



Modélisation de l'évolution du carbone organique dans les sols agricoles

TRAVAUX RÉCENTS AUTOUR DU MODÈLE AMG

Hugues Clivot¹ – Fabien Ferchaud²

¹ UMR FARE, URCA – INRAE ; ² UMRt BioEcoAgro, INRAE

Plan de la présentation

Travaux récents autour du modèle AMG

- Historique et description du modèle
- Evaluation de la version actuelle du modèle
- Derniers développements et améliorations
- Evaluation du modèle STICS vs AMG
- Perspectives

Historique du modèle

Un modèle simple de bilan du C organique du sol à pas de temps annuel

Modèle de Hénin-Dupuis (1945)

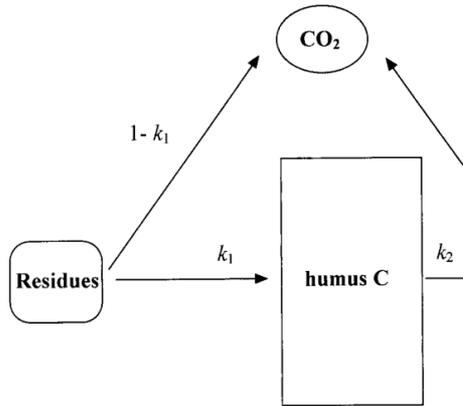


Figure 1. Diagram of Hénin-Dupuis' model considering two C pools. k_1 = humification rate of crop residues, k_2 = mineralisation rate of soil organic matter.

Evolution vers un modèle à 3 compartiments



Modèle AMG (1999)

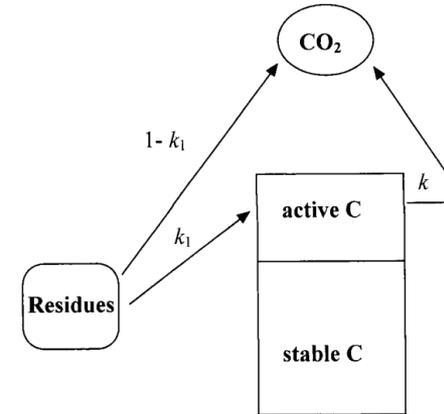


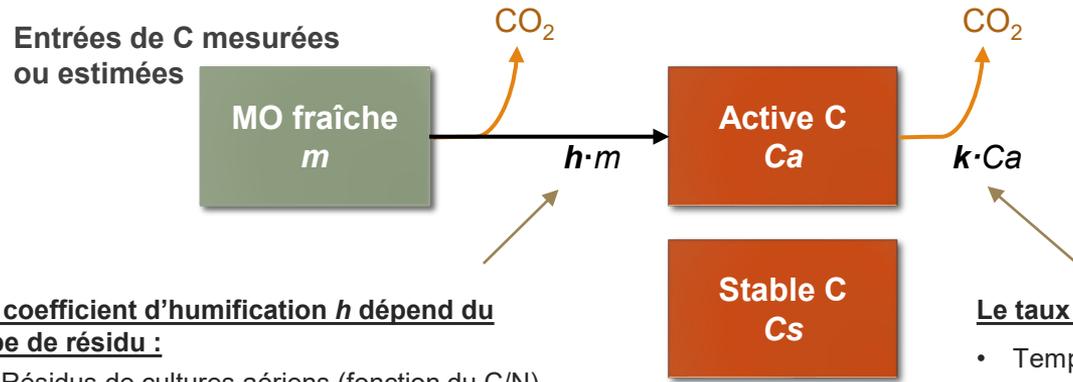
Figure 2. Diagram of the three-compartment model. k_1 = humification rate of crop residues, k = mineralisation rate of active soil organic matter, C_s = stable C fraction.

