



SIMEOS-AMG

pour le pilotage dynamique des stocks de carbone organique des sols

Annie Duparque

Agro-Transfert Ressources et Territoires

a.duparque@agro-transfert-rt.org

Agro-Transfert

Ressources et Territoires



**Une plateforme de transfert
d'innovations au service de
l'agriculture régionale**

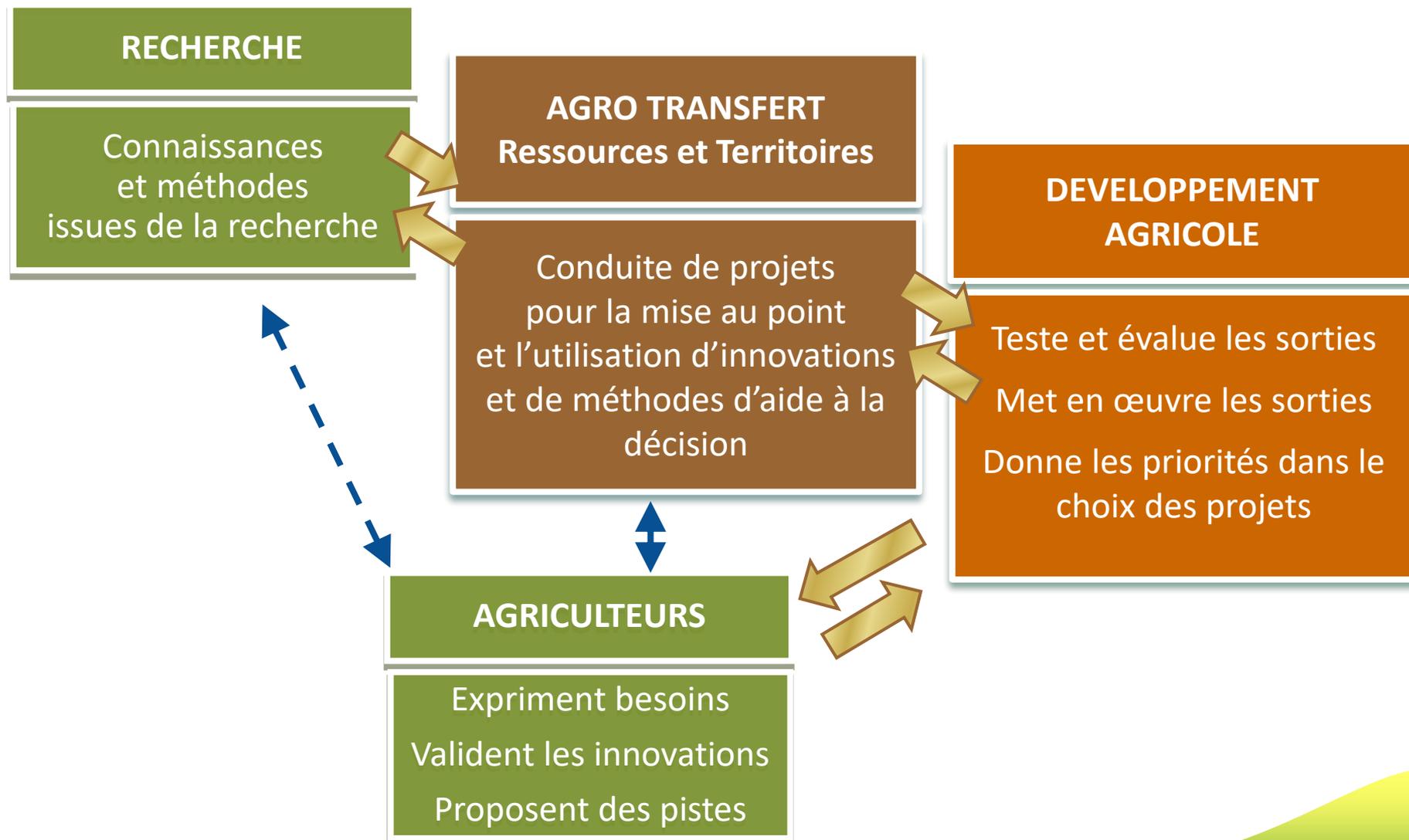


Depuis 1991 à l'initiative de :



A. Duparque, Agro-Transfert-RT - Journées Sol - Pôle IAR
27^{ème} Rencontres RITTTMO - 13 juin 2017 - COLMAR

Le fondement de la démarche



SIMEOS-AMG, pour le pilotage dynamique des stocks de carbone organique des sols



Le modèle AMG :
Principes, structure, évaluation

L'outil Siméos-AMG :
Présentation,
Principales applications

SIMEOS-AMG, pour le pilotage dynamique des stocks de carbone organique des sols

Le modèle AMG :
Principes, structure, évaluation



Compartiments et flux de C organique

- 3 compartiments de Corg

Corg frais des résidus

Ca = fraction active du COS

Cs = Fraction Stable du COS

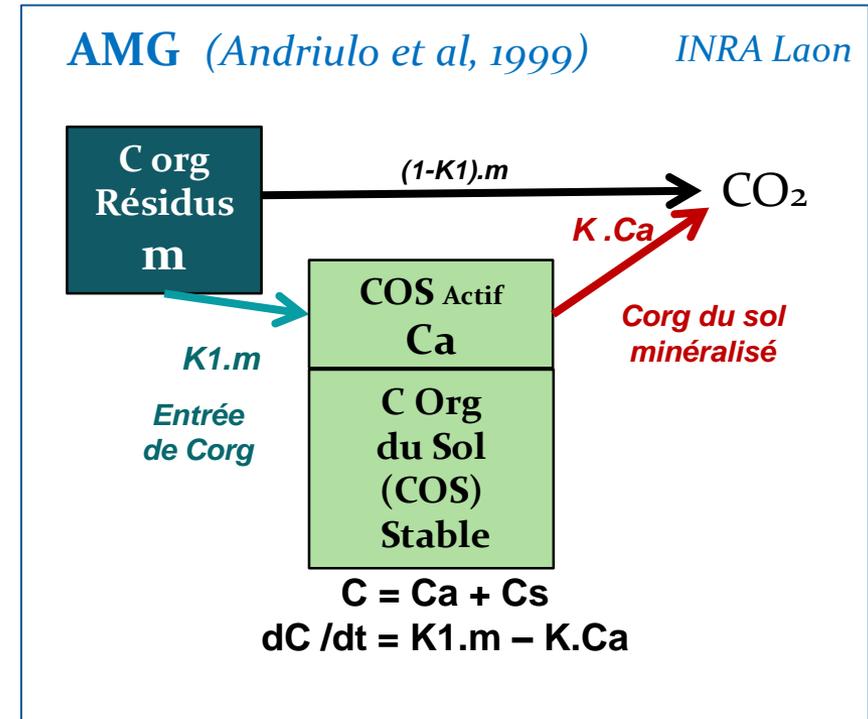
-Pas de temps annuel

-3 parametres :

K1 = coefficient d'humification

K = coefficient de minéralisation annuelle

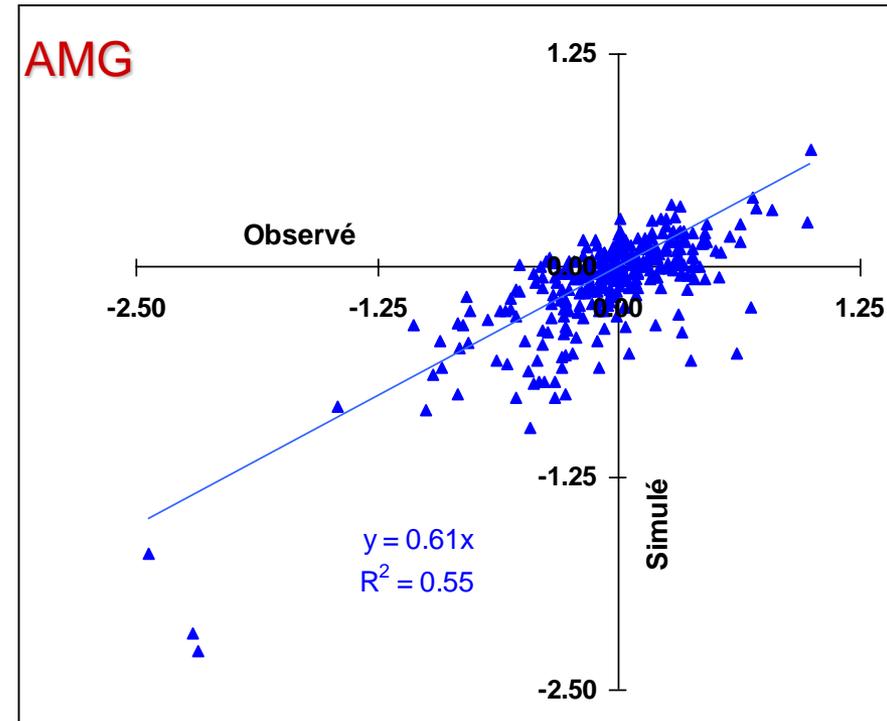
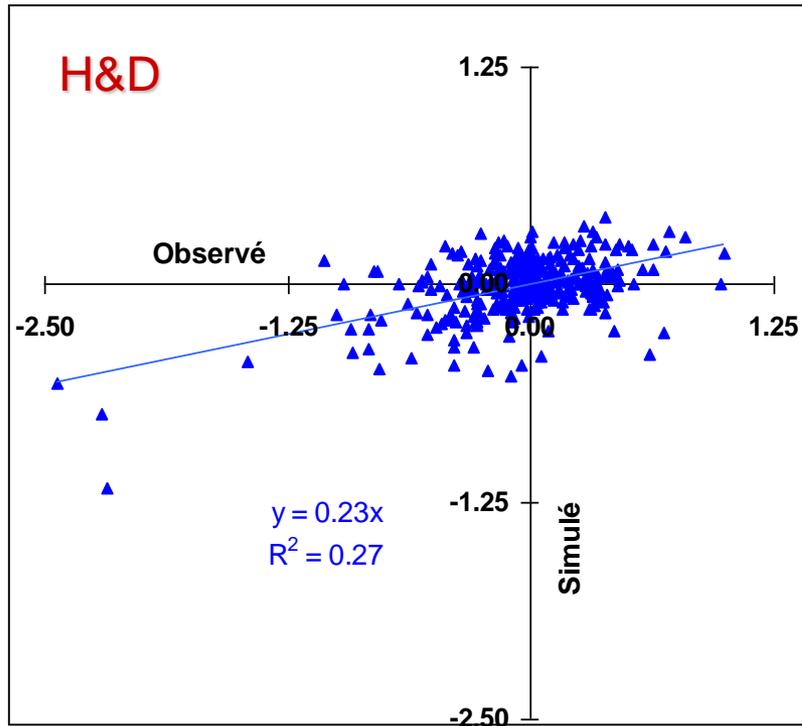
Cs/Co proportion initiale de COS stable



Sources : Andriulo et al., 1999 ; Wylleman et al, 2001

De Hénin Dupuis à AMG

- Comparaison des variations de stock observées et simulées
- Variations exprimées en t C/ha/an



