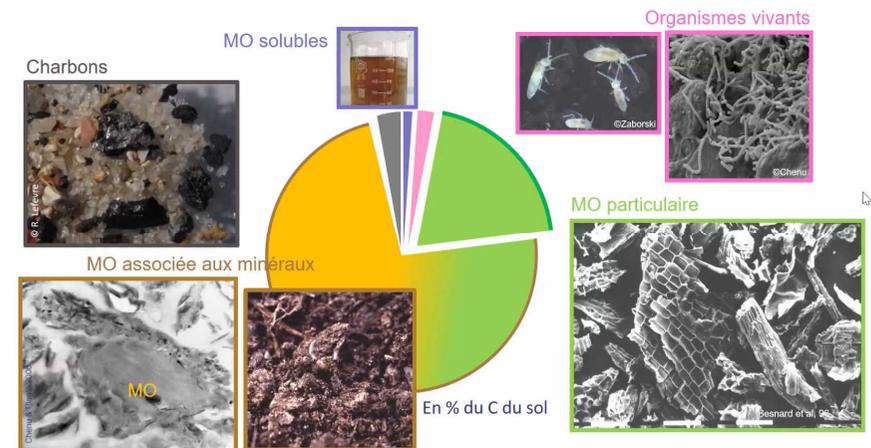
➤ Biotransformation des MO



Lehman & Kieber (2015)

Stockage de C dans les sols

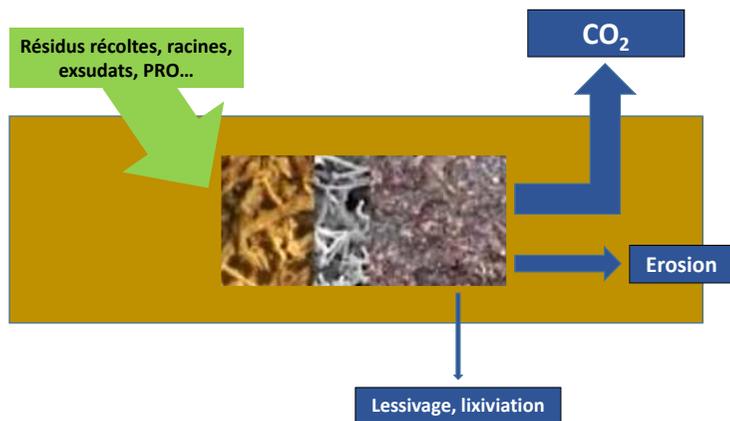
➤ Les MO des sols, un ensemble hétérogène et complexe...



MOOC Sol et climat : Chenu et Chevallier (2021)

Stockage de C dans les sols

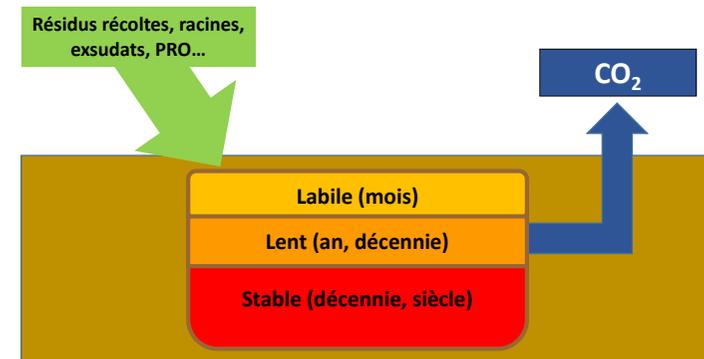
➤ ...en perpétuel renouvellement...



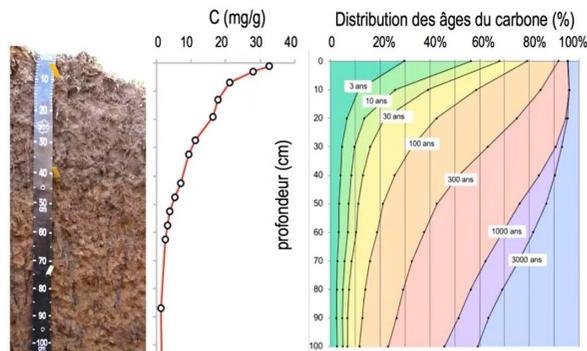
MOOC Sol et climat : Chenu et Chevallier (2021)

Stockage de C dans les sols

➤ ...avec des temps de résidences très variables



Stockage de C dans les sols

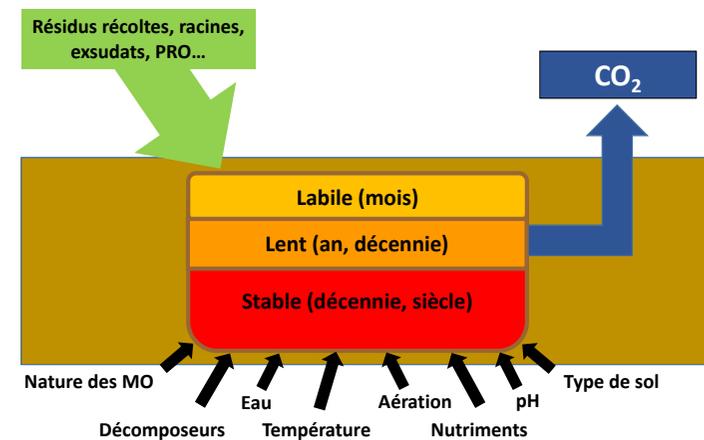


↳ Temps de résidence du C > ds horizons plus profonds

Balesdent et al (2018)

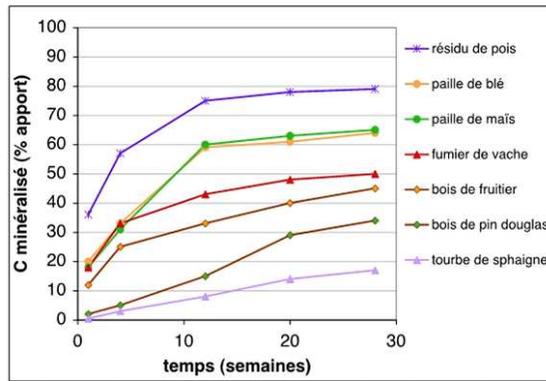
Stockage de C dans les sols

➤ Facteurs influençant les temps de résidence des MO dans les sols



Stockage de C dans les sols

➤ Nature chimique des MO

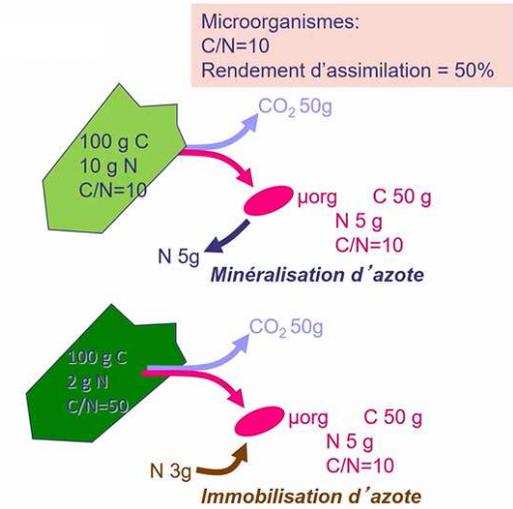


Haider & Martin (1986)