Andriulo A., Mary B., Guérif J., 1999. Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. *Agronomie*, 19 (5)

Historique du modèle

AMG v1 (Saffih-Hdadi & Mary 2008) → AMG v2 (Clivot *et al* 2019)

Méthode d'estimation des entrées de C
 à partir des rendements mesurés et de
 relations allométriques (v2)



Le coefficient d'humification h dépend du type de résidu :

- Résidus de cultures aériens (fonction du C/N)
- Résidus racinaires
- Produits résiduaux organiques (PROs)

Le taux de minéralisation k dépend de :

- Température
- Bilan hydrique (P+Irr-ETP)
- Teneurs en argile (après décarbonatation) et calcaire
- pH et C/N du sol (v2)

Saffih-Hdadi and Mary. "Modeling consequences of straw residues export on soil organic carbon." *Soil Biology and Biochemistry* 40.3 (2008): 594-607.

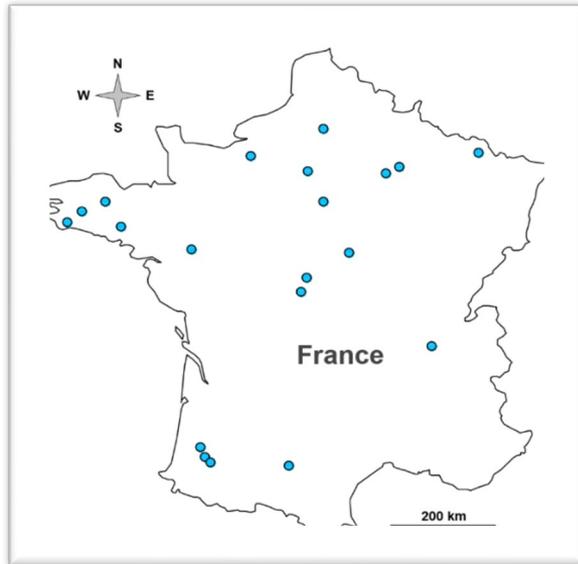
Clivot et al. "Modeling soil organic carbon evolution in long-term arable experiments with AMG model." *Environmental modelling & software* 118 (2019): 99-113.



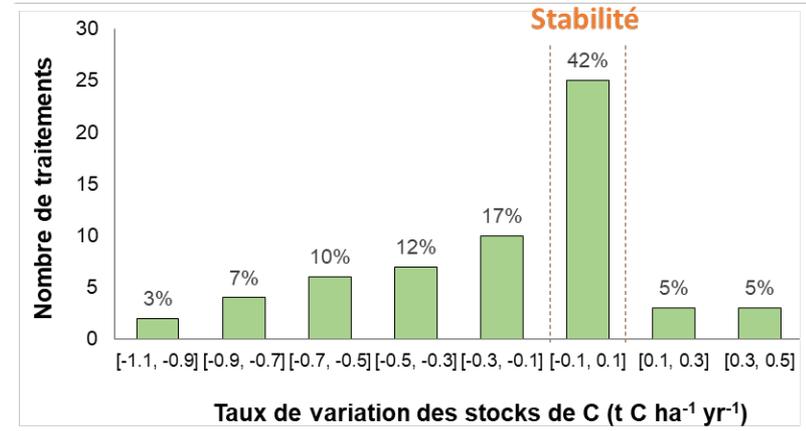
Evaluation du modèle

Base de données d'essais de longue durée **AIAL** (Arvalis, INRA, Agro-Transfert et LDAR)

20 sites en France (60 traitements)



- **Systèmes de grandes cultures**
- **Essais réalisés entre 1970 et 2015**
- **Durée = 8 à 41 ans**