R. Wylleman & B. Mary, 1999

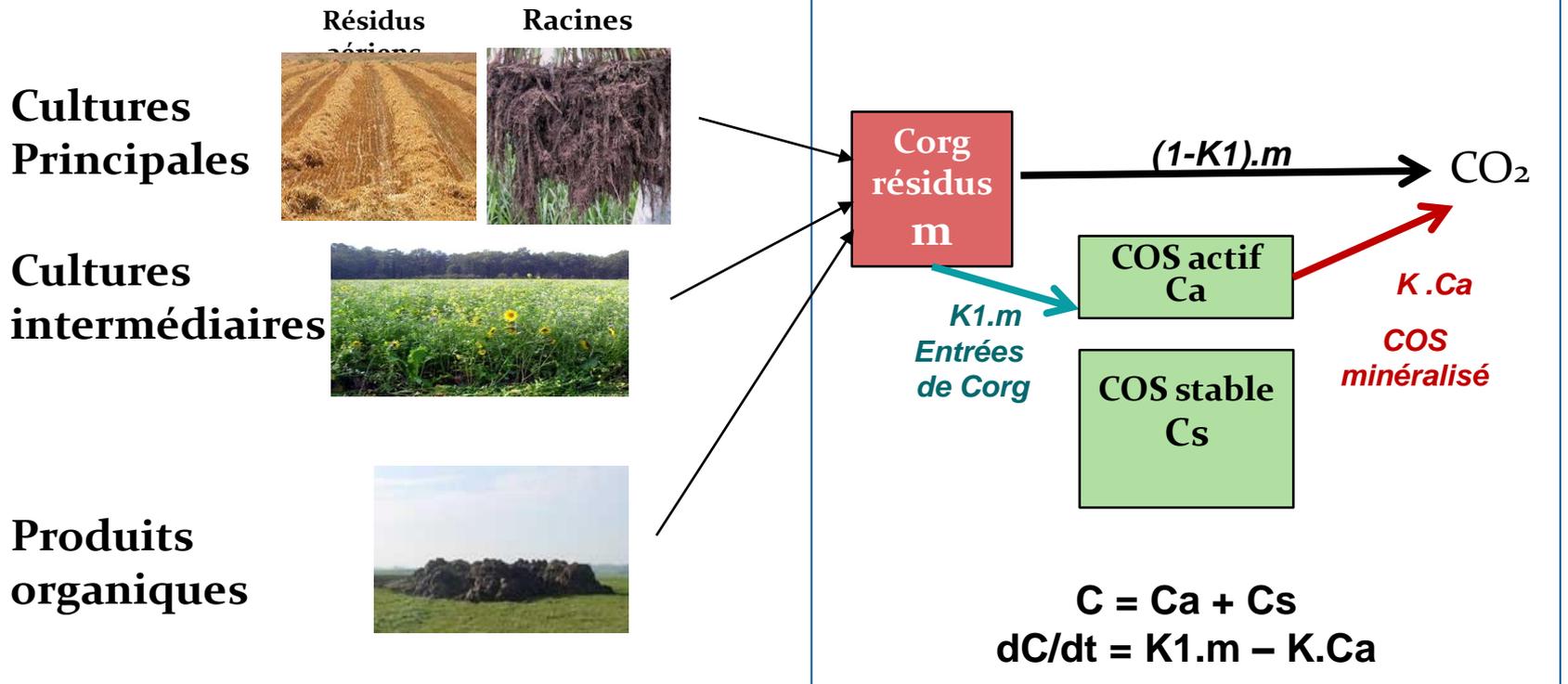
Différents types de modèles portant sur la dynamique des MO du sol

Modèle	Auteurs	Nb compartiments de C organique	Nb de paramètres
H&D	Hénin et Dupuis (1945)	2	2
AMG	Andruilo et al. (1999)	3	3
BAL	Balesdent et al. (1994)	4	7
CENTURY	Parton et al. (1987)	5	17
DAISY	Hansen et al. (1990)	6	22

Les modèles les plus complexes simulent de nombreux processus mais ils sont difficiles à mettre en œuvre car ils comportent un grand nombre de paramètres

Source : B. Mary, INRA Laon

Determination des entrées de Corg



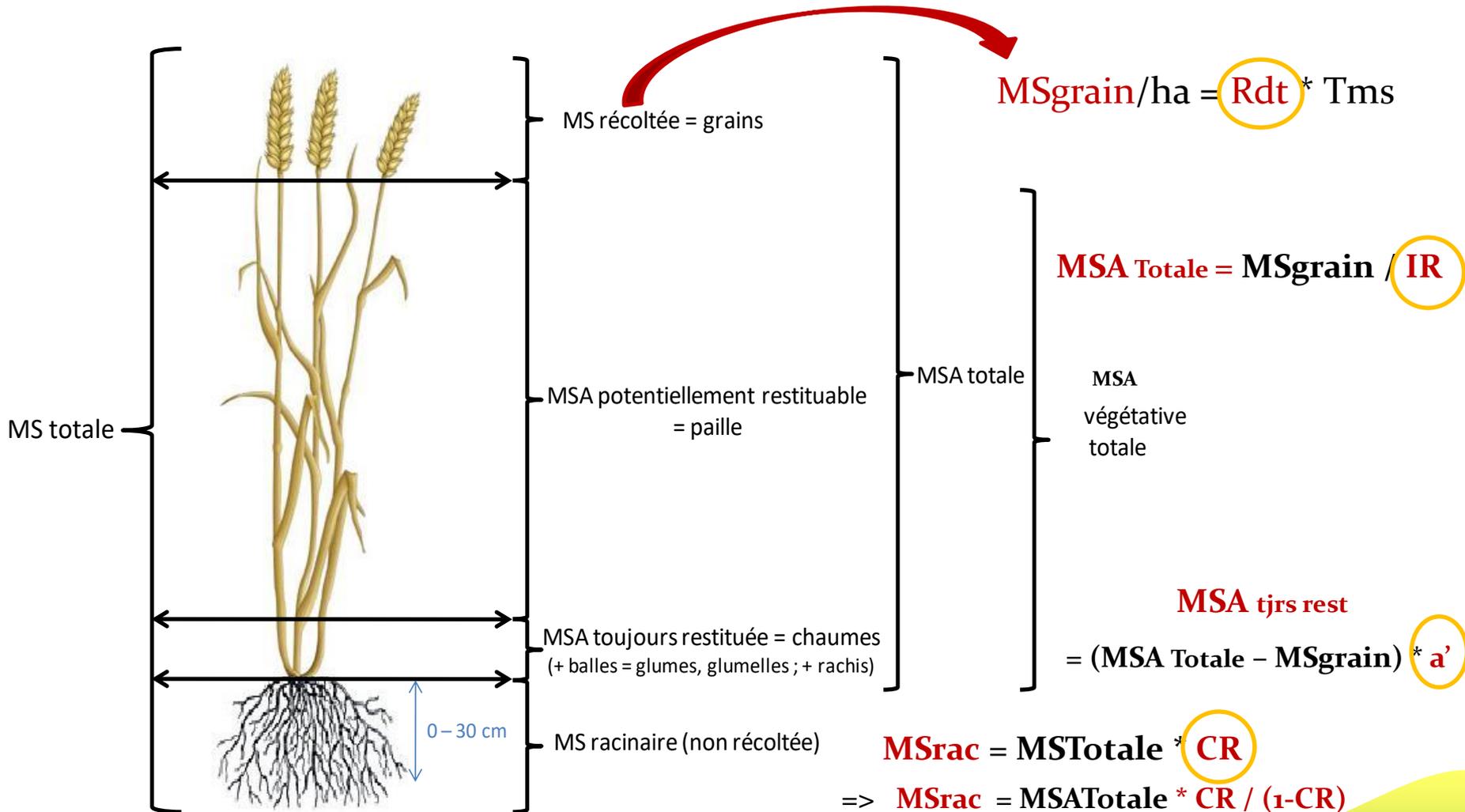
MO fraîches = résidus de cultures et PRO

$m = f(\text{rendement des cultures et doses de PRO apportées ; concentration en Corg})$

$K1 = f(\text{nature et composition des MO fraîches})$

Estimation de la biomasse des *résidus de cultures*...

...à partir d'une information connue par l'agriculteur :
le rendement de la culture aux normes commerciales

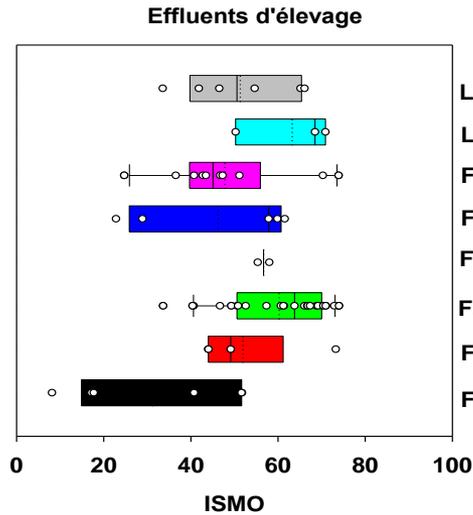


Détermination de K1

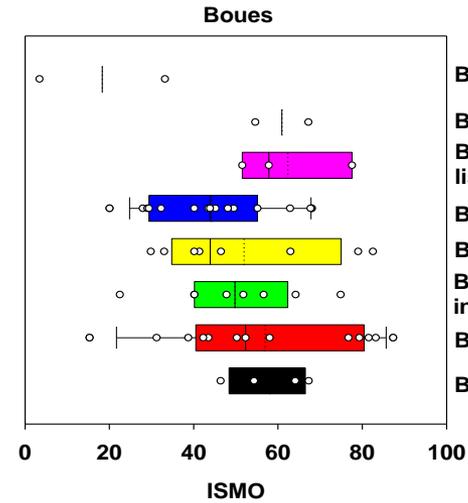
3 méthodes principales:

- **M1) Ajustement du modèle à des données d'essais de LT**
(travaux en cours INRA EGC Grignon, INRA Agro-Impact Laon, Agro-Transfert-RT)
- **M2) Calibration avec des incubations au laboratoire**
(Nicolardot et al, 2001 ; Juste et al, 2009 ; Lashermes et al, 2009)
- **M3) Calibration à partir d'analyses biochimiques**
=> Indice de Stabilité des MO : ISMO (Lashermes et al, 2009)

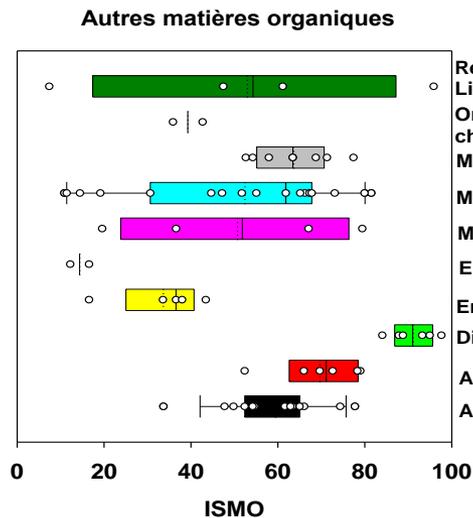
Base de données ISMO



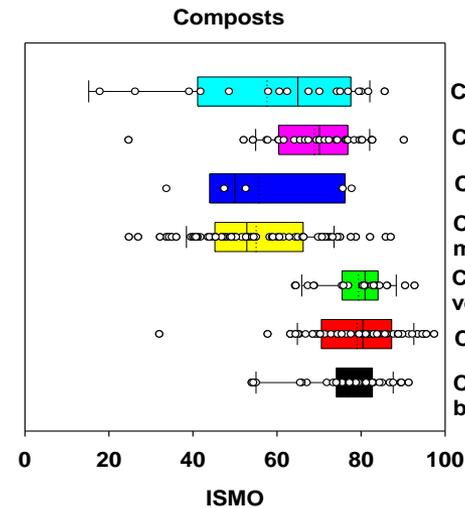
Lisiers de porcs
Lisiers
Fumiers de volailles
Fumiers de porcs
Fumiers d'ovins
Fumiers de bovins
Fumiers
Fientes



Boues + co-produit
Boues de papeterie
Boues traitement lisier
Boues séchées
Boues chaulées
Boues agro-industrielles
Boues urbaines
Boues



Refus traitement du Lisier
Ordures ménagères chaulées
Mulchs
Matières animales
Matières végétales
Engrais organo-minéral
Engrais organiques
Digestats
Amendements organiques
Autres