Stockage de C dans les sols

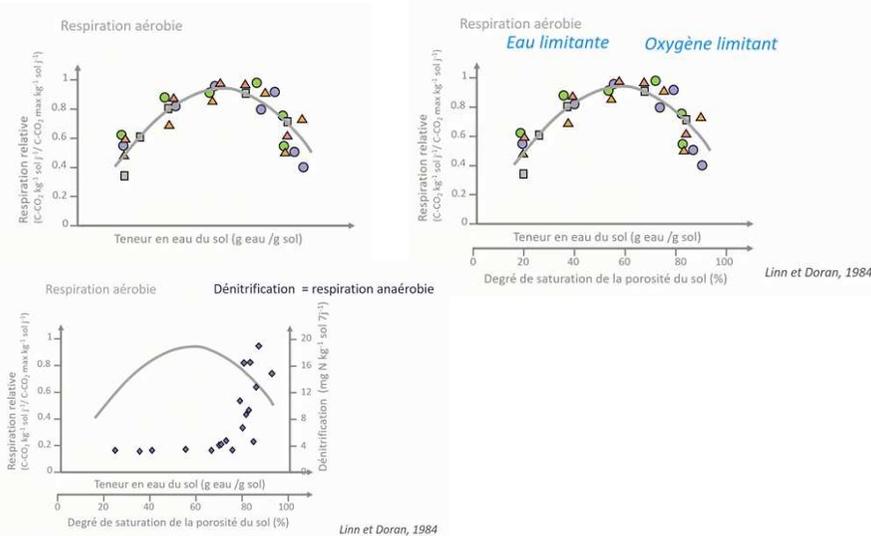
➤ Disponibilité des nutriments

	C/N
Luzerne	13
Feuilles de déclin	45-70
Aiguilles de Pin	60-70
Pailles de céréales	80-120
Lisier de porcherie	6
MO des sols	10



Stockage de C dans les sols

➤ Disponibilité eau et air

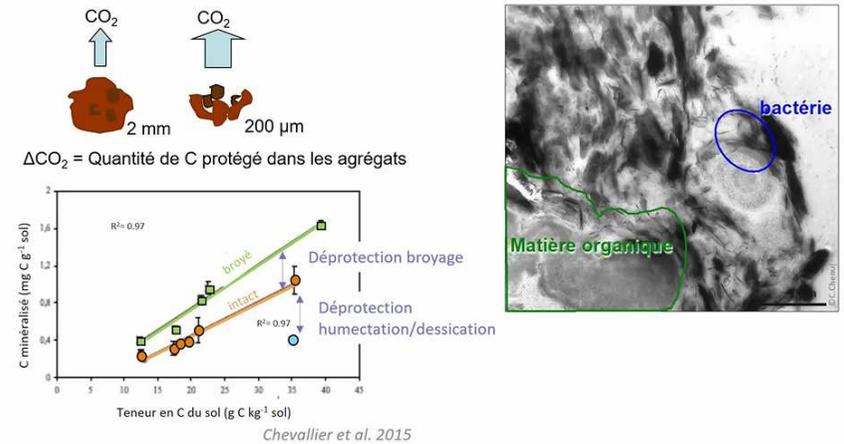


Linn et Doran, 1984

Linn et Doran, 1984

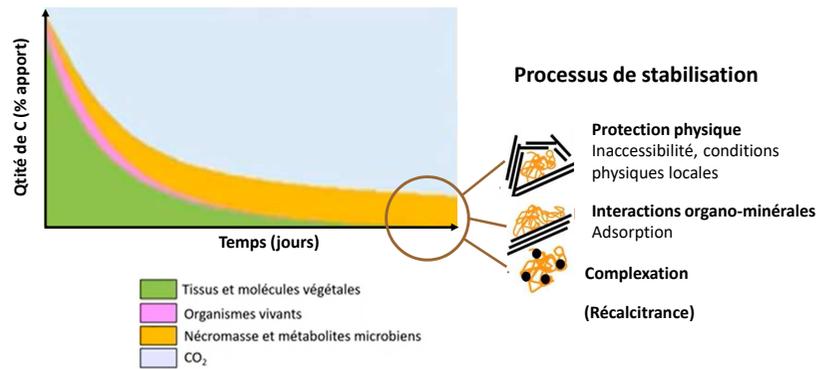
Stockage de C dans les sols

➤ Structure du sol



Stockage de C dans les sols

➤ Persistance des MO dans les sols - Processus de stabilisation



Chenu et al (2002, 2009); Derrien et al (2016); Basile et al (2020)
Illustrations : Chenu C

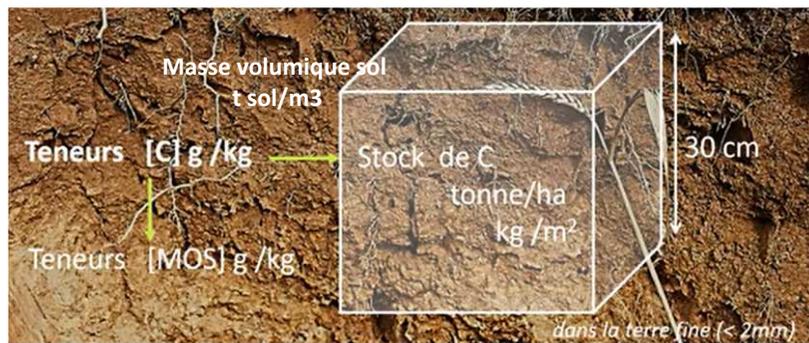
Stockage de C dans les sol

- Stockage de C dans les sols et changement climatique
- MO (C) des sols
- Stockage de C dans les sols
- **Comment mesurer et prédire les stocks de C dans les sols ?**
- Cartographie des stocks de C dans le monde et en France
- Facteurs de variation des stocks de C dans les sols
- Comment augmenter les stocks de C dans les sols cultivés ?
Effet des pratiques : TD
Quelques exemples complémentaires
- Avec quelle efficacité ? Evolution des stocks de C au cours du temps
- Stockage de C vs émissions de GES ?
- Limites et compromis

Comment mesurer et prédire les stocks de C dans les sols ?

➤ Essais au champ

Comment calculer un stock de C ?



Comment mesurer et prédire les stocks de C dans les sols ?

➤ Essais au champ

Efficacité de ≠ types de PRO à augmenter les stocks de C dans les sols (sur la base d'une 50taine d'essais longue durée : 17 ans en moy)

Mafor	Rendement moyen d'augmentation du stock de C du sol, en tonne de C du sol par tonne de C apporté via la Mafor
Composts de déchets verts, de biodéchets, d'effluents d'élevage	0,41 ± 0,22
Boues d'épuration	0,25 ± 0,12
Fumiers de bovins	0,25 ± 0,13
Lisiers (bovins essentiellement)	0,21 ± 0,08

- ☞ Variabilité ⤴ : durées d'étude, doses et fréquences des apports, degrés de stabilité des MAFOR variables y compris pour une même dénomination...
- ☞ Peu d'essais avec des digestats

Comment mesurer et prédire les stocks de C dans les sols ?

➤ Utilisation de modèles de dynamique du C ds les sols : différents modèles avec un nombre de compartiments variable

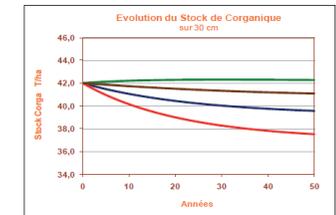
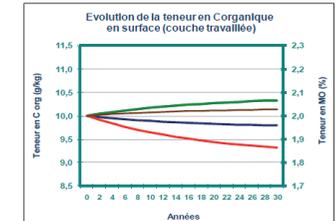
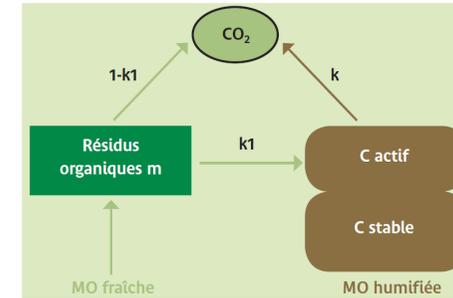
- Modèle mécaniste de Henin et Dupuis (1945)



Comment mesurer et prédire les stocks de C dans les sols ?

➤ Utilisation de modèles de dynamique du C ds les sols : différents modèles avec un nombre de compartiments variable

- Modèle AMG (Andriulo, Mary, Guérif)

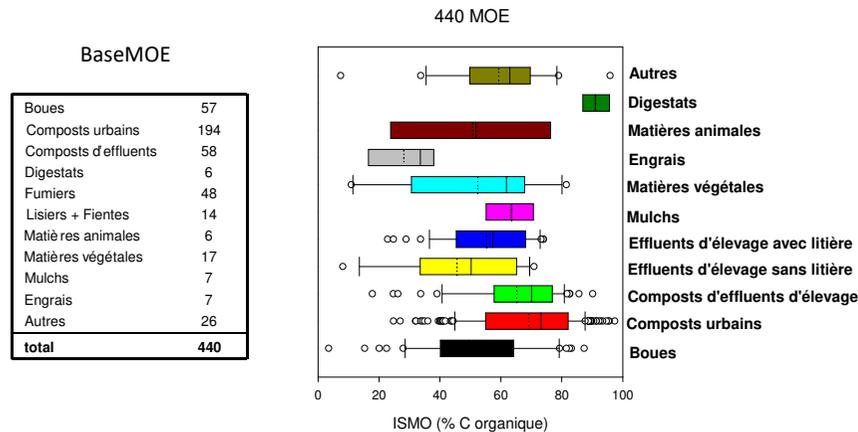


Comment mesurer et prédire les stocks de C dans les sols ?

