UCL Université catholique de Louvain
Université partenaire de l'Académie universitaire 'Louvain'

Teneurs en matière organique des sols en Région Wallonne

Méthodologie pour les cartes et figures réalisées à la demande de la DGRNE dans le cadre de la mise à jour des indicateurs de l'Etat de l'Environnement Wallon 2008

Mai 2008

Goidts Esther
Meersmans Jeroen
van Wesemael Bas

Département de géographie de l'UCL

UCL Unité de géographie
SC/GEO/**GEOG**

Table des matières

1. INTRODUCTION **3**

2. MODÉLISATION DE LA TENEUR EN C **3**

3. SPATIALISATION DE LA TENEUR EN C **10**

3.1 DONNÉES SPATIALES UTILISÉES 10

3.2 CARTES DES TENEURS EN MATIÈRE ORGANIQUE POUR L'ANNÉE 2005 12

- **Sols de culture (cartes SOLS 2-1a)** 13
- **Sols de prairie (cartes SOLS 2-1b)** 18
- **Sols de culture et de prairie (carte SOLS 2-1c)** 23
- **Validation avec les données REQUASUD** 25

3.3 CARTES DE L'ÉVOLUTION DES TENEURS EN MATIÈRE ORGANIQUE ENTRE 2005 ET 1955 29

- **Sols de culture (cartes SOLS 2-2a)** 30
- **Sols de prairie (cartes SOLS 2-2b)** 33
- **Sols de culture et de prairie (cartes SOLS 2-2c)** 37

4. EVOLUTION DES STOCKS DE C ET FACTEURS EXPLICATIFS **39**

4.1 EVOLUTION DES STOCKS DE C ENTRE 2005 ET 1955 (FIG. SOLS 2-2) 39

4.2 FACTEURS EXPLICATIFS 42

5. ESTIMATION DES QUANTITÉS DE MO À APPORTER ET DU TEMPS NÉCESSAIRE POUR RELEVER LE STOCK DE C DES SOLS DÉFICITAIRES **47**

6. CONCLUSIONS **52**

7. RECOMMANDATIONS **53**

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES **54**

ANNEXES **57**

1. CORRESPONDANCE AVEC LES PRINCIPAUX TYPES DE SOLS (PTS) DE LA CARTE NUMÉRIQUE DES SOLS DE WALLONIE (CNSW) 57

2. DESCRIPTION DES UNITÉS DE PAYSAGE RÉ-ÉCHANTILLONNÉES 59

3. DESCRIPTION DE LA TABLE DE DONNÉES « DATA » AYANT SERVI À LA CONFECTION DES CARTES 61

1. Introduction

Ce document décrit la méthodologie utilisée pour la mise à jour des indicateurs de l'Etat de l'Environnement Wallon (EEW) concernant la teneur en matière organique (MO) des sols de la Région Wallonne et son évolution entre 1955 et 2005. Ce document propose également une analyse succincte des résultats obtenus.

La teneur en MO (exprimée en %) est obtenue en multipliant par 2 la teneur en carbone organique du sol (COS) mesurée en laboratoire (g C kg^{-1}) [1]. Les résultats obtenus sont exprimés selon l'une ou l'autre forme, selon les nécessités (pour permettre par exemple la comparaison avec d'autres travaux).

La production d'une carte des teneurs en MO suppose l'utilisation d'un **modèle** permettant de spatialiser cet indicateur à travers la zone d'étude. Ce modèle peut être de type empirique (le processus décrit est basé sur une relation empirique) ou de type méchanistique (le processus décrit est basé sur des relations explicites). L'approche utilisée pour cette étude est empirique, sachant que les **données de COS** sont nombreuses et bien distribuées spatialement de la zone d'étude (base de données Aardewerk pour les années 1955 et campagne de ré-échantillonnage d'environ 550 profils de sols pour la période 2005).

La **spatialisation** des teneurs en MO à partir des variables et des paramètres repris dans le modèle est ensuite réalisée et conduit à la production d'un ensemble de cartes présentant les indicateurs (teneurs en MO en 2005 et évolution des teneurs en MO entre 1955 et 2005).

L'analyse des cartes permet d'identifier les **zones déficitaires en MO**, et l'analyse de l'évolution des teneurs en C exprimées en stocks de C permet de mettre en évidence les principaux **facteurs explicatifs** de l'évolution observée.

Enfin, la **restauration** des teneurs en MO des sols déficitaires est discutée sur base des gisements de MO produits en Wallonie (secteurs agricole, forestier, agro-industriel et public).

2. Modélisation de la teneur en C

La modélisation se base sur une régression linéaire multiple pour obtenir une distribution spatiale de la teneur en carbone organique dans le sol (COS) à l'échelle régionale (Wallonie). Le modèle prédit la teneur de COS sur une profondeur de 30 cm, en fonction de variables descriptives environnementales identifiées dans la littérature internationale comme étant les facteurs les plus importants influençant la teneur en COS. La zone d'étude étant caractérisée par une grande variabilité spatiale pour chacune de ces variables, le modèle est susceptible de refléter l'hétérogénéité des teneurs en COS dans la région.

Le modèle utilise les **variables** descriptives environnementales suivantes :

- Occupation du sol

Deux types d'**occupation du sol** sont considérés : les sols de culture et les sols de prairie (permanente).

[1] Ce facteur de conversion est préférable pour les horizons hémi-organiques au facteur 1.724 généralement utilisé (Bock & Laroche, 2002).

Rem. : Les données pour les sols sous forêts dont nous disposons pour l'année 2005 ne sont disponibles que pour une zone d'étude restreinte (127 profils de sol répartis uniquement dans la zone au Nord de l'Ardenne et tout au Sud de la région herbagère de Liège). Dès lors, ils sont insuffisants pour la réalisation d'un modèle empirique couvrant l'ensemble des sols sous forêts en Wallonie. Les teneurs en COS des sols sous forêts ne sont donc pas considérés dans cette étude.

- Type de sol

Le type de sol est défini sur base de la texture du sol et de l'état de drainage du sol.

- *Texture*: elle est reflétée par le contenu relatif en sable / limon / argile de la terre fine (**sand**, **silt**, **clay**, [%]) (Ameryckx et al. 1995), et par la taille géométrique moyenne des particules de sol (**Dg**, [mm]) (Meersmans et al., 2008)

Tab.1 : Texture selon la légende de la carte des sols de Belgique avec la correspondance en terme de contenu relatif en sable, limon, argile, et en terme de taille géométrique moyenne des particules de sol (Ameryckx et al. 1995)

	Gravels	Sand %	Silt %	Clay %	Dg (mm)
Z		90	8	2	0,665
S		75	20	5	0,348
P		60	35	5	0,200
L		30	60	10	0,057
A		5	85	10	0,023
E		35	35	30	0,035
U		15	35	50	0,001
G*	20	15	50	15	0,057

* Comme seule la terre fine est prise en considération, la proportion relative des trois classes de particules sur une base de 100 doit être re-calculée et donne les valeurs suivantes : %sand – 18,75 ; %silt – 62,5 ;%clay – 18,75 ; avec un Dg de 0.057

- *Drainage*: la profondeur minimale (**H2Omin**, [m]) et maximale (**H2Omax**, [m]) de la nappe phréatique (H2O min correspond à la profondeur d'apparition des traces d'oxido-réduction ; H2O max correspond à la profondeur d'apparition des traces de réduction)

Tab. 2: Profondeur d'apparition des traces d'oxido-réduction et de réduction en fonction des classes de drainage des sols de la carte des sols de Belgique (Hanotiaux, 1992)

Classes de drainage	Textures Z, S, P		Textures L, A, E, U, G	
	Oxido-réduction (cm)	Réduction (cm)	Oxido-réduction (cm)	Réduction (cm)
a	/	/	/	/
b	90-125	/	>125	/
B (a+b)	>90	/	/	/
c	60-90	/	80-125	/
d	40-60	/	50-80	/
D (c+d)	40-90	/	50-125	/
h	20-40	/	30-50	/
i	0-20	/	0-30	/
I (h+i)	<40	/	<50	/
e	20-40	>80	30-50	>80
f	0-20	40-80	0-30	40-80
g	/	<40	/	<40
F (e+f)	<40	>40	<50	>40
G (e+f+g)	0-40	<125	0-50	<125
A (a+b+c+d)	>40	/	>50	/

- <u>Pratiques agricoles</u>

La gestion des effluents d'élevage est prise en compte à travers la quantité de fumier et lisier épandue sur les terres arables en Belgique (**Man**, [t C / ha / yr]) (van Wesemael et al., 2004). Cette information est disponible par région agricole.

Tab. 3: Quantité de fumier et de lisier épandue sur les terres arables par région agricole pour les années 1958 et 2002 (van Wesemael et al., 2004)

	tonne C/ha/an	
	1958	2002
Dunes-Polders	1,38	2,38
Sableuse	1,78	3,85
Campine	1,51	4,07
Sablo-limoneuse	1,33	2,53
Limoneuse	1,05	1,07
Condroz	1,07	0,99
Herbagère Liégeoise	2,44	1,67
Campine Hennuyère	1,25	1,06
Haute Ardenne	1,52	1,48
Herbagère Fagnes	1,62	1,40
Famenne	1,15	1,39
Ardenne	1,25	1,79
Jura	0,99	1,31

- <u>Climat</u>

Les données climatiques viennent de 47 stations météorologiques (18 en Belgique, 1 au Luxembourg, 4 aux Pays-Bas, 19 en Allemagne et 5 en France) pour lesquelles on dispose également des coordonnées géographiques et de l'altitude. Les données climatiques prises en compte sont les précipitations totales annuelles (**Prec**, [mm/m²]) et la température moyenne annuelle (**Temp**, [°C]), et sont considérées comme valables pour l'ensemble de la période étudiée (1955 – 2005) (i.e. pas de changement pendant cette période).

Les relations entre la teneur en COS dans les 30 premiers centimètres et les différentes variables sont analysées à partir de la base de données Aardewerk (n > 10 000). Cette base de données dispose d'une bonne distribution spatiale à travers des environnements variés (occupation de sol, type de sol et climat). Sur base de l'ensemble des variables présentées ci-dessus et de leur corrélation avec la teneur en COS, l'expression du modèle est construite pour chaque utilisation du sol séparément (tableau 4 et 5). Les variables ayant les plus fortes corrélations sont d'abord utilisée dans l'expression du modèle, tout en veillant à ne pas introduire des variables fortement corrélées entre elles (telles que les couples précipitation/température, Dg/silt, Dg/sand, silt/sand).

Tab. 4: Construction successive du modèle préliminaire pour les sols de culture (équation et coefficient R^2 associé)

Expression du modèle pour les cultures	**R^2**
a.prec+b	0,089
a.prec².man+b	0,123
a.prec².man+b.prec.man+c	0,147
a.prec².man+b.prec.man+c.dg+d	0,176
a.prec².man+b.prec.man+c.dg+d.h2omax+d	0,202
a.prec².man+b.prec.man+c.dg+d.h2omax+e.clay	0,210
a.prec².man+b.prec.man+c.dg+d.h2omax+e.clay+f.man+g	0,214

Tab. 5: Construction successive du modèle préliminaire pour les sols de prairie (équation et coefficient R^2 associé)

Expression du modèle pour les prairies	**R^2**
a.h2omax+b	0,145
a.h2omax+b.clay+c	0,239
a.h2omax+b.clay+c.man+d	0,296
a.h2omax+b.clay+c.man+d.prec+e	0,289
a.h2omax+b.clay+c.man+d.prec+e.h2omin+f	0,303
a.h2omax+b.clay+c.man+d.prec+e.h2omin+f.dg+g	0,306
a.h2omax+b.clay+c.man+d.prec+e.h2omin+f.dg+g.dg.man+h	0,310

L'expression finale du modèle pour l'année 1955 est alors obtenue (équation 1, tableau 6). Le modèle est calibré sur 2/3 des profils de sol et validé avec le tiers restant. Cette répartition permet en effet d'obtenir un set de calibrage avec une variabilité dans les teneurs

en COS suffisante que pour construire un modèle empirique, mais également un set de validation suffisamment important que pour déterminer le niveau de confiance dans le modèle obtenu (sachant qu'un minimum de 30 profils est généralement requis pour réaliser des analyses statistiques robustes). Ces deux sets sont indépendants et tirés aléatoirement.

$$COS = \sum_{i=1}^{n} X_i \qquad \text{(equation 1)}$$

où COS est la teneur en carbone organique du sol [%C]
X_i est le $i^{ème}$ terme du modèle (les termes X_i sont présentés dans le tableau 6)
n est le nombre total de termes impliqué (14)

Tab.6 : Termes du modèle final pour la teneur en COS (%C) dans les 30 premiers centimètres du sol en 1955 (Dcrop = 1 si le sol est sous culture et 0 pour un sol sous prairie ; l'inverse est vrai pour Dgrass)

Modèle de 1955 (R^2=0.428)	***Coefficients (p=0.05)***
Variable X 1 - H2Omax	-1,4
Variable X 2 - Dcrop*Clay	0,009
Variable X 3 - Dcrop*Dg	0,8
Variable X 4 - Dcrop*Man*Prec²	6E-06
Variable X 5 - Dcrop*Man*Prec	-0,008
Variable X 6 - Dcrop*Man	2,5
Variable X 7 - Dgrass*H2Omin	-0,6
Variable X 8 - Dgrass*Clay	0,03
Variable X 9 - Dgrass*Dg	3,3
Variable X 10 - Dgrass*Dg*Man	-2,2
Variable X 11 - Dgrass*Man	0,6
Variable X 12 - Dgrass*Prec	0,002
Variable X 13 - Cste crop	3,1
Variable X 14 - Cste grass	1,6

Dans un deuxième temps, le modèle obtenu pour 1955 est appliqué sur des données récentes de COS (profils de sols agricoles de Aardewerk ré-échantillonnés en 2005-2006) (n > 550), et disposant également d'une bonne distribution spatiale à travers différents environnements en Belgique (régions flamande et wallonne). Le modèle de 1955 doit donc d'abord être re-calibré (2/3 des données de 2005 sont utilisées comme set de calibrage) et ensuite validé sur base du tiers restant (set de validation). Cependant, certains termes du modèle de 1955 deviennent non significatifs quand le modèle de 1955 est appliqué tel quel sur les données de 2005. Dès lors, certaines adaptations ont été réalisées afin de ne garder que des termes significatifs (seuil p=0.05) et en partant du principe sous-jacent que si des termes du modèle de 1955 deviennent non significatifs, ils doivent d'abord être testés en mode général (le paramètre est calibré pour les sols de culture et de prairie pris ensembles au lieu de les considérer séparément) avant d'être retirés du modèle s'ils ne sont toujours pas significatifs.

Détail des adaptations pour le modèle de 2005:

Les termes du modèle de 1955 devenus non significatifs en 2005 sont les suivants : X1, X2, X4 et X7 (tableau 6). Le terme X4 étant proche du terme X5 est retiré du modèle. Malgré ce retrait,

*les termes X1, X2 et X7 restent non significatifs. Si l'on retire le terme X7, les termes X1, X2 et en plus X9 sont non significatifs. Dès lors, les termes liés à « clay » (X2 et X8) et à « Dg » (X3 et X9) sont rendus indépendants de l'occupation du sol (et gardé en mode général), et l'on garde le terme X7. Cette opération permet de ne plus avoir que X1 (H2Omax) et X7 (Dgrass * H2Omin) qui restent encore non significatifs. Toutefois, à partir de l'observation des données, une interaction entre l'état hydrique du sol et la texture du sol semble se produire et est donc testée (i.e. : X1 devenant H2Omax * [silt+clay], et X7 devenant Dgrass * H2Omin * clay). Ces interactions apparaissent effectivement significatives et peuvent donc être conservées dans le modèle final de 2005.*

Les résultats du modèle sont les teneurs en C exprimées en % (10 g C kg^{-1} = 1%C). L'utilisation du modèle permet d'obtenir au final une distribution complète des teneurs en COS sans devoir réaliser un échantillonnage supplémentaire. *Il faut cependant remarquer que les sols de Aardewerk ré-échantillonnés n'ont pas subi de changement d'occupation de sol depuis les années 1955.*

Tab.7 : Termes du modèle final pour la teneur en COS (%C) dans les 30 premiers centimètres du sol en 2005 (Dcrop = 1 si le sol est sous culture et 0 pour un sol sous prairie ; l'inverse est vrai pour Dgrass)

Modèle de 2005 (R^2=0.683)	***Coefficients* (p=0.05)**
Variable X 1 - H2Omax*(silt+clay)	-0.004
Variable X 2 - Clay	0.01
Variable X 3 - Dg	1.1
Variable X 4 - Dcrop*Man*Prec	0.003
Variable X 5 - Dcrop*Man	-2.2
Variable X 6 - Dgrass*H2Omin*clay	0.01
Variable X 7 - Dgrass*Dg*Man	-0.6
Variable X 8 - Dgrass*Man	0.2
Variable X 9 - Dgrass*Prec	0.004
Variable X 10 - Cste crop	1.2
Variable X 11 - Cste grass	-0.8

Le coefficient de détermination (R^2) du modèle final de 1955 (0.43) est comparable à celui obtenu dans une étude similaire sur la région flamande (R^2 = 0.36 ; Meersmans et al., 2008). Tous les facteurs pris en compte sont significatifs (p = 0.05) sauf la température moyenne annuelle. Le modèle rend donc compte de l'effet du type de sol (texture et drainage), du climat (précipitations), et de la gestion agricole de la MO sur les teneurs en COS, ainsi que de leurs interactions. Le modèle de 2005 présente un R^2 plus élevé (0.68), et est également plus simple que le modèle utilisé en 1955. Cela pourrait notamment s'expliquer par les données utilisées, pour lesquelles l'état initial (l'occupation de sol) est un facteur contrôlé.

L'étape de validation montre une erreur quadratique moyenne (RMSE, équation 2) de 0,8 %C (ou 8 g C kg^{-1}), soit une erreur relative de 44% sur la teneur moyenne en C de la région wallonne, ce qui est assez élevé. En différenciant les cultures des prairies, la RMSE pour les teneurs en C des sols de culture est de 0,6 %C (ou 6 g C kg^{-1}), soit une erreur relative de 39%, et de 1,1 %C (ou 11 g C kg^{-1}) pour les sols de prairie (soit 45% d'erreur relative). Il s'agira d'en tenir compte pour l'interprétation des cartes de teneurs en MO.

$$RMSE = [\ (1/n) * \sum_{i=1}^{n} (x_{pred\ i} - x_{obs\ i})^2\ ]\ ^\wedge\ (1/2) \qquad \text{(equation 2)}$$

où RMSE est l'erreur quadratique moyenne [%C]
i est le profil de sol pris en compte
n est le nombre total de profils de sol dans le set de validation
$X_{pred\ i}$ est la teneur en COS prédite par le modèle pour le profil i [%C]
$X_{obs\ i}$ est la teneur en COS observée pour le profil i [%C]

Possibilité d'un modèle valable pour les sols forestiers :

Les données de l'Inventaire Permanent du Réseau Forestier de Wallonie (IPRFW) sont mieux réparties spatialement que les données dont nous disposons pour les sols forestiers. Ces données pourraient donc potentiellement permettre d'effectuer la même démarche que celle réalisée pour les sols de culture et de prairie. Toutefois, l'impact de la gestion historique a été identifié comme l'un des facteurs les plus importants jouant sur les teneurs en COS observées (Stevens & van Wesemael, 2008). Dès lors, l'efficacité d'un modèle empirique basé sur des variables telles que le type de sol et le climat risque d'être fortement diminuée malgré le nombre de données disponibles, et de rendre moins fiable la spatialisation des teneurs en COS des sols sous forêts à l'échelle de la Wallonie.

3. Spatialisation de la teneur en C

3.1 Données spatiales utilisées

La carte est réalisée à partir des couches d'information suivantes :

- *la carte d'occupation du sol* pour distinguer les cultures des prairies permanentes (DGATLP, 2007) (échelle de 1 :50 000)

  Remarque : les « zones urbaines » considérées dans cette étude recouvrent les habitats, les industries, les services, les terrains et aérodromes militaires, et les gares

Tab. 8: Occupations du sol définies par la carte DGATLP en Wallonie (DGATLP, 2007)

VALUE	LEGENDE
1	BOIS ET FORETS DE FEUILLUS
2	BOIS ET FORETS DE RESINEUX
3	BOIS ET FORETS MIXTES
4	FRICHES ET TERRAINS INCULTES
5	PRAIRIES PERMANENTES
6	CULTURES SAISONNIERES ET AUTRES
7	ESPACES VERTS URBAINS
8	HABITAT DENSE
9	HABITAT DISCONTINU
10	HABITAT ET SERVICES
11	INDUSTRIES ET SERVICES
12	CARRIERES, SABLIERES ET TERRILS
13	TERRAINS ET AERODROMES MILITAIRES
14	PLANS D'EAU, FLEUVES, CANAUX
16	GARES

- *la carte des principaux types de sols de Wallonie* (CNSW250) qui reprend le type de sols rencontré sur base des séries de sols définies par la légende de la carte nationale des sols de Belgique (Lejeune et al., 2006) (échelle de 1 :250 000)

  Remarque : la correspondance entre les principaux types de sols de Wallonie et les classes de texture et de drainage sont fournies en annexe 1

- *la carte des précipitations totales annuelles* dont la résolution est optimisée sur base des relations entre les précipitations et la topographie (altitude et orientation de la pente) (Meersmans et al., en préparation)

- *la carte des régions agricoles belges* qui permet de prendre en compte les différents types de gestion agricole rencontrés en Wallonie (DGATLP, 2001).

Remarque : afin de diminuer les effets abrupts au niveau des bordures des régions agricoles, un filtre agissant dans un rayon de 10 km environ a été utilisé sur chaque cellule spatiale.

Tab.9 : Régions agricoles présentes en Wallonie

VALUE	AR_NOM
1	Région jurassique
2	Region herbagère (Fagnes)
3	Ardenne
4	Famenne
5	Campine hennuyère
6	Région sablo-limoneuse
7	Haute Ardenne
8	Condroz
9	Région herbagère (Liège)
10	Région sablonneuse
11	Région limoneuse

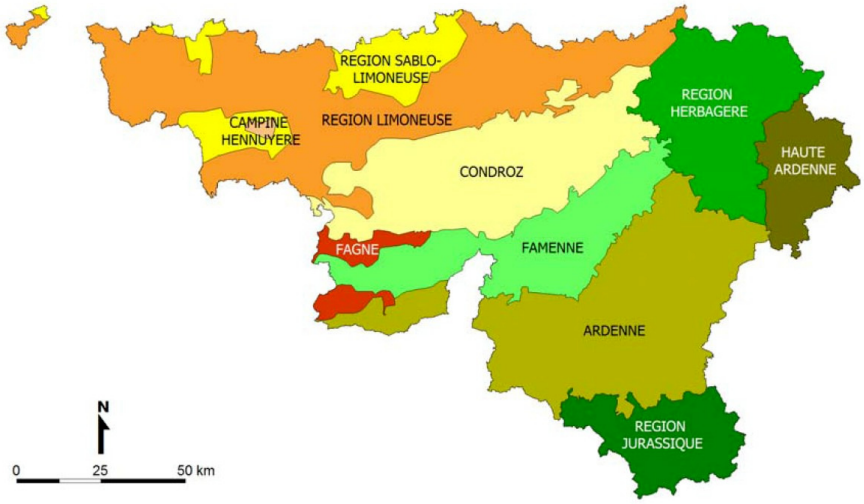

Figure 1 : Carte des régions agricoles de Wallonie

3.2 Cartes des teneurs en matière organique pour l'année 2005

Les cartes sont présentées pour les sols de culture (a), les sols de prairie (b) et les deux occupations de sol ensemble (c). Pour les cartes a et b, différentes présentations sont disponibles :

- la carte avec une <u>légende continue</u> de la teneur en MO pour représenter les tendances générales (/cont)

- la carte avec une <u>légende sur base de classes</u>

  - soit les classes sont celles reprises dans le rapport analytique de *l'Etat de l'Environnement Wallon 2006-2007* (ancienne carte SOLS 2-1, DGRNE, 2007) pour pouvoir réaliser des comparaisons

    - soit la carte ne tient pas compte de la distribution spatiales des sols sous culture (/class)

    - soit la carte tient compte de la distribution spatiales des sols sous cultures et masque les autres occupations de sols pour identifier les zones réellement concernées (/mask)

  - soit les classes reposent sur des *valeurs standards* (0 ou valeur minimale ; 2[2] ; 2,5 ; 3 ; 4 ; 5 ; 7 ; 8 ; valeur maximale) pour simplifier l'interprétation de la carte

    - soit la carte ne tient pas compte de la distribution spatiales des sols sous culture (/std)

      * les valeurs prédites moyennes sont présentées

      * les valeurs prédites moyennes desquelles on retire la RMSE (i.e. 1.2%MO pour les sols sous culture et 2.2%MO pour les sols de prairies) (/limite inf.)

      * les valeurs prédites moyennes auxquelles on ajoute la RMSE (i.e. 1.2%MO pour les sols sous culture et 2.2%MO pour les sols de prairies) (/limite sup.)

    - soit la carte tient compte de la distribution spatiales des sols sous cultures et masque les autres occupations de sols pour identifier les zones réellement concernées (/stdmask)

Pour les cartes c, seule les légendes en classes (/class, /std – valeurs moyennes) et avec le masque (/mask, /stdmask) ont été retenues.