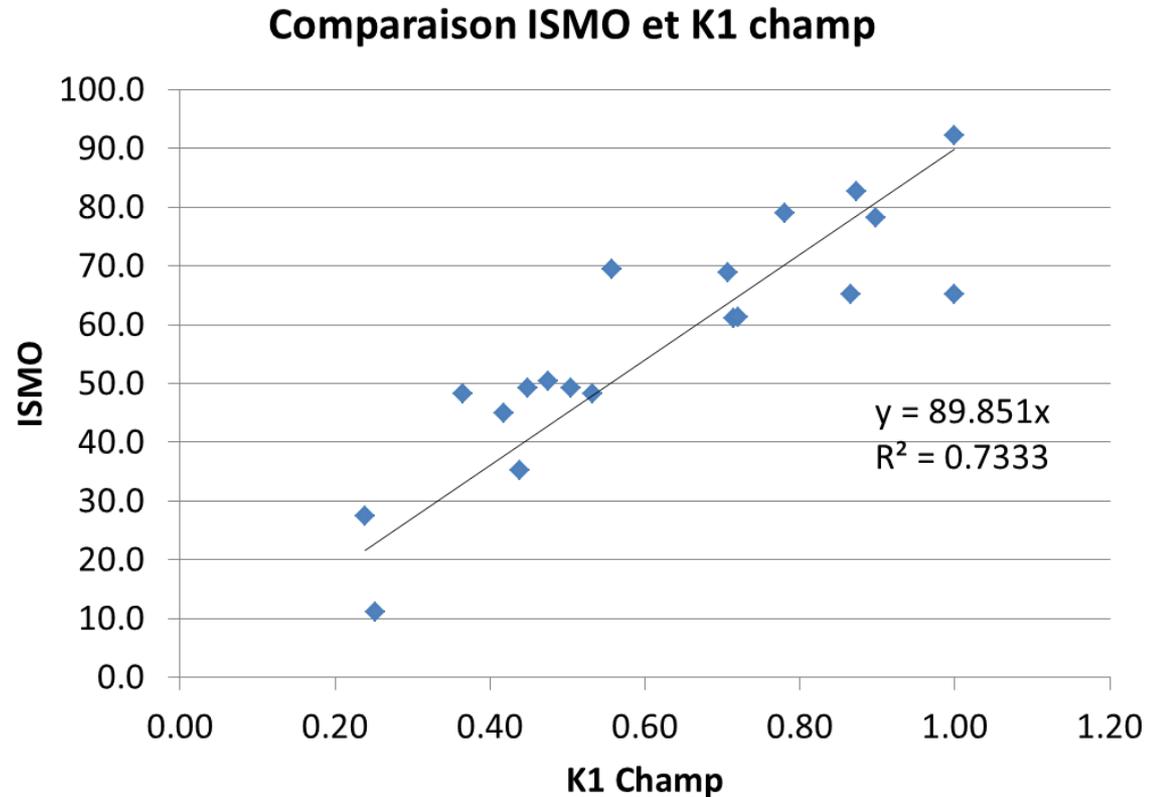


Composts de lisier
Composts de fumiers
Composts de fientes
Composts d'ordures ménagères
Composts de déchets verts
Composts de boues
Composts de biodéchets

Source : S. Houot, INRA Ecosys, Grignon

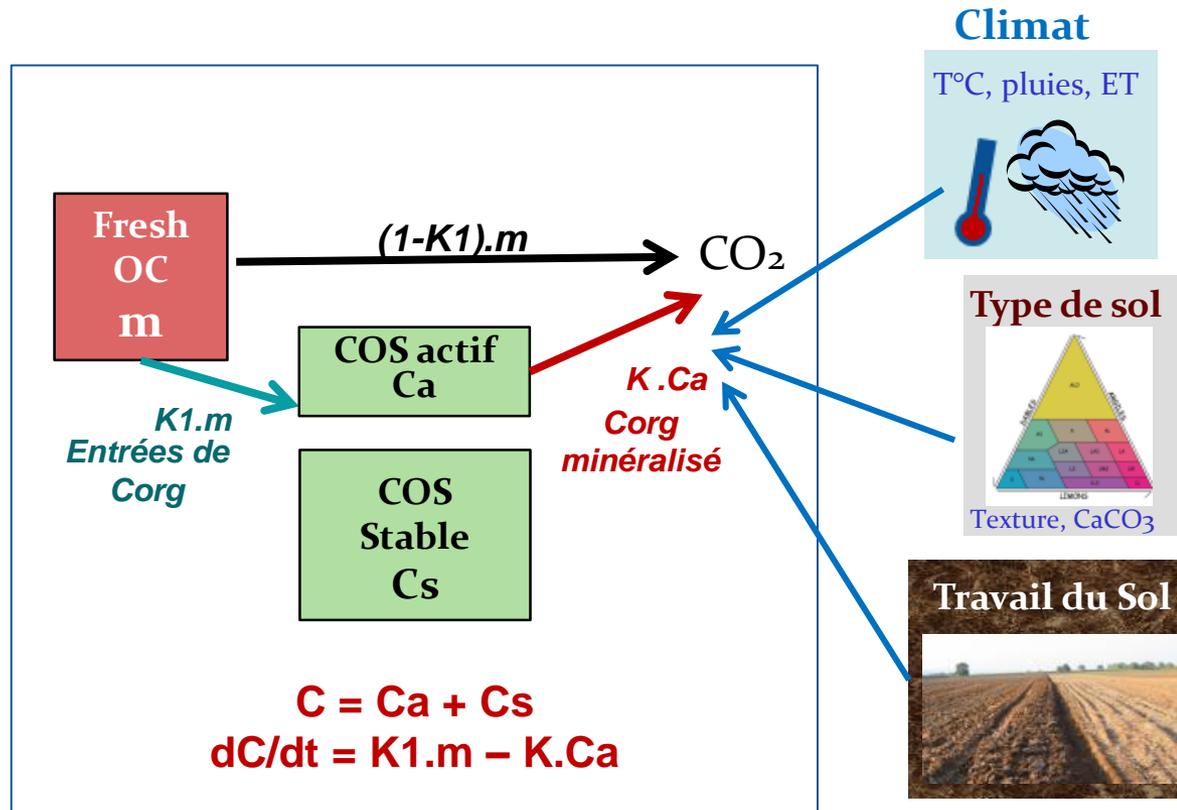
Comparaison K1 champ et ISMO

**ISMO des PRO
épanchés au
champ**



Source : Travaux de D. Jouseaume et S. Houot ; INRA Grignon, 2011

Calcul du coefficient de minéralisation K



$$K = K_o * f(\text{Argile}) * f(\text{CaCO}_3) * f(T) * f(\text{P-ETP}) * f(\text{Travail du sol}) \quad v.2008$$

$$K = K_o * f(\text{Argile}) * f(\text{CaCO}_3) * f(\text{pH}) * f(\text{C/N}) * f(T) * f(\text{P-ETP}) * f(\text{Travail du sol})$$

v.2017



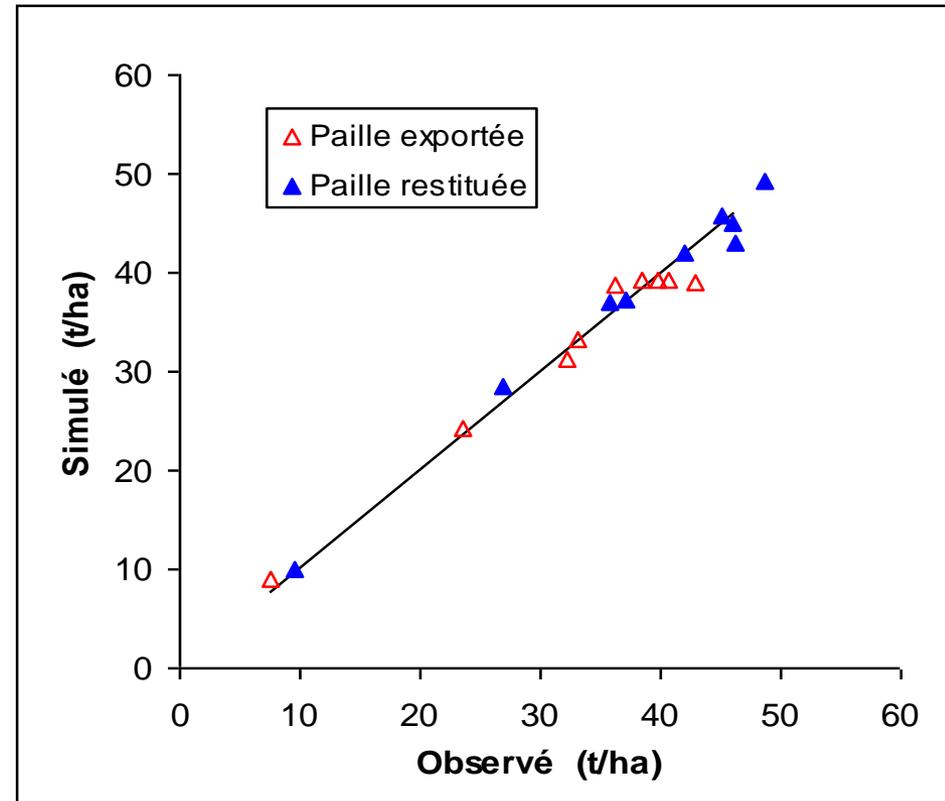
Evaluations récentes du modèle AMG en systèmes de grandes cultures

Evaluation sur 9 expérimentations de longue durée

Projet « Cartopailles » 2004 - 2007

Synthèse sur les 9 essais internationaux avec et sans exportations de pailles

- Ultuna (Suède) 35 ans
- Askov (Danemark) 31 ans
- Askov 2 (Danemark) 20 ans
- Khon Kaen (Thaïlande) 26 ans
- Issoudun (France) 32 ans
- Serreslous (France) 24 ans
- Doazit (France) 13 ans
- Grignon (France) 18 ans
- Boigneville (France) 12 ans



Saffih et Mary, 2008

Evaluation sur une BdD de 23 essais de long-terme en France

Projet CasDAR « AMG » (2009-2012)

Une base de données d'essais de LT construite pour évaluer le modèle

Sélection des essais sur :

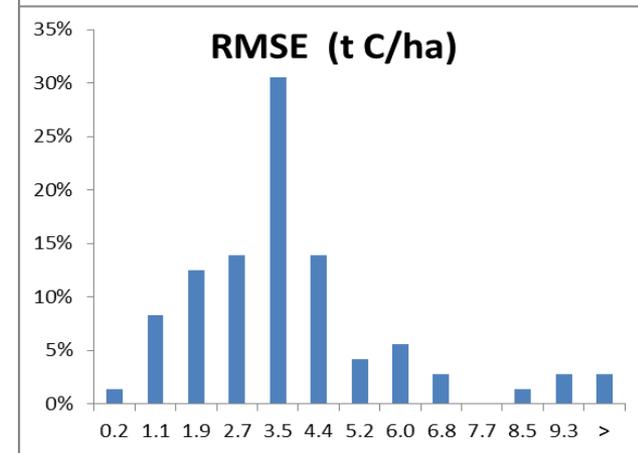
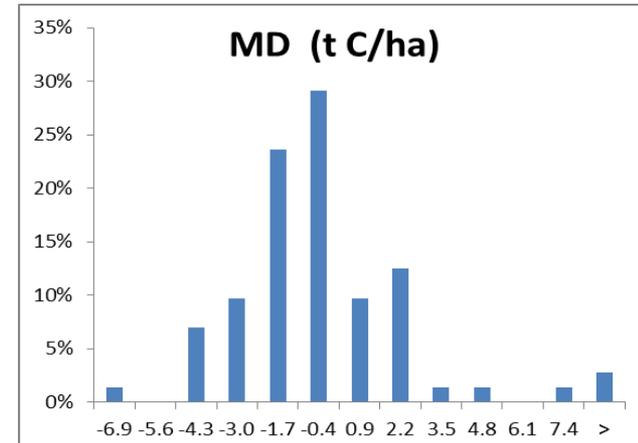
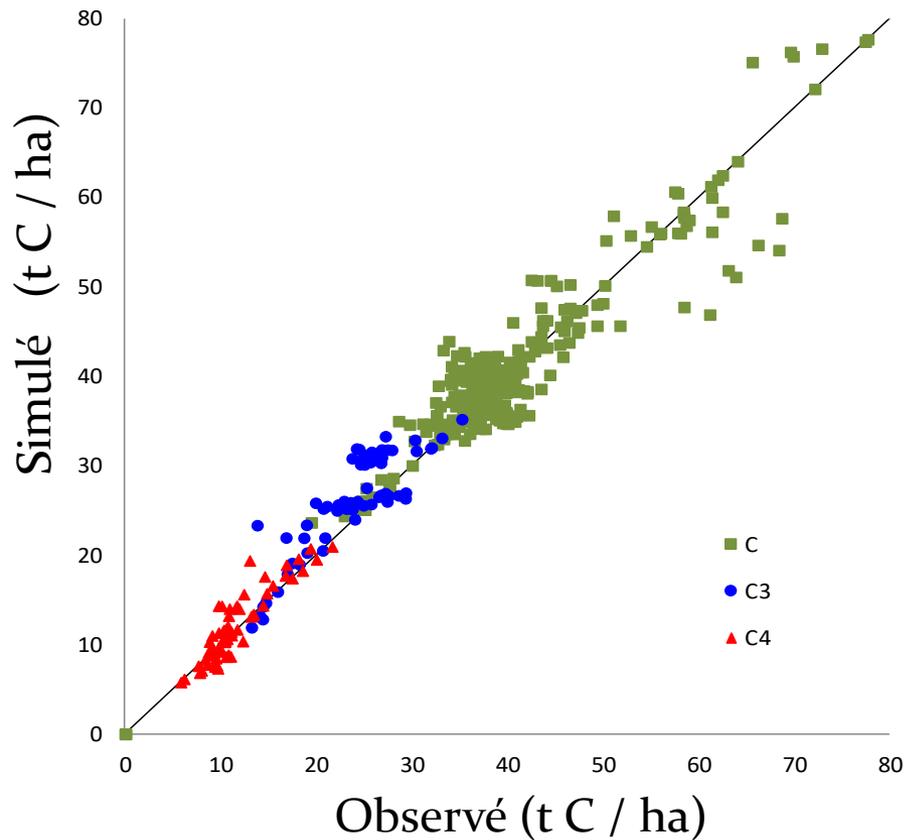
- La cohérence des cinétiques d'évolution observées du C org du sol
- Un nombre de dates de mesures du Corg du sol au cours de l'essai > 3 et une durée d'essai suffisante : > 7 ans
- La disponibilité des informations sur les système de culture pratiqués (cultures, rendements, gestion des résidus, pratiques de CI, nature, doses, analyses des amendements organiques
- La qualité des informations disponibles sur le mode de prélèvement pour analyse de terre et relation avec les pratiques de travail du sol