➤ Indicateurs de biodégradabilité (conditions de laboratoire)

$$ISMO = 44.5 + 0.5 SOL - 0.2 CEL + 0.7 LIC - 2.3 C3j$$

Valeurs d'ISMO pour différents types de matières organiques



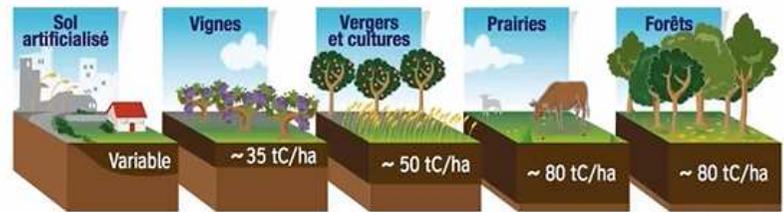
Comment mesurer et prédire les stocks de C dans les sols ?

➤ Indicateurs de biodégradabilité (conditions de laboratoire)

		TENEUR EN CARBONE (g/kg matière brute)	K 1
BOUES	Boue urbaine liquide	12	0,47
	Boue déshydratée non chaulée	49	0,47
	Boue déshydratée chaulée	63	0,47
	Boue traitement lisier porc	18	0,47
	Boue papeterie	70	0,61
DIGESTATS	Digestat brut	35	0,63
	Digestat liquide	15	0,63
	Digestat solide	100	0,63
EFFLUENTS D'ÉLEVAGE	Digestat velle sèche	100	0,63
	Fumier bovin	80	0,67
	Fumier ovin	120	0,67
	Fumier porc	145	0,61
	Fumier de cheval	135	0,49
	Fumier volailles	223	0,46
	Fiente de canard	211	0,16
	Fiente de dinde	211	0,16
	Fiente de poule brute	85	0,16
	Fiente de poule sèche	216	0,41
COMPOSTS	Litière de bovin	30	0,46
	Litière de porc	21	0,51
	Compost de déchets verts	121	0,82
	Co-compost de déchets verts et biodéchets	183	0,77
	Co-compost de déchets verts et boue	124	0,80
	Compost d'ordures ménagères résiduelles	111	0,53
	Compost de fumier (sauf volailles)	123	0,72
	Refus lisier de porc +/- composté	139	0,63
	Compost de fumier de volailles	110	0,46
	AUTRES	Écumes défécation	32
Vinasse diluée		22	0,55
Vinasse concentrée		248	0,55

Facteurs de variation des stocks de C organique des sols

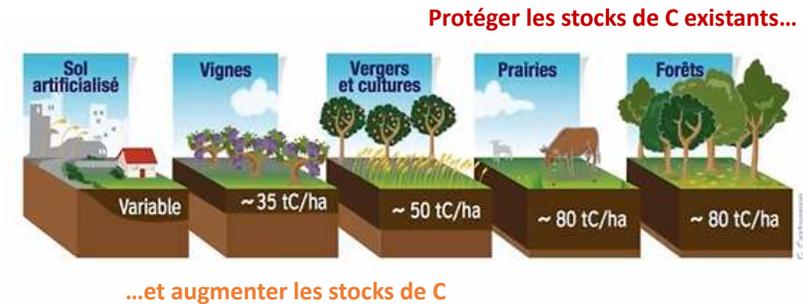
➤ Effet du mode d'occupation des sols



Ademe (2014)

Facteurs de variation des stocks de C organique des sols

➤ Effet du mode d'occupation des sols



Ademe (2014)

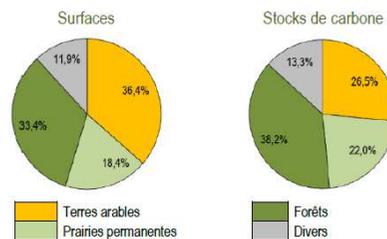
Facteurs de variation des stocks de C organique des sols

➤ Effet du mode d'occupation des sols

Stocks de C par mode d'occupation du sol pour l'horizon 0-30 cm (données RMQS-GIS Sol)

	Stock de C Horizon 0-30 cm (tC/ha)	Ecart type	Surface (Mha)	Stock total Horizon 0-30 cm (MtC)
Prairie permanente	84,6 ±2,8	35,0	9,3	790
Terres arables (grandes cultures et prairies temporaires)	51,6 ±1,1	16,2	18,4	950
Forêts	81,0 ±2,9	35,4	16,9	1 370
Autres	79,0		6,0	475
TOTAL			50,6	3 585

Surfaces et stocks totaux de C par grands modes d'occupation des terres



↪ Sols forestiers : 38% du stock de C total

↪ Sols sous prairies permanentes 22%

↪ Sols grandes cultures et prairies temporaires : 26.5% (stock plus ↘ mais S² ↗)

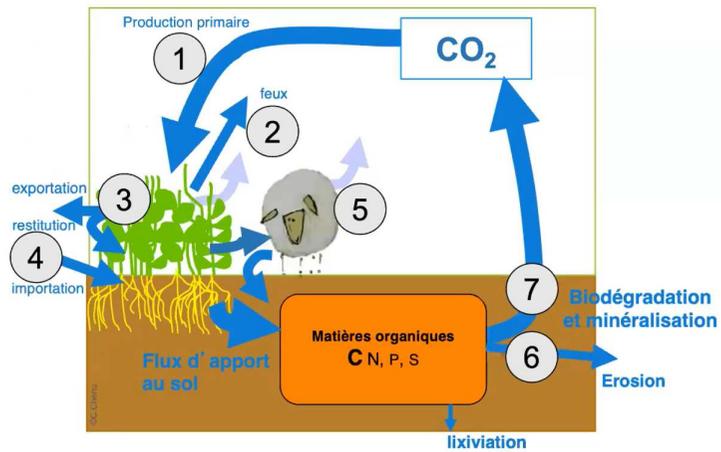
Pellerin et al (2019)

Stockage de C dans les sol

- Stockage de C dans les sols et changement climatique
- MO (C) des sols
- Stockage de C dans les sols
- Comment mesurer et prédire les stocks de C dans les sols ?
- Cartographie des stocks de C dans le monde et en France
- Facteurs de variation des stocks de C dans les sols
- **Comment augmenter les stocks de C dans les sols cultivés ?**
 - Effet des pratiques : TD
 - Quelques exemples complémentaires
- Avec quelle efficacité ? Evolution des stocks de C au cours du temps
- Stockage de C vs émissions de GES ?
- Limites et compromis

Comment augmenter les stocks de C dans les sols cultivés ?

➤ Différents leviers d'action

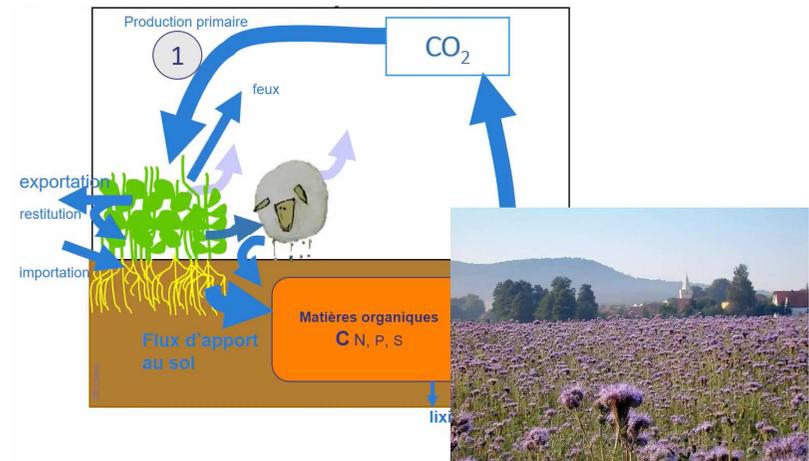


Chenu C (2021) – webinaire Agreenium

Comment augmenter les stocks de C dans les sols cultivés ?

