

Tiphaine Chevallier, Tantely M. Razafimbelo, Lydie Chapuis-Lardy et Michel Brossard (dir.)

## Carbone des sols en Afrique Impacts des usages des sols et des pratiques agricoles

IRD Éditions

---

# Chapitre 1. Les stocks de carbone des sols d'Afrique de l'Ouest

Matieu Henry, Mahamadou Belem, Rémi d'Annunzio et Martial Bernoux

---

DOI : 10.4000/books.irdeditions.34892  
Éditeur : IRD Éditions, FAO  
Lieu d'édition : Rome, Marseille  
Année d'édition : 2020  
Date de mise en ligne : 16 décembre 2020  
Collection : Synthèses  
ISBN électronique : 9782709928373



<http://books.openedition.org>

### Édition imprimée

Date de publication : 1 septembre 2020

### Référence électronique

HENRY, Matieu ; et al. *Chapitre 1. Les stocks de carbone des sols d'Afrique de l'Ouest* In : *Carbone des sols en Afrique : Impacts des usages des sols et des pratiques agricoles* [en ligne]. Rome, Marseille : IRD Éditions, 2020 (généré le 18 décembre 2020). Disponible sur Internet : <<http://books.openedition.org/irdeditions/34892>>. ISBN : 9782709928373. DOI : <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.34892>.

---

# Les stocks de carbone des sols d'Afrique de l'Ouest

*Matieu HENRY, Mahamadou BELEM,  
Rémi D'ANNUNZIO, Martial BERNOUX*

## Introduction

Les sols jouent un rôle primordial dans notre environnement de par leur capacité d'échange d'éléments nutritifs et de régulation. Le changement climatique est aujourd'hui la crise environnementale la plus importante et les sols y jouent un rôle prépondérant, essentiellement de régulation via le cycle du carbone. Le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) est, de loin, le plus grand contributeur d'origine anthropique à l'effet de serre et au changement climatique. De plus, environ les deux tiers du carbone organique terrestre se trouvent dans le compartiment du sol (LE QUÉRÉ *et al.*, 2016). Les stocks de carbone du sol ou de matière organique résultent d'un équilibre entre les apports (la plupart du temps les résidus végétaux) et les pertes (surtout par décomposition microbienne et transfert par érosion), qui sont provoqués par divers processus d'origine naturelle ou anthropique (SCHLESINGER et PALMER WINKLER, 2000 ; AMUNDSON, 2001). La modification d'usage du sol entraîne des changements des stocks de carbone. Les processus de diminutions du carbone dans les sols sont beaucoup plus rapides que les processus d'accumulation. Une diminution, même faible, des teneurs en carbone ou en matière organique dans la couche arable d'un sol peut avoir des effets négatifs considérables sur ses propriétés comme la capacité de rétention en eau ou la teneur en éléments nutritifs et leur stockage (SOMBROEK *et al.*, 1993). Aussi, la gestion des sols est un facteur particulièrement important dans le cadre des politiques d'atténuation et d'adaptation au changement climatique et de sécurité alimentaire (FAO, 2015).

Les sols tropicaux ont un rôle particulier, d'une part, au travers de leurs propriétés et de la rapidité de leur évolution et, d'autre part, au travers des nombreux changements dans leurs usages. En Afrique subsaharienne, les émissions issues du changement d'usages des sols sont plus importantes que celles issues des énergies fossiles (VALENTINI *et al.*, 2014) (35 % comparés à 9 % au niveau global). La plupart de ces émissions proviennent de la déforestation (WILLIAMS *et al.*, 2007). Depuis 1990, environ 12 % des superficies forestières (soit 81,6 millions ha) ont été convertis en d'autres types d'usages des sols en Afrique, dont environ 9 % (79 millions ha) en Afrique de l'Ouest (FAO, 2015).