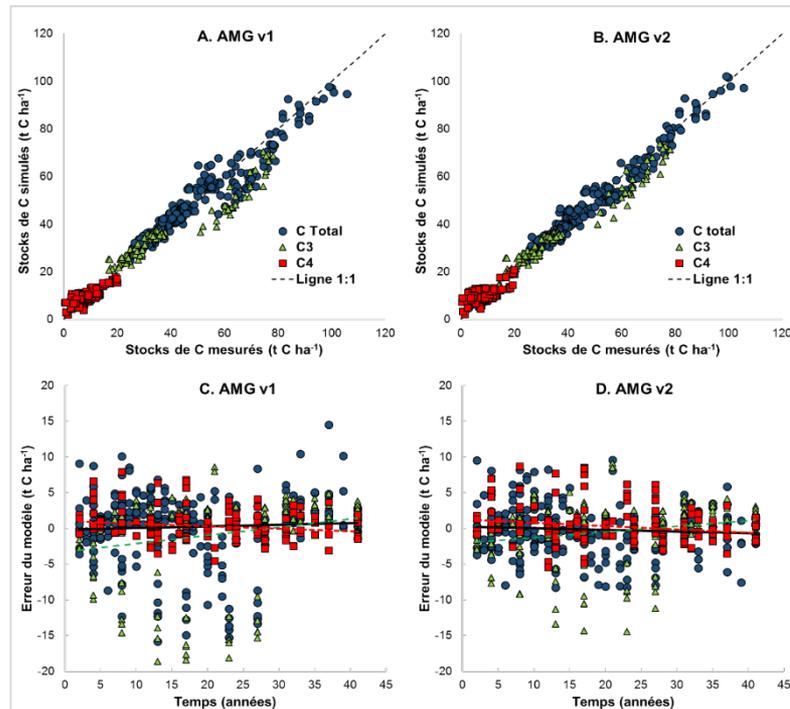


Clivot et al 2019



Evaluation du modèle

Base de données d'essais de longue durée **AIAL** (Arvalis, INRA, Agro-Transfert et LDAR)



AMG v2 vs v1 =

- Amélioration de la simulation des stocks de C : diminution de l'erreur du modèle (RMSE) de 3,2 à 2,6 t C ha⁻¹
- Erreur relative (RRMSE) de 5,3 % comparable à l'erreur de mesure des stocks de C (CV = 4,3 %)
- Modèle ne présentant pas de biais ni de dérive au cours du temps
- Sources d'incertitudes majeures : entrées de C et taille des compartiments stables et actifs de la MOS à l'initialisation du modèle

