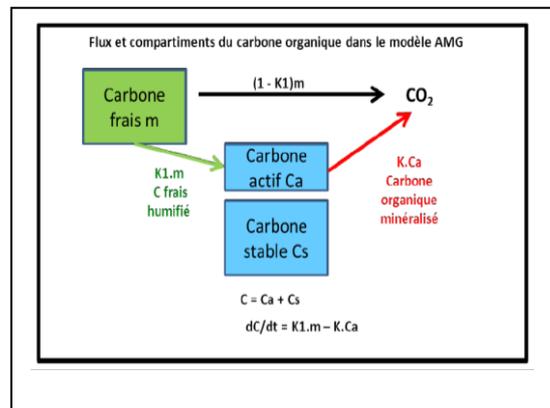


Le projet « AMG\* » a permis de fonder les bases du Consortium AMG associant AgroTransfert, Arvalis, INRA et LDAR. Afin de permettre un développement d'outils d'aide à la décision pour gérer le stock de carbone organique des sols cultivés, le domaine d'application du modèle a été élargi grâce à la mutualisation des travaux de recherche et d'expérimentation disponibles au sein des différents organismes. Des outils communs ont été créés et développés afin de permettre au modèle de vivre au-delà du projet.

## Problématique

Compte tenu du regain d'intérêt pour les gisements de biomasse à la fin des années 2010, le besoin d'utilisation d'outils de simulation des évolutions des stocks de carbone organique des sols s'est accru. Au regard de l'importance des résultats de tels modèles aux plans économique et environnemental, il est apparu essentiel, pour les partenaires du projet, de disposer d'outils développés à partir d'une version unique et partagée du modèle AMG pour laquelle la validation scientifique serait assurée et renouvelée. Il est apparu important également, que ce modèle soit paramétré pour un grand nombre de types de sols, de climats et de pratiques agricoles, qu'il puisse être évalué et validé sur des données fiables d'essais de longue durée, pour tout le territoire de France métropolitaine, au moins.

Figure 1 : Diagramme du modèle AMG



K1 : coefficient d'humification ; k : coefficient de minéralisation annuelle ; m : masse de carbone frais entrante

\*AMG (du nom de ses auteurs Andriulo, Mary et Guérfif) est un modèle de calcul de bilan humique à long terme mis au point en 1999 par l'INRA de Laon.

## Contribution du projet au programme du RMT Fertilisation & Environnement

Le projet « AMG » de 2009 à 2012, puis les activités du consortium du même nom, qui en regroupe les partenaires pour faire vivre le modèle et continuer à l'améliorer, ainsi que la valorisation du modèle au travers des applications permises par les outils qui le mobilisent (Simeos-AMG d'Agro-Transfert-RT, et CHN-AMG d'Arvalis) sont associés aux travaux de l'axe 3 (développement et amélioration des outils d'aide à la décision des acteurs) du programme 2014-2019 du RMT Fertilisation et Environnement. Dans ce cadre, l'amélioration et l'extension du paramétrage d'AMG ont pu être poursuivies notamment au sein d'un autre projet du RMT, « Réseau PRO », qui a permis de continuer les travaux de paramétrage de l'effet carbone des Produits Résiduaux Organiques et de proposer une première adaptation d'AMG à la vigne. Les réunions et assemblées générales du RMT ont offert des occasions répétées de faire connaître le modèle, les outils de simulations dérivés et leurs applications à différentes échelles. L'outil Simeos-AMG est par ailleurs intégré à la chaîne de calcul de la méthode ABC'Terre (Atténuation des bilans de GES intégrant le bilan carbone des sols à l'échelle de territoires agricoles), développée dans le cadre de projets labélisés par le RMT Sols et Territoires. La thématique « Stockage de carbone dans les sols » de grande culture est partagée entre ces deux RMT.