Evaluation sur une BdD de 23 essais de long-terme en France

Projet CasDAR « AMG » (2009-2012)

Stocks de C organiques Simulés / Observés



Test comparatif de SIMEOS-AMG et de 3 autres modèles sur un essai de longue durée à Changins *Maltas et al, 2011*

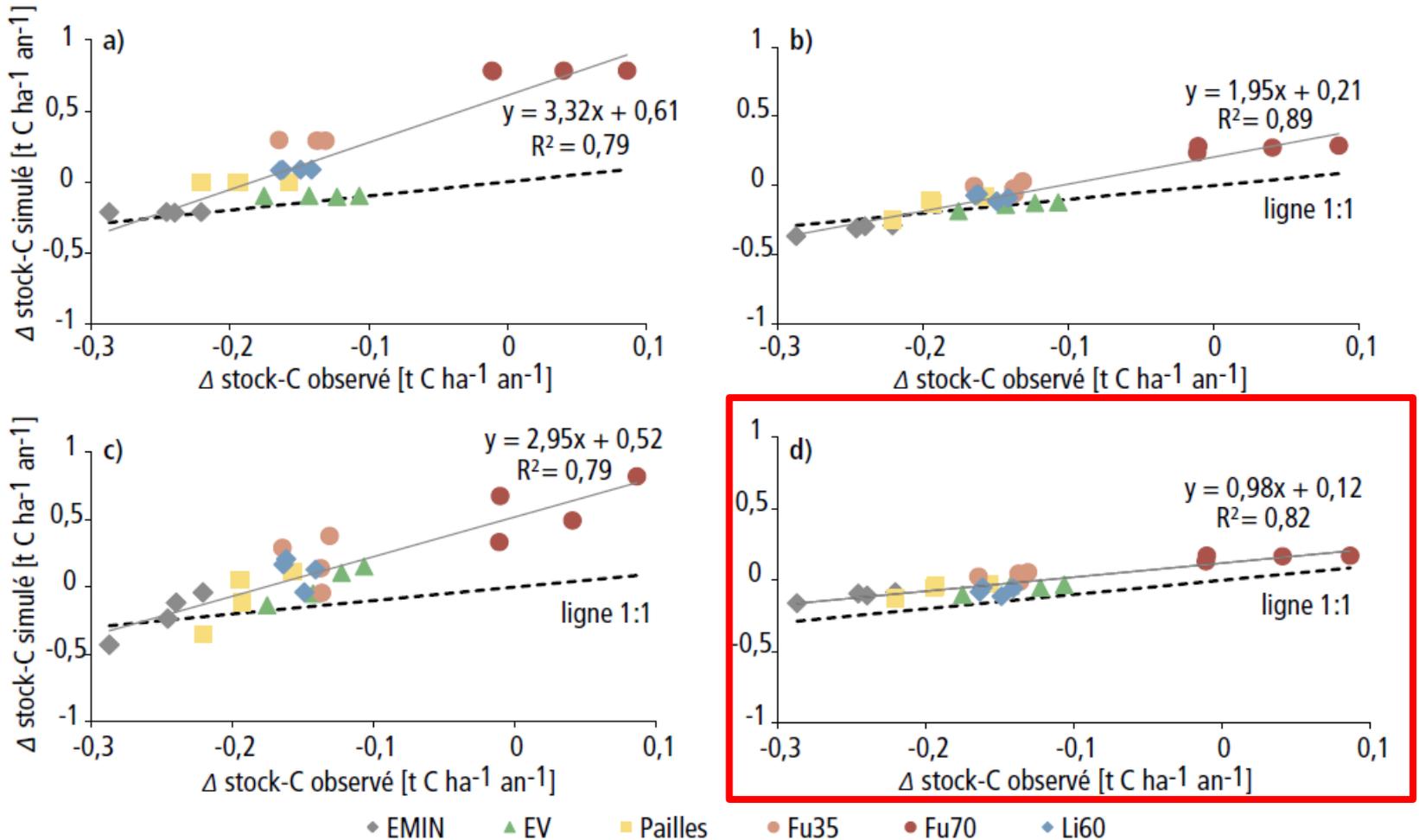


Figure 2 | Variations annuelles moyennes du stock de C sur 0–25 cm entre 1975 et 2009 observées (axe x) et simulées (axe y) par le modèle a) SALCA, b) VDLUFA, c) HUMOD et d) SIMEOS-AMG. Les quatre points pour un même procédé correspondent aux sous-procédés de fertilisation azotée.

SIMEOS-AMG, pour le pilotage dynamique des stocks de carbone organique des sols

Le modèle AMG :
Principes, structure, évaluation

L'outil Siméos-AMG :
Présentation,
Principales applications



L'outil en ligne SIMEOS-AMG :



Outil réalisé par :

En partenariat avec :

Avec le concours financier de :

Accès utilisateurs

Identifiant :

Mot de passe :

SIMEOS-AMG est un outil de simulation de l'évolution des teneurs et stocks en C organique du sol fondé sur le modèle de calcul du bilan humique AMG de l'INRA de Laon.

www.agro-transfert-rt.org

Contact : v.tomis@agro-transfert-rt.org

Documents PDF :



Dépliant Simeos



Guide utilisateur

SIMEOS AMG - version 1.0.2 - Propriété Agro-Transfert Ressources et Territoires & INRA

Mis au point dans le cadre du projet GCEOS, Agro-Transfert-RT, (2004-2011)

<http://www.agro-transfert-rt.org/>

Principe d'utilisation :

Accessible via internet : www.simeos-amg.com

Etape 1 : Saisie du système de culture et des conditions pédoclimatiques

Cultures:

	Culture	Rendement aux normes	Fréquence de restitution des résidus	Type travail du sol	Prof Travail du sol (cm)	Irrig. moy. (mm/ha/an)
1	Betterave sucrière (t/ha)	75	Toujours restitués	Labour	25	0
2	Blé hiver (q/ha)	80	Toujours restitués	Non Labour	10	0
3	Féverole (q/ha)	45	Toujours restitués	Labour	25	0
4	Blé hiver (q/ha)	85	Toujours restitués	Non Labour	15	0
5						
6						
7						
8						
9						
10						

Saisie des fréquences de cultures (optionnel)

Cultures intermédiaires:

	espèce	Biomasse	Fréquence
1	Moutarde	Faible (<1,5 T)	1 an sur 4
2			
3			
4			

Cultures dérobées:

	Espèce	Rendement	Fréquence
1			
2			
3			
4			

Données nécessaires en entrée de SIMEOS-AMG

Variables déterminant les entrées de Carbone dans le sol par humification :

- Succession de cultures
- Rendements des cultures de la succession
- Pratique des cultures intermédiaires
- Apports de Produits organiques

Variables influant sur les sorties de Carbone par minéralisation :

- Teneur du sol en argiles vraies
- Teneur du sol en calcaire total
- Température moyenne et Bilan pluie – ETP annuels
- Type et fréquence de travail du sol

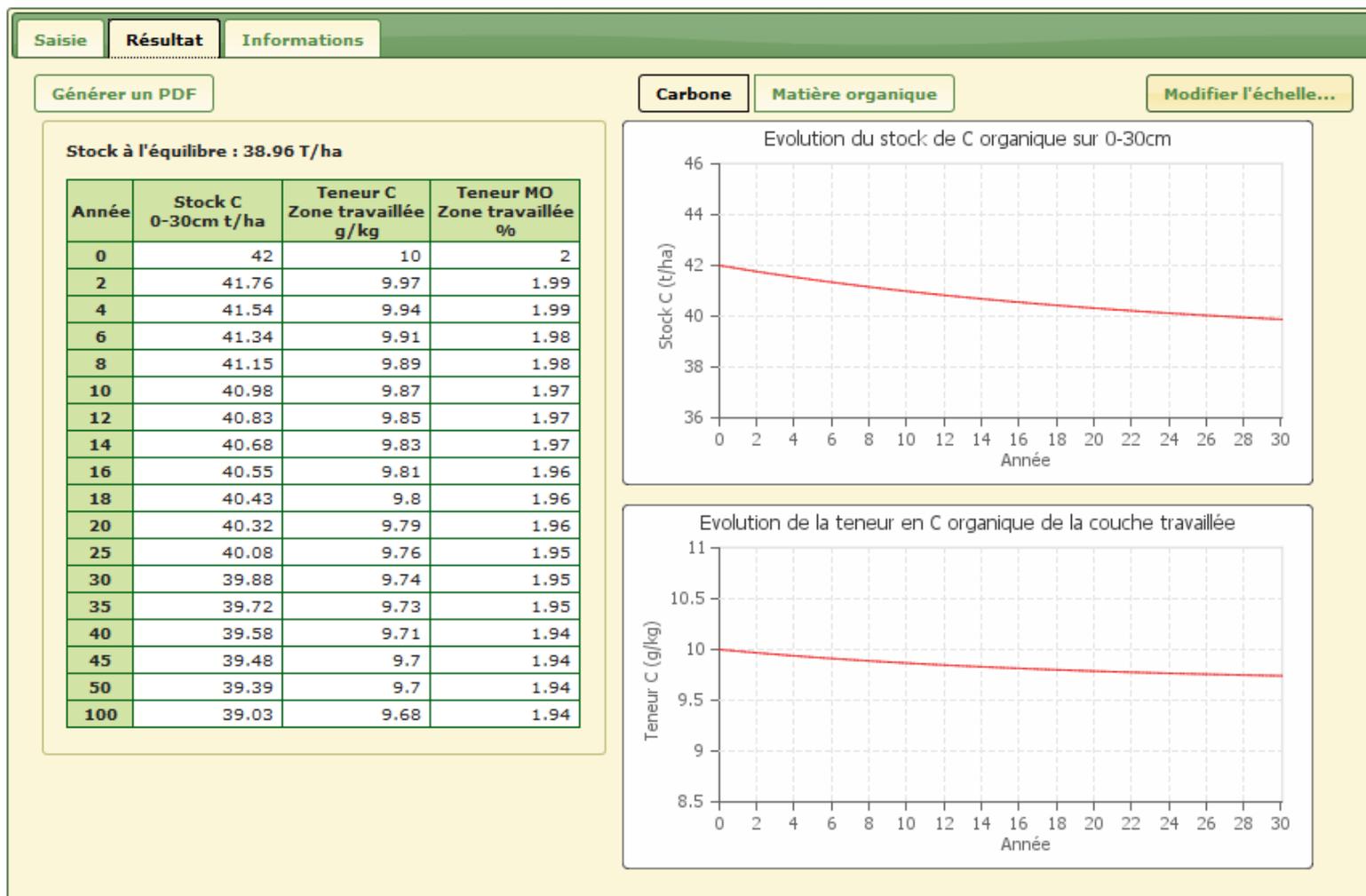
Variables déterminant le stock de Carbone organique initial :

- Teneur en carbone organique actuelle (récente)
- Densité apparente
- Profondeur de sol considérée

Principe d'utilisation :