[2] la valeur de 2% de MO étant définie par le Bureau européen des Sols comme une valeur seuil en-dessous de laquelle les sols sont particulièrement vulnérables à des dégradations plus poussées (Jones et al., 2004)

- **Sols de culture (cartes SOLS 2-1a)**

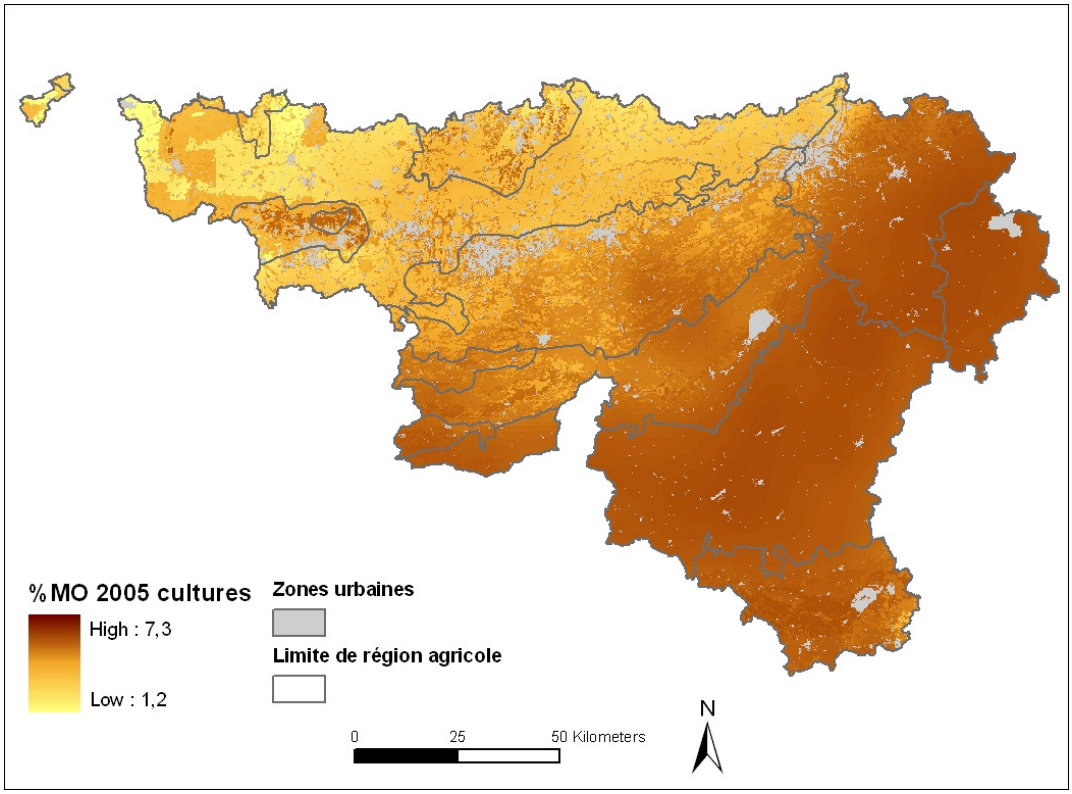

Figure 2: SOLS 2-1a /cont (Teneur en MO pour l'année 2005 des sols de culture qui sont restés en culture depuis 1955)

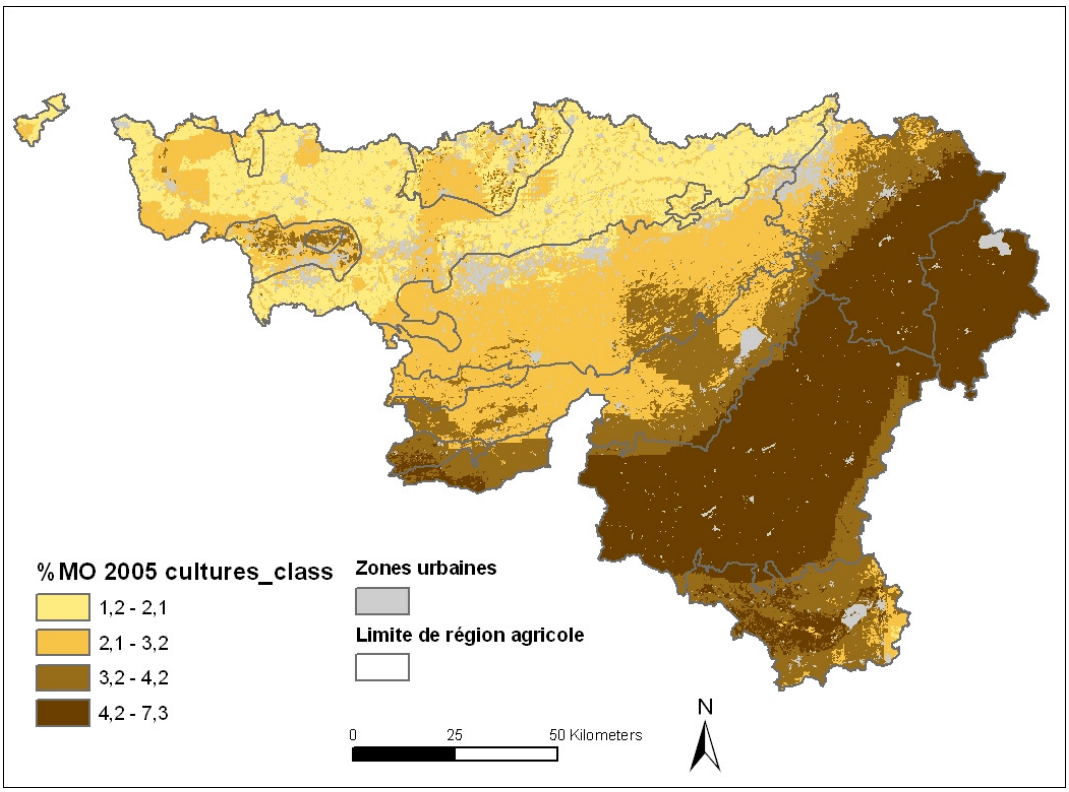

Figure 3: SOLS 2-1a /class (Teneur en MO pour l'année 2005 des sols de culture qui sont restés en culture depuis 1955)

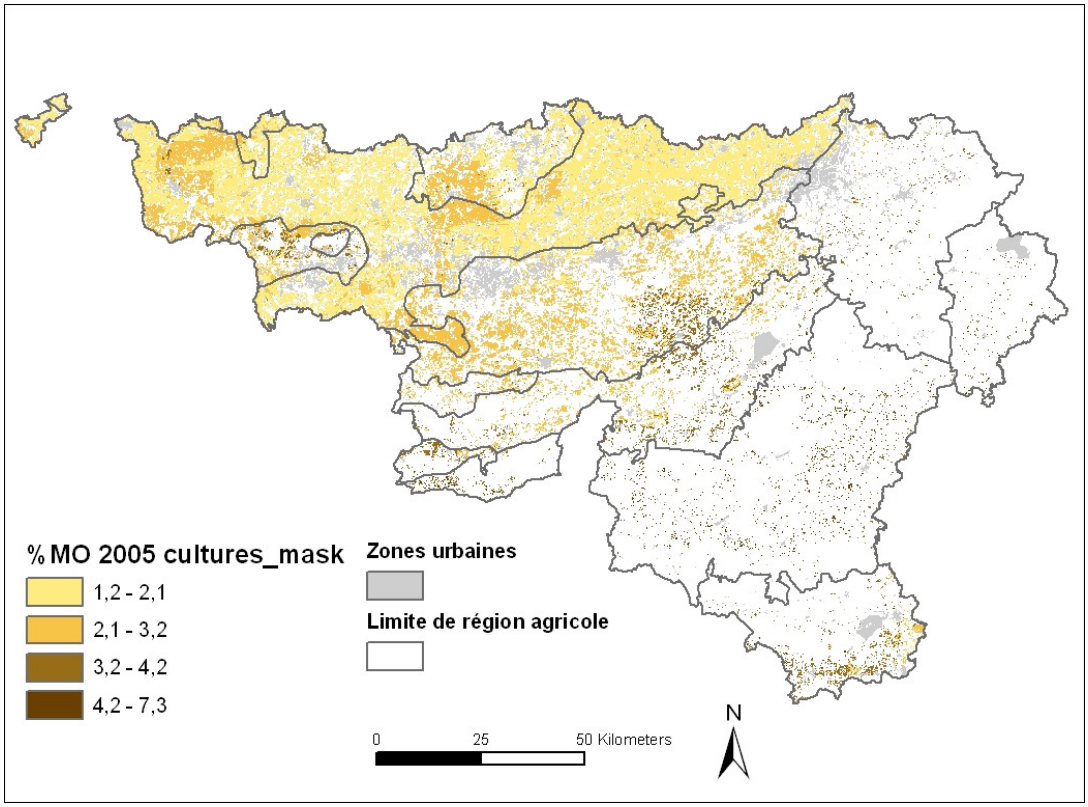

Figure 4: SOLS 2-1a /mask (Teneur en MO pour l'année 2005 des sols de culture qui sont restés en culture depuis 1955)

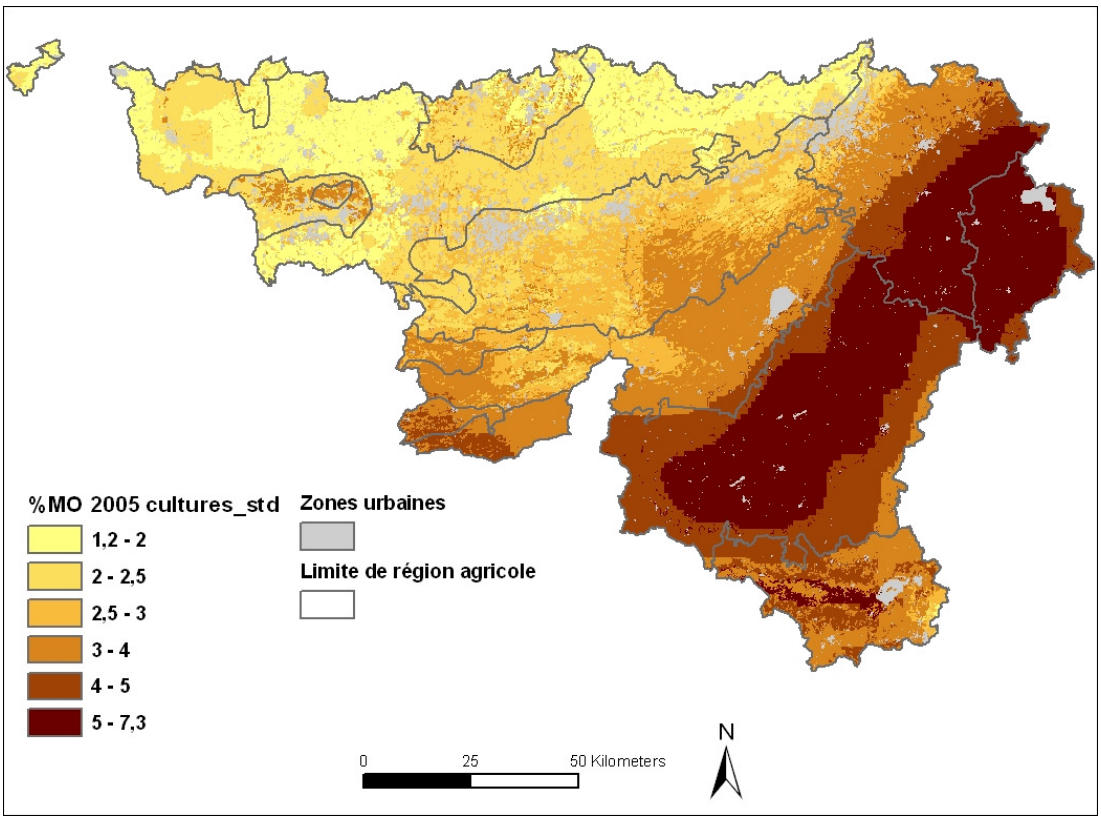

Figure 5: SOLS 2-1a /std (Teneur en MO pour l'année 2005 des sols de culture qui sont restés en culture depuis 1955)

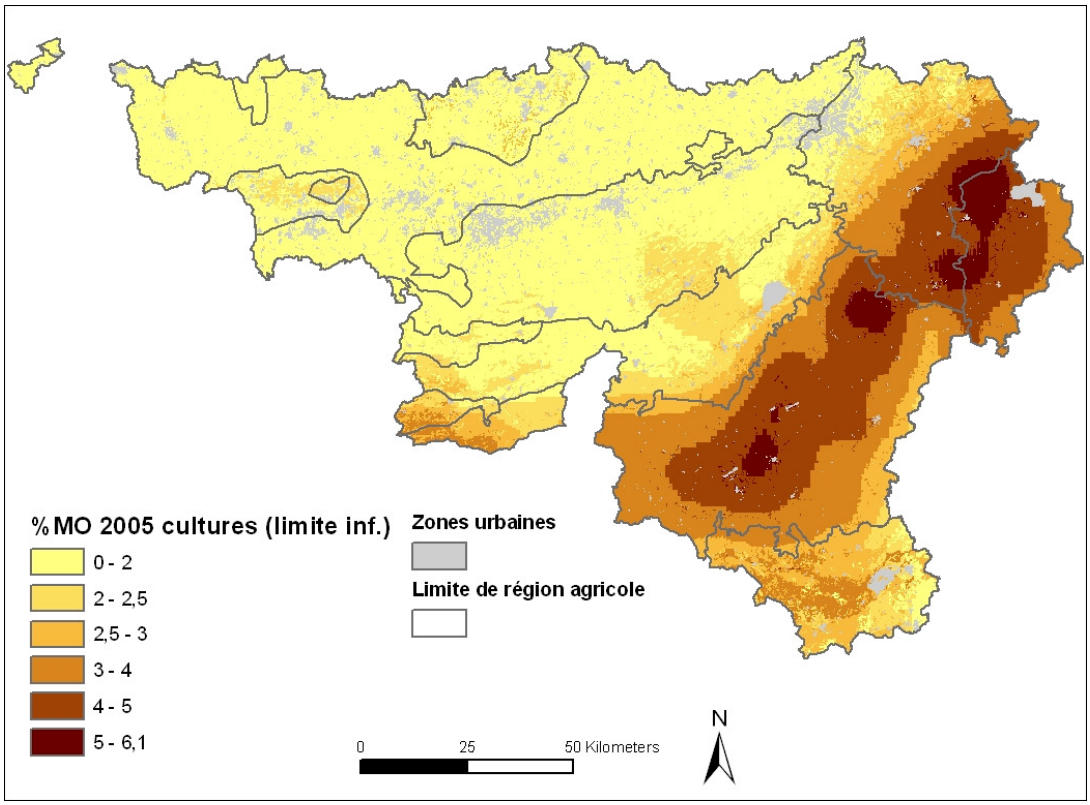

Figure 6: SOLS 2-1a /limite inf. (Teneur en MO pour l'année 2005 des sols de culture qui sont restés en culture depuis 1955)

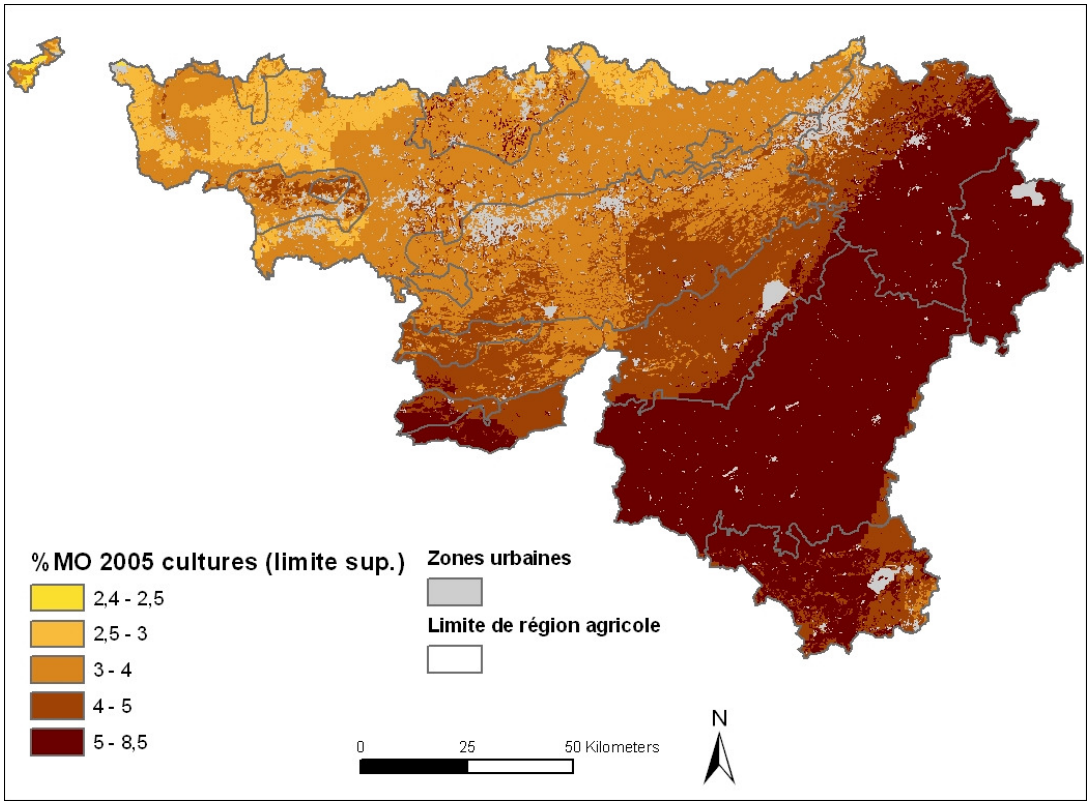

Figure 7: SOLS 2-1a /limite sup. (Teneur en MO pour l'année 2005 des sols de culture qui sont restés en culture depuis 1955)

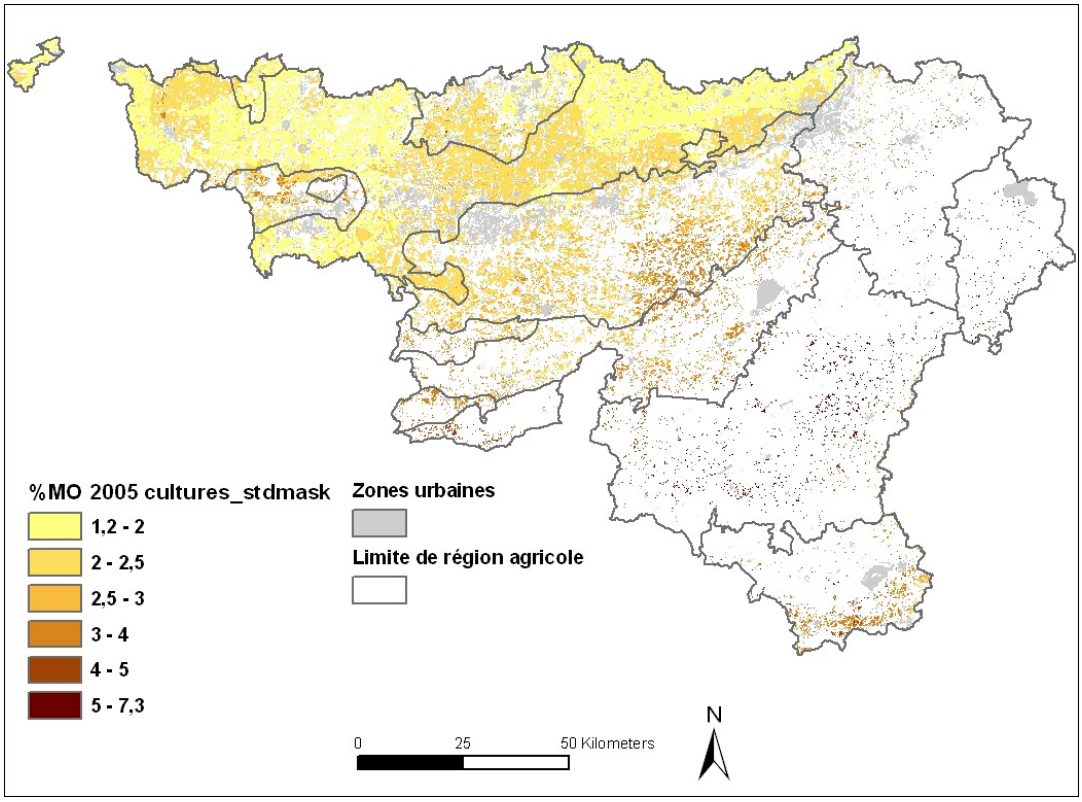

Figure 8: SOLS 2-1a /stdmask (Teneur en MO pour l'année 2005 des sols de culture qui sont restés en culture depuis 1955)

- ✓ Les cartes des figures 2, 3 et 5 montrent le gradient de MO du Nord-Ouest vers le Sud-Est de la Wallonie, reflétant les tendances générales en terme de climat et de type de sol

- ✓ Les figures identifient quatre zones pour lesquelles les teneurs en MO sont plus élevées qu'aux alentours :

  - Zone 1 (Campine hennuyère et région sablo-limoneuse avoisinante)
  - Zone 2 (Centre-Sud du Condroz et Centre-Nord de la Famenne)
  - Zone 3 (Extrême ouest de la région limoneuse)
  - Zone 4 (Ouest de la région sablo-limoneuse en Brabant avec une prolongation vers le Sud dans la région limoneuse)

  Ces teneurs en MO plus élevées sont principalement liées aux variables du modèle : les précipitations, le type de sol (texture et régime hydrique) et la gestion des effluents d'élevage. Dans la zone 2, des précipitations plus importantes entraînent un ralentissement des processus de minéralisation de la MO et donc des teneurs en MO plus élevées. Dans les zones 1 et 3, les sols avec une teneur en MO plus élevée sont caractérisés par une texture plus sableuse, alors qu'en général la quantité de MO est plutôt corrélée avec la teneur en argile. Cependant, dans le modèle utilisé, la teneur en sable est liée à la proximité de la nappe phréatique avec la surface du sol. Dès lors, les processus de minéralisation de la MO peuvent également être ralentis. Dans les zones 1 et 4, la quantité de MO épandue sur les terres arables est plus importante et peut expliquer les teneurs en MO plus élevées.

- ✓ Les zones déficitaires par rapport au seuil de 2%MO représentent plus du tiers de la surface cultivée (40.8%) avec la quasi totalités de ces sols (94%) situés en région limoneuse (figure 5). Compte-tenu de l'erreur liée au modèle utilisé pour les sols de culture (RMSE de 1.2%MO), les sols ayant des teneurs en MO de 3.2% en moyenne présentent potentiellement le risque de faire partie de la catégorie des sols déficitaires (figure 6). Cela signifierait alors qu'une majorité des sols cultivés sont en déficit, excepté dans la zone du sud de la Famenne jusqu'au sud de la région jurassique, dans la majorité de la région herbagère de Liège et dans la Haute Ardenne.

- **Sols de prairie (cartes SOLS 2-1b)**

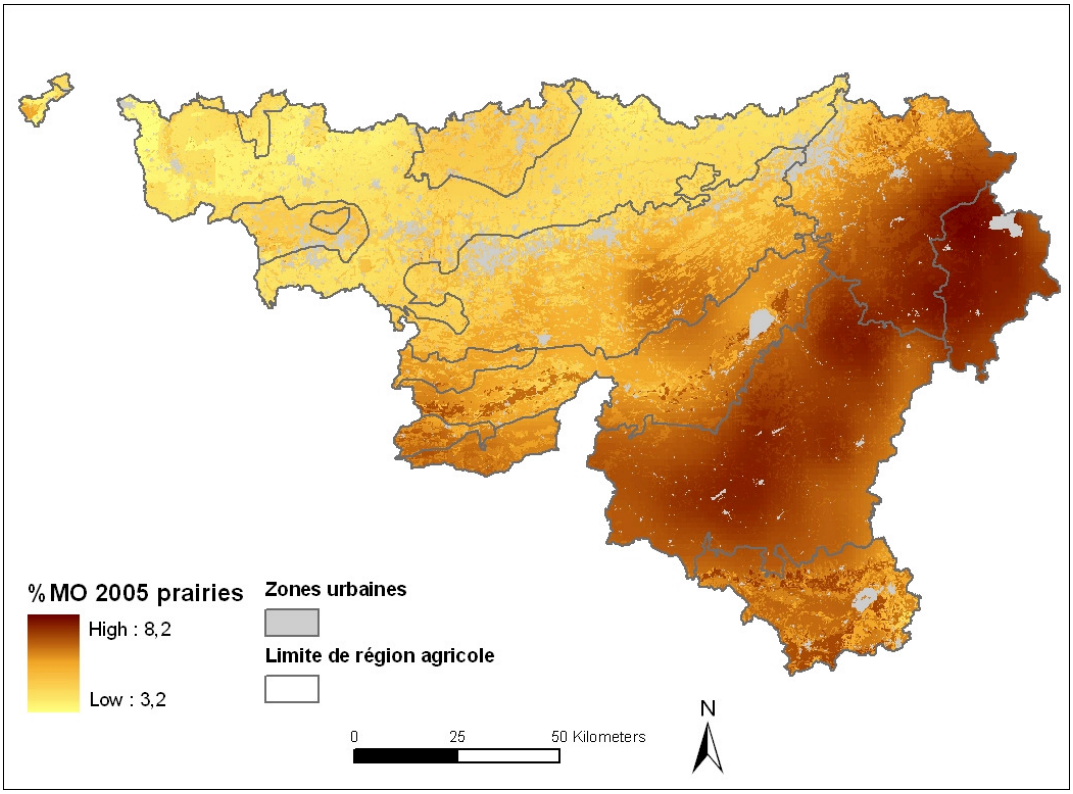

Figure 9: SOLS 2-1b /cont (Teneur en MO pour l'année 2005 des sols de prairie qui sont restés en prairie depuis 1955)