## Partenaires du projet

Pilote du projet :

ARVALIS-Institut du végétal



Autres partenaires :



Projet soutenu financièrement par :



Afin de répondre aux objectifs du projet :

- disposer d'outils développés à partir **d'une version unique et partagée** du modèle AMG
- disposer d'un modèle **paramétré pour un grand nombre de pratiques** agricoles
- un paramétrage devant pouvoir être **évalué et validé**
- disposer d'un modèle qui peut être **amélioré par la recherche au-delà du projet**

Le projet s'est structuré autour de plusieurs volets :

## Constitution d'une base de données issue d'essais de longue durée

La base de données établie rassemble les résultats d'expérimentations et de suivis de parcelles de longue durée pour lesquelles on peut évaluer l'évolution du stock de matière organique dans le sol sous l'effet de pratiques culturales. L'ensemble des données enregistrées a fait l'objet d'une validation quant à leur précision de mesure et de renseignement. Elles ont servi ensuite à ajuster les paramètres du modèle AMG et à en conduire l'évaluation.

La sélection des essais retenus s'est basée sur un cahier des charges précisant les variables indispensables (teneurs et stocks de CO mesurés périodiquement dans l'essai, caractéristiques du sol, rendements des cultures, gestion des résidus, enregistrements des pratiques culturales). Les essais devaient avoir été suivis au moins 7 à 10 ans. Ils devaient comporter au minimum deux analyses de sol.

La base de données ainsi constituée est stockée sous un format PostgreSQL avec un lien établi avec le moteur de calcul AMG (Outil de simulation et d'optimisation « AMG-Recherche »).

## Réalisation d'un moteur de calcul « AMG-Recherche » interfacé avec la base de données

Il est apparu nécessaire au cours du projet de mettre en place un outil de calcul intégrant le modèle AMG et pouvant être relié à la base de données afin d'effectuer les calculs d'optimisation des paramètres du modèle et leur évaluation. L'outil a été conçu dans l'objectif de servir d'outil de recherche pour permettre les améliorations du modèle. Il est utilisable par l'ensemble des partenaires au-delà du projet.

En pratique, l'outil permet la réalisation des simulations de l'évolution de l'état organique du sol ; la comparaison avec les données réelles mesurées sur les essais ; les calculs statistiques pour évaluer l'erreur de prédiction du modèle et l'optimisation des paramètres du modèle.

## Evaluation de la valeur prédictive du modèle AMG en début de projet

Le modèle AMG évalué au cours du projet correspond à la version développée par Saffih et Mary (2008). L'erreur du modèle a ainsi été analysée (Dinh, 2012), en faisant intervenir des variables liées aux données d'entrée d'AMG : soit liées au sol (% argile, pH, teneur en C initiale, C/N), soit liées au climat (température, P-ETP), soit liées aux pratiques agricoles (densité apparente, apports de C par les PRO ou les résidus de culture, profondeur de travail du sol).

## Mise à jour des paramétrages du modèle

Les travaux de paramétrage du modèle AMG conduits dans le cadre du projet ont privilégié les paramètres relatifs aux entrées de carbone via les résidus de culture et les apports de produits résiduels organiques.

### 1- Amélioration des coefficients isohumiques des PRO (K1):

Le travail effectué a eu pour objectif d'estimer les K1 des PRO pour une gamme représentative des PRO épandus dans les exploitations françaises, comprenant à la fois des effluents d'élevage, urbains et industriels.

Plusieurs méthodes d'acquisition de données ont été mises en œuvre :

1 = K1 calculés à partir des résultats expérimentaux de laboratoire obtenus par incubations de longue durée des PRO mélangés à un sol.

2 = K1 estimés à partir des données d'expérimentations au champ de longue durée intégrant des PRO. Les calculs ont été effectués par une optimisation inverse du modèle AMG.