Etape 1 : Saisie du système de culture et des conditions pédoclimatiques

Etape 2 : Visualisation des résultats et diagnostic du système de culture



Système Légumier en limon

Rotation culturale :

Pomme de Terre / Blé / Pois conserve /
Betteraves / Blé / Carottes

Système actuel :

- Labour : 2 ans sur 3
- Prof. de labour : 28 cm
- Engrais vert : 1 an/3

Scénario A

(réduction des pertes de C)

- Suppression d'un labour (1 an sur 2)
- Réduction de la profondeur de labour à 22 cm

Scénario C

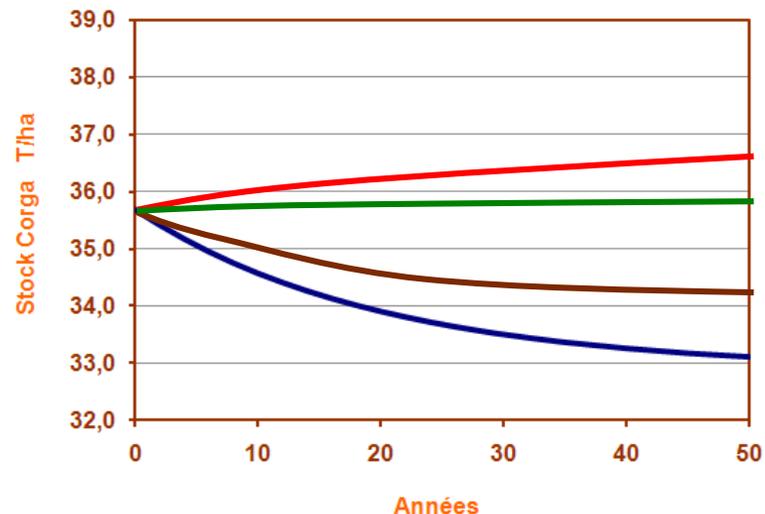
- Apport de 10 T/ha de compost de déchets verts/6ans
- Suppression d'un labour et réduction de prof. Labour à 22 cm

Scénario B

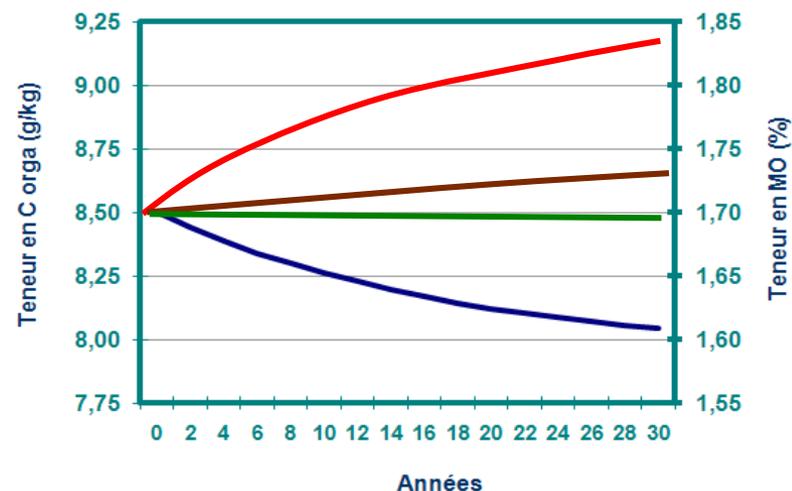
(augmentation des restitutions humiques)

- Apport de 10 T/ha de compost de déchets verts /6ans
- Engrais vert : 1 an sur 2

Evolution du Stock de C organique sur 30 cm

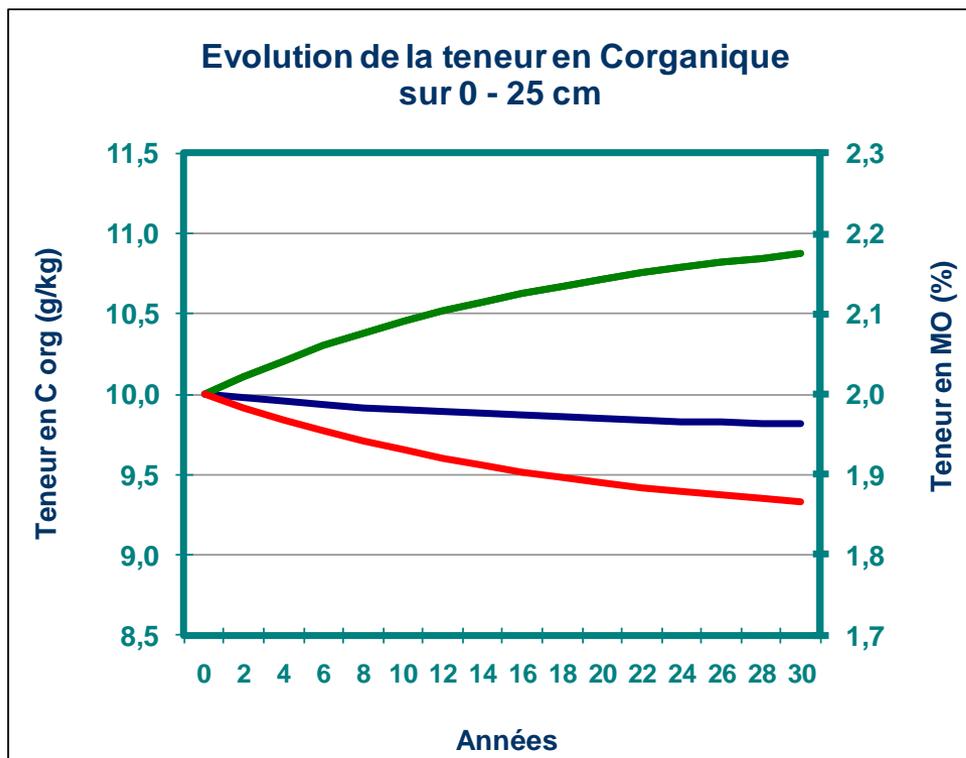


Evolution de la teneur en C organique sur la couche travaillée



La dynamique d'évolution des MO du sol dépend :

- de la succession culturale



Rotations culturales :

Colza - blé - orge

Bett - blé - féverole - blé

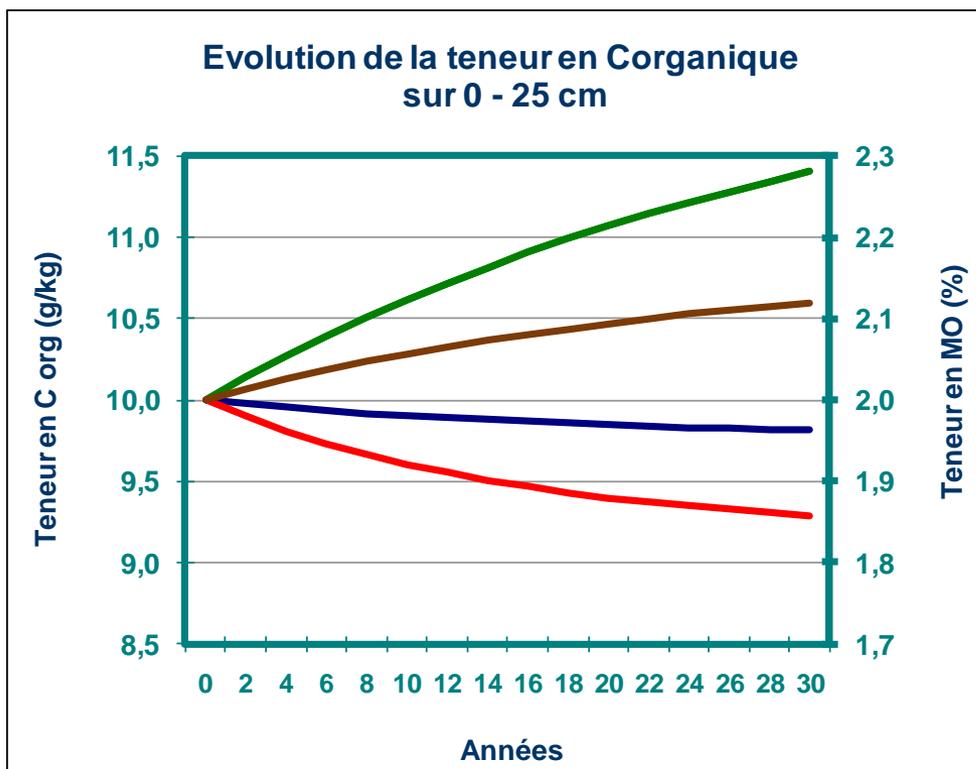
Bett - pdt - blé - haricot - blé

Simulation réalisée sur un sol limoneux

Labour 1 an/2 à 25 cm ; pailles restituées, cultures intermédiaires 1 an/4

La dynamique d'évolution des MO du sol dépend :

- de la succession culturale
- du type de sol



Types de sol :

Sol crayeux
(10 % d'argile, 600 g/kg de CaCO₃)

Limon argileux (25 % d'argile)

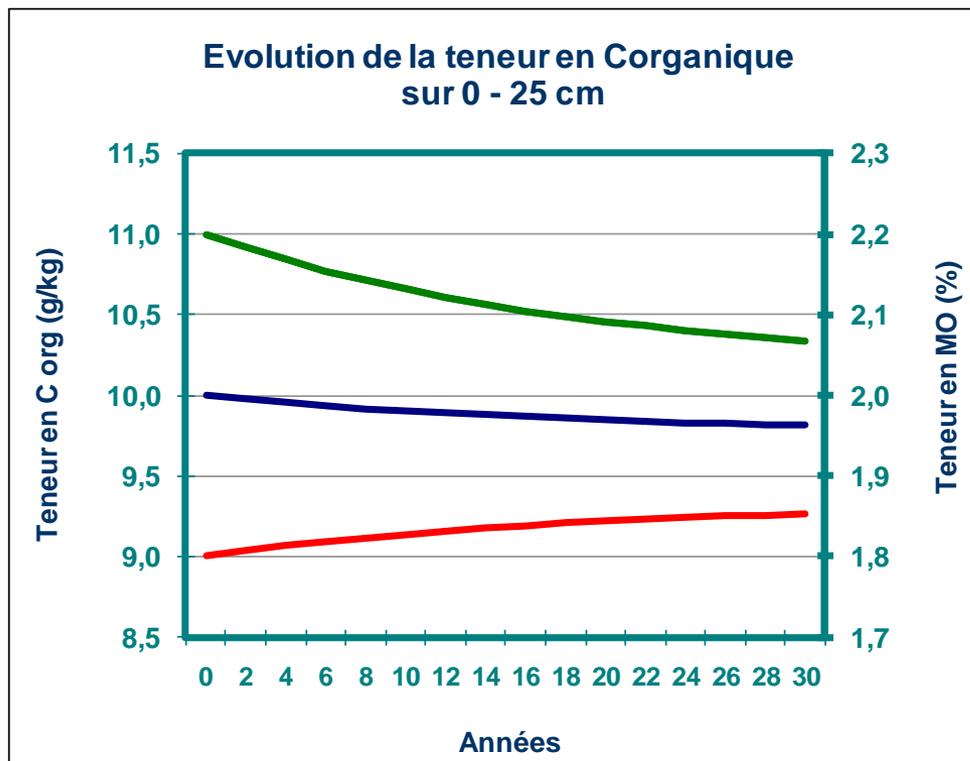
Limon (16 % d'argile)

Sable limoneux (8 % d'argile)

Simulation réalisée à partir d'une rotation betterave – blé – féverole – blé
Labour 1 an/2 à 25 cm ; pailles restituées, cultures intermédiaires 1 an/4

La dynamique d'évolution des MO du sol dépend :

- de la succession culturale
- du type de sol
- du taux de MO initial



Taux de MO initial :