➤ ↗ la production primaire pour ↗ les restitutions organiques au sol

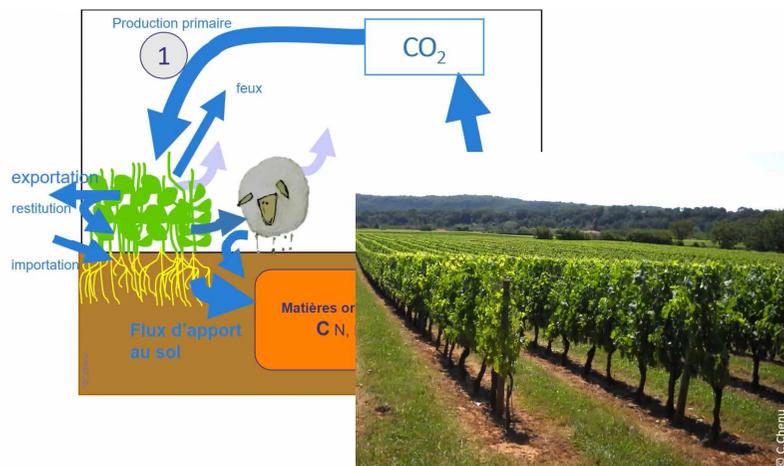
Implantation de couverts (cult intermédiaires)



Comment augmenter les stocks de C dans les sols cultivés ?

➤ ↗ la production primaire pour ↗ les restitutions organiques au sol

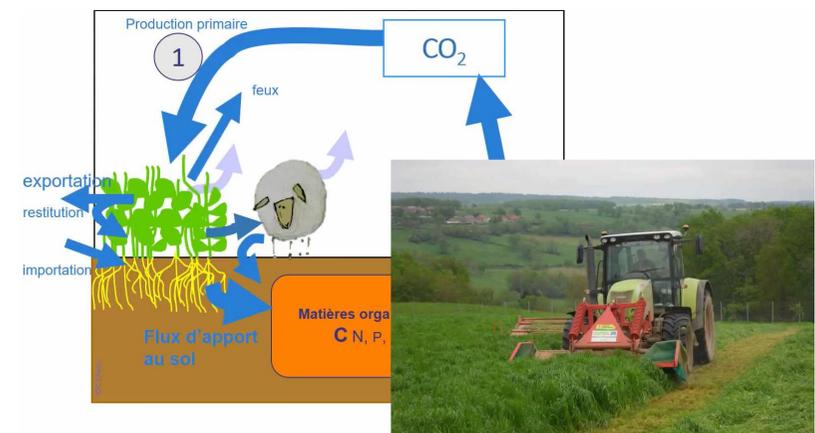
Enherbement des vignes et vergers



Comment augmenter les stocks de C dans les sols cultivés ?

➤ ↗ la production primaire pour ↗ les restitutions organiques au sol

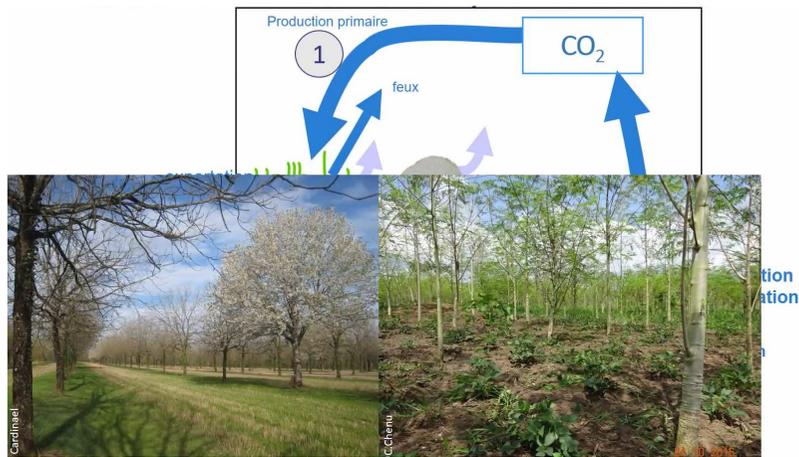
En ↗ la durée des prairies temporaires



Comment augmenter les stocks de C dans les sols cultivés ?

➤ ➤ la production primaire pour ➤ les restitutions organiques au sol

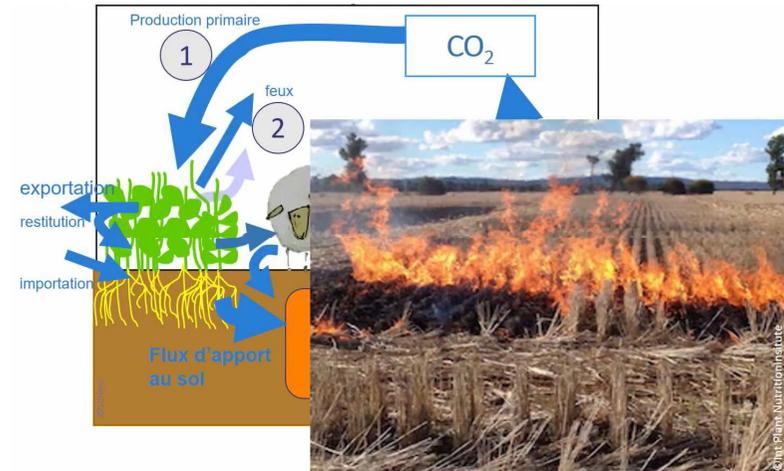
En plantant des arbres (agroforesterie)



Comment augmenter les stocks de C dans les sols cultivés ?

➤ ➤ les pertes de C de la biomasse photosynthétisée

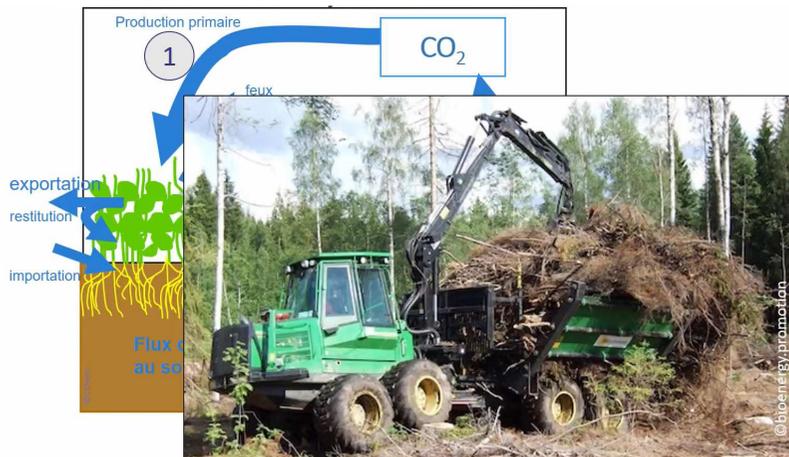
Limiter les feux de récolte



Comment augmenter les stocks de C dans les sols cultivés ?

➤ ➤ les restitutions / exportations

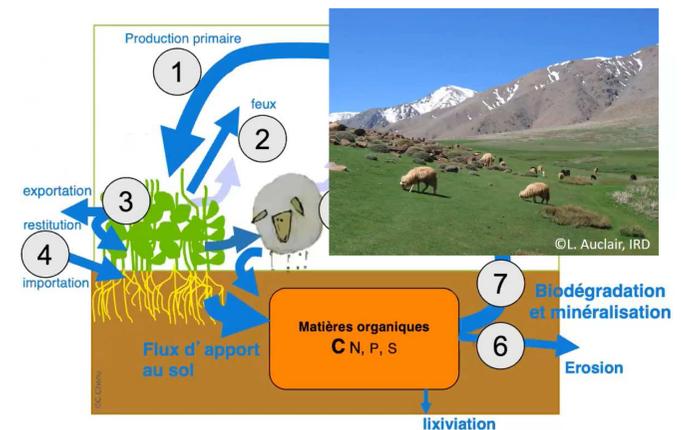
Limiter les exportations de rémanents en forêts et les résidus de culture en sols agricoles



Comment augmenter les stocks de C dans les sols cultivés ?