Essentiellement du fait d'un doublement de la population africaine d'ici 2050 (FAOSTAT), les superficies forestières en Afrique devraient décroître depuis 2010 de 5 % (BAD, 2011) à 17 % (MERCIER 2012) (D'ANNUNZIO *et al.*, 2015). Les pertes de stocks de carbone du sol engendrées seraient de l'ordre de 20 à 50 % (SOMBROEK *et al.*, 1993 ; GUO et GIFFORD 2002 ; MURY *et al.*, 2002 ; MARCO *et al.*, 2010). Ces pertes touchent principalement la couche arable du sol. Elles sont principalement liées à la réduction de la production de biomasse et de résidus végétaux retournant au sol, à l'augmentation des processus d'érosion et de décomposition de la matière organique du sol par oxydation suivie d'émissions de carbone sous forme de CO<sub>2</sub>. Les taux de décomposition de la matière organique et des émissions de CO<sub>2</sub> du sol vers l'atmosphère varient en fonction de nombreux facteurs tels que le type d'écosystème (RHOADES *et al.*, 2000), le climat (PASTOR et POST, 1986), le type et la texture des sols (SCHJONNING *et al.*, 1999) et les pratiques agricoles. DETWILER (1986) rapporte des pertes de carbone de l'ordre de 40 %, cinq ans après l'installation de cultures annuelles sur les sols. Pour d'autres modes d'usages du sol, comme les plantations forestières, la teneur en matière organique du sol ne change pas significativement (KNOEPP et SWANK, 1997 ; YANAI *et al.*, 2003). Les récentes études en Afrique de l'Ouest montrent une diminution importante du stock du carbone du sol. Ainsi, dans la région de Assin dans le Nord Ghana, la déforestation pour la production des cultures a entraîné une perte de 33 % du stock de carbone du sol entre 1900 et 2000 (TAN *et al.*, 2008). Au Sénégal, la perte est estimée à 0,477 Pg C entre 1850 et 2000 (PARTON *et al.*, 2004). Dans le bassin Arachidier au Sénégal, la perte est estimée à 0,13 Mg C.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> en 25 ans (TSCHAKERT, 2004).

Environ 68 % du carbone terrestre en Afrique subsaharienne se trouveraient dans les sols (HENRY, 2009). La prise en compte des sols dans les bilans de gaz à effet de serre est donc particulièrement importante mais elle fait face à de nombreuses sources d'incertitude. En Afrique de l'Ouest, les stocks de carbone des sols et les impacts du changement d'usage du sol sur ces stocks sont mal connus. Une meilleure compréhension est nécessaire pour différentes raisons, y compris pour la mise en place de mesures d'atténuation du changement climatique. Souvent limitée à quelques sites de recherche, l'évaluation de la dynamique du carbone en zone tropicale est difficile car elle doit tenir compte de la variabilité spatiale du climat, des sols, de la topographie et des perturbations anthropiques et naturelles. Plusieurs études ont porté sur l'estimation des stocks de carbone des sols à grande échelle (BATJES, 2001 ; BATJES, 2002 ; BATJES,

2005 ; BATJES, 2006 ; BATJES, 2008 ; HENRY *et al.*, 2009). Cependant, ces différentes études fournissent des estimations très variées. Ces variations s'expliquent par plusieurs facteurs :

- l'utilisation de différents systèmes de classification, la difficulté d'accès aux bases de données sur les propriétés des sols ;
- le manque de compatibilité entre des types de données provenant de différentes sources et pour divers horizons ou profondeurs des sols ;
- la compatibilité entre les données relatives au carbone du sol et les types d'occupation du sol ;
- le manque de connaissances sur les modes de gestion agricole et forestière, par zone climatique ou par zone écologique ;
- le niveau de résolution des données spatiales utilisées.

En 2009, HENRY *et al.* ont évalué la variabilité spatiale des stocks de carbone du sol en Afrique de l'Ouest et comparé différentes bases de données et cartes antérieures disponibles. Depuis, de nouvelles cartes ont été produites, en particulier la carte du Centre de recherche commun européen (DEWITTE *et al.*, 2013) et celle du Partenariat mondial sur les sols (FAO et ITP, 2018). Au regard de ces nouvelles sources d'information, l'objectif de ce chapitre est de faire l'état des stocks de carbone en Afrique de l'Ouest et de présenter les sources d'incertitudes et de variabilité. Cette étude vise à améliorer les connaissances sur les stocks de carbone du sol dans un contexte sous-régional.