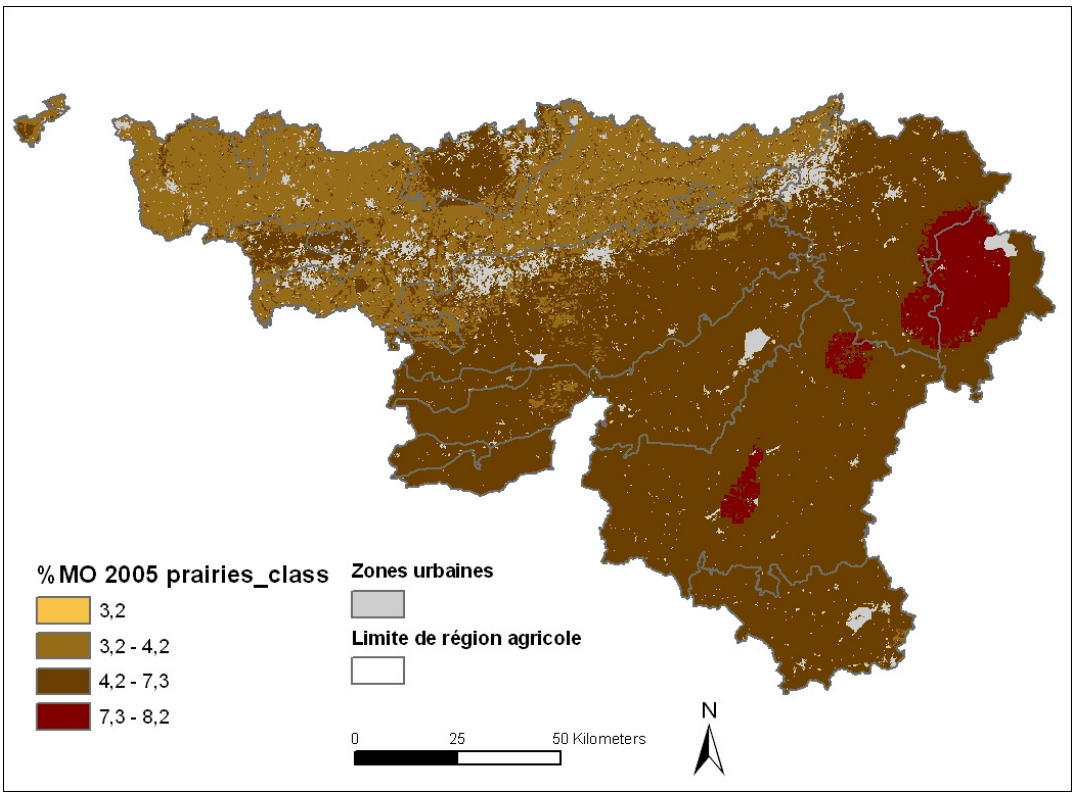

Figure 10: SOLS 2-1b /class (Teneur en MO pour l'année 2005 des sols de prairie qui sont restés en prairie depuis 1955)

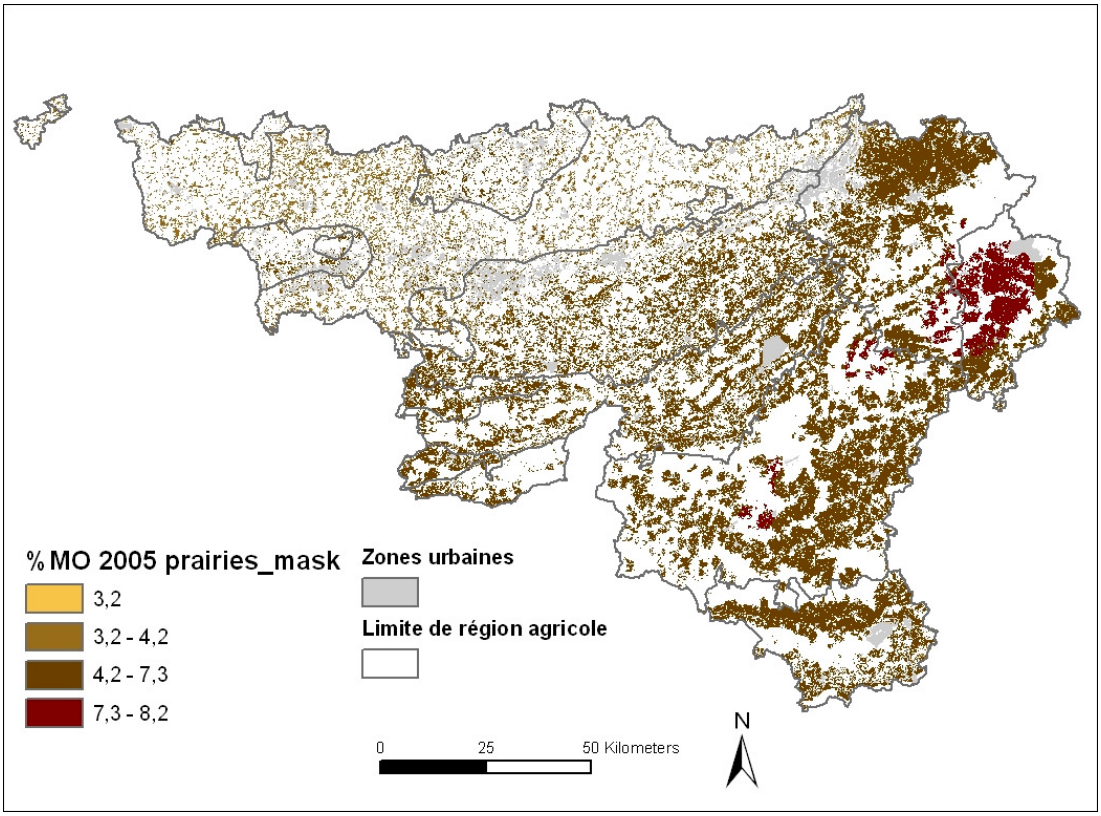

Figure 11: SOLS 2-1b /mask (Teneur en MO pour l'année 2005 des sols de prairie qui sont restés en prairie depuis 1955)

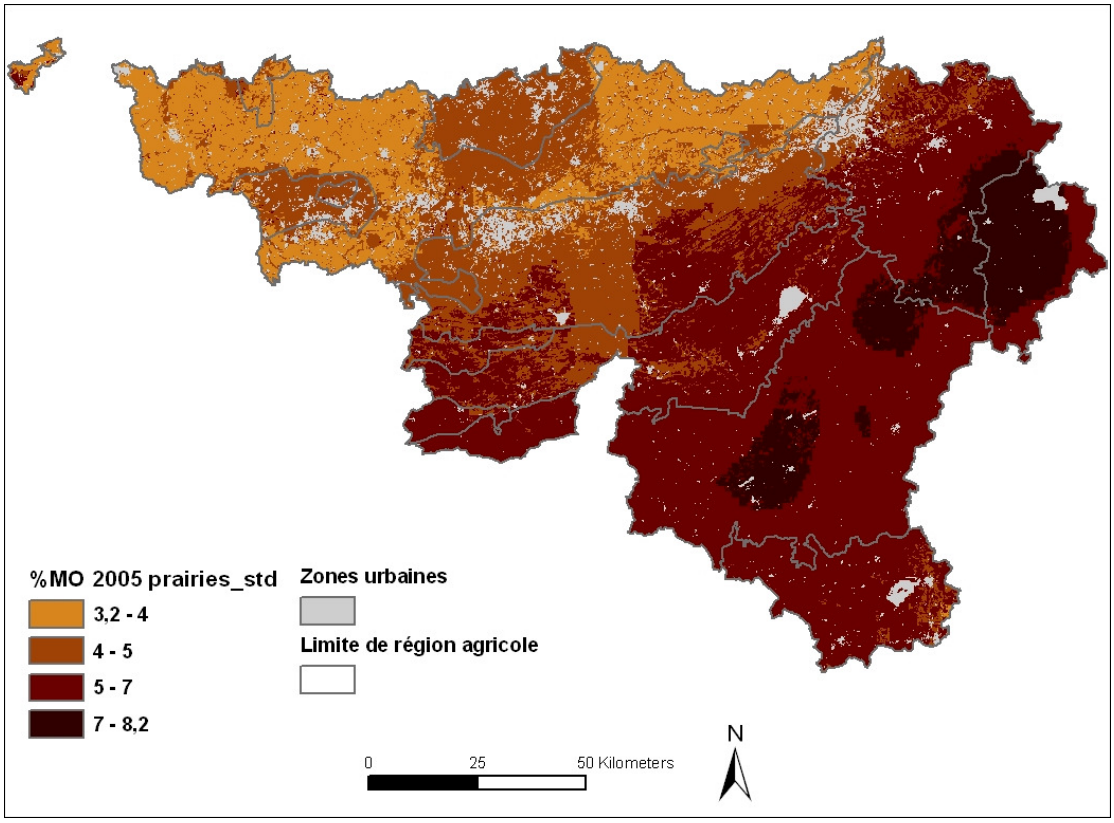

Figure 12: SOLS 2-1b /std (Teneur en MO pour l'année 2005 des sols de prairie qui sont restés en prairie depuis 1955)

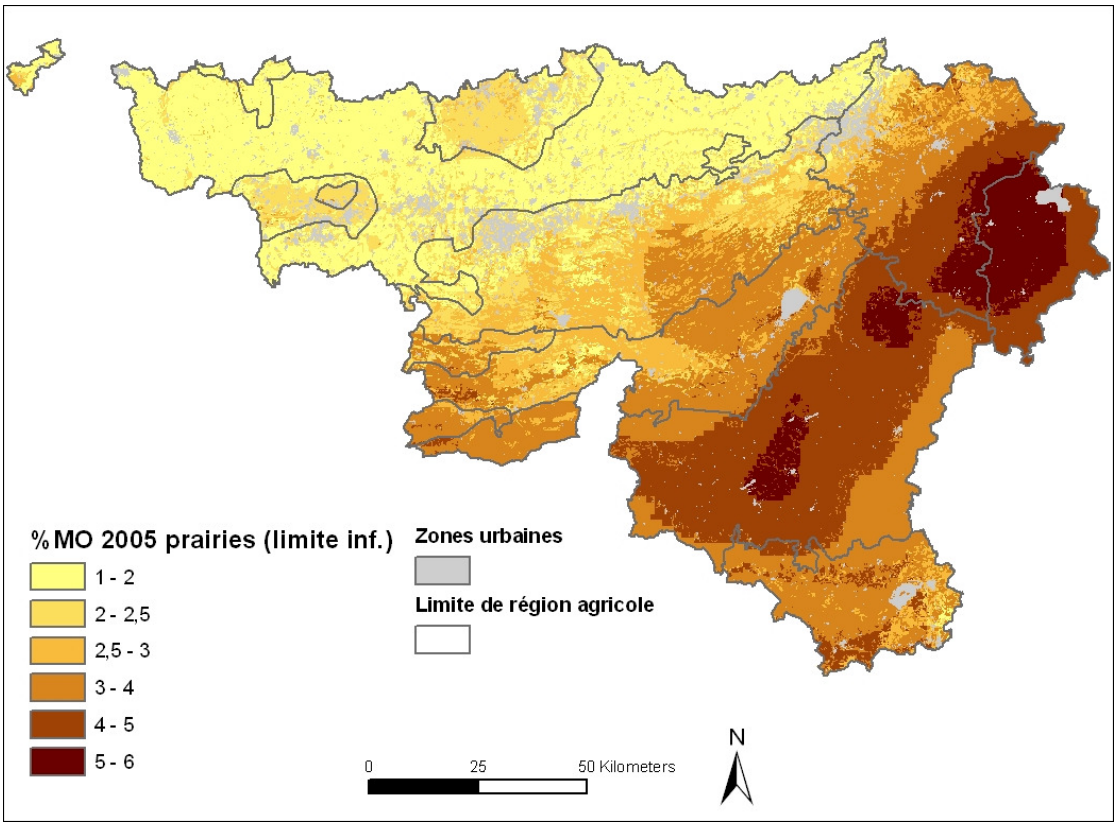

Figure 13: SOLS 2-1b /limite inf. (Teneur en MO pour l'année 2005 des sols de prairie qui sont restés en prairie depuis 1955)

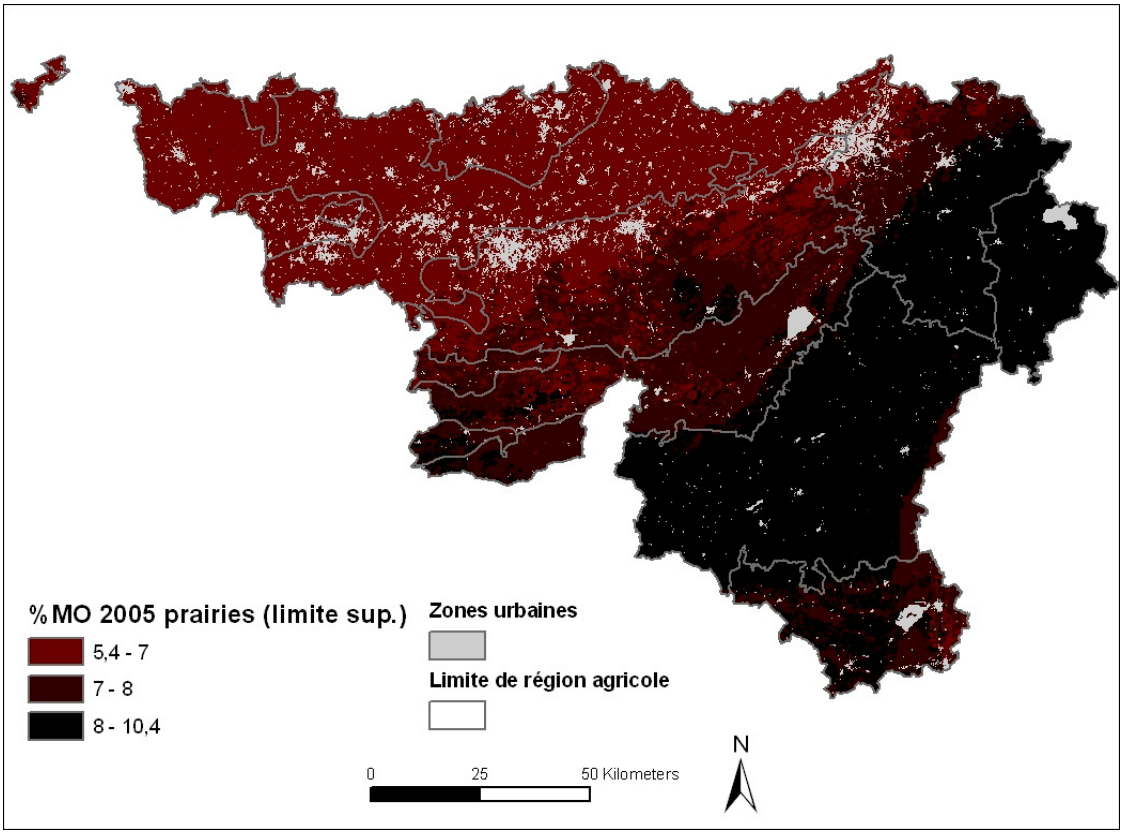

Figure 14: SOLS 2-1b /limite sup. (Teneur en MO pour l'année 2005 des sols de prairie qui sont restés en prairie depuis 1955)

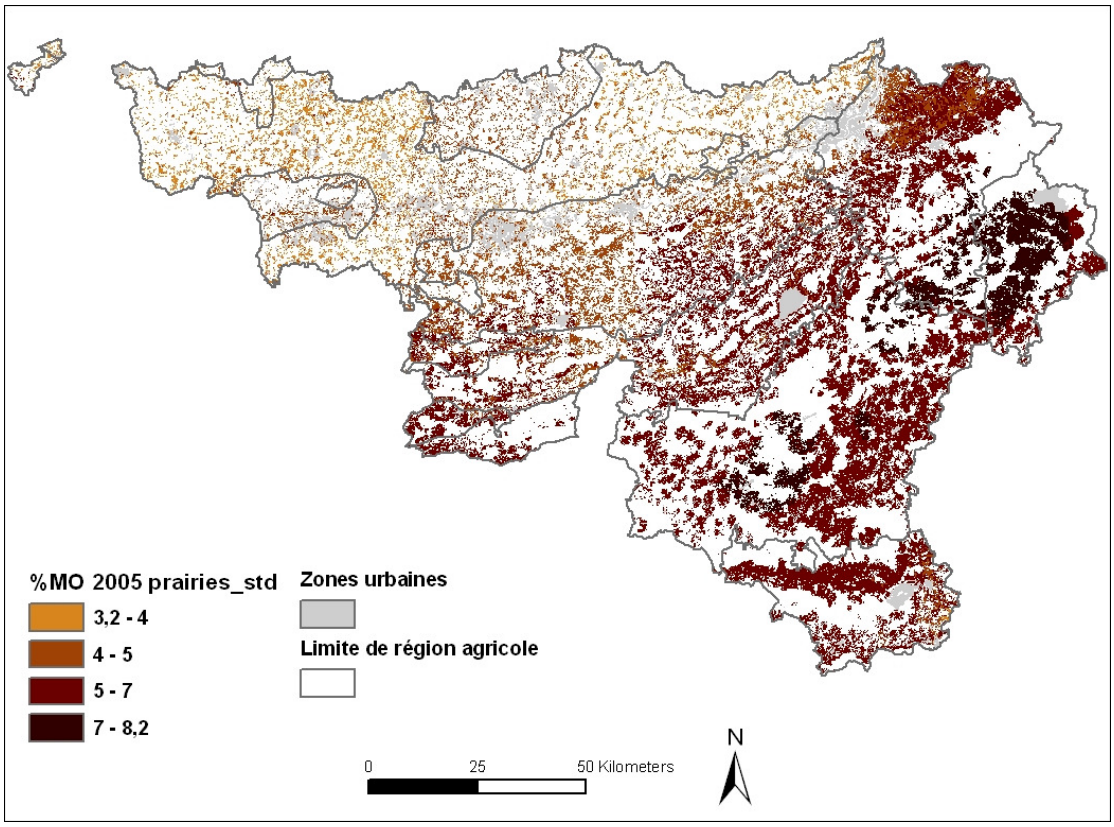

Figure 15: SOLS 2-1b /stdmask (Teneur en MO pour l'année 2005 des sols de prairie qui sont restés en prairie depuis 1955)

- ✓ Les cartes des figures 9, 10 et 12 montrent le même gradient de MO du Nord-Ouest vers le Sud-Est de la Wallonie que pour les sols de cultures (reflétant les tendances générales en terme de climat et de type de sol)

- ✓ Les figures mettent également en évidence les mêmes zones de teneurs en MO plus élevées aux alentours que pour les sols de culture, avec en plus une zone supplémentaire, soit :

  - Zone 1 (Campine hennuyère et région sablo-limoneuse avoisinante)
  - Zone 2 (Centre-Sud du Condroz et Centre-Nord de la Famenne)
  - Zone 3 (Extrême ouest de la région limoneuse)
  - Zone 4 (Ouest de la région sablo-limoneuse en Brabant avec une prolongation vers le Sud dans la région limoneuse)
  - Zone 5 (Haute Ardenne et Sud-Est de la région Herbagère de Liège)

  Comme pour les sols de culture, ces teneurs en MO plus élevées sont principalement liées aux variables du modèle : les précipitations (zones 2 et 5), le type de sol (texture et régime hydrique, zones 1 et 3) et la gestion des effluents d'élevage (zones 1 et 4). De plus, les sols caractérisés par des mouvements de nappe phréatique plus proches de la surface du sol (apparition des traces d'oxydo-réduction à faible profondeur) ont également des teneurs en MO plus élevées (zones 1, 3 et 4).

- ✓ Les zones déficitaires par rapport au seuil de 2%MO sont inexistantes (figure 12). Compte-tenu de l'erreur liée au modèle utilisé pour les sols de prairie (RMSE de 2.2%MO), les sols ayant des teneurs en MO de 4.2% pourraient faire partie de la catégorie des sols déficitaires, ce qui concernerait en majorité les sols de prairie situés en région limoneuse (figure 13).

- **Sols de culture et de prairie (carte SOLS 2-1c)**

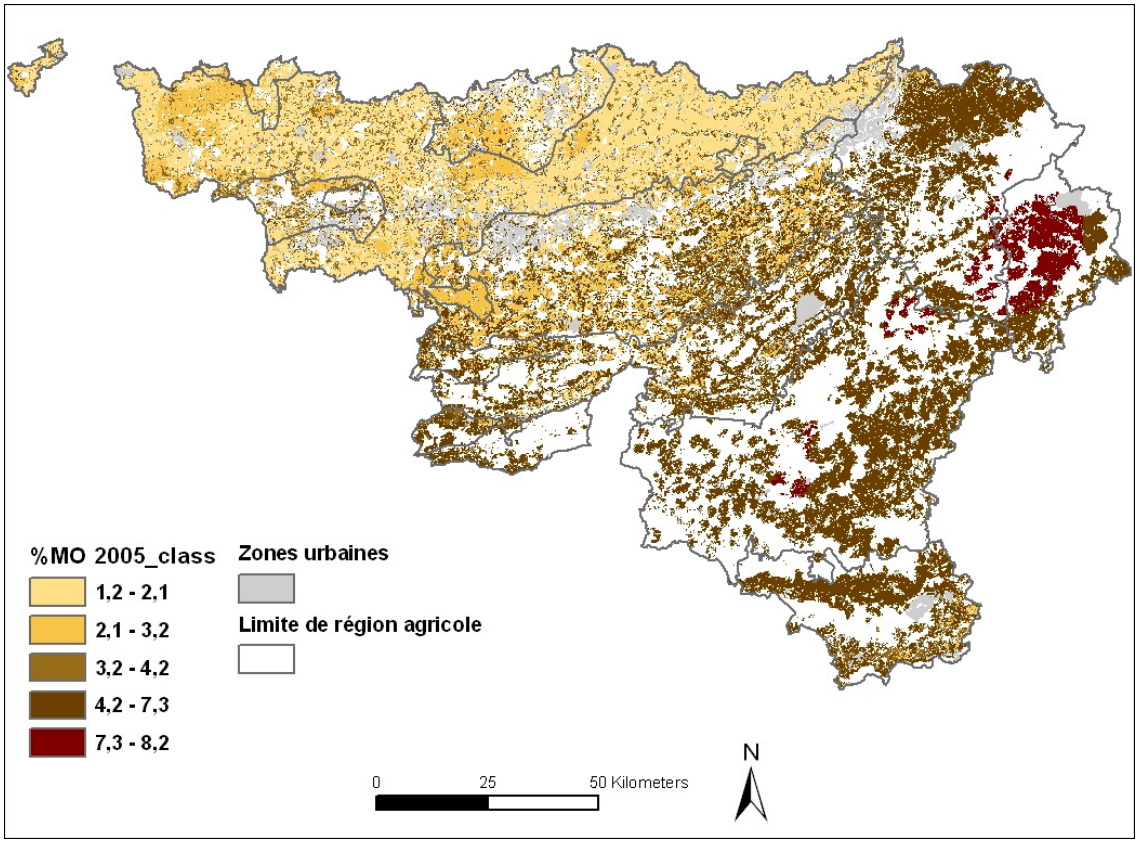

Figure 16: SOLS 2-1c /mask (Teneur en MO pour 2005 des sols de culture et de prairie qui n'ont pas changé d'occupation de sol depuis 1955)

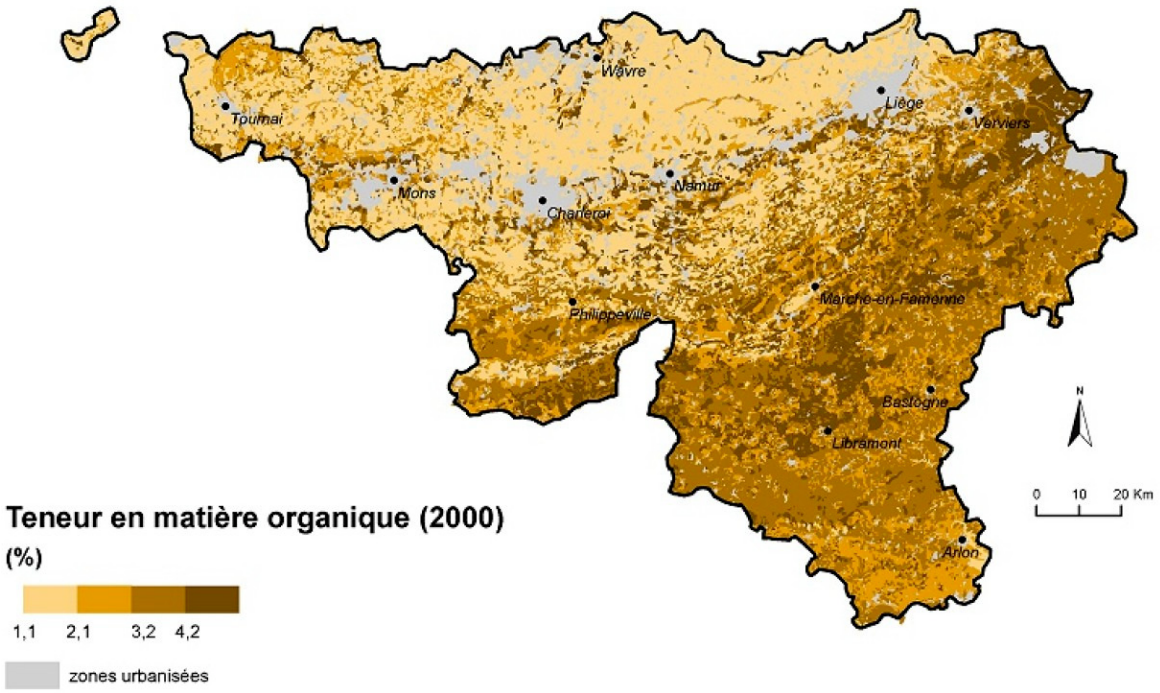

Figure 17: carte SOLS 2-1 de l'EEW 2006-2007 (Teneur en MO pour les sols de culture et de prairie en 2000)

La comparaison entre les teneurs en MO données par la modélisation (figure 16) et celles obtenues avec le projet METAGE (figure 17, basée sur des données de COS de REQUASUD et de la Bodemkundige Dienst agrégées au niveau communal) montre essentiellement que :

- ✓ Le modèle reproduit en général des teneurs en MO similaires à celles observées dans les sols de culture de la figure 17, avec cependant des teneurs en MO plus élevées pour la zone 4 (Ouest de la région sablo-limoneuse en Brabant avec une prolongation vers le Sud dans la région limoneuse) et pour les sols du Condroz
- ✓ Le modèle tend généralement à donner des teneurs en MO plus élevées dans les sols de prairie, au point d'avoir un décalage dans les classes utilisées : la teneur en MO des sols de prairie modélisée varie de 3.2 à 4.2%MO pour la région limoneuse, alors que les teneurs en MO de ces sols varient entre 1.1 et 3.2%MO dans le projet METAGE (figure 16 et 17). La tendance est la même pour les sols de prairie au sud du sillon Sambre et Meuse et dans la région herbagère de Liège

Ces différences sont à considérer avec prudence compte-tenu des erreurs sur les teneurs en MO données par le modèle et de l'utilisation de classes pour les teneurs en MO (rendant le passage d'un sol d'une classe à l'autre très rapide si ses teneurs en MO sont proches des bornes d'une classe).