➤ ➤ les restitutions / exportations

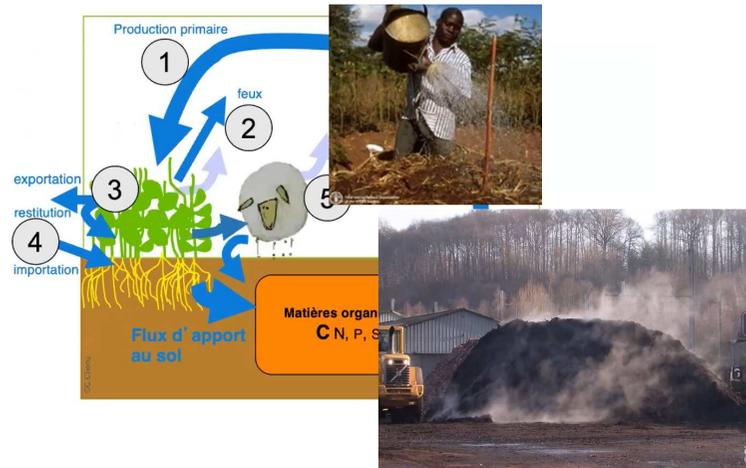
Limiter les fréquences de fauche, remplacer la fauche par du pâturage, ➤ densité du bétail



Comment augmenter les stocks de C dans les sols cultivés ?

➤ ➤ les apports exogènes

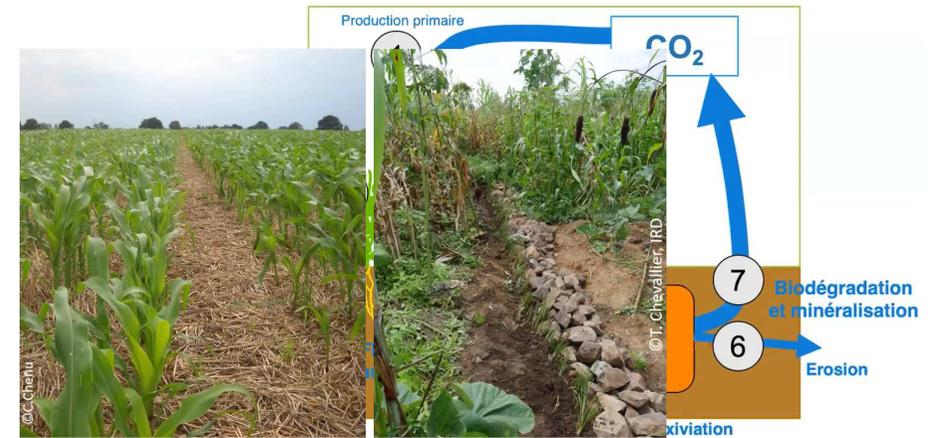
Apport de PRO



Comment augmenter les stocks de C dans les sols cultivés ?

➤ ➤ l'érosion

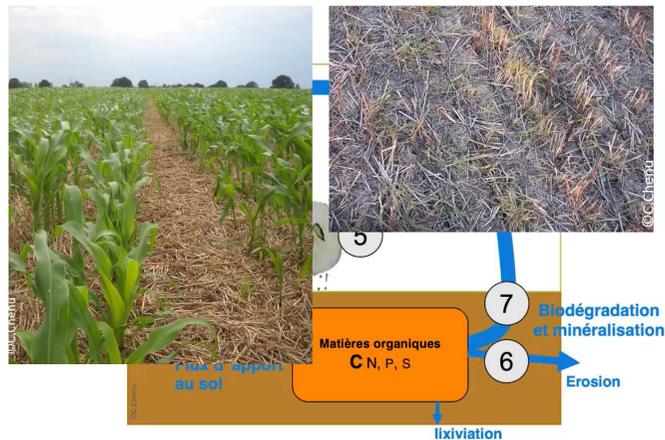
Couverture des sols, dispositifs anti érosifs (ex des cordons pierreux)



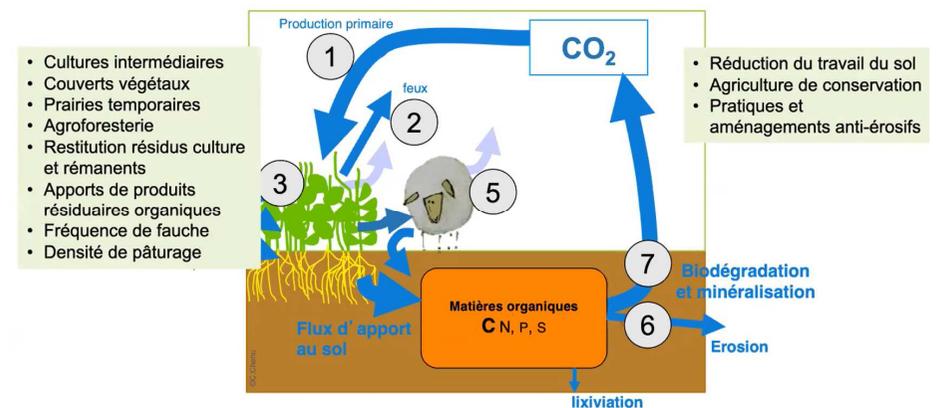
Comment augmenter les stocks de C dans les sols cultivés ?

➤ ➤ la minéralisation

Limiter le travail du sol (semis direct, agriculture de conservation)



Comment augmenter les stocks de C dans les sols cultivés ?

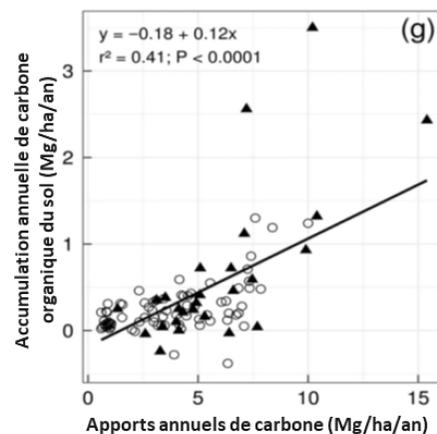


- Cultures intermédiaires
- Couverts végétaux
- Prairies temporaires
- Agroforesterie
- Restitution résidus culture et rémanents
- Apports de produits résiduaux organiques
- Fréquence de fauche
- Densité de pâturage

- Réduction du travail du sol
- Agriculture de conservation
- Pratiques et aménagements anti-érosifs

Comment augmenter les stocks de C dans les sols cultivés ?

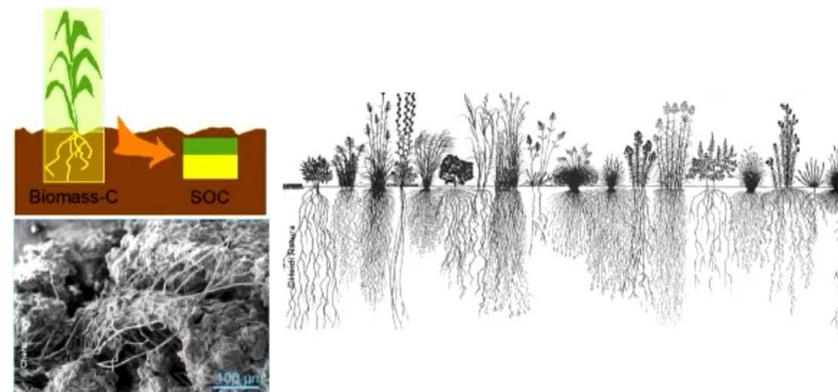
➤ Augmenter les entrées ou diminuer les sorties ?



Fujisaki et al (2018)

Comment augmenter les stocks de C dans les sols cultivés ?

➤ Voie aérienne vs racinaire ?