## Méthodologie

### Sources des données

Différentes sources de données récentes (tabl. 1) ont été utilisées. Trois estimations des stocks de carbone du sol de la région ont été réalisées et comparées afin d'illustrer la variation de ces estimations selon la méthode utilisée. À travers ces trois estimations, nous cherchons à déterminer le stock de carbone pour les différents types de sols et les différents systèmes de classification.

La première estimation utilise la base de données HWSD (Harmonized World Soil Database, FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC, 2008). Celle-ci contient 48 148 unités cartographiques avec leurs propriétés texturales, leur teneur en carbone ainsi que d'autres propriétés. Une carte à l'échelle 1:1-1:5 M donne la localisation géographique des différentes unités de sols et des différents types de sols qu'elles contiennent (fig. 1A).



Tableau 1  
Les sources d'information utilisées.

Bases de données	Cartes	Classifications*	Estimations
HWSD (FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC, 2008)	HWSD (FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC, 2008)	FAO 74	1
	JRC (DEWITTE <i>et al.</i> , 2013)	BRM	2
GIEC (2006) tableau 2.3	GIEC (BATJES, 2010)	GIEC Type de sol de référence & FRA 2001	3

\* Pour la correspondance entre les systèmes de classification, voir le tableau 2 réalisé à partir des travaux de l'International Union of Soil Science (ou Association internationale de science du sol) (IUSS working group WRB, 2014) et de la FAO (2012).

HWSD : Harmonized World Soil Database. JRC : Joint Research Center. GIEC : Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat. FAO : Food and Agriculture Organization / Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture. FRA : Global Forest Resources Assessment. BRM : Base de référence mondiale que pour les sols. IUSS : International Union of Soil Science / Association internationale des sciences du sol.

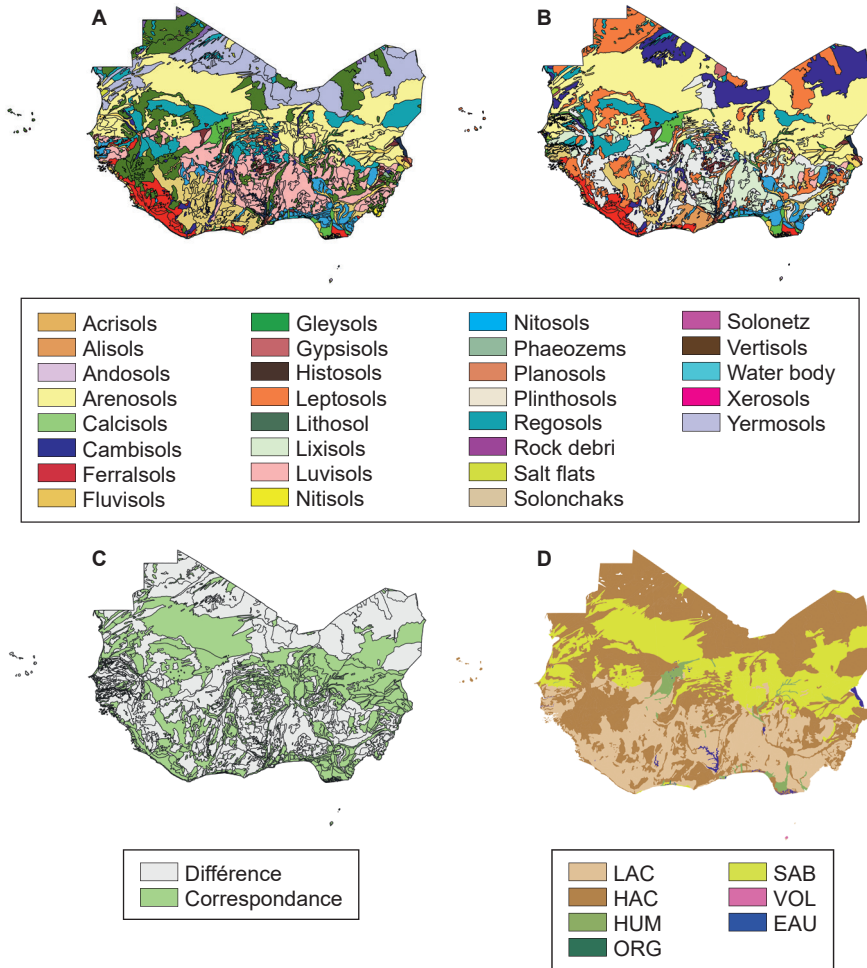
La deuxième estimation utilise une cartographie plus récente et améliorée (DEWITTE *et al.*, 2013) ainsi que les propriétés des sols de la base de données HWSD. Cette nouvelle cartographie est réalisée à la même échelle que la précédente mais utilise le système de classification de la base de référence mondiale pour les ressources en sols (BRM) (IUSS WORKING GROUP WRB, 2014). Les améliorations concernent les frontières, les zones dépourvues d'informations, les modèles de sols, les réseaux fluviaux et les éléments dynamiques tels que les dunes, les plans d'eau et les côtes. En comparaison avec la carte utilisée par la première méthode, la nouvelle carte représente une correction de 13 % des données sur les sols du continent africain (DEWITTE *et al.*, 2013) (fig. 1B).