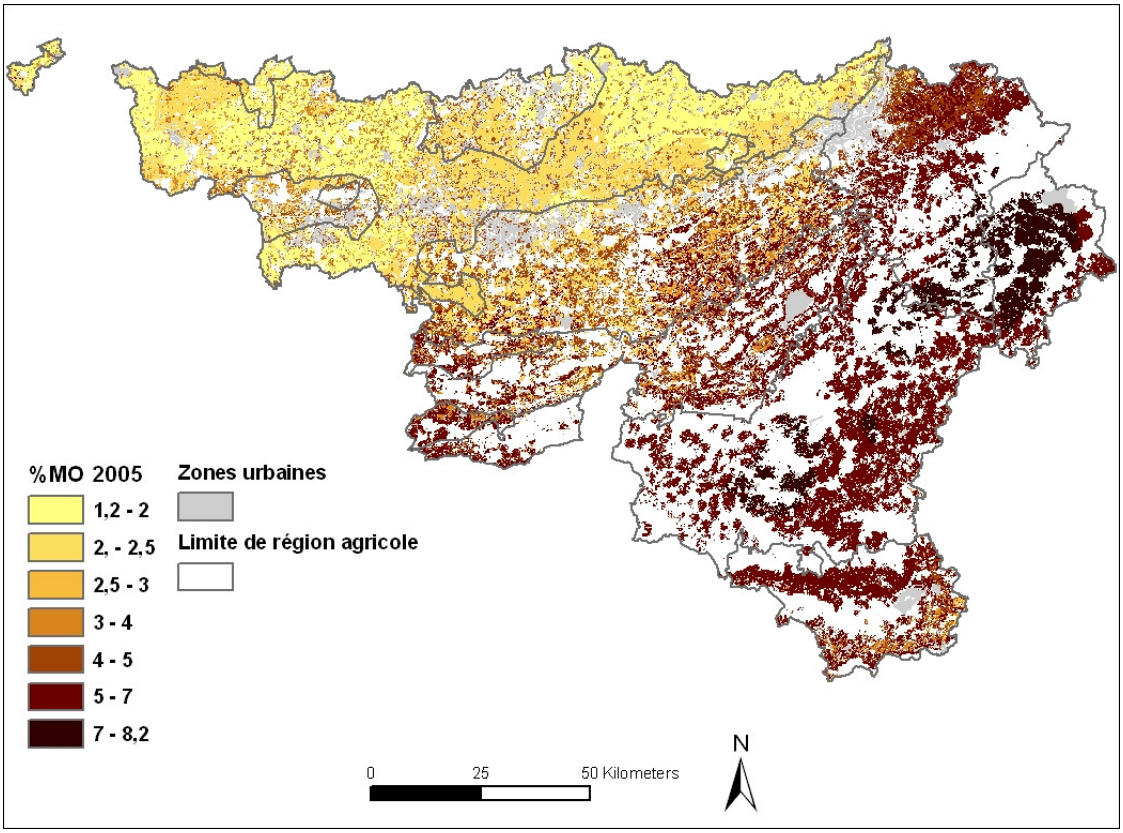

Figure 18: SOLS 2-1c /stdmask (Teneur en MO pour les sols de culture et de prairie en 2005)

- **Validation avec les données REQUASUD**

Etant donné que nous ne disposons pas des données de REQUASUD, l'étape de validation n'est pas réalisable en tant que telle. Néanmoins, une comparaison visuelle avec les cartes des teneurs en MO des sols de culture et prairies reprises dans le rapport analytique de l'Etat de l'Environnement Wallon 2006-2007 (carte SOLS 1-2, figure 20) est possible sur base d'une même classification des teneurs en C (2*COT = MO).

- ✓ D'une manière générale pour les sols de culture et de prairie, les découpages présents dans les figures 20 et 22 (REQUASUD) ne le sont pas dans les figures 19 et 21 (modèle empirique). Les cartes des figures 20 et 22 ont été réalisées sur base d'une désagrégation spatiale des données communales de COS au niveau des associations de sol (carte des associations de sol au 1/500 000 de Maréchal et Tavernier, 1974), ces associations de sol correspondent en effet aux découpages observés. Bien que le modèle empirique prenne en compte l'effet du type de sol, ce dernier est contrebalancé par d'autres variables de telle manière que la différence des teneurs en MO liée au type de sol ne justifie pas le passage d'une classe à l'autre. Toutefois, l'effet du type de sol se remarque si l'on présente les teneurs en MO des figures 19 et 21 avec une légende continue comme c'est le cas dans les figures 2 et 9 précédentes.

Il faut également être prudent dans la comparaison des cartes du fait :

- des incertitudes liées aux données de cette étude et de REQUASUD

- de la distribution spatiale réelle des sols de culture et de prairie (cf. figures 8 et 15)

- de la profondeur d'échantillonnage utilisée pour les sols de prairie dans REQUASUD (la profondeur utilisée pour les sols de culture - la couche de labour - étant comparable): dans REQUASUD, ce sont les 15 premiers centimètre qui ont été considérés comparé à 30 cm pour notre étude qui montrera donc des concentrations en C inférieures à celles de REQUASUD (les horizons sous-jacents étant moins pourvus en COS que les horizons de surface).

- du temps séparant les données de REQUASUD et de cette étude (environ 5 ans)

Sols de culture

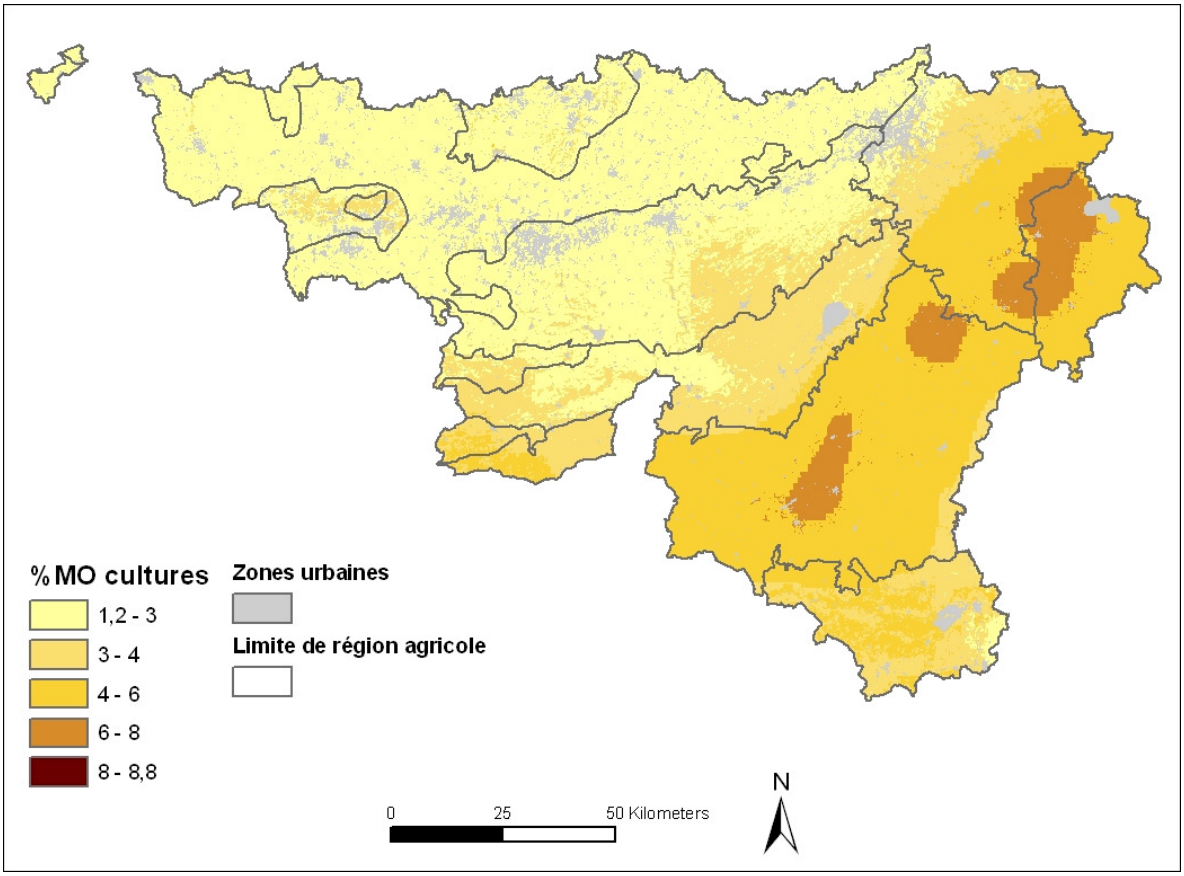

Figure 19: Teneur en MO pour l'année 2005 des sols de culture qui sont restés en culture depuis 1955 ; légende basée sur la classification de la figure SOLS 1-2 de l'EEW 2006-2007

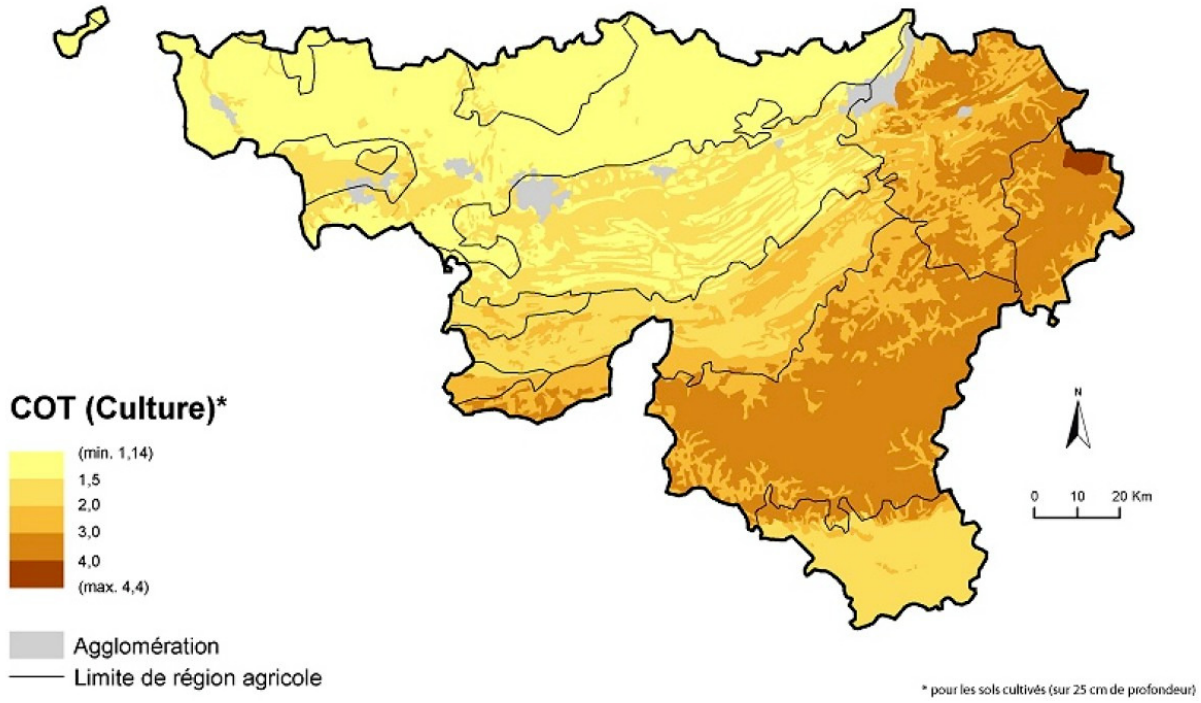

Figure 20: Figure SOLS 1-2 de l'EEW 2006-2007 (Teneur en MO pour les sols de culture en 1998-2002)

- ✓ Les sols de culture ayant une teneur en MO comprise entre 1.2 et 3% ont en général la même distribution spatiale dans les figures 19 et 20, sauf pour les sols du Condroz et du sud / sud-ouest de la Famenne pour lesquels les teneurs en MO du modèle empirique sont inférieures aux données de REQUASUD.

- ✓ Les sols de culture ayant des teneurs supérieures à 3%MO présentent une distribution spatiale très différente en fonction des figures considérées, avec une tendance générale à des teneurs en MO inférieures pour la figure 19 (décalage d'une classe) par rapport à la figure 20 (REQUASUD).

- ✓ La distribution spatiale des sols ayant une teneur en MO entre 6 et 8% de MO dans la figure 19 reflète les effets de la précipitation et du relief au niveau des hauts plateaux (St Hubert, Baraque fraîture et Hautes Fagnes).

<u>Sols de prairie</u>

- ✓ De manière générale, l'ensemble des sols de prairies sont en décalage d'une classe entre la figure 21 et 22 (sauf pour la région jurassique et la région sablo-limoneuse), avec des teneurs en MO plus élevées dans la figure 22 (REQUASUD) que la figure 21. De plus la classe des teneurs en MO de 3.2 à 4% n'existe pas dans la figure 22, et la classe de 10 à 12% de MO n'existe pas dans la figure 21.

  Le modèle utilisé prédit les teneurs en MO pour la couche 0 – 30 cm (figure 21), alors que les teneurs en MO de REQUASUD sont valables pour la couche 0 – 15 cm (figure 22). Dès lors, du fait de la diminution de la teneur en MO avec la profondeur du sol étudiée, il est probable qu'un effet de dilution explique les teneurs en MO du modèle inférieures à celles de REQUASUD.

- ✓ En particulier, les teneurs en MO des sols de prairie de la région limoneuse prédites par le modèle empirique sont inférieures à celles présentées dans la figure 22.

⇨ Les teneurs en MO prédites par le modèle empirique sont donc en général inférieures aux teneurs mesurées et extrapolées par REQUASUD. Cependant, si l'on considère les surfaces réellement occupées par les sols de culture, cette différence ne porte pas à conséquence car la majorité des sols cultivés sont situés en région limoneuse et sablo-limoneuse où les données de REQUASUD et du modèle concordent. Pour les sols de prairie par contre, la différence entre la figure 12 et 13 est importante même en considérant la surface réellement occupée par les prairies. Ainsi, il est possible que les sols de prairies de la région limoneuse aient des teneurs en MO plus élevées que ne le prédit le modèle empirique.

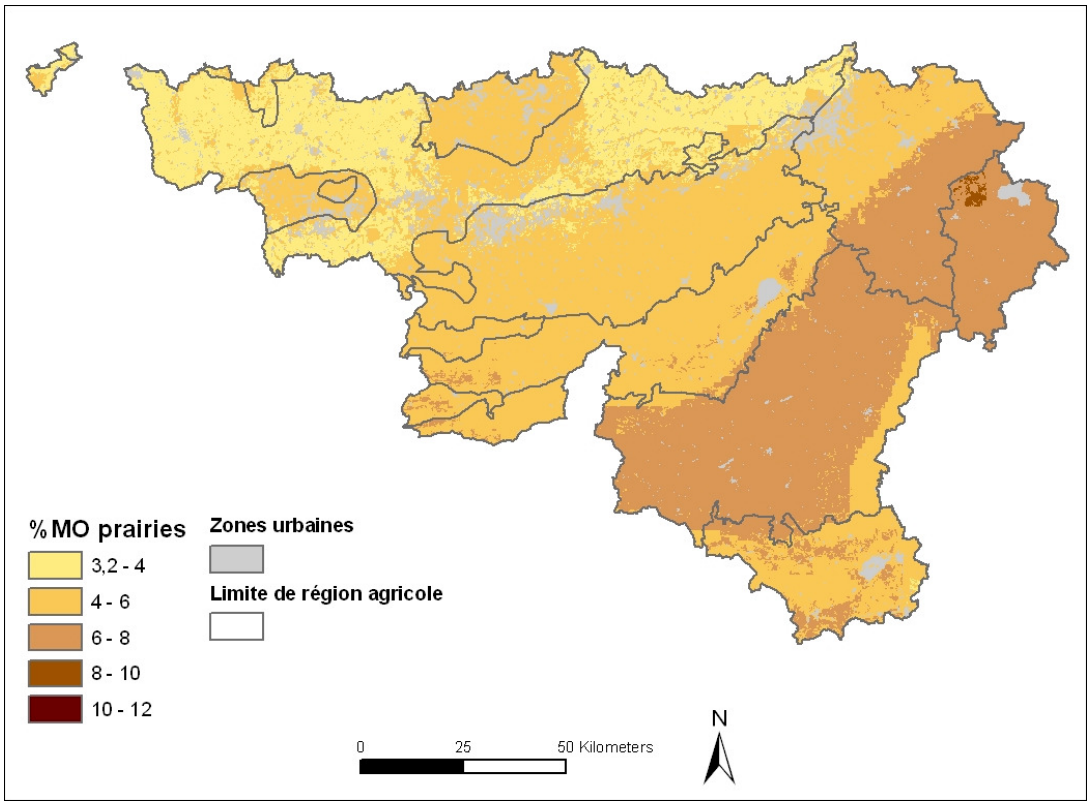

Figure 21: Teneur en MO pour l'année 2005 des sols de prairie qui sont restés en prairie depuis 1955 ; légende basée sur la classification de la figure SOLS 1-2 de l'EEW 2006-2007

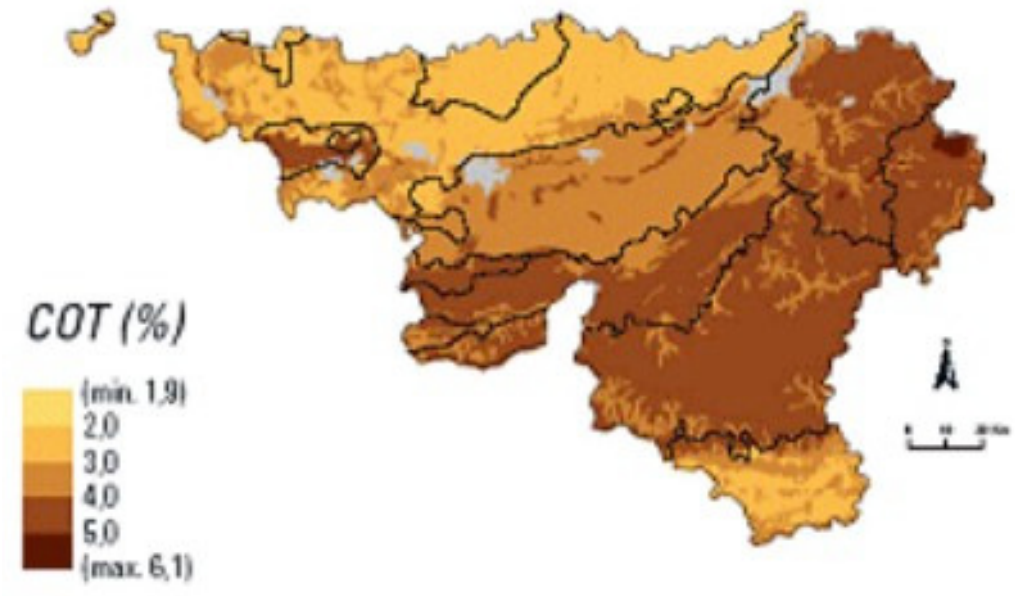

Figure 22: Teneur en MO pour les sols de prairie pour l'année 2005 selon la classification de la figure SOLS 1-2 de l'EEW 2006-2007

3.3 Cartes de l'évolution des teneurs en matière organique entre 2005 et 1955

Les cartes montrant l'évolution des teneurs en MO entre 2005 et 1955 ont été réalisées en faisant la différence entre les cartes de 2005 et les cartes correspondantes de 1955.

Similairement aux cartes des teneurs en MO de 2005, les cartes d'évolution des teneurs en MO sont présentées pour les sols de culture (a), les sols de prairie (b) et les deux occupations de sol ensemble (c). Pour les cartes a et b, différentes présentations sont également disponibles :

- la carte avec une <u>légende continue</u> de l'évolution de la teneur en MO pour représenter les tendances générales (/cont)

- la carte avec une <u>légende sur base de classes</u>

  - soit les classes sont celles reprises dans le rapport analytique de *l'Etat de l'Environnement Wallon 2006-2007* (ancienne carte SOLS 2-2, DGRNE, 2007) pour pouvoir réaliser des comparaisons

    - soit la carte ne tient pas compte de la distribution spatiales des sols sous culture (/class)

    - soit la carte tient compte de la distribution spatiales des sols sous cultures et masque les autres occupations de sols pour identifier les zones réellement concernées (/mask)

  - soit les classes reposent sur des *valeurs standards* (valeur minimale ; -4 ; -2 ; -1 ; -0.5 ; pas de changement ; 1 ; 2 ; valeur maximale) pour simplifier l'interprétation de la carte

    - soit la carte ne tient pas compte de la distribution spatiales des sols sous culture (/std)

    - soit la carte tient compte de la distribution spatiales des sols sous cultures et masque les autres occupations de sols pour identifier les zones réellement concernées (/stdmask)

Pour la carte c, seule les légendes en classes et avec le masque ont été retenues.

- **Sols de culture (cartes SOLS 2-2a)**

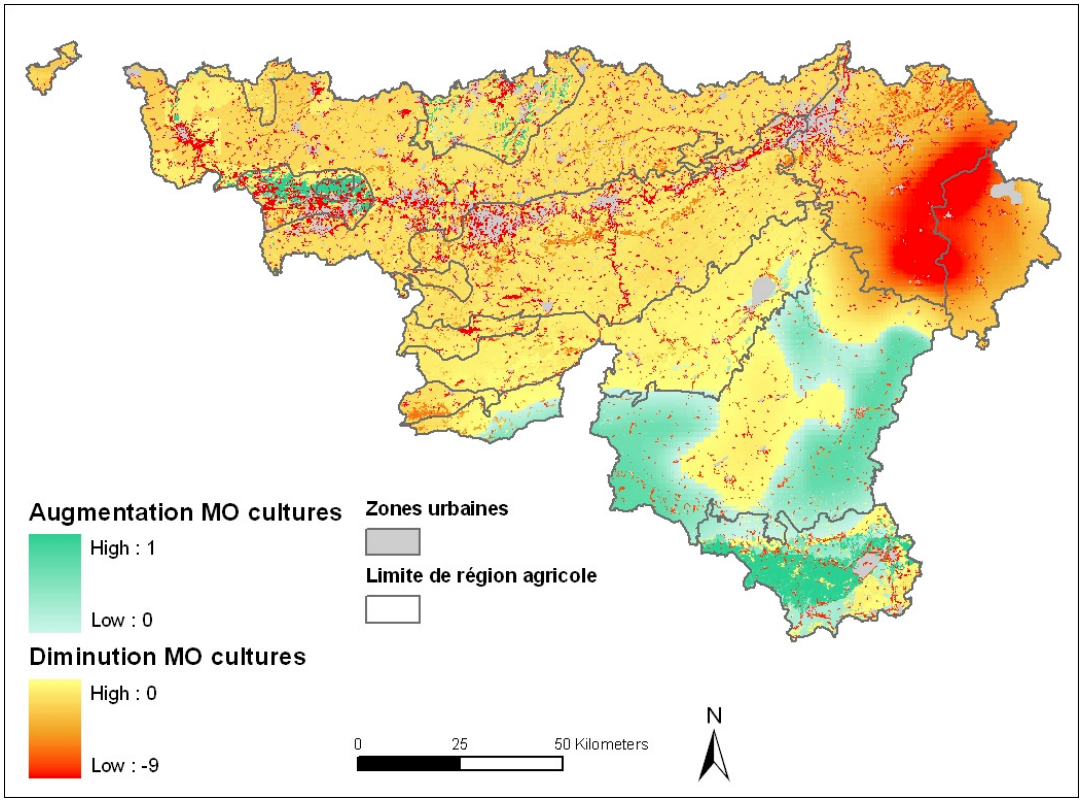

Figure 23: SOLS 2-2a /cont (Evolution des teneurs en MO - % - entre 1955 et 2005 pour les sols de culture restés sous la même occupation pendant cette période)

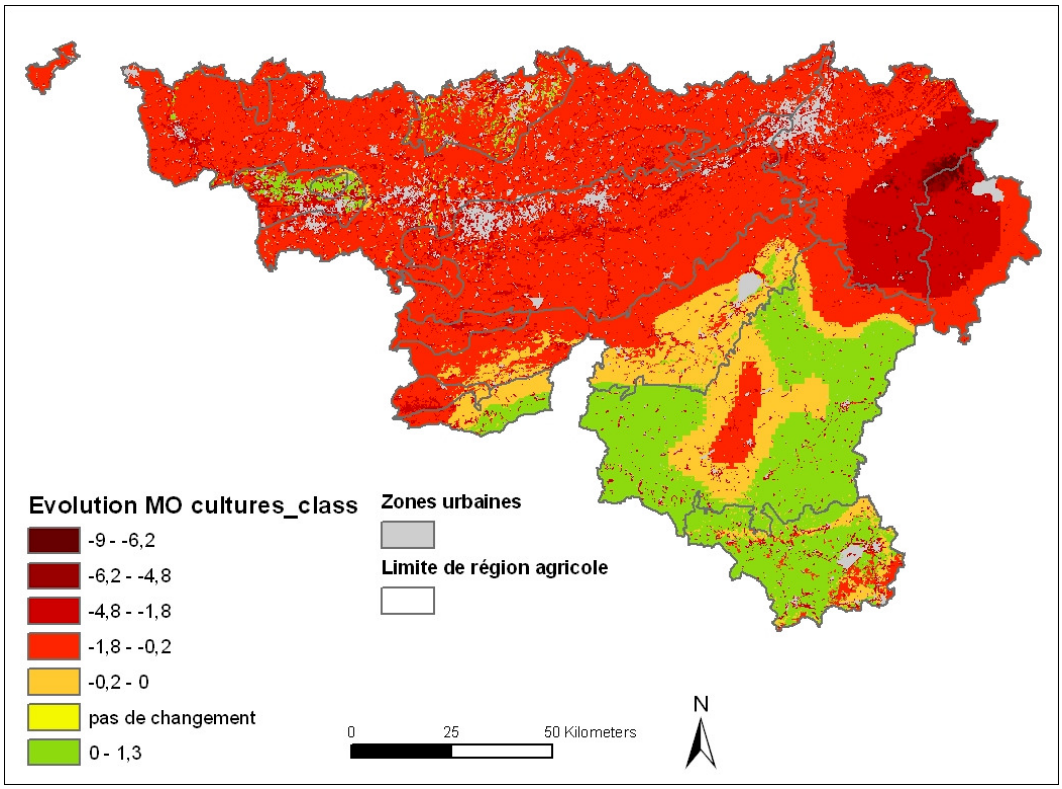

Figure 24: SOLS 2-2a /class (Evolution des teneurs en MO - % - entre 1955 et 2005 pour les sols de culture restés sous la même occupation pendant cette période)