3 = Les K1 obtenus par les 2 méthodes ont été comparés Etude des coefficients isohumiques (K1) racinaires du maïs :

Dans la version du modèle AMG, les coefficients d'humification des parties aériennes et racinaires étaient les mêmes. Le projet a donc examiné si des K1 différents entre les racines et les parties aériennes des plantes peuvent être pris en compte dans le paramétrage d'AMG. L'étude a été réalisée à partir d'une synthèse bibliographique et en particulier sur 5 essais avec du maïs. En effet, cette culture présente l'avantage de produire du carbone en C4 alors que le carbone dans le sol est généralement en C3. Ce marquage naturel a permis de faire des simulations avec différents paramétrages du modèle AMG.

## Constitution d'une base de données issue d'essais de longue durée

La collecte réalisée auprès des partenaires a permis de réunir 79 essais avec répétitions, 5 essais sans répétitions et 7 suivis de parcelles soit 507 traitements évalués sur le long terme ont été recensés en France. Un tri a été effectué afin de sélectionner les traitements satisfaisant les critères de qualités. 75 traitements répartis sur 23 essais ont ainsi été sélectionnés. Cela met en évidence l'importance accordée à la rigueur des suivis au cours du temps dans la sélection. Les données manquantes aux essais non sélectionnés concernaient principalement les profondeurs de mesures, l'absence de mesures à la parcelle élémentaire à l'état initial et le renseignement du travail du sol.

La base de données ainsi créée est stockée en format PostGreSQL; elle est nommée « base AIAL » (pour Arvalis, INRA, AgroTransfert, LDAR). Elle continue d'être mise à jour et est utilisée dans le cadre du consortium AMG au-delà du projet.

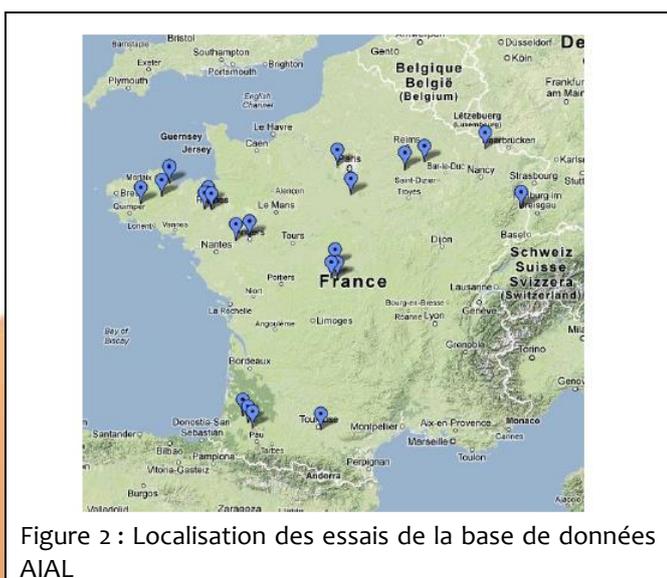


Figure 2 : Localisation des essais de la base de données AIAL

## L'outil « AMG-Recherche »

Au même titre que la base de données, il constitue un résultat important du projet, qui permet aujourd'hui en particulier, à plusieurs équipes de recherche, rattachées ou collaborant avec les partenaires du projet AMG (membres du consortium AMG) de poursuivre l'amélioration du modèle et sa comparaison à d'autres modèles utilisés en France et au niveau international.

## Evaluation de la valeur prédictive du modèle AMG en début de projet

L'évaluation du modèle a été conduite sur le jeu de données des 75 traitements des 23 essais sélectionnés.

Le modèle a montré une tendance à surestimer légèrement le stock de carbone total, avec une erreur de prédiction modeste (RMSE = 3.4 t C /ha) qui fait d'AMG un modèle à la fois simple et robuste.

Les tests des modèles d'erreurs montrent que la prise en compte de covariables peut apporter un gain de précision de l'ordre de 20% et supprimer une part du biais.