La troisième estimation (fig. 1C) se base sur une adaptation de la carte HWSD en regroupant les types de sols par grandes classes de sols, définies par le GIEC (BATJES, 2010), et les zones écologiques définies par la FAO (2001) et en utilisant les valeurs de carbone organique du sol (COS) par défaut proposées par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2006). La correspondance entre les systèmes de classification FAO 74, WRB et GIEC est expliquée dans le tableau 2. Les différents systèmes de classification sont illustrés par la figure 1.

L'analyse des données a été effectuée sous R (R Development Core Team, 2006) en utilisant en particulier les paquets suivants : *gdal*, *raster*, *mapdata*, *maptools*. Les estimations des superficies ont été calculées en utilisant une projection sinusoidale (SR-ORG:6842).

## Estimation des stocks de carbone du sol

Les propriétés du sol sont disponibles par type de sol. Les données spatiales sont identifiées comme unités cartographiques qui peuvent chacune correspondre à différents types de sols. Afin de rendre compte des propriétés des sols d'une



**Figure 1**

Les sols d'Afrique de l'Ouest.

A. Les types de sols principaux selon la base de données HWSD et la classification FAO 74.

B. Les types de sols selon la carte JRC et la classification BRM.

C. Les différences et correspondances entre la base de données HWSD et la carte JRC.

D. Les types de sols selon la base de données HWSD adaptées aux catégories par défaut (Tier I)

du Giec. LAC : sols à minéraux argileux à faible capacité d'échange, HAC : sols à minéraux argileux à forte capacité d'échange, HUM : humide, ORG : sols très organiques,

SAB : sols sablonneux, VOL : sols volcaniques.

unité, le COS a été estimé en fonction de la proportion relative de chaque type de sol pour chaque couche de sol. Aussi, le calcul de la densité de carbone ( $\text{kg C.m}^{-2}$ ) pour chaque profil de sol et des stocks de carbone résulte des propriétés et la composition du sol de chacune de ses couches. Pour une superficie

Tableau 2  
Correspondance entre les systèmes de classification FAO 74, BRM et GIEC.