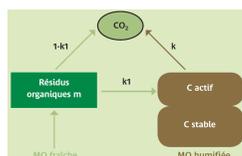
↪ Rendement en C du sol par les racines 2.5 fois plus ↗ que pour résidus des parties aériennes (Rasse et al, 2005; Katterer et al, 2011)

MOOC Sol et Climat – Chenu & Chevallier (2021)

Comment augmenter les stocks de C dans les sols cultivés ?

➤ Effets des pratiques

TD : Utilisation d'un modèle opérationnel (AMG) pour tester l'effet de différentes pratiques sur les stocks de C dans les sols



<http://www.simeos-amg.org/>

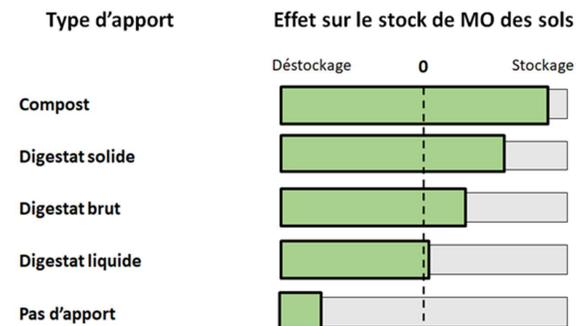
- Cultures intermédiaires
- Non labour
- Apport de PRO
- ...

- ↪ Créer un compte
- ↪ Définir les scénarios
- ↪ Simuler les évolutions des teneurs et stocks de C

Stockage de C dans les sols cultivés : effets des pratiques

➤ Effet des digestats

- Teneur initiale en MO des sols
- Teneur et stabilité des MO apportées par les digestats

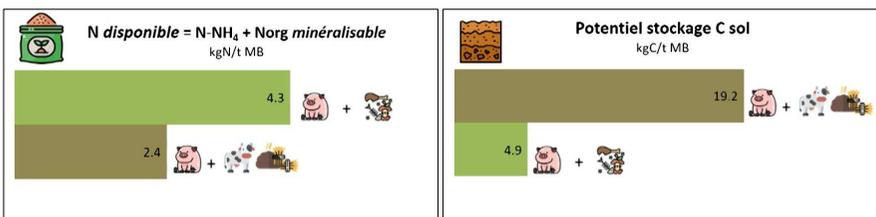


Stockage de C dans les sols cultivés : effets des pratiques

➤ Effet des digestats

Digestats d'origine différentes -> qualités physico-chimique et agronomique contrastées

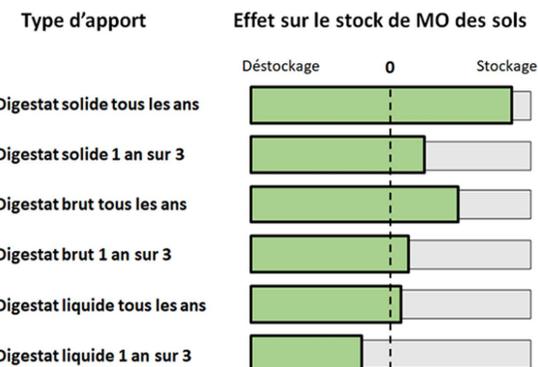
Type de digestat	MS %	MO %	C/N	N g/kg MS	N-NH ₄ g/kg MS	P ₂ O ₅ g/kg MS	K ₂ O g/kg MS
+ +	6	69	9	51	20	10	117
+	2	58	3	145	83	24	272



Stockage de C dans les sols cultivés : effets des pratiques

➤ Effet des digestats

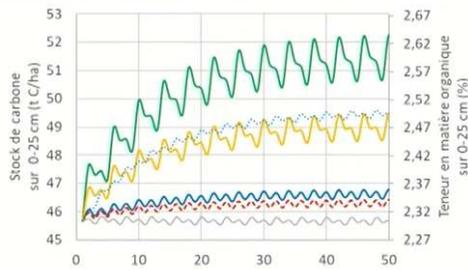
- Dose de digestats apportés
- Fréquence des apports



Stockage de C dans les sols cultivés : effets des pratiques

➤ Effet des digestats

traitements	Fréquence (an ⁻¹)	Teneur C (% MB)	K ₁	Dose par apport		
				Matière brute (t MB/ha)	Carbone (t C/ha)	Carbone humifié (t C/ha)
Témoin sans apport	-	-	-	-	-	-
Compost de déchets verts	0,25	12	0,82	20	2,40	1,97
Digestat territorial brut	0,25	2,7	0,60	20	0,54	0,32
Digestat territorial liquide	0,25	1,5	0,73	20	0,30	0,22
Digestat territorial solide	0,25	9,8	0,58	20	1,96	1,14
Digestat territorial brut	1	2,7	0,60	20	0,54	0,32

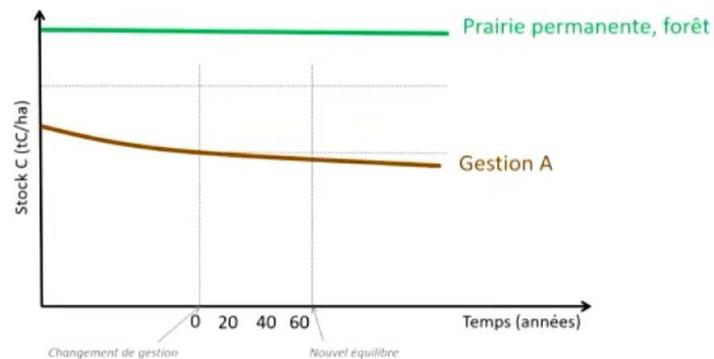


Huot et al (2023)

Stockage de C dans les sol

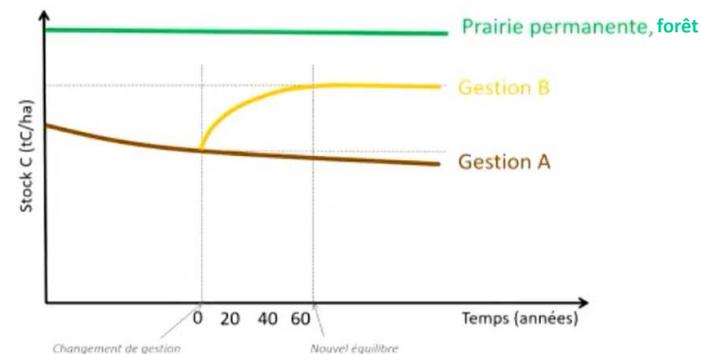
- Stockage de C dans les sols et changement climatique
- MO (C) des sols
- Stockage de C dans les sols
- Comment mesurer et prédire les stocks de C dans les sols ?
- Cartographie des stocks de C dans le monde et en France
- Facteurs de variation des stocks de C dans les sols
- Comment augmenter les stocks de C dans les sols cultivés ?
 - Effet des pratiques : TD
 - Quelques exemples complémentaires
- Avec quelle efficacité ? Evolution des stocks de C au cours du temps
- Stockage de C vs émissions de GES ?
- Limites et compromis

Evolution des stocks de C au cours du temps dans les sols cultivés



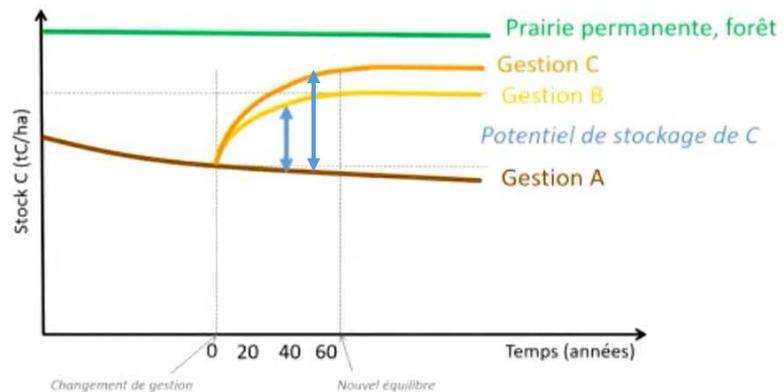
↪ Tendence en Europe et en France dans les sols cultivés : perte de C

Evolution des stocks de C au cours du temps dans les sols cultivés



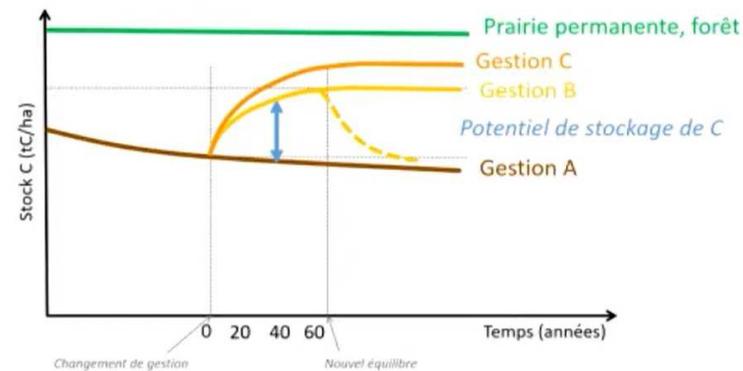
↪ Le stockage de C est lent et limité.