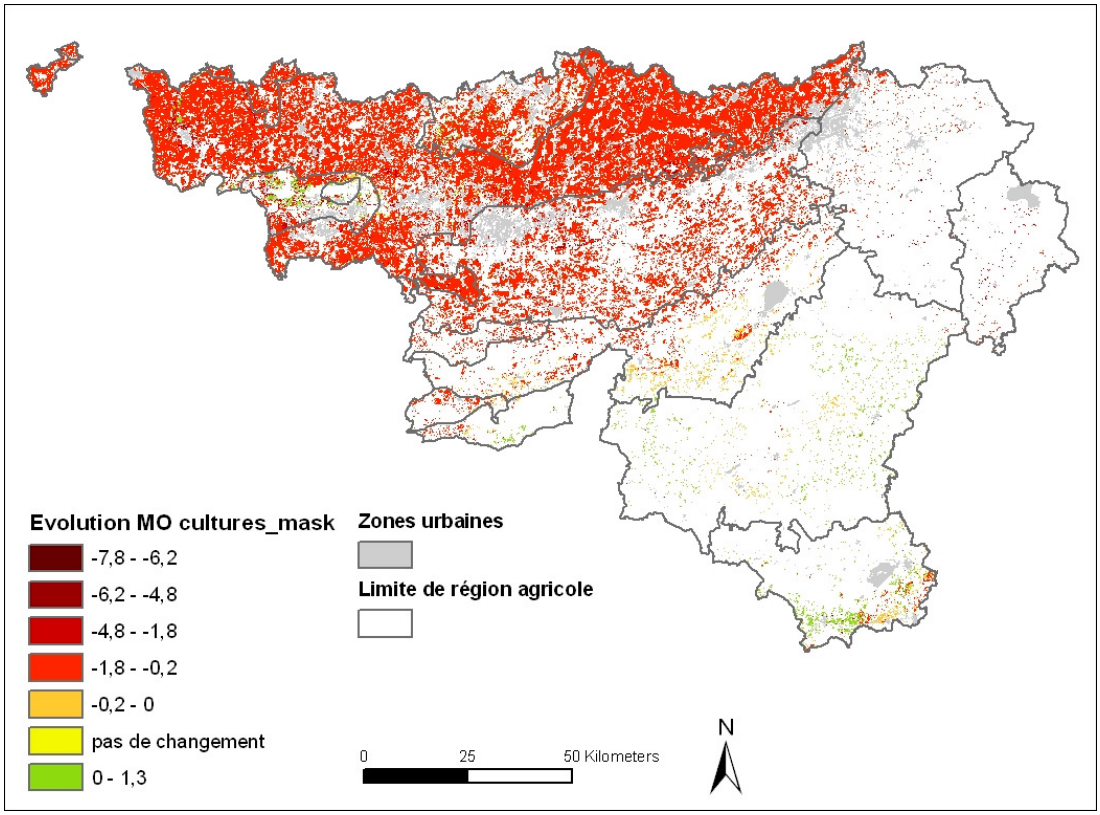

Figure 25: SOLS 2-2a /mask (Evolution des teneurs en MO - % - entre 1955 et 2005 pour les sols de culture restés sous la même occupation pendant cette période)

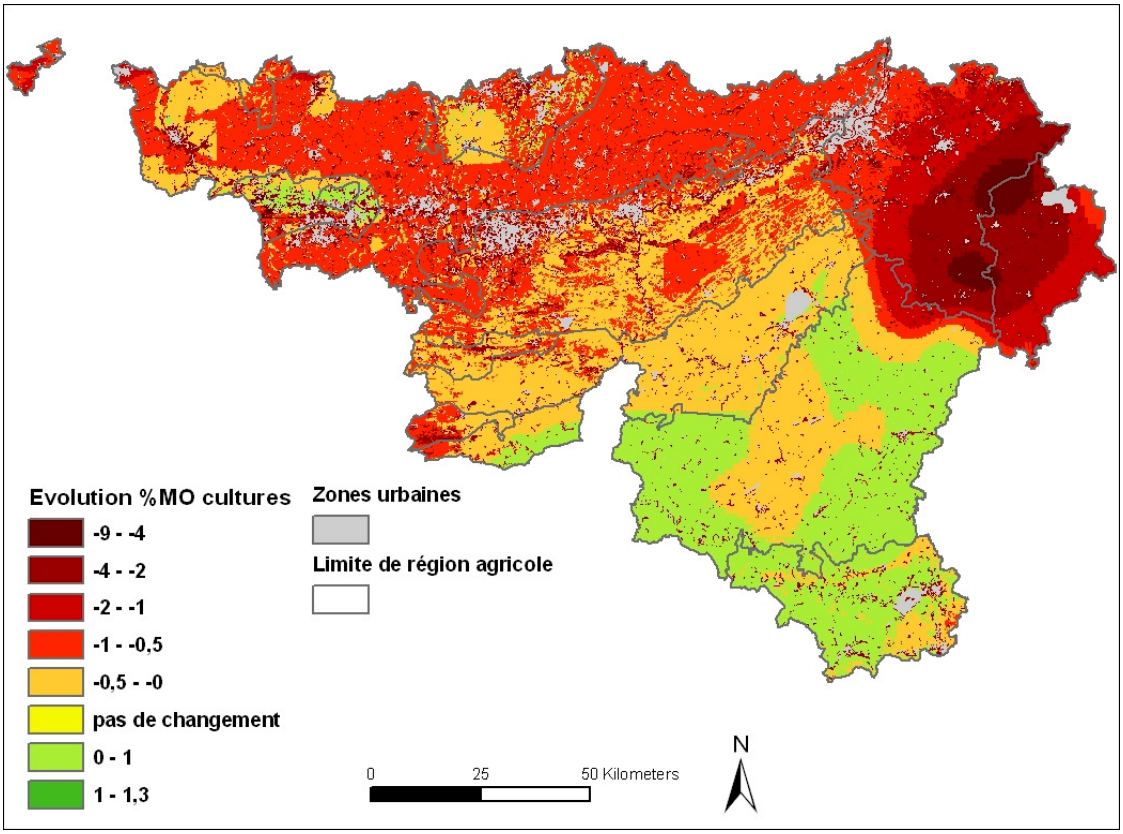

Figure 26: SOLS 2-2a /std (Evolution des teneurs en MO - % - entre 1955 et 2005 pour les sols de culture restés sous la même occupation pendant cette période)

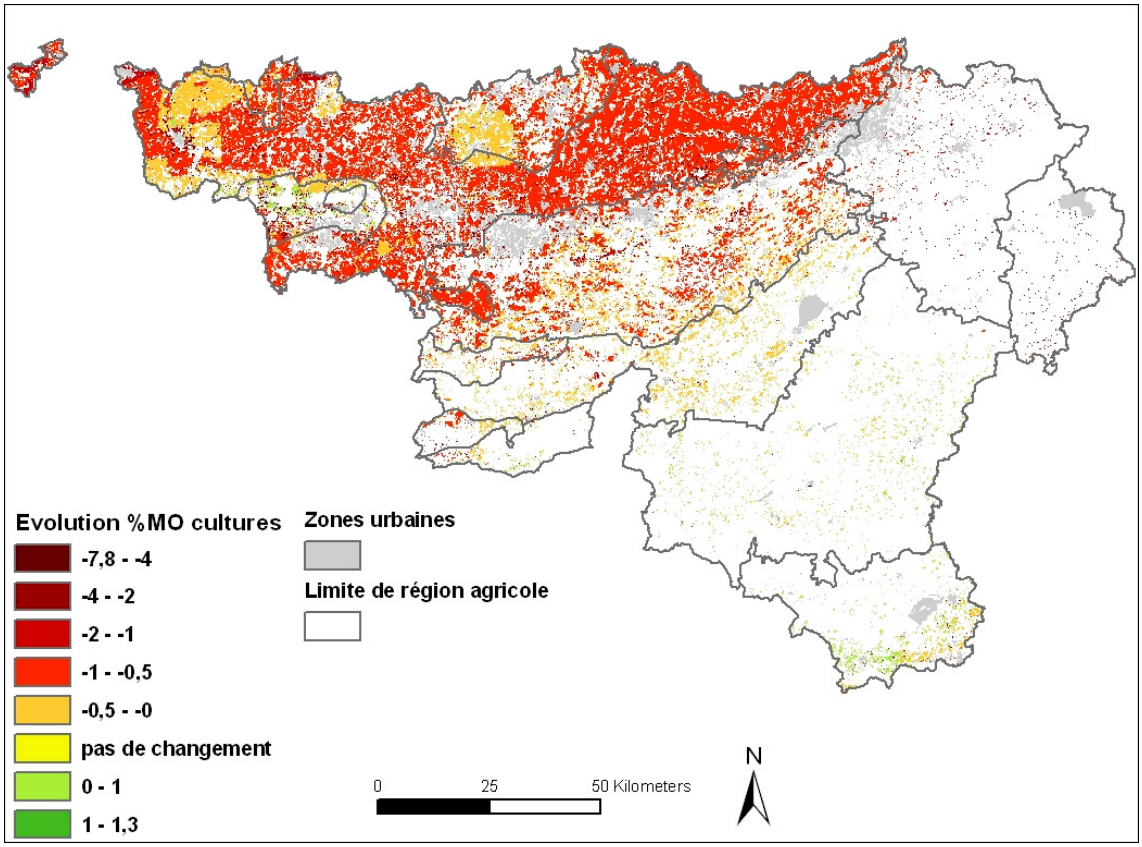

Figure 27: SOLS 2-2a /stdmask (Evolution des teneurs en MO - % - entre 1955 et 2005 pour les sols de culture restés sous la même occupation pendant cette période)

- ✓ De manière générale, les teneurs en MO diminuent pour les sols de culture, et particulièrement dans la région herbagère de Liège et les Hautes Ardennes, mais aussi dans la région limoneuse, sablo-limoneuse, le Condroz et le nord de la Famenne

- ✓ La diminution en MO semble affecter particulièrement les sols de culture situés dans le fond des vallées, et les sols de culture de la région herbagère de Liège

- ✓ L'augmentation des teneurs en MO des sols de culture de l'Ardenne, de la région jurassique et de la Campine hennuyère n'est probablement pas significative (l'erreur moyenne sur les teneurs étant du même ordre que l'augmentation prédite)

- ✓ L'évolution des teneurs en MO semble liée à l'évolution de la quantité de fumier et lisier épandue sur les terres arables (une augmentation dans les régions sablo-limoneuse, Famenne, de l'Ardenne et du jurassique, et une importante diminution dans la région herbagère de Liège), aux interactions entre ces épandages et les précipitations, et également au type de sol (des sols ayant une texture plus sableuse sont moins affectés par la diminution des teneurs en MO)

- **Sols de prairie (cartes SOLS 2-2b)**

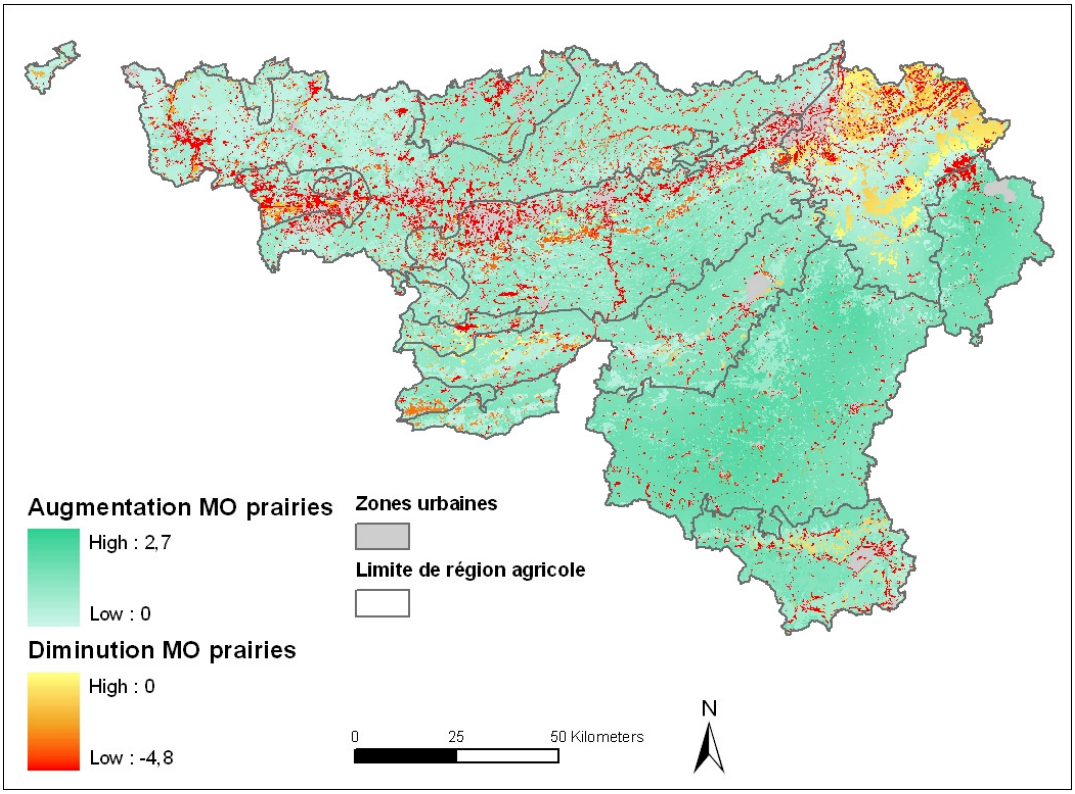

Figure 28: SOLS 2-2b /cont (Evolution des teneurs en MO - % - entre 1955 et 2005 pour les sols de prairie restés sous la même occupation pendant cette période)

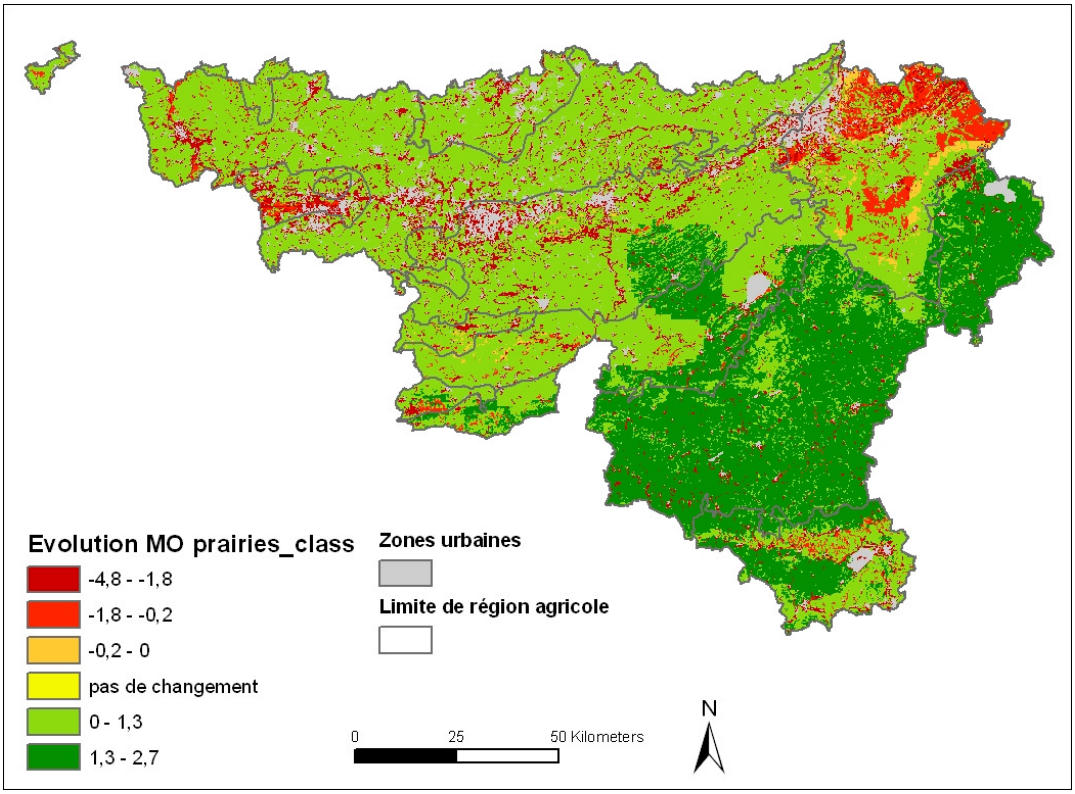

Figure 29: SOLS 2-2b /class (Evolution des teneurs en MO - % - entre 1955 et 2005 pour les sols de prairie restés sous la même occupation pendant cette période)

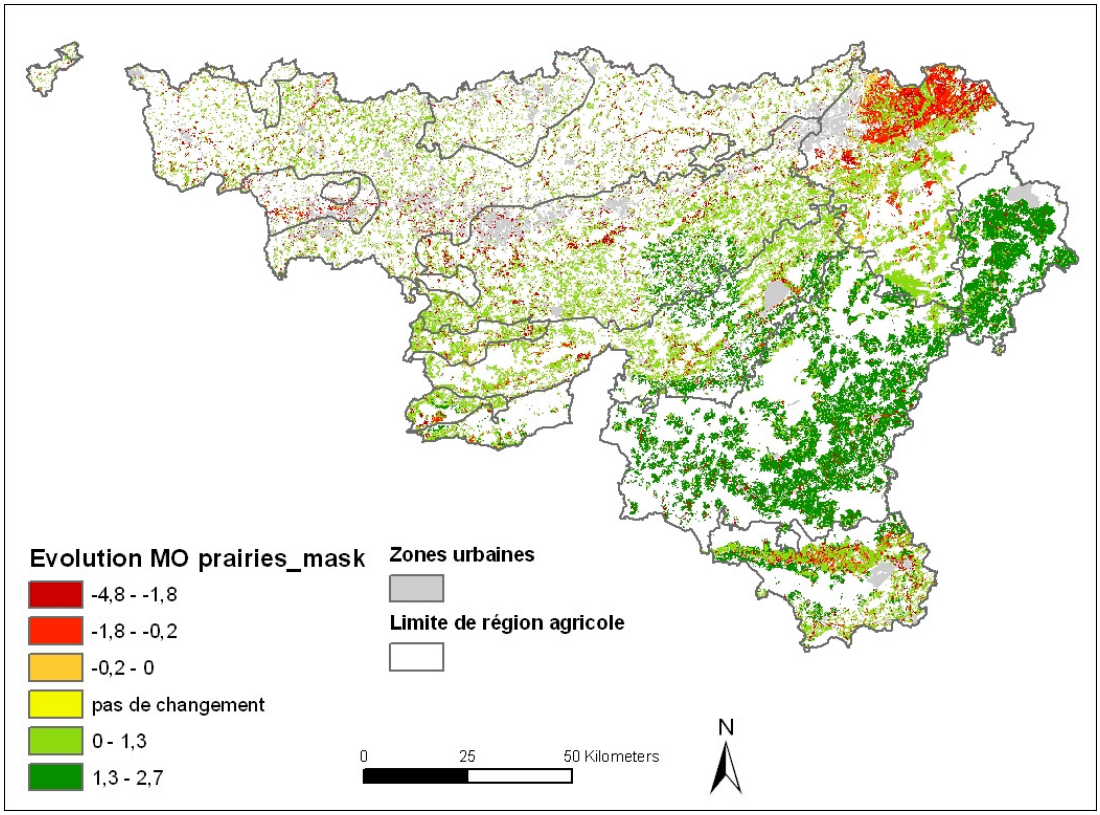

Figure 30: SOLS 2-2b /mask (Evolution des teneurs en MO - % - entre 1955 et 2005 pour les sols de prairie restés sous la même occupation pendant cette période)

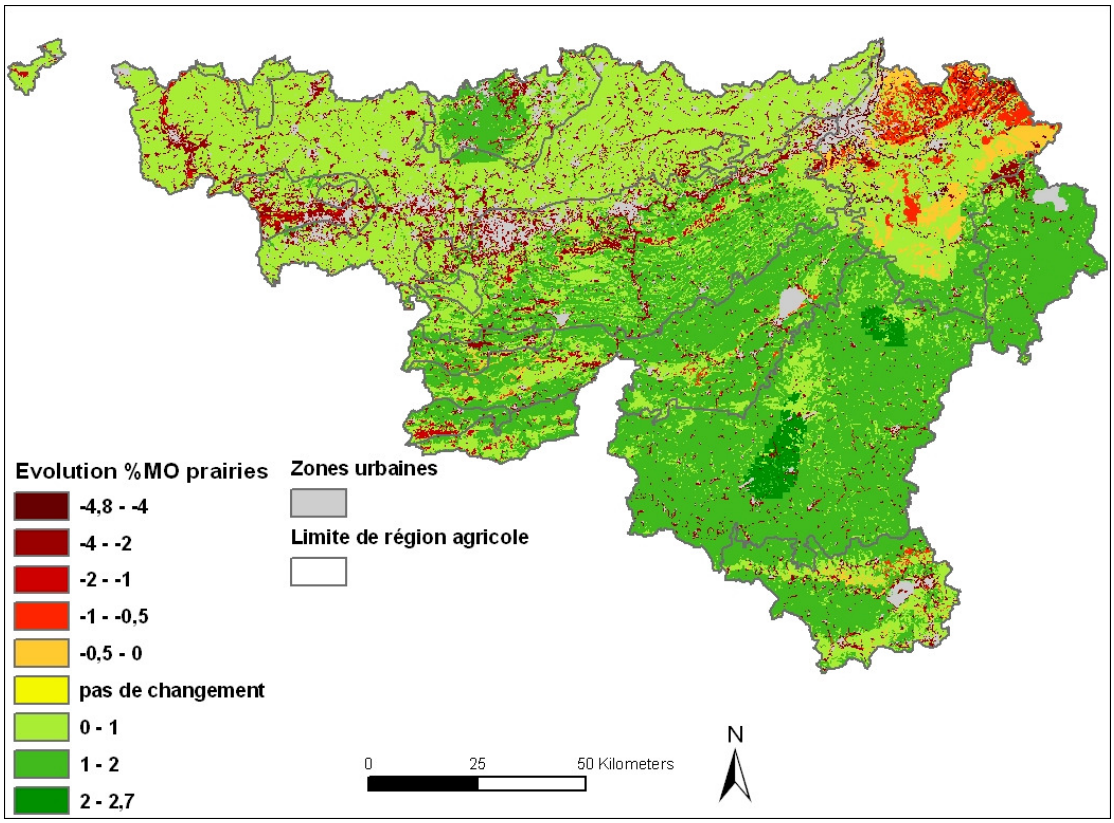

Figure 31: SOLS 2-2b /std (Evolution des teneurs en MO entre 1955 et 2005 pour les sols de prairie restés sous la même occupation pendant cette période)

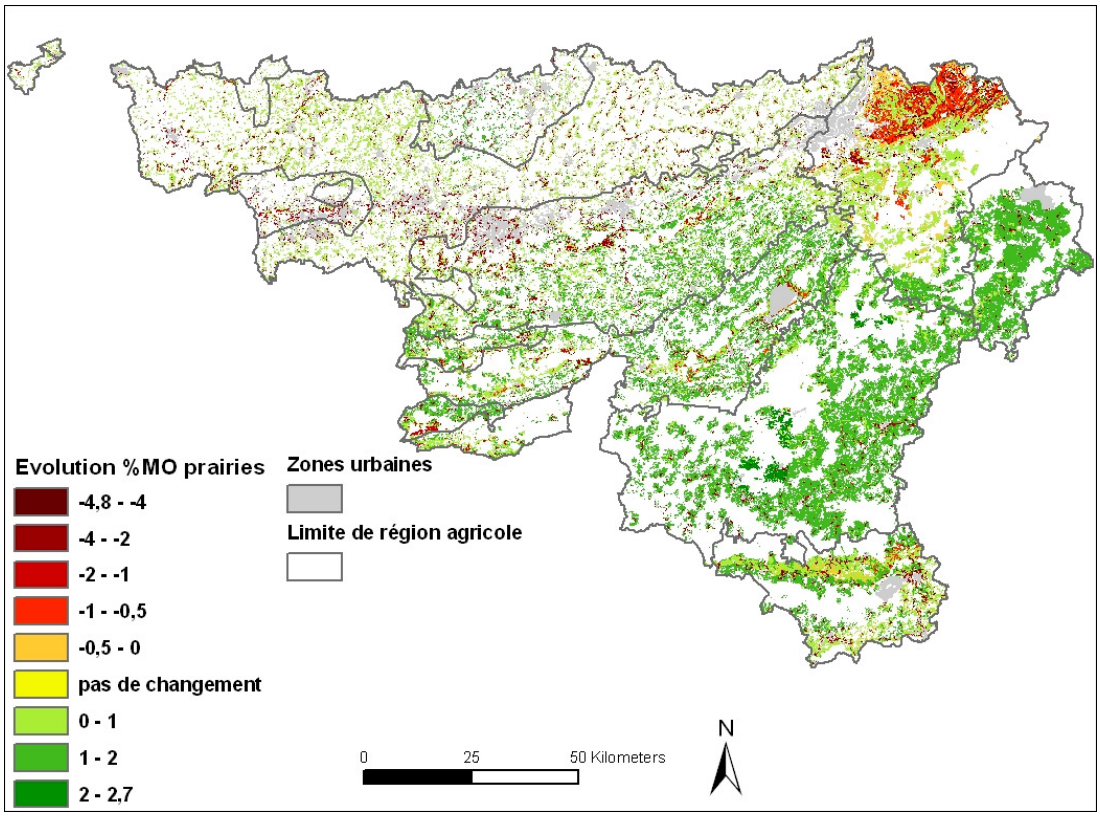

Figure 32: SOLS 2-2b /stdmask (Evolution des teneurs en MO entre 1955 et 2005 pour les sols de prairie restés sous la même occupation pendant cette période)

- ✓ De manière générale, les teneurs en MO augmentent pour les sols de prairie, avec un gradient allant du nord-ouest (faible augmentation) au sud-est (augmentation plus importante) de la Wallonie, hors région jurassique.