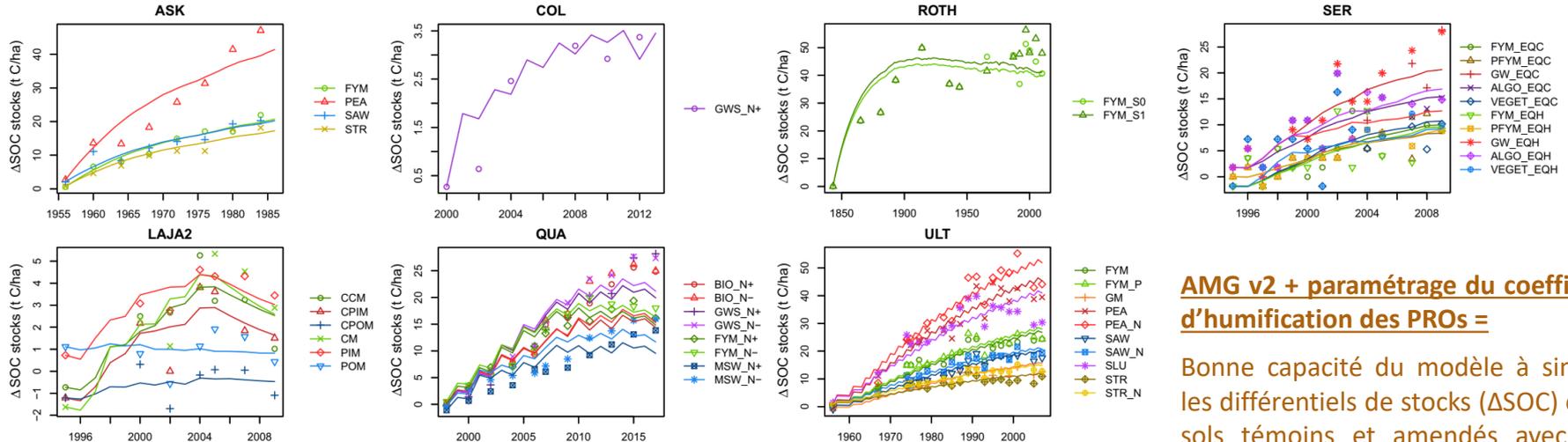
Clivot et al 2019



Evaluation du modèle

Essais de longue durée avec amendements organiques (France, Norvège, Royaume-Uni, Suède)

7 sites en grandes cultures (48 traitements) avec des types d'amendements organiques variés



AMG v2 + paramétrage du coefficient d'humification des PROs =

Bonne capacité du modèle à simuler les différentiels de stocks (Δ SOC) entre sols témoins et amendés avec une erreur moyenne (RMSE) de 3,0 t C ha⁻¹

Levasseur et al. "The simple AMG model accurately simulates organic carbon storage in soils after repeated application of exogenous organic matter." *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 117.2 (2020): 215-229.

Evaluation du modèle

7 essais de longue durée européens en jachère nue – Projet CN-MIP

6 sites (7 essais de 29 à 79 ans) x 26 modèles

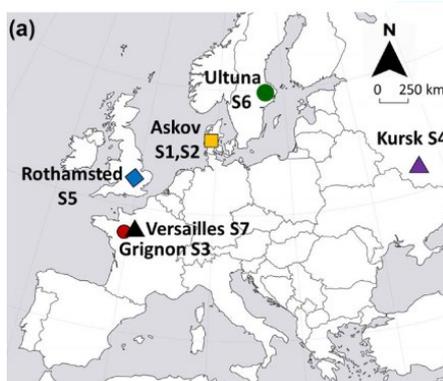
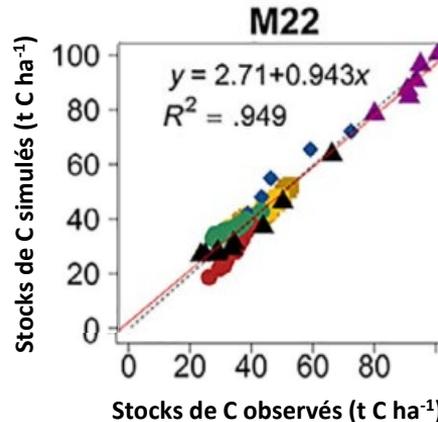


FIGURE 1 Location (a) and characterization of the study sites (b) with respect to mean annual temperature (°C) and mean annual temperature range (°C). Details about study sites are in Table 2



AMG v2 =

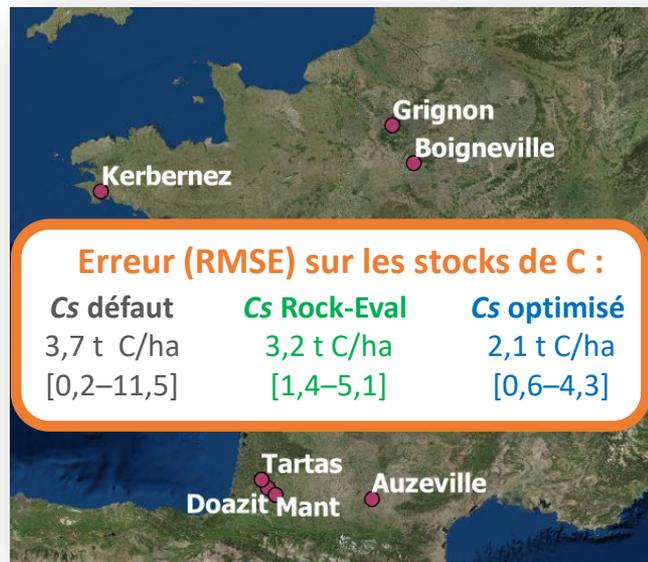
- Bonne capacité du modèle à simuler la décroissance des stocks de C en jachère nue (*i.e.* la minéralisation de la MOS) avec une erreur relative moyenne (RRMSE) de 7,9 % (#1/26 modèles en paramétrage par défaut)
- Une optimisation de la taille des compartiments stables et actifs de la MOS à l'initialisation du modèle permet d'améliorer encore ses performances (RRMSE = 4,4 %)