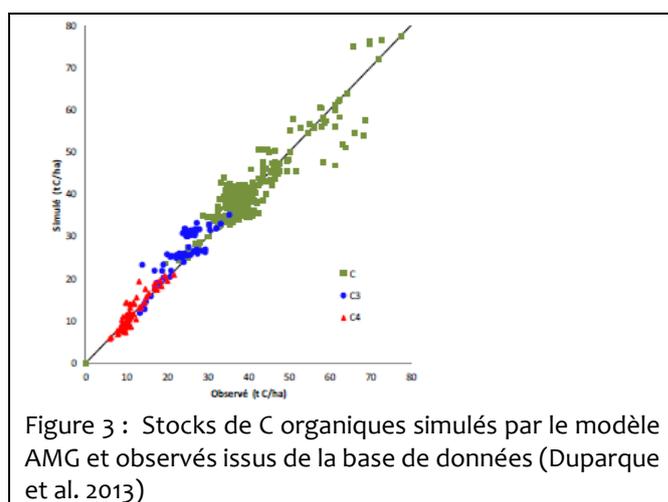


Figure 3 : Stocks de C organiques simulés par le modèle AMG et observés issus de la base de données (Duparque et al. 2013)

## Mise à jour du paramétrage du modèle

### 1- Amélioration des coefficients isohumiques des PRO (K1):

Les résultats des 7 essais au champ avec des apports de PRO utilisés dans l'étude ont permis de produire des premières estimations de K1 pour une série de PRO à partir des simulations AMG et des mesures en laboratoire. Les résultats montrent que les estimations des K1 issues de l'indicateur ISMO quand il a pu être mesuré sur les PRO épandus sont bien ajustés avec les estimations obtenues avec le modèle AMG. L'ISMO semble être un bon indicateur. Cette question a été traitée plus en détail depuis dans le cadre d'un autre projet de recherche SOLEBIOM (2015-2019).

Le projet AMG a permis de diffuser une liste des coefficients isohumiques des 37 PRO étudiés.

### 2- Amélioration des coefficients isohumiques (K1) racinaires du maïs :

Les références bibliographiques montrent que le coefficient d'humification racinaire serait plus important que celui des parties aériennes. Certains auteurs proposent des valeurs proches de 0.4 pour les racines alors qu'il est proche de 0.2 pour les parties aériennes. Les simulations les plus précises sur les 5 essais maïs avec le modèle AMG aboutissent à des coefficients légèrement inférieurs à 0.4. Cette valeur a été adoptée récemment pour paramétrer le k1 des racines de toutes les espèces, dans la nouvelle version d'AMG (Clivot et al., 2019).

# Bilan et perspectives

## Bilan des travaux

Les travaux conduits dans le cadre du projet ont permis :

- de constituer **la base de données AIAL**. Elle regroupe les situations expérimentales, avec suivi de la matière organique au cours du temps, issues d'essais de longue durée dans des contextes pédoclimatiques variés.
- de réaliser un **moteur de calcul « AMG-Recherche »**, qui intègre une version adaptée du modèle AMG, et qui, interfacé avec la base de données AIAL, sert d'outil pour les travaux de paramétrage et d'évaluation du modèle. AMG-Recherche est utilisé par les partenaires du projet qui ont poursuivi les travaux portant sur le paramétrage du modèle.
- de réaliser une **évaluation** de la valeur prédictive du modèle AMG à partir du jeu de données constitué, par modélisation statistique de l'erreur.
- de proposer de premières valeurs pour actualiser **les coefficients isohumiques (K1) des PRO et des racines**.

## Perspectives

Les résultats acquis dans le cadre du projet ont principalement permis de créer les moyens permettant de réaliser une évaluation solide du modèle AMG, de mettre en œuvre cette évaluation et de fournir les bases d'améliorations qui ont pu être implémentées par la suite, en poursuivant ces travaux. Il a aussi permis aux partenaires du projet d'asseoir (Simeos-AMG, pour Agro-Transfert-RT et l'INRA) ou de réaliser (module Carbone de CHN pour Arvalis) leurs propres outils de simulation de l'évolution du stock de carbone organique des sols basés sur la version du modèle AMG validée dans le cadre du projet.