- ✓ En particulier, une augmentation importante des teneurs en MO concerne les sols de prairie des zones suivantes :

  - la région sablo-limoneuse du brabant
  - la zone Centre-Sud du Condroz et la région de la Famenne
  - la région de l'Ardenne et de la Haute Ardenne

  Les plus grandes augmentations des teneurs en MO de ces zones sont notamment liées aux variables utilisées dans les modèles telles que l'interaction entre les précipitations et la quantité d'effluents d'élevage épandue. En effet, une plus grande quantité d'effluents d'élevage est épandue dans les régions sablo-limoneuse, de la Famenne et de l'Ardenne, tandis que d'importantes précipitations caractérisent le Centre-Sud du Condroz et le Centre-Nord de la Famenne. Toutefois, d'autres facteurs pourraient être impliqués dans les évolutions observées, tels que l'impact des mesures agri-environnementales.

- ✓ Par contre, les sols de prairie situés dans la région herbagère de Liège et dans les fonds de vallée ont des teneurs en MO qui diminuent. La forte diminution de la quantité de fumier et lisier épandue sur les terres arables de la région herbagère de Liège est également à l'origine de la diminution de la teneur en MO dans cette région (passage de 2,44 t C ha^{-1} an^{-1} épandue en 1958 à 1,67 t C ha^{-1} an^{-1} en 2002, van Wesemael et al., 2004).

  La mise en place de la réglementation nitrate liée au PGDA (Programme de Gestion Durable de l'Azote) pourrait éventuellement expliquer la diminution des apports en amendement organique dans la région Herbagère de Liège. Cependant, des études complémentaires sont nécessaires pour établir les liens éventuels entre les réglementations mises en place (PGDA, MAE) et l'évolution des teneurs en MO.

- **Sols de culture et de prairie (cartes SOLS 2-2c)**

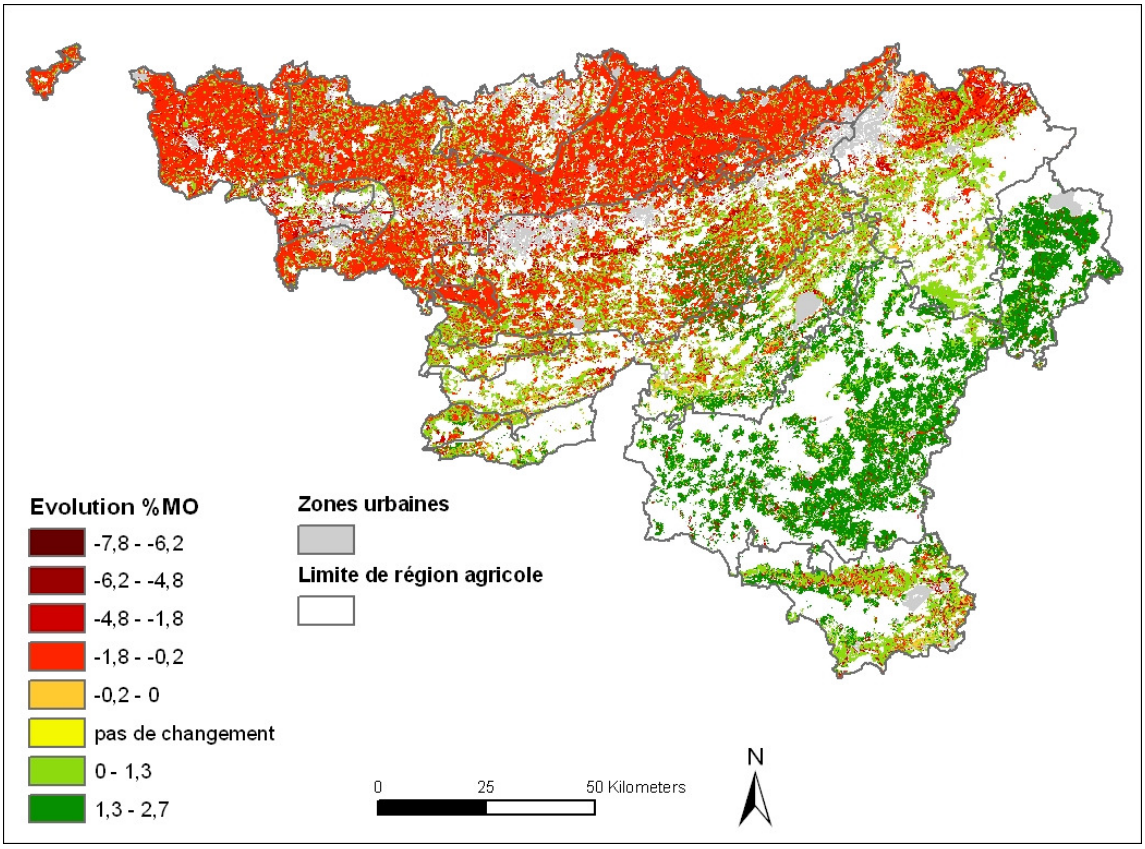

Figure 33: SOLS 2-2c /mask (Evolution des teneurs en MO entre 2005 et 1955 pour les sols de culture et de prairie restés sous la même occupation pendant cette période)

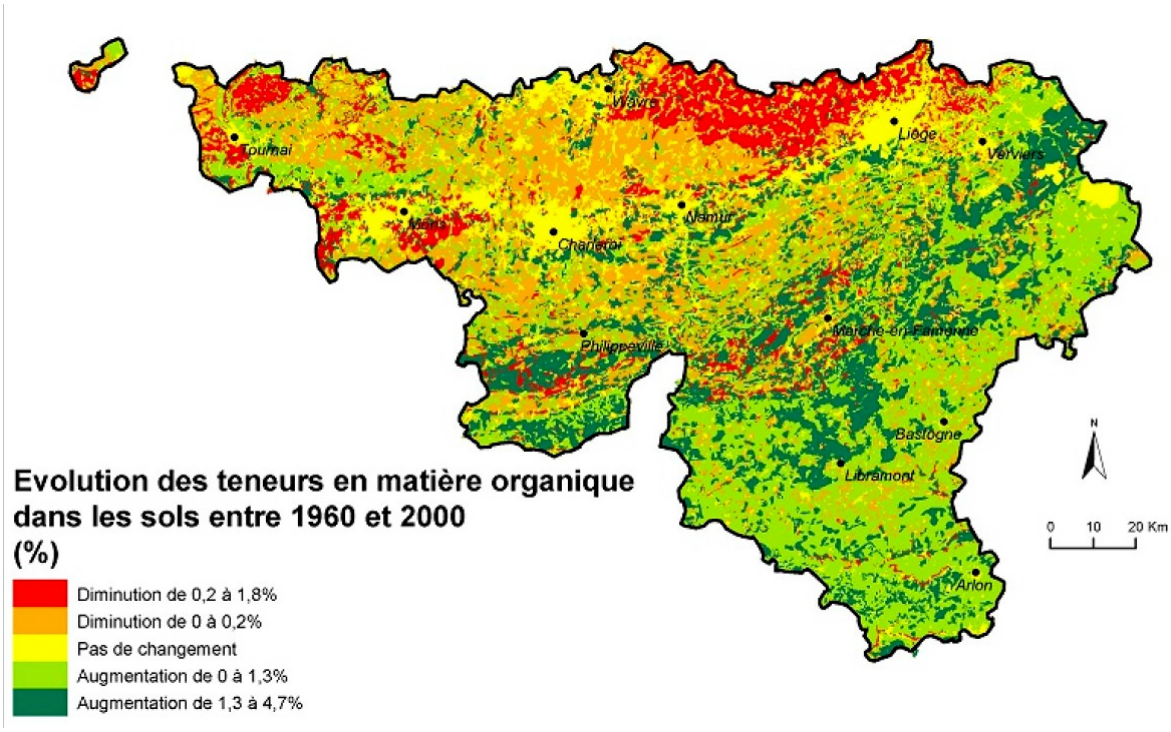

Figure 34: Figure SOLS 2-2 de l'EEW 2006-2007 (Evolution des teneurs en MO pour les sols de culture, de prairie et de forêt entre 2000 et 1955)

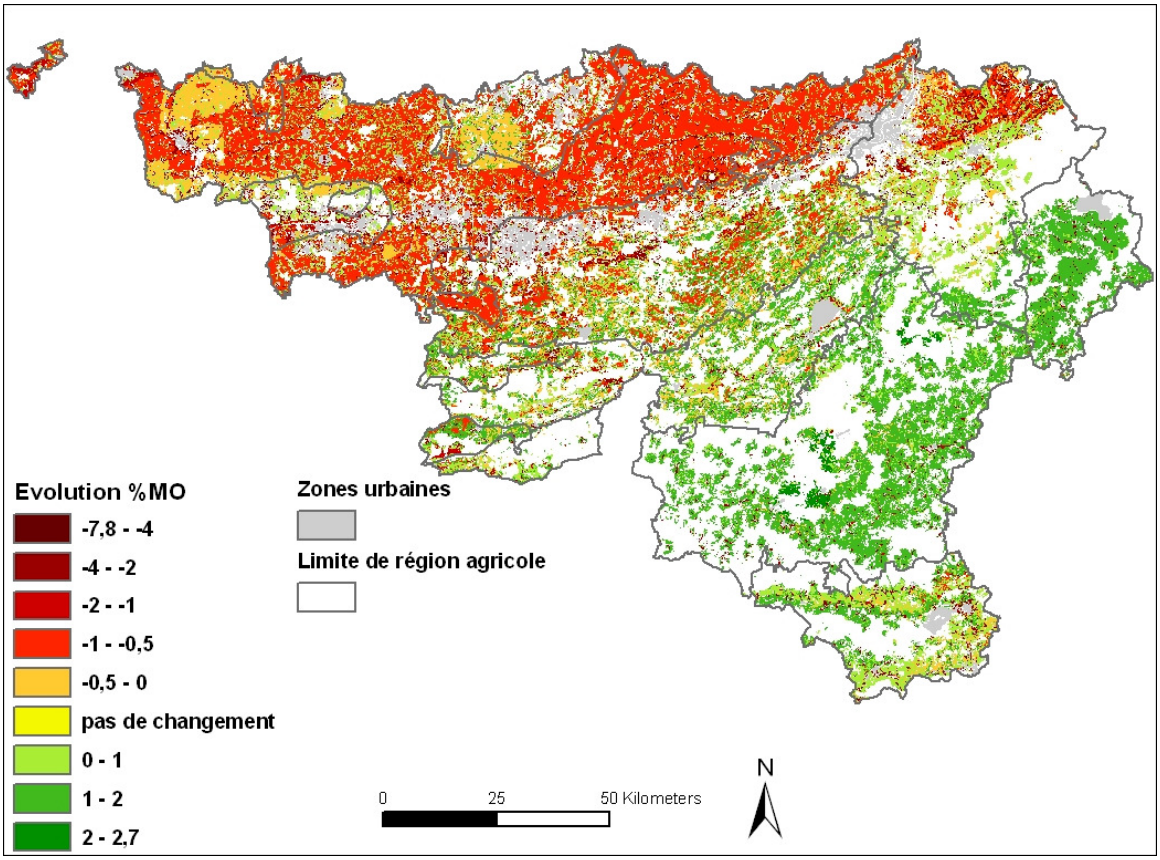

Figure 35: SOLS 2-2c /stdmask (Evolution des teneurs en MO entre 2005 et 1955pour les sols de culture et de prairie restés sous la même occupation pendant cette période)

La comparaison entre l'évolution des teneurs en MO données par la modélisation (figure 33) et celles obtenues avec le projet METAGE (figure 34, basée sur des données de COS de Aardewerk, des Centres d'Information Agricole provinciaux et de REQUASUD agrégées au niveau communal, Lettens et al., 2005b) montre essentiellement que :

- ✓ Le modèle reproduit en général les mêmes tendances au niveau de l'évolution des teneurs en MO des sols de culture et de prairie, à savoir des comportements opposés (diminution des teneurs en MO pour les sols de culture et augmentation des teneurs en MO pour les sols de prairie)

- ✓ Cependant le modèle a une gamme plus large de changements en MO par rapport aux données du projet METAGE (diminution et augmentation des teneurs en MO plus importantes)

Les différences constatées entre les évolutions des teneurs en MO données par le modèle et par le projet METAGE sont difficiles à expliquer. Cependant, l'évolution des teneurs en MO donnée par le projet METAGE (figure 34) concerne l'ensemble des sols agricoles ayant ou non subi un changement d'utilisation du sol, tandis que l'évolution présentée par le modèle concerne des sols ayant toujours été cultivés ou ayant toujours été en prairie durant la période 1955 - 2005. Sachant que de nombreuses prairies ont été retournées dans les années 50 pour être mises en culture, la teneur en MO des sols

nouvellement cultivés est plus importante que celle des sols restés en culture. Dès lors, il est possible que la diminution des teneurs en MO observée dans les sols cultivés en 2005 apparaisse moins importante dans le projet METAGE que dans notre modèle. La plus grande augmentation des teneurs en MO observées avec le modèle par rapport au projet METAGE est cependant plus difficile à expliquer et nécessite une étude complémentaire.

4. Evolution des stocks de C et facteurs explicatifs

4.1 Evolution des stocks de C entre 2005 et 1955 (Fig. SOLS 2-2)

L'estimation de l'évolution des stocks de C requiert, en plus de la mesure de la teneur en C, celle de la densité apparente des sols et de la fraction de fragments rocheux. Ces mesures sont disponibles pour les 430 profils de sols de la base de données Aardewerk qui ont été ré-échantillonnés dans le cadre des projets D31-1082 et D31-1120 réalisés pour la Direction Générale de l'Agriculture (Goidts & van Wesemael, 2008). Les stocks de C des ces profils sont donc mesurés, ce qui n'est pas le cas pour les profils ré-échantillonnés dans la région flamande et qui ont aussi servi à élaborer le modèle (Meersmans et al., 2008). Dès lors, la discussion sur l'évolution des stocks de C sera réalisée à partir des profils de sols ré-échantillonnés en Wallonie, mais en concordance avec les cartes d'évolution des teneurs en MO présentées auparavant.

La figure 36 (SOLS 2-2) présente l'évolution relative des stocks de C pour les sols de culture (dans la couche de labour) et les sols de prairie (dans la couche 0 – 30) ré-échantillonnés en Wallonie. Ces sols appartiennent à 15 unités de paysage agricoles définies sur base d'une même occupation de sol, d'une appartenance à la même région agricole et à un même type de sol (la texture et le drainage sont pris en compte, mais avec des classes de drainage simplifiées par rapport aux classes prises en compte pour la réalisation du modèle[3], voir l'annexe 2). Ces sols n'ont pas subi de changement d'occupation du sol depuis les années 60. Ces unités de paysage représentent environ 54% de la surface agricole utile si aucune conversion n'a effectivement eu lieu dans les sols agricoles. L'évolution des stocks de C est également présentée par unité de paysage (Tableau 10) et la répartition spatiale des unités de paysage avec leur évolution de stock de C est montrée dans la figure 37.

[3] Le modèle utilise des données venant de deux études indépendantes (Goidts & van Wesemael, 2007 et Meersmans et al., 2008) qui, bien que basées toutes deux sur les séries de sol de la carte pédologique de Belgique, ont repris ou non des simplifications pour répondre à leurs objectifs.

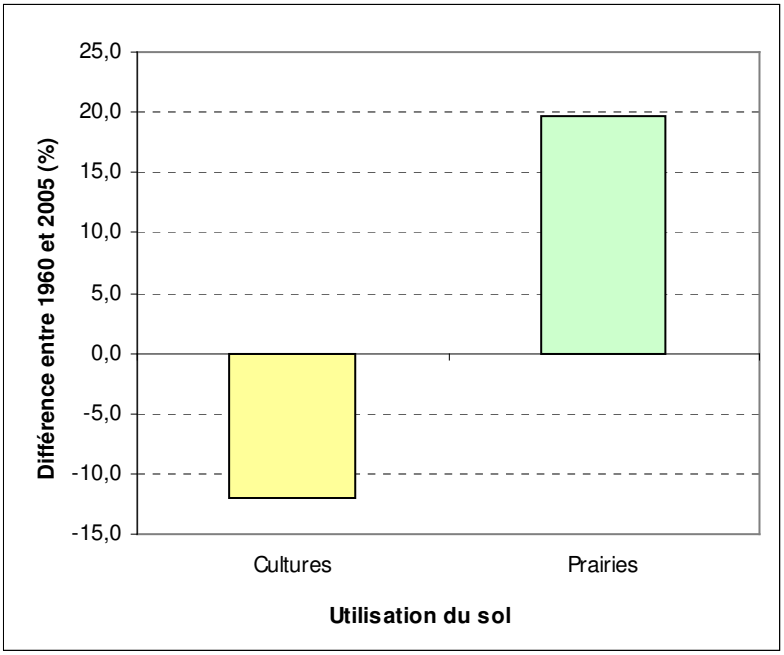

Figure 36: SOLS 2-2 ; Evolution relative des stocks de C pour les sols de culture (couche de labour) et de prairie (couche de 0 – 30 cm) ré-échantillonnés en Wallonie (n=430)

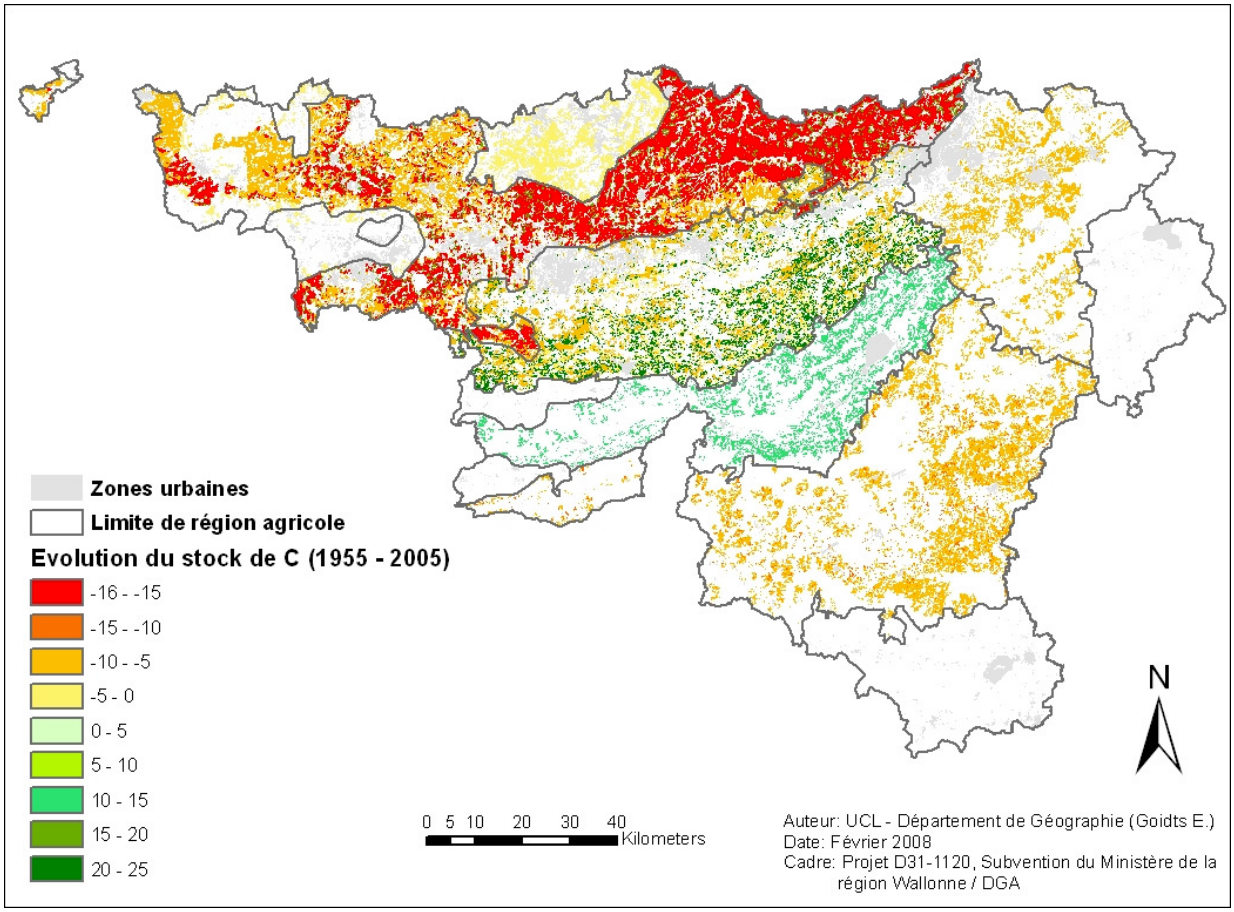

Figure 37: Evolution des stocks de C entre 1955 et 2005 pour les sols de culture (couche de labour) et de prairie (couche de 0 – 30 cm) appartenant aux unités de paysage ré-échantillonnés en Wallonie (n=15) et dont l'occupation du sol n'a pas changé entre 1955 et 2005

Tab. 10 : Teneurs en MO[a] des 15 unités de paysage ré-échantillonnées en Wallonie pour la période 1955 et 2005, et évolution des teneurs en COS pendant cette période

Unité[b]	Surface [ha]	Région agricole[c]	n	COS 1955 [%MO]	COS 1955 [t C ha-1]	COS 2005 [%MO]	COS 2005 [t C ha-1]	diff COS (2005-1955) [%MO]		diff COS (2005-1955) [t C ha-1]		diff relative %
Cultures												
1	3.229	SL	29	2,4	42,8	2,0	40,3	-0,4	**	-3,9	*	-9,1
2	24.537	SL	24	2,3	42,6	2,0	41,2	-0,3	*	-2,2		-5,2
3	4.326	L	38	2,6	43,8	2,1	41,9	-0,4	**	-3,6		-8,2
4	140.734	L	47	3,2	56,7	2,2	36,6	-1,0	**	-16,0	**	-28,2
10	73.123	L	21	2,7	48,7	2,0	43,3	-0,7	**	-7,8		-16,0
6	24.084	C	29	2,7	46,7	2,3	41,3	-0,4	**	-5,2	**	-11,1
7	18.435	C	43	2,8	49,0	2,3	40,1	-0,5	**	-7,0	**	-14,3
8	22.646	C	44	3,1	42,2	2,7	43,3	-0,4	**	-1,4		-3,3
14	8.634	A	23	7,1	97,0	5,8	64,0	-1,2	*	-11,7	*	-12,1
Moyenne			*33*	*3,2*	*52,2*	*2,6*	*43,6*	*-0,6*		*-6,5*		*-11,9*
Prairies												
5	25.504	L	28	3,6	61,9	4,5	85,6	0,9	**	15,9	**	25,7
9	13.888	C	9	2,8	51,5	4,2	78,9	1,4	**	24,3	**	47,2
11	28.866	C	12	3,5	63,0	4,8	85,2	1,4	**	24,4	**	38,7
12	35.519	HL	22	6,6	113,6	6,5	105,2	-0,1		-5,6		-4,9
13	37.030	F	26	4,7	72,7	5,9	92,1	1,2	**	13,9		19,1
15	75.595	A	32	6,1	90,5	6,2	82,3	0,1		-6,7		-7,4
Moyenne			*22*	*4,5*	*75,5*	*5,3*	*88,2*	*0,8*		*11,0*		*19,7*

** hautement significatif (P=0.01) ; * significatif (P=0.05)

[a] la profondeur considérée est la couche de labour pour les cultures et la couche 0-30 cm pour les prairies ; l'évolution des teneurs en COS exprimée en stock est calculée sur base d'une masse équivalente entre les deux périodes

[b] voir l'annexe 2 pour la description des unités de paysage

[c] SL = sablo-limoneuse ; L = limoneuse ; C = Condroz ; HL = Herbagère de Liège ; F = Famenne ; A = Ardenne

La comparaison de ces résultats avec les cartes présentées précédemment montre que :

- Le comportement opposé des sols de culture et de prairie est également marqué quand on examine les évolutions du contenu des sols en MO en terme de stocks de C

- Les sols de culture ré-échantillonnés présentent une diminution de C de 0.3 à 1.2 %MO (ou de 2 à 16 t C ha^{-1}). En examinant carte de l'évolution des teneurs en MO des sols de culture (figure 26), cette gamme de diminution de C couvre la majorité des sols de la région limoneuse et une partie des sols du Condroz et de l'Ouest de la région Herbagère de Liège. Aucun sol n'a été ré-échantillonné dans une classe à plus forte diminution de C telle que celle couvrant le restant de la région herbagère de Liège et la Haute Ardenne, mais il serait intéressant de le faire.

- Contrairement à la carte montrant l'augmentation de la teneur en MO d'une partie des sols de culture de la région sablo-limoneuse et de l'Ardenne (figure 23 ou 26), les sols ré-échantillonnés dans ces régions ont des stocks

de C qui diminuent. Le modèle ne semble donc pas refléter complètement les tendances observées et doit être utilisé avec prudence.

- Les sols de prairie ré-échantillonnés ont une augmentation de C de 0.1 à 1.4 %MO (ou de 0 à 24 t C ha^{-1}). En examinant carte de l'évolution des teneurs en MO des sols de prairie (figure 29), cette gamme d'augmentation en C couvre la majorité des sols de la région sablo-limoneuse, limoneuse, du Condroz, de la Famenne et une partie des sols de la région Herbagère de Liège, ce qui correspond aux régions couvertes par les unités de paysage ré-échantillonnées.

- Le gradient d'augmentation du C des sols de prairie de la figure 18 ne se retrouve pas dans les sols de prairie ré-échantillonnés (les sols de la Famenne et de l'Ardenne n'ont pas d'augmentation en C plus importante que celle des sols des autres régions, avec même une diminution des stocks de C pour les sols de prairie de l'Ardenne, tableau 10)

- Le contraste montré par le modèle entre la diminution en C des sols de prairie de la région herbagère de Liège et l'augmentation en C des sols de prairie des autres régions (figure 31) se retrouve également en terme de stock de C (tableau 10), bien que les évolutions soient non significatives pour les sols ré-échantillonnés.