2,2 % de MO initial

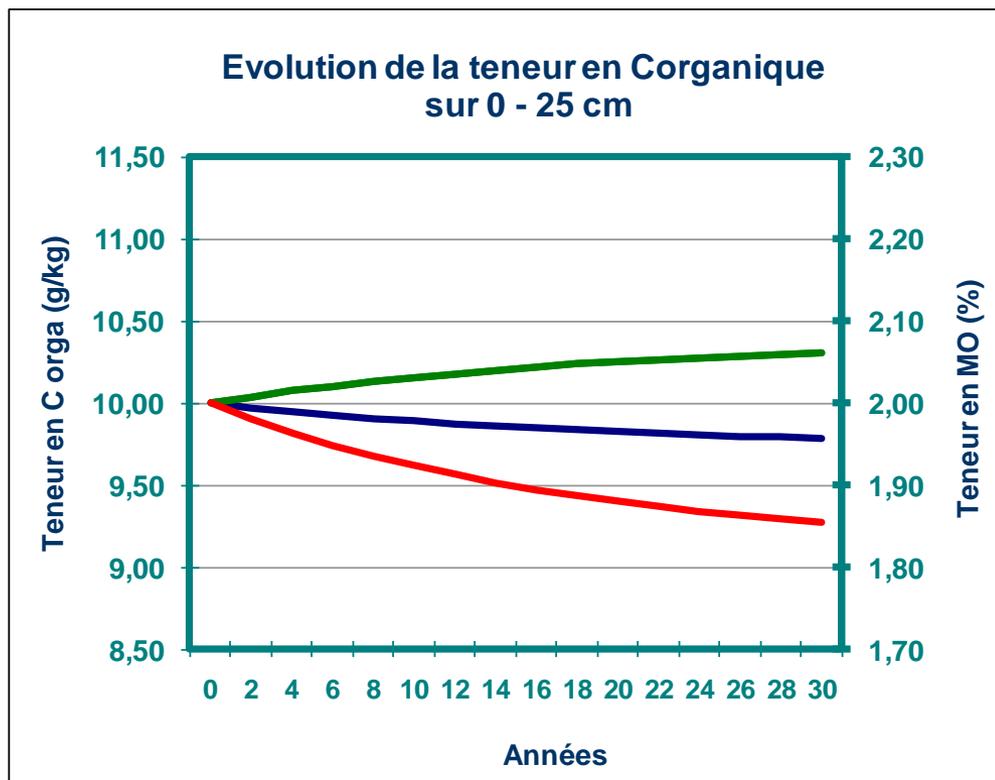
2 % de MO initial

1,8 % de MO initial

Simulation réalisée à partir d'une rotation betterave – blé – féverole – blé en sol limoneux
Labour 1 an/2 à 25 cm ; pailles restituées, cultures intermédiaires 1 an/4

La dynamique d'évolution des MO du sol dépend :

- de la succession culturale
- du type de sol
- du taux de MO initial
- de la productivité



Niveaux de rendement :

+ 20 % de rendement

Rendement moyen (blé à 80 q/ha)

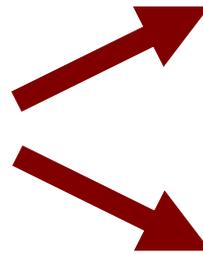
- 20 % de rendement

Simulation réalisée à partir d'une rotation betterave - blé - féverole - blé en sol limoneux
Labour 1 an/2 à 25 cm ; pailles restituées, cultures intermédiaires 1 an/4

Interprétation des sorties des simulations

A chaque objectif ses types d'effets recherchés :

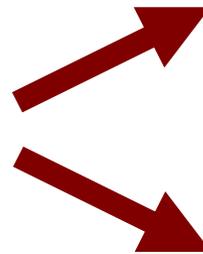
Objectif stabilité structurale
(lutte contre la battance, érosion...)



Effet **TENEUR** en MO

Effet **FLUX** de MO fraiche

Objectif fourniture d'azote



Effet **STOCK** de MO humifiée

Effet **FLUX** de MO fraiche

Objectif activité biologique



Effet **FLUX** de MO fraiche

Interprétation des sorties des simulations

A chaque objectif ses types d'effets recherchés :

Effet LT

≠

Effet CT



« Capital »

Matière organique stable

- CEC
- PUIITS DE CARBONE
- STABILITE STRUCTURALE
liaison entre particule et
diminution mouillabilité

Effet **TENEUR** ou **STOCK** de MO

« Chiffre d'affaire »

- Matières organiques labile
- Biomasse microbienne
 - STABILITE STRUCTURALE
liaison particules et contention
mécanique
 - FOURNITURES éléments

Effet **FLUX** de MO fraiche

Quelle proportion des pailles peut-on exporter sans risque sur une parcelle ?

Cas-types		Teneurs en C organique actuelles du sol (en g/kg)	Teneurs en MO actuelles du sol (en ‰)	Possibilités d'exportation des pailles sans apports organiques extérieurs	Possibilités d'exportation des pailles avec apports organiques extérieurs
Système de culture	Type de sol				
Cas 1 : 0 à 25 % de céréale + pdt – légumes – betteraves 1 céréale tous les 5 – 6 ans	Sables et limons			Teneurs en MO faibles et restitutions organiques faibles => pas d'exportation	Teneurs en MO faibles et restitutions organiques faibles => pas d'exportation
	Cas 2 : 25 à 40 % de céréale – colza + betteraves - pdt – légumes 1 céréale tous les 3 ans	Sables, limons et limons argileux			
Cas 3 : 40 à 60 % de céréale – colza + betteraves – pdt – protéagineux 1 céréale tous les 2 ans	Sables et limons	7 à 10	14 à 20	Pas d'exportation	1 paille/4
	Limons argileux	8,5 à 10,5	17 à 21	Pas d'exportation	1 paille/2
Cas 4 : 60 à 70 % de céréale - colza + betteraves - protéagineux	Sables	7 à 9	14 à 18	Pas d'exportation	1 paille/3
	Limons	8,5 à 10,5	17 à 21	1 paille/5	1 paille/2
	Limons argileux	9 à 11	18 à 22	1 paille/3	3 pailles/4
	Cranettes	11 à 14	22 à 28	1 paille/3	3 pailles/4
Cas 5 : 65 à 85 % de céréale – colza + betteraves - protéagineux <i>Exemple de rotation :</i> <i>betterave – blé – orge – colza - blé</i>	Sables	7 à 9	14 à 18	1 paille/4	3 pailles/4
	Limons	8,5 à 11	17 à 22	1 paille/3	3 pailles/4
	Limons argileux	9 à 11	18 à 22	1 paille/3	3 pailles/4
	Argiles	10 à 12,5	20 à 25	1 paille/2	Toutes les pailles
	Cranettes	11,5 à 14	23 à 28	1 paille/2	Toutes les pailles

Quelle proportion des pailles peut-on exporter sans risque sur une parcelle ?

Cas-type

Système "SCOP + betteraves"
Sol : Limon moyen

betterave – blé – orge - colza – blé.
Engrais verts : 1 année/5
Labour à 25 cm

Hypothèse teneur
en MO du sol

Hypothèse
travail du sol

1,8 % de MO

Labour 80% **1**

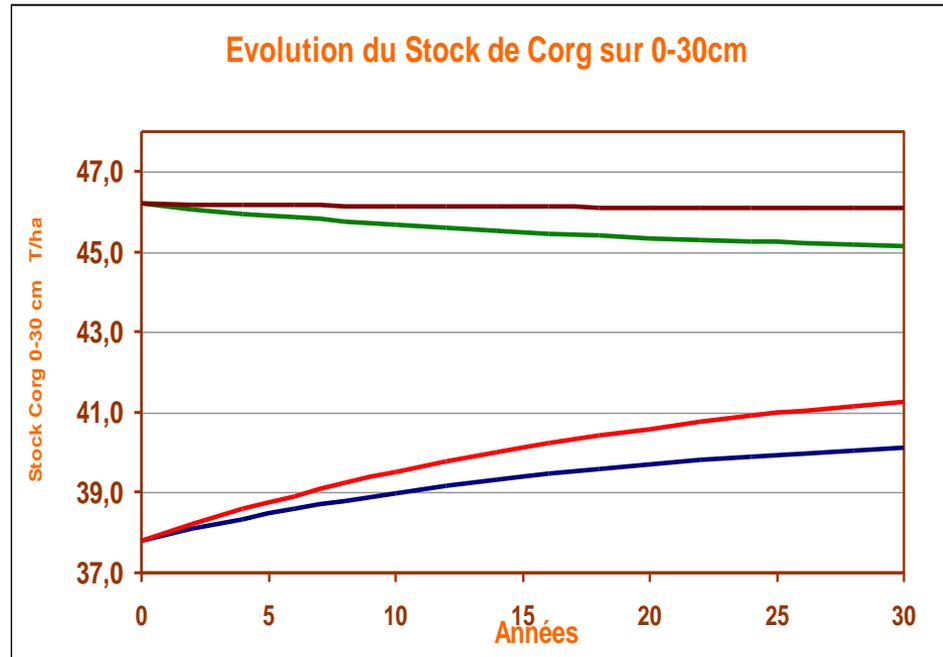
Labour 40% **2**

2,2 % de MO

Labour 80% **3**

Labour 40% **4**

Simulations
par AMG



Exportation
de paille
permise

4

→ 0%

3

→ 0%

2

→ 1paille/2

1

→ 1paille/3

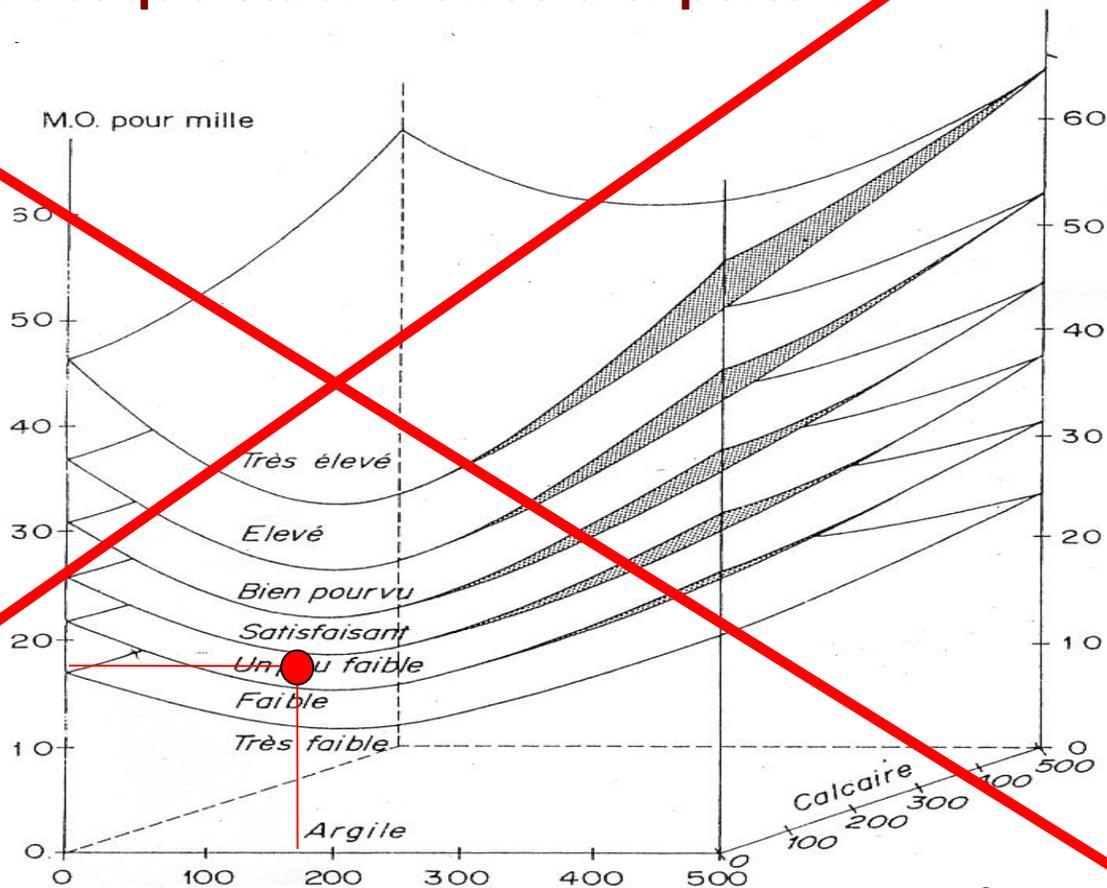
Préserver l'état organique du sol

Quelle teneur en MO rechercher dans un sol ?

Un abaque établi à dire d'experts...

Appréciation de l'état organique du sol en fonction de ses teneurs en MO, en argile et en calcaire

...actuellement remis en question, pour une utilisation hors de son cadre de mise au point (levée de la carte des sols de l'Aisne) !