Farina et al. "Ensemble modelling, uncertainty and robust predictions of organic carbon in long-term bare-fallow soils." *Global Change Biology* 27.4 (2021): 904-928.

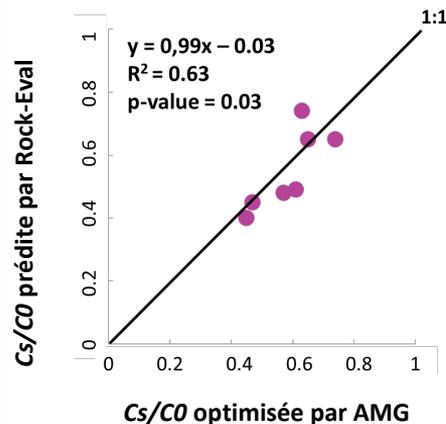
Analyse thermique Rock-Eval

Méthode pour caractériser la fraction stable de la MOS (C_s)

7 sites en France (12-47 ans)



Pour un historique grandes cultures de long terme : le paramétrage par défaut de la proportion de C stable à l'initialisation (C_s/C_0) est de 65 % du C total



AMG v2 + Rock-Eval =

Amélioration de la simulation des stocks de C par rapport au paramétrage par défaut, en particulier pour les sites ayant un historique complexe avec changements de pratique ou d'usage des sols récents ou peu renseignés

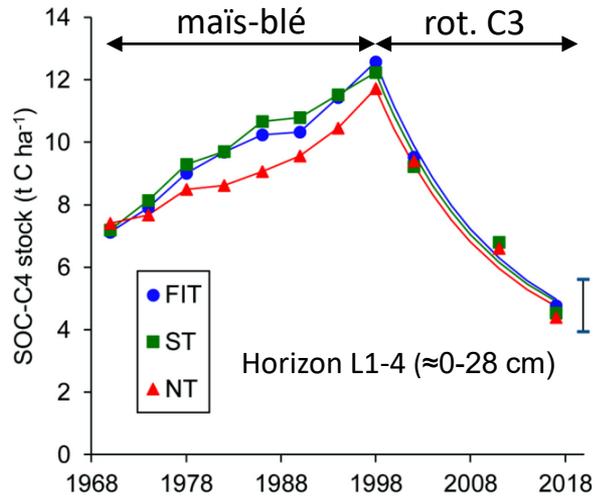
Barré et al. "Initializing the stable pool of soil carbon models using Rock-Eval thermal analysis to improve their accuracy." *Food security and climate change: 4 per 1000. Poitiers, France* (2019)
 Kanari et al. (en préparation)

Simulation d'un sol en non labour

Adaptation du modèle (AMG v3) pour simuler l'essai de **Boigneville** (NT vs TCS vs Labour)

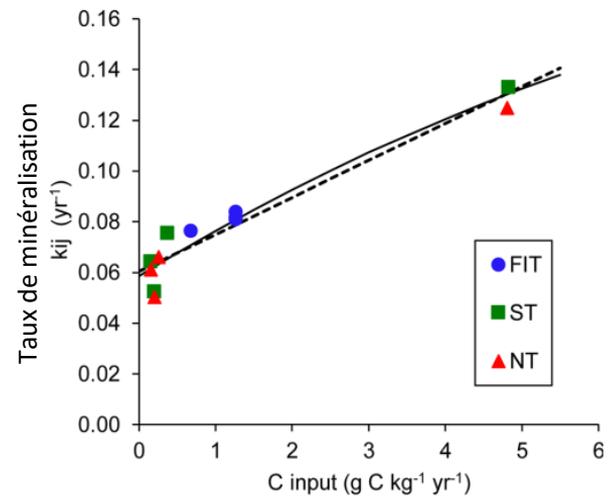
- Changement de rotation (C3/C4 -> C3)**