4.2 Facteurs explicatifs

Les résultats obtenus au niveau des profils de sols ré-échantillonnés (tableau 10 précédent et rapport Goidts & van Wesemael, 2008) montrent de manière générale que:

- ✓ L'effet du climat est outrepassé par l'effet de l'occupation du sol (comportement opposés des sols cultivés et des sols sous prairie dans une même zone climatique), mais le climat marque les teneurs en carbone organique du sol (COS) initiales et finales (existence d'un gradient des teneurs en COS augmentant depuis le nord-est de la Wallonie jusqu'au sud-ouest), de même qu'il existe une corrélation entre le taux de changement en COS et l'évolution de la température et des précipitations moyennes annuelles (tableau 11)

Tab.11 : Coefficient de corrélation de Spearman pour l'ensemble des profils de sol ré-échantillonnés (n=427)

Coefficient de corrélation de Spearman	COS 1960	ARGILE	LIMON	Δprof. de labour	ΔSurface en céréales	ΔSurface en cultures sarclées	ΔSurface en cultures fourragères	ΔDensité d'UGB par ha de prairie	ΔFumier et lisier par ha de culture	ΔT moyenne annuelle	ΔP moyenne annuelle
Taux de changement en COS (Cultures, *n=298*) (taux négatif)	**-0,78*** **	0,02	**-0,21*** **	**0,14***	**0,13***	**-0,13***	0,08	-0,04	-0,11	**-0,19*** **	**0,12***
Taux de changement en COS (Prairies, *n=129*) (taux positif)	**-0,72*** **	**0,17***	-0,02	/	-0,04	**0,18***	0,08	0,13	-0,06	**-0,24** **	**0,20***

* = significatif (P<0,05) ** = hautement significatif (P<0,01) *** = très hautement significatif (P<0,001)

- ✓ Au niveau des sols cultivés, les unités homogènes ayant la plus grande diminution de leur teneur en COS sont les unités 4 (région limoneuse) et 14 (Ardenne) (Tableau 10). L'analyse de corrélation a identifié le rôle significatif des variables suivantes dans la plus grande diminution des teneurs en COS (tendance négative plus forte): un important contenu en COS initial (r = -0.78), une grande teneur en limon (r = -0.21), l'augmentation de la température moyenne annuelle (r = -0.19), une diminution de la profondeur de labour (r = 0.14), la diminution des surfaces en céréales (r = 0.13), l'augmentation des surfaces en cultures sarclées (r = -0.13) et une diminution des précipitations moyennes annuelles (r = 0.12) (Tableau 11). Les unités 4 et 14 ont en effet les contenus en COS les plus élevés pour la période 1955 (Tableau 10) et sont caractérisés par les régions agricoles ayant subi la plus grande diminution proportionnelle de leur surface en céréales. L'unité 4 a la plus grande teneur en limon et la région limoneuse est caractérisée par la plus grande augmentation en cultures sarclées. L'unité 14 appartient à la région agricole caractérisée par la plus grande augmentation de la température moyenne annuelle et par la seule diminution des précipitations moyennes annuelles.

  L'importance du contenu initial en COS est ainsi soulignée : un contenu initial élevé en COS est caractérisé par une plus grande diminution en COS, du fait de la grande quantité de MO disponible pour la minéralisation par les microorganismes, et éventuellement du fait d'un type de MO présent plus facilement dégradable (fraction labile). Le rôle de la teneur en limon est également souligné et pourrait indirectement refléter le rôle de l'érosion (les particules limoneuses étant les plus facilement sujettes à ce phénomène). Le lien entre l'augmentation de la température et la diminution en COS s'explique par l'effet positif de la température sur la minéralisation de la matière organique (des températures plus élevée vont de pair avec une plus grande diminution en COS), tandis que le lien entre la diminution des teneurs en COS et la diminution des précipitations pourrait s'expliquer par la moindre inhibition des processus de minéralisation par des teneurs en eau trop élevées dans les sols. Les effets liés à la diminution des surfaces en céréales peuvent refléter un moindre retour de résidus de culture à haute valeur C/N (la diminution en COS est proportionnelle à la diminution des surfaces en céréales), tandis que l'augmentation des surfaces en cultures sarclées pourrait correspondre à une plus grande diminution des teneurs en COS du fait d'une minéralisation plus poussée liée au travail du sol plus intensif pour les cultures sarclées que pour les autres types de culture. De plus, les cultures sarclées sont souvent liées à des phénomènes d'érosion plus intensifs (moindre couverture du sol et érosion par exportation des produits récoltés). Le lien entre la diminution de la profondeur de labour et la diminution des teneurs en COS est contre-intuitif, puisqu'en général c'est l'augmentation de la profondeur de labour qui est susceptible d'induire un effet de dilution de la matière organique en incorporant des horizons sous-jacents moins pourvus en COS que l'horizon de surface, et de ce fait provoquer une plus grande diminution des teneurs en COS.

- ✓ Au niveau des prairies, les unités homogènes ayant la plus grande augmentation de leur teneur en COS sont les unités 9 et 11 du Condroz (Tableau 10). L'analyse de corrélation a identifié le rôle significatif des variables suivantes dans la plus grande augmentation des teneurs en COS (tendance positive plus forte): un faible contenu en COS initial (r = -0.72), la diminution de la température moyenne annuelle (r = -

0.24), l'augmentation des précipitations moyennes annuelles (r = 0.20), l'augmentation des surfaces en cultures sarclées (r = 0.18) et de la teneur en argile (r = 0.17) (Tableau 11). Les unités 9 et 11 ont en effet les contenus en COS les moins élevés pour la période 1955 (Tableau 8) et n'ont subi ni les plus grandes hausses de température ni les plus grandes diminutions des précipitations. Toutefois les effets pouvant expliquer les changements en COS qui leur sont associés restent masqués par la grande variabilité présentée par les sols sous prairie.

Ces résultats confirment également l'importance du contenu initial en COS pour les sols de prairie, bien que de manière opposée puisqu'un contenu initial élevé en COS est caractérisé par une moindre augmentation en COS. Le type de MO pourrait être impliqué (de futures recherches devraient être menées), de même que le potentiel effet de saturation en MO du sol (l'augmentation de la teneur en COS d'un sol déjà bien pourvu en COS sera plus difficile que pour un sol dont les teneurs en COS sont faibles). Le rôle de la teneur en argile dans la plus grande augmentation en COS est également souligné et peut s'expliquer par une plus forte capacité de l'argile à structurer le sol, en protégeant ainsi la MO des processus de minéralisation ou de lixiviation. Le lien entre la diminution de la température et l'augmentation des précipitations d'une part et l'augmentation des teneurs en COS d'autre part, s'explique par l'effet de ces facteurs climatiques sur la minéralisation de la MO. Enfin, le rôle de la densité de bétail par ha de prairie n'a pas été souligné, posant la question de la faible sensibilité des données agrégées au niveau de la région agricole.

Remarques :

Selon le rapport de Genot et al. (2007), se basant sur l'analyse des teneurs en C des échantillons de Aardewerk pour les années 60, sur les données de l'Etat de l'Environnement Wallon de 1991-1992 (DGRNE, 1994) et sur les analyses de sol de routine de REQUASUD pour la période 1994-2004, les tendances moyennes observées entre 2002 et 1955 pour les sols de culture et de prairie de la région wallonne concordent avec les résultats de cette étude (diminution des teneurs en C pour les sols de culture et augmentation de C pour les sols de prairie). Cependant, les évolutions observées au niveau des régions agricoles varient sensiblement entre les deux études :

- Alors que notre étude présente une diminution générale des teneurs en C pour les sols de culture des régions agricoles ré-échantillonnées (région sablo-limoneuse, limoneuse, Condroz et Ardenne) (Goidts & van Wesemael, 2007 et 2008), Genot et al. (2007) montrent une augmentation significatives (prise en compte de l'erreur standard et non de l'écart type présenté dans la figure 38) des teneurs en C pour les sols de culture situés en région sablo-limoneuse, région limoneuse, dans le Condroz, dans la Famenne, dans la région herbagère des Fagnes, et dans la Campine hennuyère (figure 38).

- Alors que l'augmentation de C dans les sols de prairie est moins marquée pour les sols des régions sablo-limoneuse, limoneuse et de l'Ardenne dans l'étude de Genot et al. (2007), ce n'est pas le cas dans notre étude (hormis pour les sols de prairie de l'Ardenne) où l'augmentation de C est peu marquée pour les sols de prairie situés dans la région herbagère de Liège. Les sols de prairie qui présentent la plus grande augmentation en C sont ceux des régions du Condroz, de la région jurassique, de la région herbagère des Fagnes et de la Campine hennuyère dans l'étude de Genot et al. (2007), alors qu'il s'agit des sols de prairie situés non seulement également dans le Condroz, mais aussi dans la Famenne, voir même dans la région limoneuse pour notre étude.

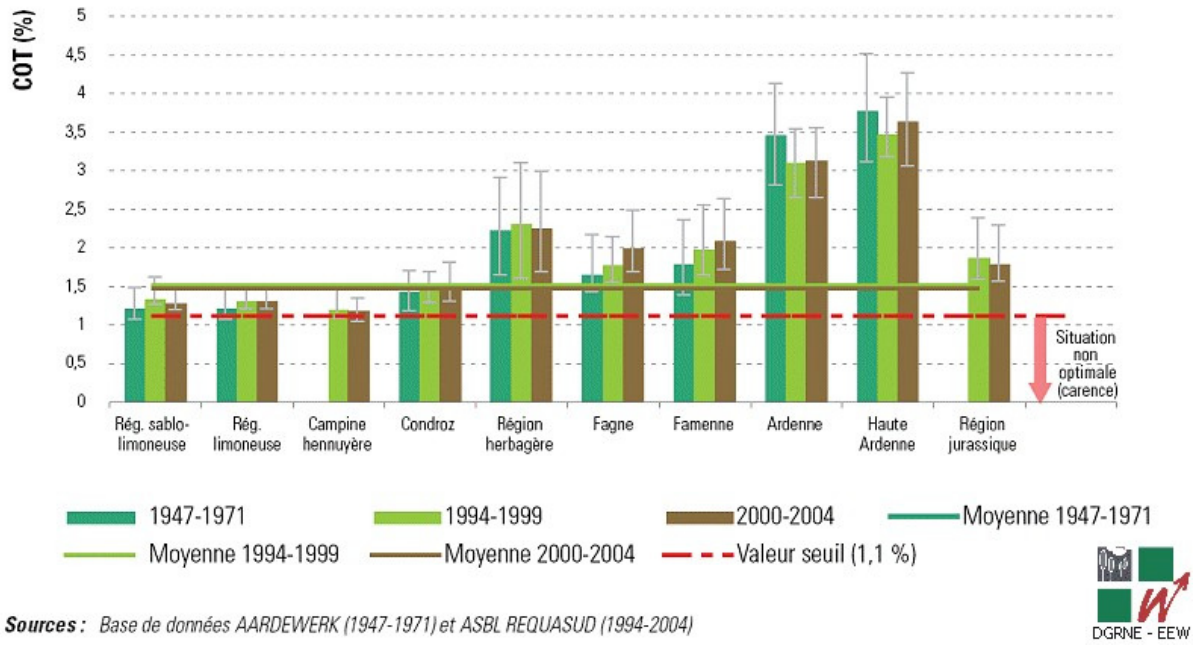

Figure 38 : Evolution de la teneur en C dans les sols de culture entre 1955 et 2002 à partir des données de Aardewerk et de l'ASBL REQUASUD (Genot et al., 2007)

- Le projet METAGE, bien qu'également basé sur l'analyse des échantillons de la base de données Aardewerk et de REQUASUD, a présenté les mêmes évolutions que notre étude, avec cependant une variabilité autour des résultats au niveau des unités de paysage trop élevée que pour montrer des tendances significatives à ce niveau-là (Lettens et al. 2005a)

⇨ *Les études du projet METAGE et de Genot et al. (2007) permettent d'avoir un bonne spatialisation des teneurs en MO, et d'ainsi couvrir l'ensemble de la Région Wallonne. Elles requièrent cependant l'utilisation d'un grand nombre de données. De plus, l'estimation des stocks de C et de leur évolution est plus difficile (dû à l'absence d'analyse de routine pour la densité apparente et la fraction massique rocheuse).*

- ⇨ *Notre étude, basée sur un ré-échantillonnage précis de profils de sol, permet de s'affranchir de la variabilité spatiale du C et de détecter de manière significative des faibles changements de teneurs en MO. Les profils ré-échantillonnés n'ont pas subi de changement d'occupation de sol depuis les années 1955, ce qui n'a pas été considéré dans les études du projet METAGE et de Genot et al. (2007). Sachant qu'un changement d'occupation du sol est un des plus importants facteurs influençant l'évolution de la teneur en C, il faut donc être prudent dans l'interprétation et les conclusions consécutives aux résultats présentés dans les différentes études (il serait très intéressant de comparer les résultats de ces différentes études à un niveau de stratification égal, i.e. pour des sols de même texture et drainage, de même occupation de sol et dans la même région agricole).*

- ⇨ *Notre étude permet d'analyser l'impact de la gestion agricole et du changement climatique sur l'évolution des stocks de C. Toutefois, les résultats ne sont valables que pour les unités de paysage étudiées qui représentent environ 54% de la surface agricole utile[4]. La spatialisation des résultats sur l'ensemble de la Région Wallonne est plus difficile du fait de la nécessité d'extrapoler les changements observés à des unités de paysage non-échantillonnées (question de la représentativité des processus impliqués).*

[4] si aucun changement d'occupation du sol n'a eu lieu depuis les années 60 pour la surface considérée

5. Estimation des quantités de MO à apporter et du temps nécessaire pour relever le stock de C des sols déficitaires

Les sols dont les teneurs en COS tombent en-dessous de 1% (soit 10 g C kg^{-1} ou 2% en MO) sont considérés par le bureau européen des sols comme appartenant à une catégorie particulièrement vulnérable à des dégradations plus poussées (Jones et al., 2004).

A partir des cartes de teneurs en MO obtenues pour 2005 (SOLS2-1a et b), on peut estimer l'appartenance de chaque sol à une catégorie déficitaire ou non par rapport à la valeur seuil de 10 g C kg^{-1} ou 2% en MO (ou de 39 t C / ha exprimé en stock de C, en considérant une densité apparente moyenne de 1300 kg/m³ et une profondeur de 30 cm). Les catégories déficitaires considérées pour cette étude sont présentées au tableau 12. Seuls les sols de culture sont pris en compte pour les différents calculs, les sols de prairie ne présentant à priori pas de déficit en MO (voir la précédente figure 12).

Tab.12 : Teneur en C du sol considéré (exprimée en g C kg^{-1} ou en stock de C) et classes de déficit en C correspondante (par rapport à la valeur seuil de 10 g C / kg ou 2% MO ou 39 t C / ha)

Teneur en C du sol		**Classes de déficit en C correspondante**	
g C / kg	*t C / ha*	*g C / kg*	*% MO*
10 – 7,5	39,0 - 29,3	0 - 2,5	0 – 0.5
7,5 – 5	29,3 - 19,5	2, 5 - 5	0,5 – 1
5 – 2,5	19,5 – 9,8	5 - 7,5	1 – 1,5
2,5 – 0	9,8 - 0	7,5 - 10	1,5 - 2

Le déficit total en C correspond à la quantité de C à ajouter non seulement pour atteindre la valeur seuil, mais aussi pour combler la perte annuelle de C des sols du fait de la minéralisation de l'humus (coefficient k2). Le modèle de Hénin et Dupuis (1945) est un modèle simplifié de l'évolution de la matière organique dans le sol. Il est utilisé dans cette étude pour estimer la quantité totale de C à apporter sous la forme suivante (Roussel et al., 2001):

$$stock_t = stock_0 * e^{(-k2*t)} + k1 * apport * (1- e^{(-k2*t)}) / k2 \qquad \text{(équation 3)}$$

Où le $stock_t$ = le stock de carbone au temps t [t C / ha]
$stock_0$ = le stock de carbone initial (t = 0) [t C / ha]
k1 = coefficient d'humification (0,25)
k2 = coefficient de minéralisation (0,015)
t = nombre d'années nécessaire pour arriver à la valeur seuil [an]
apport = quantité de MO apportée annuellement [t MS / ha / an]

En isolant la quantité de MO à apporter de l'équation 3 (*apport*) et en fixant un nombre d'années d'épandage (*t*), on peut estimer la quantité de matière organique à apporter pour passer du stock de C initial (connu) au stock de C final visé (i.e. la valeur seuil). Pour cette étude, un k1 moyen de 25% est considéré, et k2 est estimé à 1,5 % (moyenne des valeurs 1 et 2 habituellement utilisées) bien qu'il puisse varier entre 1 et 3% (Culot, 2005).

L'apport de C peut provenir des différents types de gisements de MO existants en Wallonie. Pour cette étude sont considérés les gisements venant des effluents d'élevage, des déchets agro-industriels, des sous-produits forestiers, des déchets verts (GFT – Groen/Fruit/Tuin, et composts verts), et des boues de station d'épuration. Leurs caractéristiques en terme de contenu en C et en N, ainsi que de leur proportion de matière sèche proviennent des moyennes d'une revue succincte de la littérature (NRAES, 2002; De Neve, 2002 ; Culot, 2005 ; IRCO, 2006 ; Godden et al., nc ; PGDA, 2007).

Dans la mesure où tout apport de C est associé à un apport de N et qu'il existe un Plan de Gestion Durable de l'Azote (PGDA) pour éviter des épandages excessifs (correspondant à des taux de liaison au sol supérieurs à 1), une limite dans les apports de C doit être considérée, par exemple sous la forme d'une Matière Fraîche maximale épandable (MF max) :

$$MF\ max = N\ max / (10 * \%N\ de\ la\ MF) \qquad [t\ MF / ha / an] \qquad (\text{équation } 4)$$

Où N max est l'azote maximal épandable sur les cultures (115 kg N / ha culture)
%N de la MF est le contenu en azote de la matière fraîche (kg N / 100 kg MF)

Tab.13 : Caractéristiques moyennes des gisements de MO considérés et épandage maximal sur les sols de culture autorisé par rapport à la norme du PGDA (115 kg N / ha de culture)

Gisement MO		**C/N**	**%C de MF**	**%N de MF**	**% MS de MF**	**MF max t / ha / an**
Effluents élevage	Fumier	16,1	11,8	0,7	20,4	17,4
	Lisier	9,6	4,8	0,5	7,3	22,5
	Compost de fumier	19,0	12,8	0,7	37,5	17,0
Déchets agro-industriels	Valeur moyenne	16,9	22,7	1,3	28,7	8,6
Sous-produits forestiers	Valeur moyenne	296,3	45,0	0,2	62,5	75,7
Déchets verts	GFT + Compost vert	30,3	39,1	1,3	19,8	8,9
Boues station épuration	Valeur moyenne	8,7	11,75	1,4	80,0	8,5

En tenant compte de la limite de MF pouvant être apportée annuellement (en équivalent de matière sèche – MS) et de la valeur seuil de stock de C à atteindre, on peut estimer la durée d'épandage nécessaire pour atteindre cette valeur seuil par itération (équation 3 calculée pour t = 1, et si la MS dépasse la MS maximale, alors l'équation 3 est recalculée pour t = t+1, jusqu'à ce que le besoin total en C soit comblé sans dépasser les limites d'épandage).

Ces calculs sont réalisés pour les différentes classes de déficit en C des sols et pour les différents gisements de MO considérés. Les résultats sont présentés au tableau 14 ci-dessous.

Tab.14 : Estimation des quantités de matière fraîche (MF) à apporter annuellement et de la durée de l'apport pour combler le déficit en C des sols de culture par rapport à la valeur seuil de 2% de MO et en tenant compte de la limite d'épandage utilisée par le PGDA sur les cultures (115 kg Norg / ha culture / an)

Gisement en MO	**MS et MF max épandable sur cultures**		**Quantité de MF à apporter annuellement et durée de l'apport en fonction de l'appartenance d'un sol à une classe de déficit en C**							
			Déficit en C du sol 0 – 0,5 %MO		Déficit en C du sol 0,5 - 1 %MO		Déficit en C du sol 1 – 1,5 %MO		Déficit en C du sol 1,5 - 2 %MO	
	t max MS / ha / an	*t max MF / ha / an*	*t MF / ha /an*	*années**	*t MF / ha /an*	*années**	*t MF / ha /an*	*années**	*t MF / ha /an*	*années**
Effluents élevage										
Fumier	3,5	17,4	max	27	max	46	max	60	max	72
Lisier	1,6	22,5	max	∞	max	∞	max	∞	max	∞
Compost de fumier	6,4	17,0	max	9	max	17	max	24	max	31
Déchets agro-industriels	2,5	8,6	max	115	max	155	max	180	max	200
Sous-produits forestiers	47,3	75,7	max	1	max	2	max	3	max	4
Déchets verts (GFT + Compost vert)	1,8	8,9	max	∞	max	∞	max	∞	max	∞
Boues station épuration	6,8	8,5	max	9	max	16	max	23	max	29

* ∞ signifie qu'il n'est théoriquement pas possible d'atteindre la valeur seuil quelle que soit la quantité de gisement en MO épandue

A partir de la carte des teneurs en C des sols de culture (carte SOLS 2-1a, figure 5), la surface des sols cultivés appartenant à chaque catégorie de déficit peut être évaluée. Le tableau 15 montre que plus du tiers des sols cultivés sont au niveau ou en-dessous de la valeur seuil de 2% de MO. Ces sols sont quasi tous (94%) situés en région limoneuse.

Tab.15 : Surfaces sous cultures concernées par un déficit en C en Wallonie (valeur seuil de 2% MO)

Classes de déficit en C du sol *%MO*	**Surfaces sous culture en Wallonie** *ha*	**Part de la surface sous culture** *%*
0 – 0,5	166254	38,6
0,5 – 1	9461	2,2
1 – 1,5	0	0
1,5 - 2	0	0

Connaissant la surface des sols de culture déficitaires en MO (tableau 15) et leur besoin annuel en MF par unité de surface (tableau 12), les besoins totaux de MF des sols de culture peuvent être évalués pour une année d'épandage. En plus de la MF à apporter sur les surfaces cultivées déficitaires en MO, il faut également tenir compte du maintien de la MO des sols non déficitaires (sous culture et sous prairie). La quantité de MO nécessaire pour compenser les pertes d'humus annuelles par minéralisation (k2) peut être évaluée en fonction du contenu moyen en MO des sols non déficitaires, de la surface qu'ils recouvrent, et de l'équation 3 pour $t = 1$ année.

Les besoins en MF totaux des sols de culture déficitaires et des sols non déficitaires peuvent donc être estimés et mis en perspective avec les données de gisements de MO produits en Wallonie pour l'année 2000 (Culot, 2005).

Tab.16 : Besoins annuels en MF pour combler le déficit en C des sols déficitaires et maintenir le C des sols non déficitaires, pour chaque type de gisement de MO et avec la disponibilité de ce gisement (on considère que tout le déficit en C est comblé par un seul type de gisement)

	Besoins en MF des sols de culture déficitaires	**Besoins en MF des sols non déficitaires [b]**	**Besoins totaux en MF**	**Gisements en MF [c] (Culot, 2005)**	**Déficit**	**Taux d'auto approvision-nement**
	t MF totale / an	*t MF totale / an*	*t MF totale / an*	*t MF totale / an*	*t MF / an*	*%*
Effluents d'élevage [a]						
Fumier	3.052.890	22.048.816	25.101.706	4.437.843	-20.663.863	18
Lisier	3.962.201	61.540.360	65.502.561	4.437.843	-61.064.718	7
Compost de fumier	2.993.663	11.995.851	14.989.514	986.187	-14.003.327	7
Déchets agro-industriels	1.508.800		1.508.800	773.518	-735.282	51
Sous-produits forestiers	13.294.227		13.294.227	1.000.000	-12.294.227	8
Déchets verts (GFT + Compost vert)	1.569.493		1.569.493	193.984	-1.375.509	12
Boues station épuration	1.496.260		1.496.260	91.000	-1.405.260	6

[a] les effluents d'élevage étant déjà utilisés pour être épandus sur les terres agricoles (déficitaires ou non), ils ne constituent pas un gisement de MO exogène à l'exploitation agricole en tant que tel.

[b] dès lors que l'on considère que les gisements de MO externes doivent être utilisés prioritairement sur les sols déficitaires en C, les besoins en MF des sols non déficitaires sont uniquement calculés à partir des gisements de MO sous forme d'effluents d'élevage.

[c] les données disponibles sur la quantité des gisements en effluents d'élevage ne faisant pas la distinction entre le fumier, le lisier et le compost de fumier (Culot, 2005), une répartition respective de 45% - 45% - 10% a été considérée pour les calculs.

Non seulement chaque gisement en MO pris séparément est insuffisant pour combler les besoins totaux en MF (le taux d'auto approvisionnement en MO étant inférieur à 100%), mais, même en les combinant, ils ne suffisent pas non plus à combler les besoins en MF des sols non déficitaires de la Région Wallonne (tableau 17).

Tab.17 : Besoin annuel en C des sols déficitaires et non déficitaires calculés dans cette étude et quantité totale de C disponible à travers les gisements de MO de l'année 2000 (Culot et al., 2005)

Sols de culture déficitaires		**Sols non déficitaires**	**Besoin total en C**	**Quantité de C disponible par an à travers les gisements de MO [b]**
Déficit total de C à combler	Perte de C par minéralisation	Perte de C par minéralisation		
t C	*t C / an*	*t C / an*	*t C / an*	*t C / an*
1.805.466 [a]	102.793	1.123.112	3.031.371	~1.600.000

[a] la quantité de C à apporter annuellement pour combler ce déficit va dépendre du type de gisement utilisé et du nombre d'années nécessaires correspondant (voir le tableau 12). Toutefois, on considère ici le cas maximum où le tout est apporté en 1 année (proche du cas où des sous-produits forestiers disponibles en quantité suffisante sont épandus)

[b] de cette quantité de C ne va rester qu'une partie du fait des coefficients d'humification et de minéralisation, et des restrictions d'épandage liées au PGDA.