Capacité de rétention d'eau ← Stabilité structurale → Travailleabilité

Source : Rémy et Marin-Lafleche, 1974

Quelle proportion des pailles peut-on exporter sans risque sur une parcelle ?**Référence à une teneur en C organique repère**

Principe : Eviter la détérioration sur le long terme de l'état organique des sols et des propriétés qui s'y attachent

Raisonnement **par grand type de situation (cas-type) croisant système de culture et type de sol.**

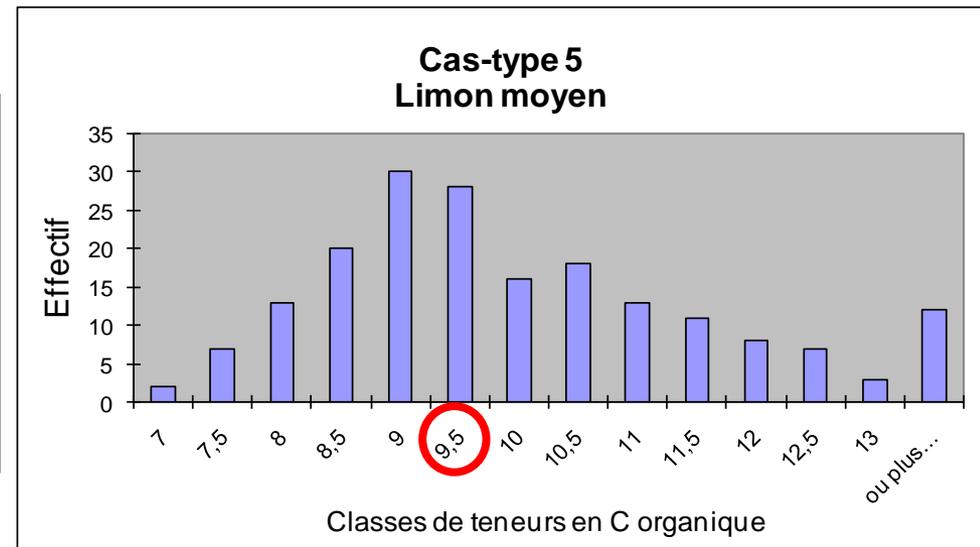
Teneur repère = Médiane des teneurs en MO observées pour chaque cas-type
indicateur d'une teneur satisfaisante

Système "SCOP + betteraves"**Sol limon moyen**

Rotation : betterave – blé – orge – colza – blé

Culture intermédiaire 1 année /5

Labour 3 ans/5 à 25 cm



Quelle proportion des pailles peut-on exporter sans risque sur une parcelle ?

Système "SCOP + betteraves"

Sol limon moyen

Rotation : betterave – blé – orge – colza – blé

Culture intermédiaire 1 année /5

Labour 3 ans/5 à 25 cm

Exportation de paille permise

Critère environnemental	Critère agronomique + environnemental
----------------------------	---

1 paille /3

1 paille /3

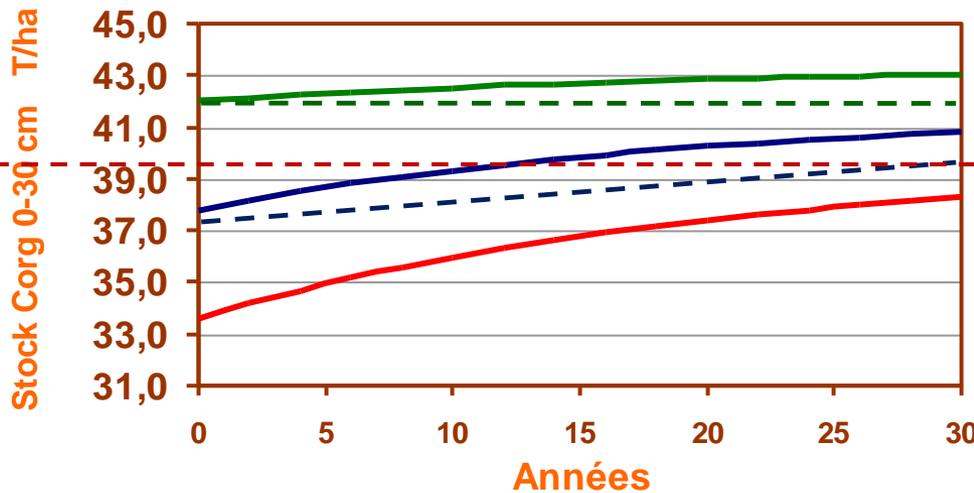
1 paille /2

1 paille /3

2 pailles /3

0 %

Evolution du Stock de Corga sur 0-30cm



9,5 g/kg de C orga



Programme ADEME REACTIF- REcherche sur l'Atténuation du Changement Climatique par l'agriculture et la Forêt

ABC'TerrE

Atténuation du Bilan gaz à effet de serre agricole intégrant le Carbone du sol, sur un TERRITOIRE

Porté par



En partenariat avec :



Soutenu par le RMT Sols et Territoires :



Les collaborateurs ABC'Terre :

O. Scheurer, L. Mata F. Vandewalle (Lasalle Beauvais) ; P. Van Dijk, C. Rosenfelden (ARAA) ; R. Koller, J. Sauter P. Martin, N. Piskiewicz (AgroParisTech); L. Guichard, B. Mary, N. Saby (INRA) ; S. Sagot (LDAR) ; JL Fort, M. Vigot (Chambre Régionale de Poitou-Charentes) ; A. Duparque, C. Godard, F. Vandewalle, C. Delame (Agro-Transfert-RT),
Dossier suivi par T. Eglin (ADEME)

Projet ABC'TerrE

AaP REACTIF ADEME 2012

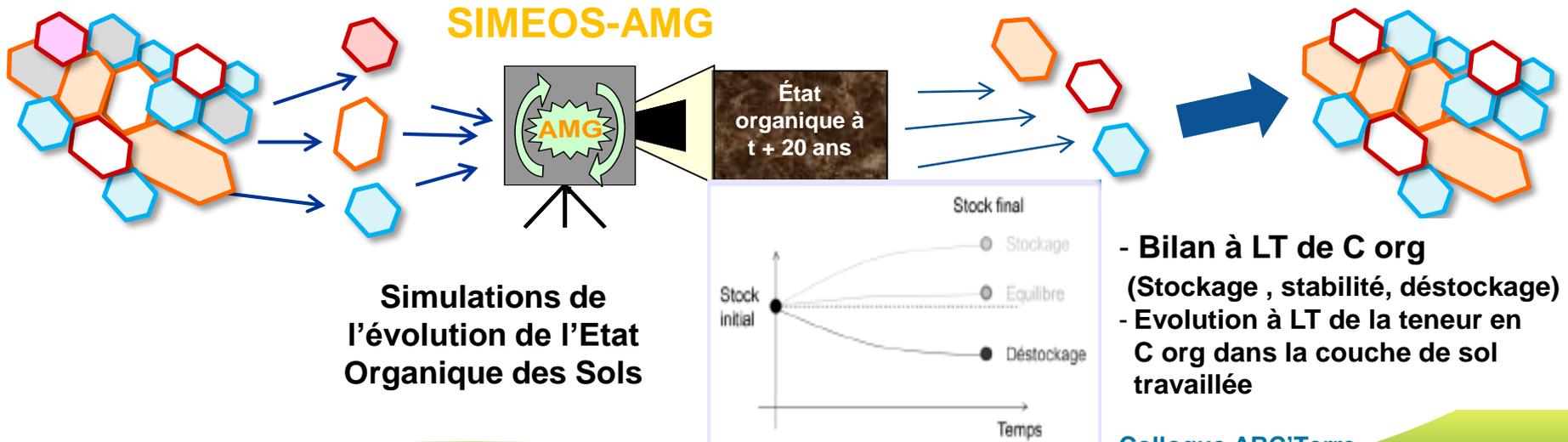
Inventaire des Combinaisons
Système de culture X Sol
x Stock de C organique
localisées sur le territoire

Bases de données nationales spatialisées
et l'outil PRG-Explorer
Bases de données et expertise locales

Diagnostic spatialisé
des Δ Stocks C organique
des sols agricoles à LT

situation actuelle

situation à long terme



Des méthodes récemment mises au point à l'échelle du territoire

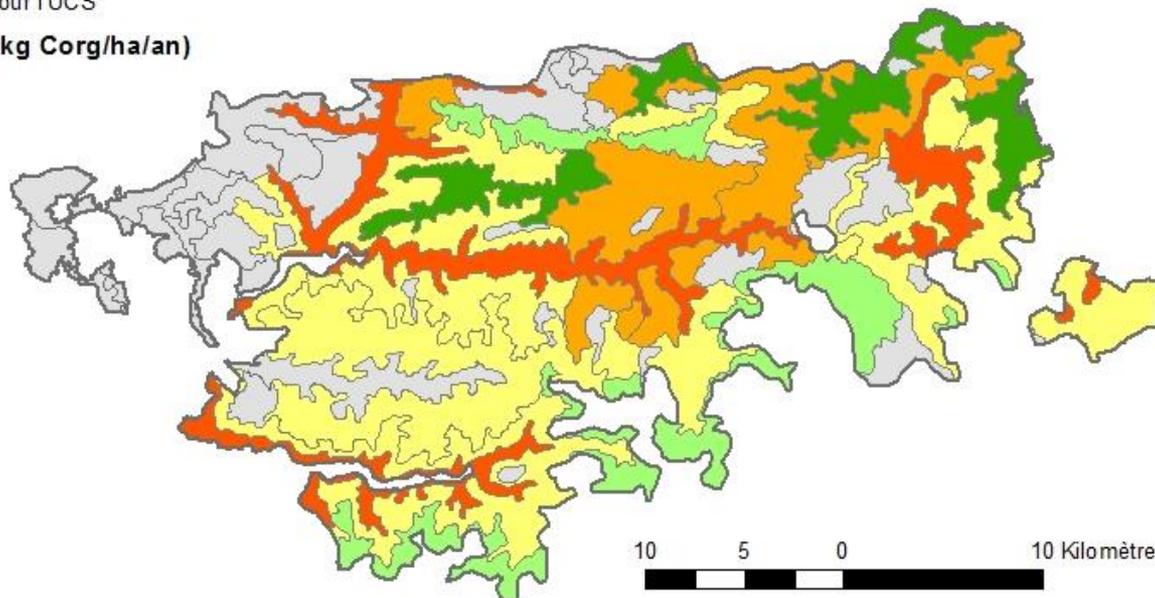
Diagnostic de l'évolution des stocks de C organique des sols cultivés pour la PRN du Tardenois (Aisne)

Représentation cartographique des résultats

Pas de successions définies pour l'UCS

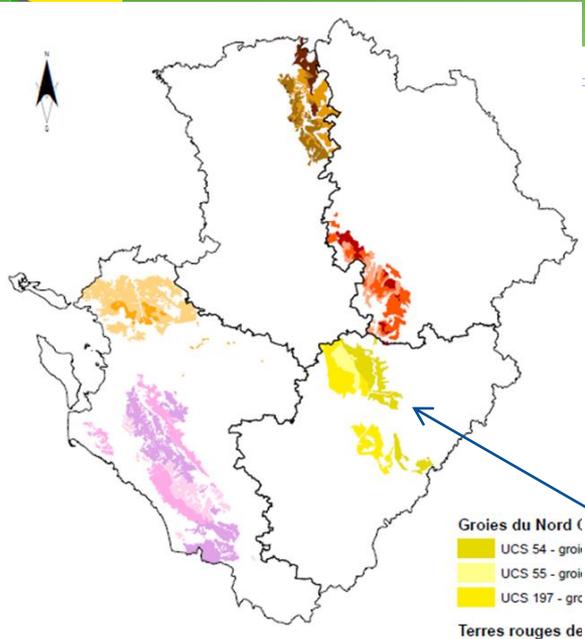
Classe de stockage de Corg (kg Corg/ha/an)

- 1 : de 110 à 130
- 2 : de 130 à 150
- 3 : de 150 à 180
- 4 : de 180 à 210
- 5 : plus de 210