FAO 74		BRM		GIEC*
Gleysols	Gleysols	Gleysols	Gleysols indifférenciés	HUM
	Eutric Gleysols	Gleysols	Eutric Gleysols	HUM
	Dystric Gleysols	Gleysols	Dystric Gleysols	HUM
	Humic Gleysols	Gleysols	Umbric Gleysols	HUM
Regosols	Regosols	Regosols	Regosols Indifférenciés	HAC
	Eutric Regosols	Regosols	Eutric Regosols	HAC
	Dystric Regosols	Regosols	Dystric Regosols	HAC
Lithosol	Lithosols	Leptosols	Lithic Leptosols	HAC
Arenosols	Cambic Arenosols	Arenosols	Brunic Arenosols	SAB
	Luvic Arenosols	Arenosols	Hypoluvic Arenosols	SAB
	Ferralic Arenosols	Arenosols	Haplic Arenosols	SAB
Andosols	Mollic Andosols	Andosols	Silandic Mollic Andosols	VOL
Vertisols	Pellic Vertisols	Vertisols	Pellic Vertisols	HAC
	Chromic Vertisols	Vertisols	Haplic Vertisols	HAC
Solonchaks	Orthic Solonchaks	Solonchaks	Haplic Solonchaks	HAC
	Takyric Solonchaks	Solonchaks	Haplic Takyric Solonchaks	HAC
	Gleyic Solonchaks	Solonchaks	Gleyic Solonchaks	HAC
Yermosols	Haplic Yermosols	Cambisols	Haplic Yermic Cambisols	HAC
	Gypsic Yermosols	Gypsisols	Haplic Yermic Gypsisols	HAC
Phaeozems	Haplic Phaeozems	Phaeozems	Haplic Phaeozems	HAC
Cambisols	Eutric Cambisols	Cambisols	Eutric Cambisols	HAC
	Gleyic Cambisols	Cambisols	Gleyic Cambisols	HAC
	Calcic Cambisols	Calcisols	Haplic Calcisols	HAC
	Vertic Cambisols	Cambisols	Vertic Cambisols	HAC
	Ferralic Cambisols	Cambisols	Ferralic Cambisols	HAC
Luvisols	Luvisols	Luvisols	Luvisols Indifférenciés	LAC
	Chromic Luvisols	Luvisols	Chromic Luvisols	HAC
	Ferric Luvisols	Lixisols	Haplic Lixisols	LAC
	Plinthic Luvisols	Lixisols	Plinthic Lixisols	LAC
	Gleyic Luvisols	Luvisols	Gleyic Luvisols	HAC
Planosols	Dystric Planosols	Planosols	Dystric Planosols	HAC
	Solodic Planosols	Planosols	Solodic Planosols	HAC
Acrisols	Orthic Acrisols	Alisols	Haplic Alisols	HAC
	Ferric Acrisols	Acrisols	Haplic Acrisols	LAC
	Plinthic Acrisols	Acrisols	Plinthic Acrisols	LAC

FAO 74		BRM		GIEC*
Nitisols	Eutric Nitisols	Nitisols	Eutric Nitisols	LAC
	Dystric Nitisols	Nitisols	Dystric Nitisols	LAC
	Humic Nitisols	Nitisols	Humic Nitisols	LAC
Petroferric	Petroferric	Plinthosols	Pisoplinthic Plinthosols	LAC
Ferralsols	Haplic Ferralsols	Ferralsols	Haplic Ferralsols	LAC
	Xanthic Ferralsols	Ferralsols	Xanthic Ferralsols	LAC
	Humic Ferralsols	Ferralsols	Umbric/Mollic Ferralsols	LAC
	Plinthic Ferralsols	Ferralsols	Plinthic Ferralsols	LAC
Histosols	Dystric Histosols	Histosols	Dystric Histosols	ORG
Arenosols	Dunes Arenosols	Arenosols	Protic Arenosols	SAB
Rock debris	Rock debris	Leptosols	Leptosols Indifférenciés	HAC
Fluvisols	Fluvisols	Fluvisols	Fluvisols Indifférenciés	HAC
	Eutric Fluvisols	Fluvisols	Eutric Fluvisols	HAC
	Calcaric Fluvisols	Fluvisols	Calcaric Fluvisols	HAC
	Dystric Fluvisols	Fluvisols	Dystric Fluvisols	HAC
	Thionic Fluvisols	Fluvisols	Thionic Fluvisols	HAC