Le suivi du carbone C4 permet de calculer la vitesse de minéralisation dans chaque couche de sol



- Mise en évidence d'une relation entre le taux de minéralisation de la MOS et les entrées de C**

Cette relation a été incorporée dans le modèle AMG (AMG v3)



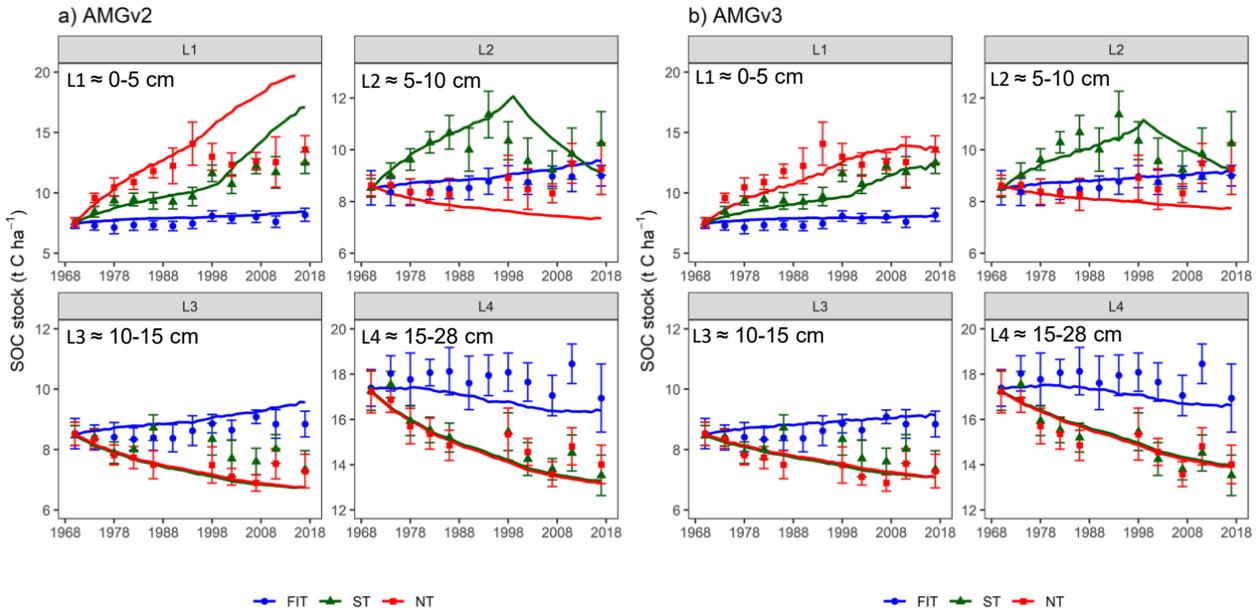
Mary al. "Soil carbon storage and mineralization rates are affected by carbon inputs rather than physical disturbance: Evidence from a 47-year tillage experiment." *Agriculture, Ecosystems & Env.* 299 (2020)



Simulation d'un sol en non labour

Adaptation du modèle (AMG v3) pour simuler l'essai de **Boigneville** (NT vs TCS vs Labour)