Par ailleurs, le projet a permis d'initier la constitution d'un consortium entre les 4 partenaires afin de poursuivre les objectifs du projet : (i) Maintenir et améliorer **une version unique et partagée** du modèle AMG ; (ii) Continuer à améliorer le **paramétrage pour un nombre plus important**

## de pratiques agricoles ; Evaluer et valider des mises à jour du modèle AMG et des outils le mettant en œuvre

Par la suite, d'autres projets de recherche sur l'amélioration du modèle AMG ont été montés :

- La base de données AIAL a été enrichie d'essais en 2014 dans le cadre de RéseauPRO, puis en 2016 par des travaux conduits par les partenaires.
- Les partenaires se sont ensuite investis dans le projet SOLEBIOM (2015-2018, APR PIVERT) porté par AgroTransfert. Dans la continuité du projet AMG, SOLEBIOM a permis d'améliorer les formalismes et paramétrages du modèle AMG pour aboutir à une nouvelle version (Clivot et al, 2019), ensuite implémentée dans les outils des partenaires (SIMEOS-AMG et CHN-AMG).
- Le projet CSOPRA (appel à projet Ademe REACTIF2) a permis de comparer les performances d'AMG avec celles d'autres modèles de simulation des évolutions des stocks de carbone organique dans les sols.
- D'autres projets travaillent actuellement sur l'utilisation et l'évaluation du modèle AMG pour de nouvelles cultures (cultures de biomasse dédiées avec le projet CE-Carb ; prairies avec CarSoIEI ; vigne avec OAD-MO).
- Les recommandations méthodologiques pour les diagnostics à l'échelle du territoire sont mises en œuvre dans des projets comme ABC'Terre (1 et 2).

Aujourd'hui, près de 10 ans après le début du projet AMG, l'intérêt pour les modèles de simulation de l'évolution du carbone organique des sols est toujours très fort. La problématique de l'évaluation des pratiques agricoles s'est orientée vers l'enjeu global de l'évaluation du stockage du carbone dans les sols pour l'atténuation des changements climatiques et le modèle AMG y prend progressivement toute sa place, à l'échelle nationale et potentiellement internationale.

## Pour aller plus loin...

- \* Andriulo, Mary & Guérif, 1999. Modelling soil carbon dynamics Andriulo, Mary & Guérif, 1999. Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. *Agronomie*, Volume 19, pp. 365-377.
- \* Bouthier A, Duparque A, Mary B, Sagot S., Trochard R, Levert M, Houot S, Damay N, Denoroy P, Dinh J.-L, Blin B, Ganteil F., 2014 - Adaptation et mise en oeuvre du modèle de calcul de bilan humique à long terme AMG dans une large gamme de systèmes de grandes cultures et de polyculture-élevage. *Innovations Agronomiques* 34 (2014), 125-139
- \* Clivot H., Mouny JC, Duparque A., Mary B. et al., 2019. Modeling soil organic carbon evolutions in long-term arable experiments with AMG model. *Agriculture, Ecosystems & Environment*
- \* Saffih-Hdadi K, Mary B (2008) Modelling consequences of straw residues export on soil organic carbon. *Soil Biology & Biochemistry*, 40: 594-607.

## Pour citer ce document :

Lagrange H. et Duparque A., 2019. AMG Développement d'outils d'aide à la décision pour gérer le stock de carbone organique des sols cultivés. *Fiche de synthèse des projets labellisés par le RMT Fertilisation et Environnement*. 4p

## Contacts :

ARVALIS : Hélène LAGRANGE, [h.lagrange@arvalis.fr](mailto:h.lagrange@arvalis.fr) ;  
AGRO-TRANSFERT : Annie DUPARQUE  
[a.duparque@agro-transfert-rt.org](mailto:a.duparque@agro-transfert-rt.org) ;  
RMT F&E : Mathilde Heurtaux, animatrice  
[mathilde.heurtaux@acta.asso.fr](mailto:mathilde.heurtaux@acta.asso.fr)

## Plus d'informations sur le RMT Fertilisation & Environnement :

<http://www.rmt-fertilisationenvironnement.org/>