UCS : Unité Cartographique de Sol

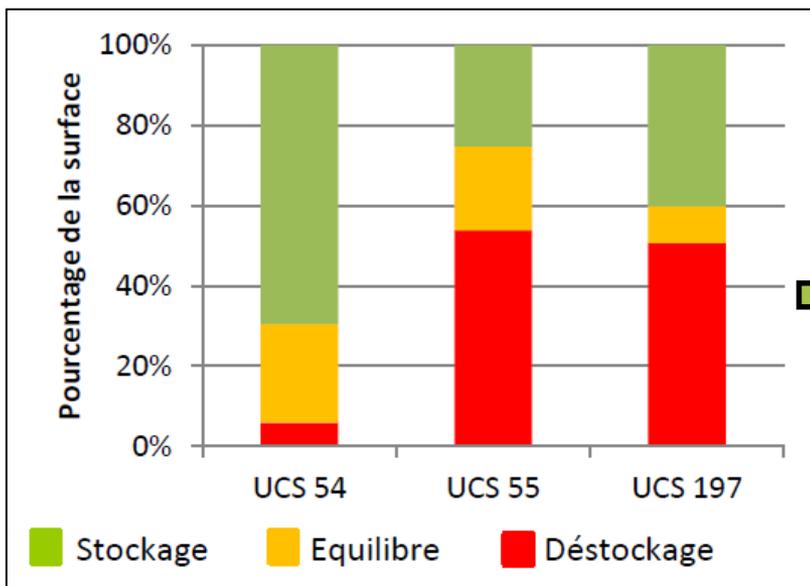
(Source : Vigot, 2012)



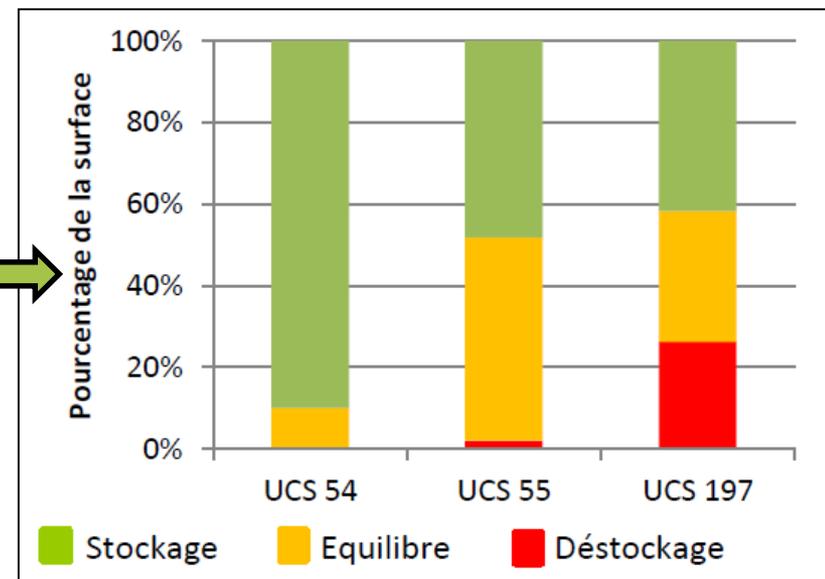
Simulations de systèmes modifiés

Terres de Groies du Nord Charente

Sans cultures intermédiaires

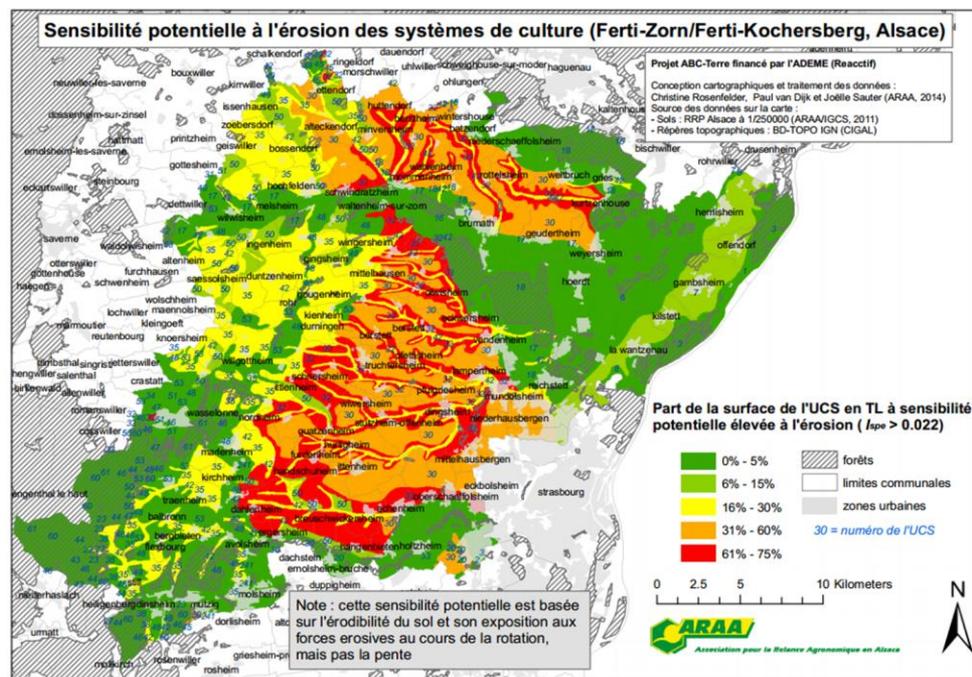


Avec généralisation des cultures intermédiaires



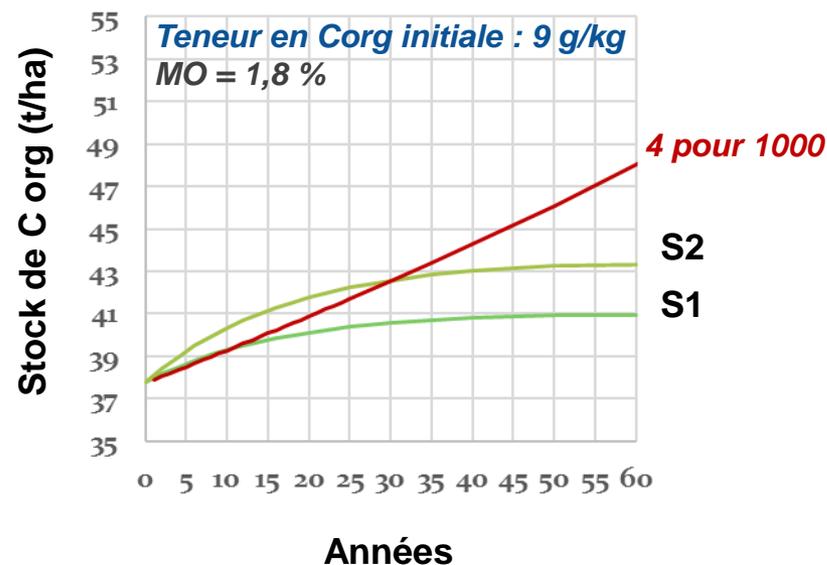
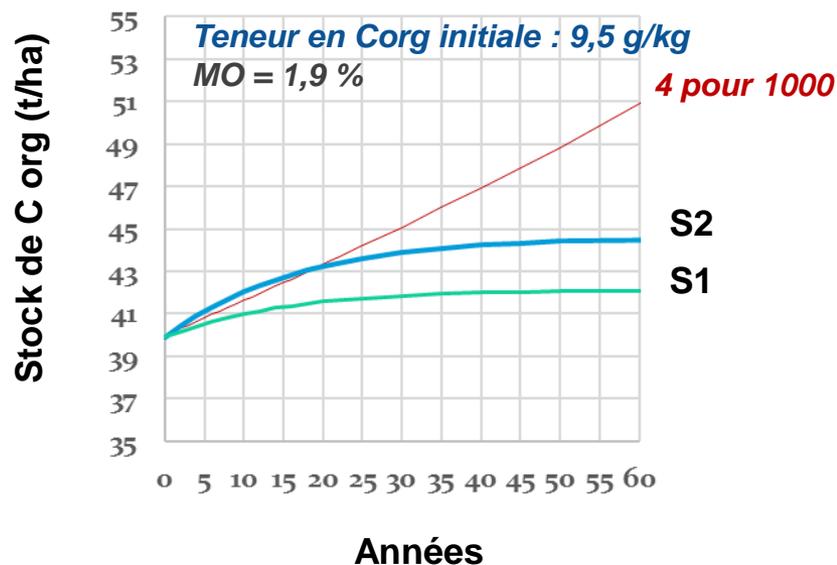
Un bilan territorial du carbone organique des sols

- qui valorise des **bases de données nationales** sur les cultures (*RPG*) et les sols (*RRP, BDAT*) et l'**expertise locale** sur les pratiques culturales
- appliqué en Alsace pour le **diagnostic des risques d'érosion** et la **simulation des impacts de changements de pratiques agricoles** à cette échelle sur ce risque



RPG : Registre parcellaire graphique ;
RRP : Référentiel Régional Pédologique ;
BDAT : Base de Données d'Analyses de Terre

Comparaison de la dynamique d'évolution du stock de C organique en parcelle agricole à la dynamique théorique d'augmentation annuelle de 4 pour 1000 pour différentes situations agronomiques



Système : Sol limoneux

Climat Saint-Quentin

Rotation : Betterave-Blé-Orge printemps-Féverole-Blé Labour = 2 ans/5

Amendement organique : 10 t compost DV 1 an/5

Culture intermédiaire : Moutarde S1 : 2 ans/5 avec biomasse 1 à 2 t MS/ha

S2 : 3 ans/5 avec biomasse 2 à 3 t MS/ha

Source : Agro-Transfert-RT, 2016 Simulations réalisées avec Simeos-AMG

Perspectives

Des évolutions en cours et prévues du modèle AMG

dans le cadre du projet SoléBIOM (AaP SAS Pivert, 2015-2018) et travaux du Consortium AMG

- Module Résidus : amélioration et compléments du paramétrage (ajout de CIVEs)
- K1 des PRO
- Fonction de minéralisation du C organique du sol
- Paramétrage simple des prairies temporaires

=> **Une mise à jour consécutive de Simeos-AMG** avec aménagements de l'interface de saisie : en particulier, Module « PRO »

- **Des travaux pour développer un AMG-Vignes** avec l'IFV
- **Le paramétrage prévu d'AMG sur cultures énergétiques pérennes** (dont *Miscanthus*) *Projet CE-CARB, AaP GRAINE ADEME*
- **La poursuite du développement d'ABC'Terre** (*Projet ABC'Terre-2A, AaP Graine ADEME 2016*) => Vers une démarche d'évaluation des bilans Carbone des sols et GES dans le cadre des PCAET



**Merci pour
votre
attention**

A la source des résultats et éléments présentés, plusieurs projets :

- **Thèse d'A. Andriulo** (1997-1999) INRA Laon
- **Etude de Richard Wylleman et B. Mary**, 1999, *porteur : INRA Laon ; partenaires : Experts fonciers, Chambres d'agriculture de Picardie*
- **Projet régional CARTOPAILLE** (2004-2007), *porteur : FRCA ; partenaires INRA Laon, Arvalis, Lasalle Beauvais, Agrotransfert-RT*
- **Projet régional de Gestion et Conservation de l'Etat Organique des Sols** » (GCEOS , 2004 – 2011), *Porteur Agro-Transfert-RT, partenaires : INRA Laon, LDAR, Chambres d'agriculture de Picardie, Lasalle Beauvais, Experts fonciers, FRCA*
- **Projet CasDAR « AMG »**, 2009-2012) *porteur Arvalis, partenaires : INRA, Agro-Transfert-RT, LDAR => Consortium « AMG »*
- **Projet CasDAR « Réseau PRO »**- (2011-2014)- *Porteur : INRA Ecosys Grignon, Partenariat large (30 partenaires)*
- **Projet ABC'Terre** (AàP REACCTIF ADEME 2012 ; 2013-2016) *Porteur : Agro-Transfert-RT ; Partenaires : ARAA, UniLasalle, AgroParisTech, INRA (Infosol Orléans, AgroImpact Laon, Agronomie Grignon) LDAR, CRA-Poitou-Charentes*
- **Projet SOLéBIOM** AàP SAS Pivert (2015 – 2018) – *Porteur Agro-Transfert-RT ; partenaires : INRA Agroimpact Laon et Ecosys Grignon, Terres Inovia, Arvalis*
- **Projet ABC'Terre-2A** (AàP GRAINE, ADEME ; 2017 – 2020) ; *Porteur : Agro-Transfert-RT ; partenariat : ARAA, Unilasalle, AgroParisTech, INRA Infosol, LDAR, Chambres d'agriculture de l'Aisne, du Nord_Pas-de-calais, de Nouvelle Aquitaine*