• Stocks de C observés et simulés par AMG (v2 et v3) dans chaque couche de sol



AMG v3 vs v2 =

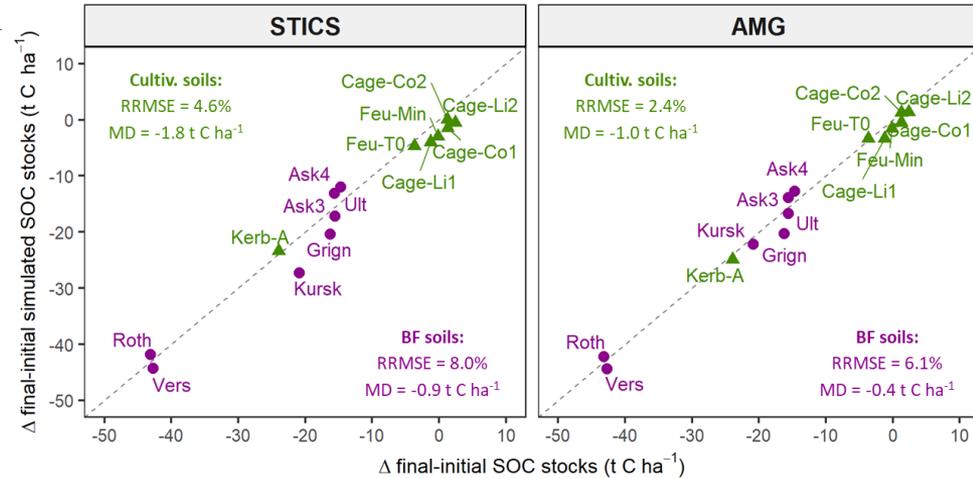
- Amélioration avec la v3 de la simulation des stocks de C par horizon en travail superficiel ou semis direct
- La v2 reste cependant performante pour simuler l'évolution du stock de C total si utilisée en version monocouche

Mary al. "Soil carbon storage and mineralization rates are affected by carbon inputs rather than physical disturbance: Evidence from a 47-year tillage experiment." *Agriculture, Ecosystems & Env.* 299 (2020)

STICS vs AMG

Modèle sol-plante à pas de temps journalier

**6 sites en jachère nue (7 traitements) et
 3 sites cultivés (5 traitements)**



STICS vs AMG v2 =

- Des performances comparables : RRMSE AMG = 4,3 % vs STICS = 6,3 %, pour les stocks de C finaux
- STICS est légèrement moins performant mais simule la croissance des plantes et leurs restitutions de biomasse

Clivot, Ferchaud et al. "Simulating soil organic carbon dynamics in long-term bare fallow and arable experiments with STICS model." *12th STICS model seminar*. Montpellier, France (2020)

Perspectives

Travaux en cours et à venir sur le modèle AMG

- Evaluer le modèle (AMG v2 et v3) + Rock-Eval dans un plus grand nombre de pédoclimats et de systèmes de culture
- Evaluer la capacité du modèle à simuler la dynamique du C profond dans les sols
- Elargir la gamme de systèmes de production végétale simulables :
 - Cultures énergétiques pérennes (projet CE-CARB)
 - Prairies (projet CareSolEI)
 - Vignes (projet OAD-MO)
 - Agroforesterie ?
- Utiliser AMG pour estimer les potentiels de stockage de carbone à l'échelle nationale (projet EJP Soil CarboSeq)

Remerciements

Bruno Mary et tous les collègues ayant participé aux

Travaux sur AMG & base AIAL :

Alain Bouthier, Pascal Denoroy, Jean-Louis Dinh, Annie Duparque, Sabine Houot, Jérôme Labreuche, Hélène Lagrange, Florent Levavasseur, Maxime Levert, Jean-Christophe Mouny, Anne-Sophie Perrin, Stéphanie Sagot, Robert Trochard, Françoise Vertès, les responsables des essais

Travaux sur AMG & Rock-Eval :

Pierre Barré, François Baudin, Lauric Cécillon, Claire Chenu, Sabine Houot, Eva Kanari, Florent Levavasseur, Laure Soucémariadin

Travaux sur STICS & AMG :

Alice Cadéro, Annie Duparque, Anne-Isabelle Graux, Sabine Houot, Florent Levavasseur, Alain Mollier, Jean-Christophe Mouny, Anne-Sophie Perrin, Olivier Therond, Françoise Vertès