Evolution des stocks de C au cours du temps dans les sols cultivés



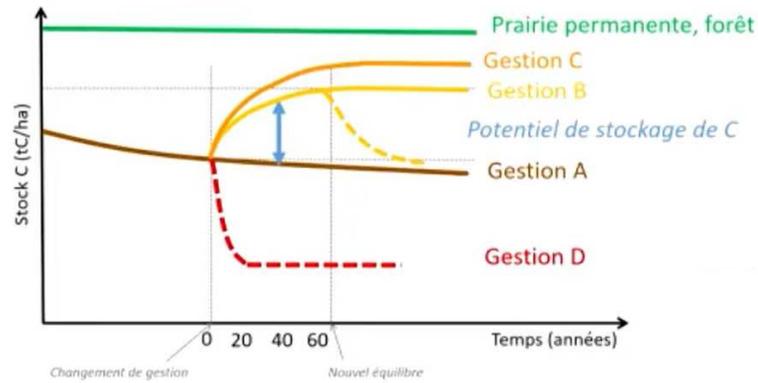
↪ Pratiques ± stockantes

Evolution des stocks de C au cours du temps dans les sols cultivés



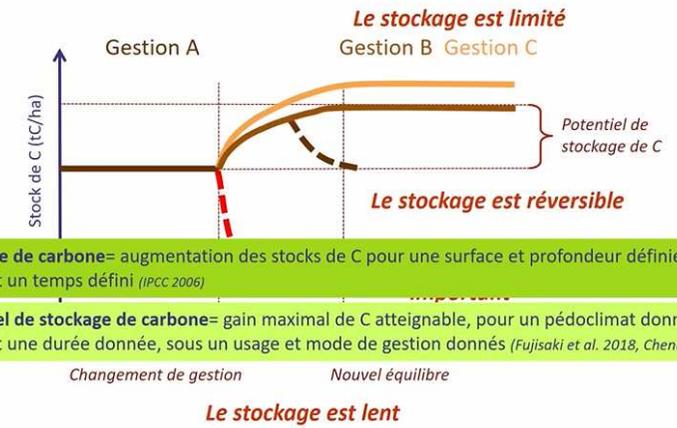
↪ Le stockage de C est réversible.

Evolution des stocks de C au cours du temps dans les sols cultivés



↪ La perte de C peut être rapide et forte : besoin de préserver ce qui existe !

Evolution des stocks de C au cours du temps dans les sols cultivés



Stockage de carbone= augmentation des stocks de C pour une surface et profondeur définies, pendant un temps défini (IPCC 2006)

Potentiel de stockage de carbone= gain maximal de C atteignable, pour un pédoclimat donné, pendant une durée donnée, sous un usage et mode de gestion donnés (Fujisaki et al. 2018, Chenu et al. 2019)

Le stockage est lent

Stockage de C dans les sols cultivés : effets des pratiques

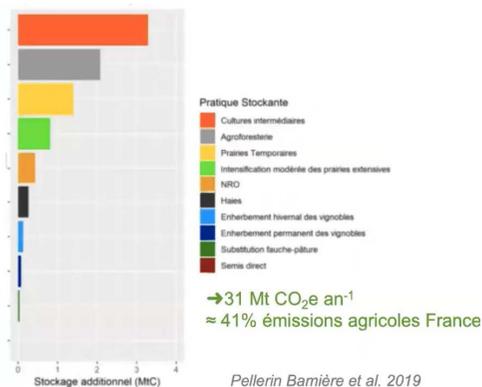
➤ Une estimation nationale – Etude 4p1000

Pratiques

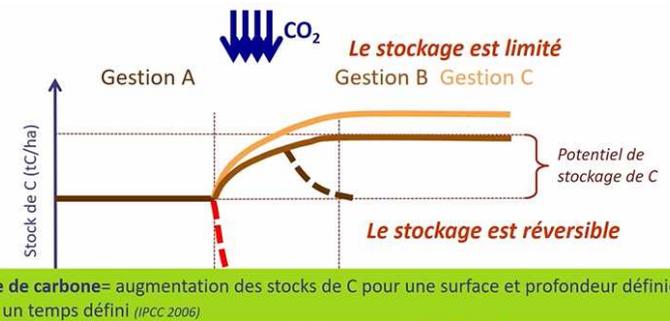
Temperature Regime	Moisture Regime	Soil Texture	Delta SOC (tonnes C ha ⁻¹ yr ⁻¹)
Cool	Dry	Loamy, Silty, and Clayey	0.06 (-0.08, 0.18)
Cool	Dry	Sandy	0.15 (-0.15, 0.40)
Cool	Moist	Loamy, Silty, and Clayey	0.27 (0.00, 0.56)
Cool	Moist	Sandy	0.35 (0.05, 0.65)
Warm	Dry	Loamy, Silty, and Clayey	0.21 (-0.15, 0.52)
Warm	Dry	Sandy	0.18 (-0.10, 0.46)
Warm	Moist	Loamy, Silty, and Clayey	0.33 (0.05, 0.61)
Warm	Moist	Sandy	0.50 (0.24, 0.76)
Tropical	Dry	Loamy, Silty, and Clayey	0.34 (-0.19, 0.85)
Tropical	Dry	Sandy	0.39 (0.18, 0.60)
Tropical	Moist/Wet	Loamy, Silty, and Clayey	0.54 (0.04, 1.02)
Tropical	Moist/Wet	Sandy	0.33 (0.13, 0.53)

Ex. non labour ≠ pédoclimats, Ogle et al. (2019)

Nationales



Evolution des stocks de C au cours du temps dans les sols cultivés



Stockage de carbone= augmentation des stocks de C pour une surface et profondeur définies, pendant un temps défini (IPCC 2006)

Potentiel de stockage de carbone= gain maximal de C atteignable, pour un pédoclimat donné, pendant une durée donnée, sous un usage et mode de gestion donnés (Fujisaki et al. 2018, Chenu et al. 2019)

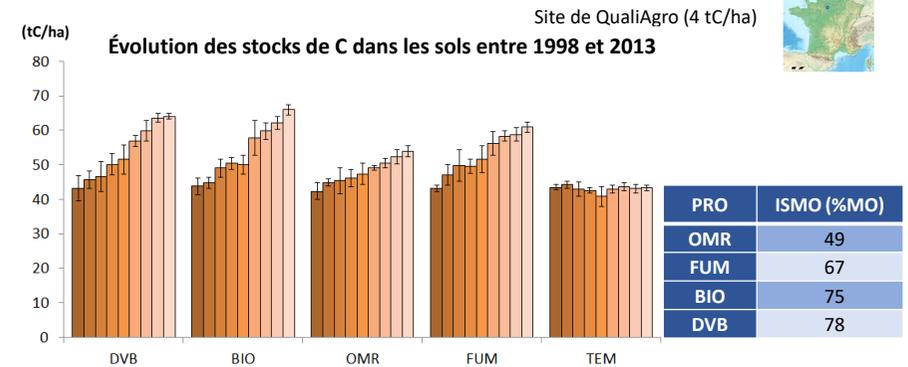
Séquestration de carbone = un stockage de carbone dans le sol, pour une durée longue, qui permet une réduction du CO₂ atmosphérique (Olson et al. 2014, Nat Academies USA, 2018)

Stockage de C dans les sols

- Stockage de C dans les sols et changement climatique
- MO (C) des sols
- Stockage de C dans les sols
- Comment mesurer et prédire les stocks de C dans les sols ?
- Cartographie des stocks de C dans le monde et en France
- Facteurs de variation des stocks de C dans les sols
- Comment augmenter les stocks de C dans les sols cultivés ?
 - Effet des pratiques : TD
 - Quelques exemples complémentaires
- Avec quelle efficacité ? Evolution des stocks de C au cours du temps
- **Stockage de C vs émissions de GES ?**
- Limites et compromis

Stockage de C vs émissions GES ?