Cette constatation va dans le même sens que les estimations présentées dans le rapport Culot (2005), à savoir que le gisement en MO ne pourra que partiellement combler le besoin en MO dû à la perte de MO par minéralisation (« *31 à 63% de la perte en MO des sols de culture par minéralisation pourraient être comblés si l'on ne tient pas compte des effluents d'élevage, et si l'on prend tous les déchets réunis, le comblement des besoins globaux des sols de culture et de prairie de la Région Wallonne varierait de 22 à 45% selon le coefficient k2 de 1 ou 2%* »). En utilisant cette même approche, mais avec un coefficient k2 de 1.5%, le taux d'auto approvisionnement pour combler la perte de MO par minéralisation des sols de culture et de prairie est compris entre 21 et 51% selon la prise en compte ou non des gisements d'effluents d'élevage prévus pour 2010 (Culot, 2005). En outre, ces calculs ne tiennent pas compte des besoins en MO pour ramener au seuil de 2% de MO les sols présentant un déficit de C.

Il est donc nécessaire d'identifier les zones déficitaires prioritaires dont il faut relever le taux de MO. Ces zones d'épandage prioritaires doivent être mises en perspective avec la disponibilité spatiale des gisements de MO et avec la quantité de gisements nécessaire pour combler le besoin total en MO des sols visés (voir le tableau 14 pour connaître les quantités à épandre). La question du transport des gisements en MO doit donc également être abordée, sachant qu'une distance limite devrait être fixée pour des questions de coût (financiers et environnementaux). De plus, certains gisements en MO présentent moins de potentiel pour relever les teneurs en MO des sols (le lisier, les déchets verts et agro-industriels, tableau 14). Dès lors, ces gisements peuvent être considérés dans le cadre d'une autre filière, de type énergétique, pour peu que les besoins en N pour les cultures soient déjà remplis (Culot, 2005).

Afin d'étudier ces questions, les gisements en MO doivent être considérés par secteur statistique plus précis que celui de l'entièreté de la Région Wallonne et être mis en relation avec les cartes présentées dans cette étude. Les données de gisement en MO n'étant pas disponibles de manière détaillée dans le cadre de cette étude, une investigation plus poussée devrait être menée.

6. Conclusions

- ✓ La modélisation utilisée pour spatialiser les données de MO des années 1955 et 2005 (par régression multiple) s'est révélée relativement efficace, surtout pour le modèle de 2005 ($r^2 = 0.68$) pour lequel les changements d'occupation du sol étaient contrôlés

- ✓ Les facteurs du modèle influençant les teneurs en MO sont, en plus de l'occupation de sol, le type de sol (texture et drainage), la gestion des amendements organiques agricoles, et les précipitations

- ✓ Les cartes produites pour les teneurs en MO des sols de culture et de prairie pour 2005 peuvent être comparées à celles provenant de deux autres études (projet METAGE et étude de Genot et al., 2007) :

    - o les mêmes tendances générales sont observées : un gradient en MO augmentant du nord-ouest au sud-est de la Wallonie, mais avec une diminution dans la région jurassique (reflétant ainsi les tendances en terme de climat et de type de sol)

    - o des différences de teneurs en MO apparaissent pour des zones plus détaillées, avec une tendance récurrente d'avoir, pour une même zone et quelle que soit l'occupation de sol, les teneurs en MO les plus faibles avec le projet METAGE et les plus élevées avec l'étude de Genot et.al (2007), notre étude présentant des valeurs intermédiaires

    - o les zones de culture déficitaires en MO (valeur seuil de 2% de MO) représentent, selon les prédictions spatiales de notre modèle, environ 48.8% de la surface cultivée en Région Wallonne, dont la quasi totalité se trouve en région limoneuse.

- ✓ Les cartes produites pour l'évolution des teneurs en MO des sols de culture et de prairie entre 1955 et 2005 peuvent également être comparées à celles provenant de du projet METAGE (et avec les valeurs par région agricoles de l'étude de Genot et al., 2007) :

    - o les mêmes tendances générales sont observées : une diminution des teneurs en MO pour les sols de culture et une augmentation pour les sols de prairie

    - o des différences en terme de la gamme des évolutions en MO sont constatées entre notre étude et le projet METAGE (les changements sont plus importants dans notre étude), tandis que la direction des changements en MO peuvent même différer entre notre étude et les données de Genot et al. (2007) agrégées au niveau des régions agricoles

- ✓ Les facteurs explicatifs de l'évolution des stocks de C des sols agricoles entre 1955 et 2005 sont les suivants : la teneur initiale en MO, l'évolution du climat, la texture, et le type de culture mis en place (céréales et cultures sarclées)

- ✓ Les gisements de MO produits en Région Wallonne sont insuffisants pour combler le déficit en MO des sols concernés et la perte en MO par minéralisation des sols déficitaires et non déficitaires

- ✓ La durée théorique de l'apport en MO sur les sols déficitaires, si aucune contrainte n'existe en terme d'approvisionnement des gisements de MO, peut être relativement rapide pour les gisements tels que les sous-produits forestiers, les boues de station d'épuration et le compost de fumier (entre 1 et 9 années d'épandage pour un déficit de 0 à 0.5% de MO, et le double pour un déficit de 0.5 à 1% de MO), mais très lent pour les gisements tels que le fumier et les déchets agro-industriels (entre 27 et 115 ans pour un déficit de 0 à 0.5% de MO), voir insuffisant pour des gisements tels que le lisier et les déchets verts, compte-tenu notamment de la limite d'épandage d'azote organique préconisée par le Plan de Gestion Durable de l'Azote (PGDA, 2007)

7. Recommandations

- ❖ Mettre en place un système de protection des sols de culture dans la région limoneuse majoritairement déficitaires en MO, en augmentant le retour de MO sur ces sols à travers des épandages (principalement sous forme de sous-produits forestiers, de boues de station d'épuration et de compost de fumier), dans les limites des quantités d'azote organique à apporter (PGDA, 2007)

- ❖ Surveiller les teneurs en MO des sols de culture de la région herbagère de Liège (et de la Haute Ardenne), ainsi que les sols de culture des fonds de vallée, notamment en réalisant des échantillonnages ciblés pour confirmer les tendances observées de diminution des teneurs en MO

- ❖ Favoriser de manière générale des pratiques agricoles permettant de retourner les résidus de culture à haute teneur en C, d'utiliser une profondeur de labour réduite, de diminuer l'intensité du travail du sol, tout en créant des conditions optimales pour la production (apports nécessaires en azote, gestion des adventices, etc…)

- ❖ Réaliser une analyse plus détaillée de la disponibilité spatiale des gisements en MO en relation avec les teneurs en MO des sols, pour permettre une gestion optimale de ces gisements, vu leur insuffisance en Région Wallonne (faible taux d'auto approvisionnement)

- ❖ Réaliser une étude de l'effet de la mise en place de réglementations environnementales telles que les Mesures Agri-Environnementales (MAE) ou le Programme de Gestion Durable de l'Azote (PGDA) sur les teneurs en MO des sols agricoles à l'échelle régionale

- ❖ Maintenir le suivi des teneurs en MO du réseau de profils de sol initié dans les projets D31-1082 et D31-1120 réalisés pour la Direction Générale de l'Agriculture (Goidts & van Wesemael, 2008), permettant l'analyse de l'impact de la gestion agricole et des changements climatiques sur les teneurs en MO des sols agricoles tant au niveau régional qu'au niveau du paysage

Références bibliographiques

- Ameryckx, J.B., Verheye, W., and R. Vermeire. 1995. Bodemkunde - Bodemvorming - Bodemeigneschappen - De bodems van Belgie - Bodemhoud en degradatie - Bodembeleid - Bodempolitiek Gent.p.96

- Bock, L. & Laroche, J., 2002. Matière organique dans les terres cultivées en Région Wallonne : Etat des lieux - Après-midi d'étude: Terres agricoles et Matières organiques - Belgian Association in Research Application on Conservation Agriculture (BARACA)

- Culot, M. 2005. Filières de valorisation agricole des matières organiques - Document réalisé à la demande du Cabinet du Ministre Benoît Lutgen, Laboratoire d'Ecologie Microbienne et d'Epuration des Eaux (LEMEE), FUSAGx, Gembloux.

- De Neve, S. 2002. Le rôle, les restrictions et les applications possibles de la matière organique dans l'agriculture en Flandre - Après-midi d'étude: Terres agricoles et Matières organiques - Belgian Association in Research Application on Conservation Agriculture (BARACA)

- DGATLP. 2001. Limites administratives. Région Wallonne

- DGATLP. 2007. Wallonie et région limitrophes : occupation du sol. Schéma de Développement de l'Espace Régional. Région Wallonne.

- DGRNE. 1994. Etat de l'Environnement Wallon, 1994, Volume 1, partim sol., Ministère de la Région Wallonne – DGRNE, Belgique, 1 – 123.

- DGRNE, 2007. Rapport analytique sur l'état de l'environnement wallon 2006-2007, Cellule Etat de l'Environnement Wallon, Ministère de la Région Wallonne – DGRNE, Namur, 736 pp

- Genot, V., Colinet, G., Bock, L., 2007. La fertilité des sols agricoles et forestiers en Région wallonne – Dossier scientifique réalisé dans le cadre de l'élaboration du Rapport analytique de l'état de l'environnement wallon 2006-2007, Laboratoire de Géopédologie, Unité Sol-Ecologie-Territoires, FUSAGx, 73p.

- Godden, B., Luxen, P., and J. Destain. nc. Ferti-Wal: un outil de gestion des engrais de ferme, élément essentiel de durabilité de l'agriculture.

- Goidts, E., and B. van Wesemael. 2007. Regional assessment of soil organic carbon changes under agriculture in southern Belgium (1955-2005). Geoderma 141: 341-354.

- Goidts, E. & van Wesemael, B., 2008. Quantification de l'évolution de la teneur en carbone dans les sols de Wallonie – Rapports finaux pour les projets D31-1082 et D31-1120, Département de Géographie, Université catholique de Louvain

- Hanotiaux, G. 1992. Updated legend of Belgium soils map Soil science departement Faculty of agricultural sciences of Gembloux.

- Henin, S., and M. Dupuis. 1945. Essai de bilan de la matière organique du sol. Annales Agronomiques 15: 17-29.

- IRCO. 2006. Bureau d'étude – sprl, Facilitateur en biométhanisation., Vade mecum technique et administratif

- Jones, R., Hiederer, R., Rusco, E., Loveland, P., and L. Montanarella. 2004. The map of organic carbon in topsoils in Europe, Version 1.2, September 2003: Explanation of: Special Publication Ispra 2004 No.72 (S.P.I.04.72) European Soil Bureau Research Report No.17, EUR 21209 EN.

- Lejeune, P., Rondeux, J., Verron, P., Bock, L., Bah, B., and C. Bracke. 2006. Principaux types de sols de la Région Wallonne (Belgique) Gembloux.

- Lettens, S., Van Orshoven, J., van Wesemael, B., Muys, B. and Perrin, D. (2005a) Soil organic carbon changes in landscape units of Belgium between 1960 and 2000 with reference to 1990. *Global Change Biology,* **11,** 2128-2140

- Lettens, S., Van Orshoven, J., van Wesemael, B., De Vos, B., and Muys, B. (2005b) Stocks and fluxes of soil organic carbon for landscape units in Belgium derived from heterogeneous data stest for 1990 and 2000. *Geoderma,* **127,** 11-23

- Maréchal, R. & Tavernier, R., 1974, Pédologie, commentaires des planches 11A (extraits de la carte des sols) et 11B (Associations de sols). Comité national de géograpie, 64p.

- Meersmans, J., De Ridder, F., Canters, F., De Baets, S., and M. Van Molle. 2008. A multiple regression approach to assess the spatial distribution of Soil Organic Carbon (SOC) at the regional scale (Flanders, Belgium). Geoderma 143: 1-13.

- Meersmans, J., van Wesemael, B., Goidts, E., De Ridder, F., Van Molle, M. (en préparation), Soil organic carbon mapping at the regional scale based on multiple regression for different dates

- NRAES. 2002. On-farm composting Handbook - Natural Resource, Agriculture, and Engineering Service, NRAES-54.

- PGDA. 2007. Arrêté du Gouvernement Wallon modifiant le Livre II du Code de l'Environnement constituant le Code de l'Eau en ce qui concerne la gestion durable de l'azote en agriculture. Moniteur Belge 7/3/2007

- Roussel, O., Bourneau, E. , Walter, Ch. (2001). Evaluation du déficit en matière organique des sols français et des besoins potentiels en amendements organiques. Etude et Gestion des Sols, 8(1) :65-82

- Stevens, A. & van Wesemael, B., 2008, Soil organic carbon dynamics at the regional scale as influenced by land use history: a case study in forest soils from southern Belgium. Soil Use and Management, 24(1):69-79

- van Wesemael, B., Lettens, S., Roelandt, C., and J. Van Orshoven. 2004. Changes in soil carbon stocks from 1960 to 2000 in the main Belgian cropland areas. Biotechnology, Agronomy, Society and Environment 8: 133-139.

Annexes

1. Correspondance avec les Principaux Types de Sols (PTS) de la Carte Numérique des Sols de Wallonie (CNSW)

- Texture :

Tab. 18 : Principaux types de sol définis par la CNSW en Wallonie (Lejeune et al., 2006)

VALUE PTS	LEGENDE
1 (=1 & 2)	Sols tourbeux ou tourbières
3	Sols sableux ou limono-sableux à charge caillouteuse inférieure à 5% et à drainage naturel excessif ou légèrement excessif
4	Sols sableux ou limono-sableux à charge caillouteuse inférieure à 5% et à drainage naturel principalement modéré ou imparfait
5	Sols sablo-limoneux à charge caillouteuse inférieure à 5% et à drainage naturel principalement favorable
6	Sols sablo-limoneux à charge caillouteuse inférieure à 5% et à drainage naturel principalement modéré ou imparfait
7	Sols limoneux à charge caillouteuse inférieure à 5% et à drainage naturel favorable
8	Sols limoneux à charge caillouteuse inférieure à 5% et à drainage naturel modéré ou imparfait
9	Sols limoneux à charge caillouteuse inférieure à 5% et à drainage naturel assez pauvre à très pauvre
10	Sols argileux à charge caillouteuse inférieure à 5% et à drainage naturel favorable à imparfait
11	Sols argileux à charge caillouteuse inférieure à 5% et à drainage naturel assez pauvre à très pauvre
12	Sols limoneux peu caillouteux (charge caillouteuse comprise entre 5% et 15%) et à drainage naturel favorable
13	Sols limoneux peu caillouteux (charge caillouteuse comprise entre 5% et 15%) et à drainage naturel principalement modéré à assez pauvre
14	Sols limono-caillouteux (charge caillouteuse supérieure à 15%) à charge schisto-phylladeuse (fi, FI) et à drainage naturel quasi-exclusivement favorable
15	Sols limono-caillouteux (charge caillouteuse supérieure à 15%) à charge schisto-gréseuse (r) ou gréseuse (fq, q, rj, d, qs) et à drainage naturel favorable
16	Sols limono-caillouteux (charge caillouteuse supérieure à 15%) à charge schisto-gréseuse (r) ou gréseuse (fq, q, rj, d, qs) et à drainage naturel modéré à assez pauvre
17	Sols limono-caillouteux (charge caillouteuse supérieure à 15%) à charge schisteuse (f, F) et à drainage naturel principalement favorable
18	Sols limono-caillouteux (charge caillouteuse supérieure à 15%) à charge psammitique (p) ou schisto-psammitique (fp) et à drainage naturel principalement favorable
19	Sols limono-caillouteux (charge caillouteuse supérieure à 15%) à charge calcaire (k, K, kf, Kf, kr, Km) et à drainage naturel quasi-exclusivement favorable
20	Sols limono-caillouteux (charge caillouteuse supérieure à 15%) à charge de silexite (x) ou de gravier (t, e, o, g, s, xt) ou de conglomérat (c, l) et à drainage naturel principalement favorable
21	Sols limono-caillouteux (charge caillouteuse supérieure à 15%) à charge de grès argilo-calcaire (m, j) $et à drainage naturel favorable à imparfait
22	Sols limono-caillouteux (charge caillouteuse supérieure à 15%) à charge crayeuse (n, nx) et à drainage naturel favorable
23	Regroupement de complexes de sols de textures différentes ou sur fortes pentes et de sols de fonds de vallons limoneux ou rocailleux
24	Sols artificiels ou non cartographiés

Tab. 19 : Texture selon la légende de la carte des sols de Belgique avec la correspondance en terme de contenu relatif en sable, limon, argile, et en terme de taille géométrique moyenne des particules de sol (Ameryckx et al., 1995 ; Meersmans et al., 2008)

	Gravels	Sand	Silt	Clay	Dg (mm)
Z		90	8	2	0,665
S		75	20	5	0,348
P		60	35	5	0,200
L		30	60	10	0,057
A		5	85	10	0,023
E		35	35	30	0,035
U		15	35	50	0,001
G	20	15	50	15	0,057
*Gbis**		*18,75*	*62,5*	*18,75*	0,057

* Texture ramenée aux trois classes de texture (sand, silt, clay) sur une base de 100

Tab. 20 : Correspondance entre les principaux types de sols de Wallonie (PTS) et la texture selon la légende de la carte des sols de Belgique, les contenus relatifs en sable, limon argile, et la taille géométrique moyenne des particules de sol

PTS**	Texture1	Texture2	**Sand**	**Silt**	**Clay**	**Dg**
1	V	W	/	/	/	/
3	Z	S	82,5	14	3,5	0,507
4	Z	S	82,5	14	3,5	0,507
5	P	L	45	47,5	7,5	0,129
6	P	L	45	47,5	7,5	0,129
7	A		5	85	10	0,023
8	A		5	85	10	0,023
9	A		5	85	10	0,023
10	E	U	25	35	40	0,018
11	E	U	25	35	40	0,018
12	G		15	50	15	0,057
13	G		15	50	15	0,057
14	G		15	50	15	0,057
15	G		15	50	15	0,057
16	G		15	50	15	0,057
17	G		15	50	15	0,057
18	G		15	50	15	0,057
19	G		15	50	15	0,057
20	G		15	50	15	0,057
21	G		15	50	15	0,057
22	G		15	50	15	0,057
23			*27,2*	*56,1*	*16,7*	*0,100*
24			/	/	/	

** en cas de plusieurs textures pour un même PTS, la moyenne est considérée pour la valeur finale ; pour le PTS 23 (complexe de texture), la moyenne de l'ensemble des PTS est considérée sur une base de 100

- <u>Drainage :</u>

Tab. 21 : Classes de drainage définies dans les Principaux Types de Sol de Wallonie (PTS) et correspondance avec les classes de drainage selon la légende de la carte des sols de Belgique (Lejeune et al., 2006)

Classes de drainage PTS	**CODE classes drainage**	**Type de drainage**	**Textures Z, S, P**		**Textures L, A, E, U, G**	
			Oxido-réduction*	Réduction**	Oxido-réduction	Réduction
Sols à drainage naturel excessif ou légèrement excessif / Sols à drainage naturel favorable	1	a, b, B (a+b)	101,7	/	125	/
Sols à drainage naturel modéré ou imparfait	2	c, d, D (c+d)	63,3	/		
Sols à drainage naturel assez pauvre ou pauvre sans horizon réduit	3	h, I, I (h+i)	24	/		
Sols à drainage naturel assez pauvre avec horizon réduit à très pauvre	4	e, f, g, F (e+f), G (e+f+g)	22,9	67,5	85	/
Sols à drainage naturel excessif à imparfait	5	A (a+b+c+d)	40	/		
Sols à drainage naturel non précisé	6					

* les valeurs indiquées correspondent à la moyenne des valeurs de chaque type de drainage de la légende de la carte des sols
** si aucune réduction n'est constatée, la valeur considérée est de 150 cm, soit la profondeur moyenne maximale échantillonnée lors de la description des profils de sol de Aardewerk

Tab. 22 : Principaux Types de Sol de Wallonie (PTS) avec les classes de drainage et les variables H2Omin et H2Omax correspondantes

Value PTS	**CODE classes drainage**	H2Omin (cm)	H2Omax (cm)
1	/	/	/
3	1	101,7	150,0
4	2	63,3	150,0
5	1	113,3	150,0
6	2	74,2	150,0
7	1	125,0	150,0
8	2	85,0	150,0
9	3 et 4	30,8	67,5
10	1 et 2	90,7	150,0
11	3 et 4	30,8	67,5
12	1	125,0	150,0
13	2 et 3	60,9	150,0
14	1	125,0	150,0
15	1	125,0	150,0
16	2 et 3	60,9	150,0
17	1	125,0	150,0
18	1	125,0	150,0
19	1	125,0	150,0
20	1	125,0	150,0
21	1 et 2	90,7	150,0
22	1	125,0	150,0
23	*moyenne tot*	*96,4*	*141,8*
24	/	/	/

2. Description des unités de paysage ré-échantillonnées

Les profils de sols ré-échantillonnés appartiennent à 15 unités de paysage agricoles définies sur base d'une même occupation de sol, d'une appartenance à la même région agricole et à un même type de sol (texture et drainage) (Goidts & van Wesemael, 2007).

Tab. 23 : Caractéristiques des 15 unités de paysage ré-échantillonnées en Wallonie

Utilisation du sol	Région agricole	Unité homogène Texture du sol	Drainage du sol*	Code
Culture	Sablo-limoneuse	L - Sablo-limoneuse	1	unit 1
		A - Limoneuse	1	unit 2
	Limoneuse	L - Sablo-limoneuse	1	unit 3
		A - Limoneuse	1	unit 4
		A - Limoneuse	2	unit 10
	Condroz	A - Limoneuse	1	unit 6
		A - Limoneuse	2	unit 7
		G - Sols à sédiments meubles à charge caillouteuse	1	unit 8
	Ardenne	G - Sols à sédiments meubles à charge caillouteuse	1	unit 14
Prairies	Limoneuse	A - Limoneuse	1	unit 5
	Condroz	A - Limoneuse	1	unit 9
		G - Sols à sédiments meubles à charge caillouteuse	1	unit 11
	Herbagère de Liège	G - Sols à sédiments meubles à charge caillouteuse	1	unit 12
	Famenne	G - Sols à sédiments meubles à charge caillouteuse	1	unit 13
	Ardenne	G - Sols à sédiments meubles à charge caillouteuse	1	unit 15

* voir le tableau suivant pour le détail des classes de drainage

Tab. 24 : Simplification des Séries de sol de la carte des sols de Belgique[a] pour cette étude

Critère repris des séries de sol définies dans la carte des sols de Belgique	Symbole utilisé dans la légende de la carte des sols de Belgique	Re-classification (si utilisée)	Description de la texture et du drainage
Matériau parental	Z		Sableux
	S		Limono-sableux
	P		Sablo-limoneux léger
	L		Sablo-limoneux
	A		Limoneux
	E		Argileux
	U		Argileux lourd
	G		Sols à sédiments meubles caillouteux
Drainage	a, b, c, A, B, C	1	Drainage bon à modéré (profondeur des taches d'oxydo-réduction ≥80 cm, pas de réduction)
	d, D	2	Drainage imparfait (profondeur des taches d'oxydo-réduction: 40-80 cm, pas de réduction)
	h, i, e, f, g, I, F, G	3	Drainage pauvre (profondeur des taches d'oxydo-réduction ≥40 cm, réduction possible)

[a] Les séries de sol sont définies par 4 critères : le matériau parental, le drainage, le développement du profil de sol (horizons) et le contenu en fragments rocheux (Hanotiaux, 1992)

Tab. 25 : Correspondance entre les unités de paysage ré-échantillonnées et les principaux types de sol (PTS)

Unité	PTS

1	5
2	7
3	5
4	7
10	8
6	7
7	8
8	12, 15, 17, 18, 19, 20
14	12, 14, 15, 17
5	7
9	7
11	12, 15, 18, 19, 20
12	12, 15, 17, 18, 19, 20
13	12, 15, 17, 18, 19
15	14, 15, 17

3. Description de la table de données « data » ayant servi à la confection des cartes

Nom du champ	Description
GRID_CODE	Série de 6 caractères maximum, avec les 2 derniers caractères définissant le principal type de sol (PTS de 01 à 24, cf. p.57), les 2 précédents définissant la région agricole (de 01 à 11, cf. p.11), et le premier ou les 2 premiers caractères définissant l'utilisation du sol (de 1 à 16, cf. page 10)
COORDN	Coordonnées géographiques Nord (Lambert Belge 1972)
COORDE	Coordonnées géographiques Est (Lambert Belge 1972)
PREC	Somme des précipitations annuelles moyennes pour la période 1955-2005 (mm)
TEMP	Températures mensuelles moyennes pour la période 1955-2005 (°C)
LU	Utilisation du sol (cf. p.10)
RA	Région agricole (cf. p.11)
PTS	Principal type de sol (cf. p.57)
SAND	Teneur en sable (%)
SILT	Teneur en limon (%)
CLAY	Teneur en argile (%)
H2OMAX	Profondeur d'apparition des traces d'oxido-réduction (m)
H2OMIN	Profondeur d'apparition des traces de réduction (m)
DG	Taille géométrique moyenne des particules de sol (mm)
C1960GRMOD	Teneur en carbone organique modélisée pour les prairies pour l'année 1955 (%C)
C1960CRMOD	Teneur en carbone organique modélisée pour les cultures pour l'année 1955 (%C)
C2006GRMOD	Teneur en carbone organique modélisée pour les prairies pour l'année 2005 (%C)
C2006CRMOD	Teneur en carbone organique modélisée pour les prairies pour l'année 2005 (%C)
MO1960GRMO	Teneur en matière organique modélisée pour les prairies pour l'année 1955 (%MO)
MO1960CRMO	Teneur en matière organique modélisée pour les cultures pour l'année 1955 (%MO)
MO2006GRMO	Teneur en matière organique modélisée pour les prairies pour l'année 2005 (%MO)
MO2006CRMO	Teneur en matière organique modélisée pour les cultures pour l'année 2005 (%MO)
DIFFMOGRMO	Différence entre la teneur en matière organique de 2005 et de 1955 pour les prairies (%MO)
DIFFMOCRMO	Différence entre la teneur en matière organique de 2005 et de 1955 pour les cultures (%MO)
FYM1958	Quantité de fumier et de lisier épandue sur les terres arables par région agricole en 1958 (t C ha^{-1} an^{-1})
FYM2002	Quantité de fumier et de lisier épandue sur les terres arables par région agricole en 2002 (t C ha^{-1} an^{-1})