➤ Effets des apports de PRO sur le stockage de C dans les sols

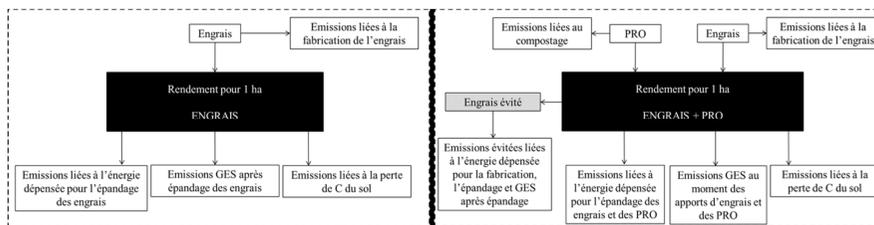


- ↗ des stocks de C avec des apports répétés de PRO
- ≠ Efficacités en fonction de la qualité des amendements
- Emissions de GES après épandage (N₂O), substitution des engrais minéraux azotés par les épandages de PRO qui peuvent avoir des coefficients équivalent engrais jusqu'à 80% dans le cas de certains digestats... ?
- Nécessité de faire des bilans complets !

Obriot (2016)

Stockage de C vs émissions GES ?

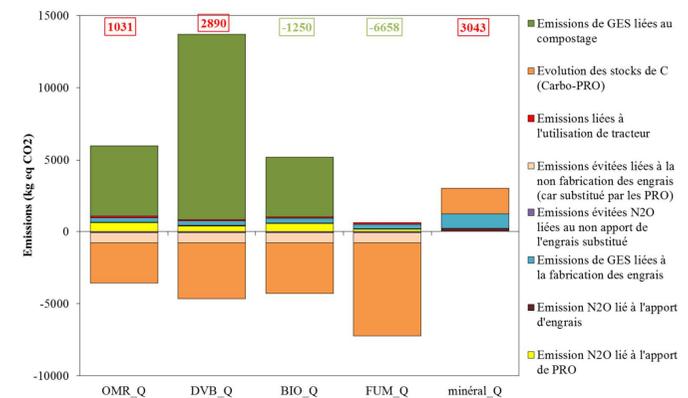
➤ Bilan C global (compostage + épandage) exprimé en kg eqCO₂/ha



Obriot (2016)

Stockage de C vs émissions GES ?

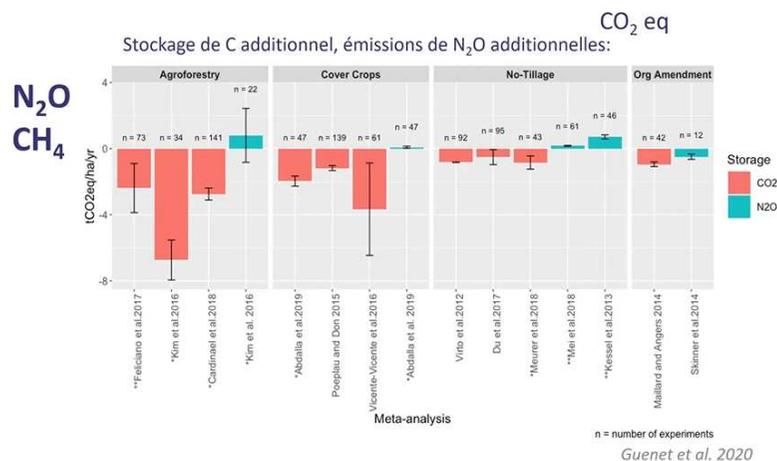
➤ Bilan C global (compostage + épandage) exprimé en kg eqCO₂/ha



Obriot (2016)

Stockage de C vs émissions GES ?

➤ Bilan de différentes pratiques

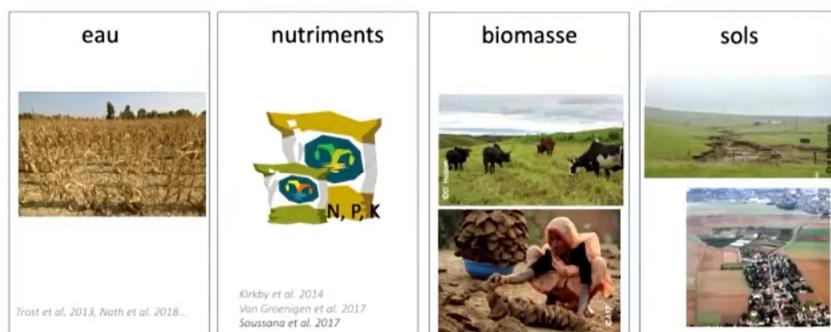


Stockage de C dans les sol

- Stockage de C dans les sols et changement climatique
- MO (C) des sols
- Stockage de C dans les sols
- Comment mesurer et prédire les stocks de C dans les sols ?
- Cartographie des stocks de C dans le monde et en France
- Facteurs de variation des stocks de C dans les sols
- Comment augmenter les stocks de C dans les sols cultivés ?
Effet des pratiques : TD
Quelques exemples complémentaires
- Avec quelle efficacité ? Evolution des stocks de C au cours du temps
- Stockage de C vs émissions de GES ?
- **Limites et compromis**

Limites et compromis

➤ Des barrières biophysiques au stockage de C dans les sols



- Des barrières techniques, économiques, sociales, culturelles, législatives...

Chenu C (2021)

Limites et compromis

➤ Que veut-on ? Stockage vs biodégradation ?

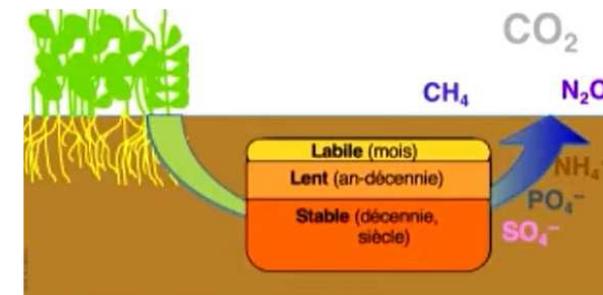
Stocker des MO (stabilisation)

Réserve utile
CEC
Stabilité structurale
Stockage de C



Biodégrader et minéraliser des MO

Biodiversité et activité biologique
Stabilité structurale
Fourniture de nutriments



Limites et compromis

➤ Que veut-on ? Stockage vs biodégradation ?

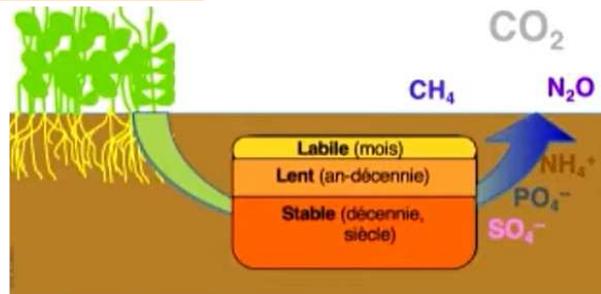
Stocker des MO (stabilisation)

Réserve utile
CEC
Stabilité structurale
Stockage de C



Biodégrader et minéraliser des MO

Biodiversité et activité biologique
Stabilité structurale
Fourniture de nutriments



Conclusion

- Les sols agricoles ont un potentiel de stockage de C (technique) ↗
- Pratiques agricoles ± efficaces, dépendantes du contexte pédoclimatique
- Apport de PRO : une des solutions mais encore trop peu de données sur l'efficacité des digestats
- Stocker du C dans les sols agricoles pour atténuer le changement climatique ne doit être qu'un co-bénéfice d'une amélioration, par les MO, de la fertilité et de la qualité des sols
- Nécessité de faire des bilans GES