\* HAC : sols à minéraux argileux à forte capacité d'échange. HUM : sols humides. LAC : sols à minéraux argileux à faible capacité d'échange. ND : sols non définis. ORG : sols très organiques. SAB : sols sablonneux. VOL : sols volcaniques.

donnée, on parle de densité de carbone plutôt que de stock. La densité est exprimée généralement en  $\text{kg C.m}^{-2}$ . Quand les densités de C sont extrapolées à l'échelle d'un écosystème, on parle de stock de C exprimé en  $\text{Mg C.ha}^{-1}$  ( $10 \text{ Mg C.ha}^{-1} = 1 \text{ kg C.m}^{-2}$ )

Les estimations de stock de carbone d'une couche de sol sont calculées en utilisant la formule suivante :

$$C = V \times (1 - Gr) \times Da \times Cc \quad (1)$$

où  $C$  est la densité de carbone ( $\text{kg C.m}^{-2}$ ),  $V$  est le volume de sol par mètre carré ( $\text{m}^3.\text{m}^{-2}$ ),  $Gr$  est la proportion de gravier (sans unité),  $Da$  est la densité apparente ( $\text{g.cm}^{-3}$ ) et  $Cc$  est la teneur en carbone ( $\text{g C.kg}^{-1}$ ).

Pour un profil de sol avec  $k$  couches, le calcul est le suivant :

$$C_d = \sum_{i=1}^k V_i \times (1 - Gr_i) \times Da_i \times Cc_i \quad (2)$$

où  $C_d$  est la quantité totale de carbone organique ( $\text{kg C.m}^{-2}$ ) du profil du sol,  $V$  est le volume de sol par mètre carré ( $\text{m}^3.\text{m}^{-2}$ ),  $Da_i$  est la densité apparente ( $\text{g.cm}^{-3}$ ) de la couche  $i$ ,  $Cc_i$  est la teneur en carbone ( $\text{g C.kg}^{-1}$ ) de la couche  $i$  et  $Gr_i$  est la proportion de gravier de la couche  $i$ . Pour un même type de sol et pour une même profondeur, des différences de texture et donc de stock de carbone peuvent être observées. Les informations relatives à la texture à 0-30 cm

sont une simplification des classes de texture utilisées dans la carte (FAO/ UNESCO, 1971-1981).

Le stock de carbone de chaque unité de cartographie de sols avec  $k$  types de profils de sols a été déterminé par le calcul suivant :

$$M_u = \sum_{i=1}^k S \times P_i \times C_{id} \quad (3)$$

où  $M_u$  est la masse totale de carbone organique (kg C),  $S$  est la surface de l'unité de carte ( $m^2$ ),  $P_i$  la proportion de chaque type de sol,  $C_{id}$  est la densité de carbone du profil de sol ( $kg\ C.m^{-2}$ ). En se basant sur la masse totale de carbone organique de chaque unité, la densité de carbone du sol de chaque unité cartographique est définie comme suit :

$$M_{ud} = M_u \div S \quad (4)$$

où  $M_{ud}$  est la densité de carbone du sol de l'unité cartographique ( $kg\ C.m^{-2}$ ),  $M_u$  la masse totale de carbone organique du profil du sol,  $S$  la surface totale de l'unité cartographique ( $m^2$ ).

La masse de carbone dans le sol pour un biome, un pays ou un type de sol majeur est déterminée en additionnant les stocks de carbone des unités cartographiques correspondantes :

$$M_d = \sum_{j=1}^n S_{dj} \times M_{udj} \quad (5)$$

où  $M_d$  est la masse de carbone dans le sol pour le biome  $d$ ,  $S_{dj}$  la surface de l'unité cartographique  $j$  qui se trouve dans le biome et  $M_{udj}$  la densité du carbone pour l'unité cartographique  $j$ .

## Résultats

### Les différents types de sols d'Afrique de l'Ouest

Comme nous pouvons le voir sur la figure 1, les différences entre les systèmes de classification FAO 74 et BRM peuvent être importantes. La comparaison des deux cartes montre que 36 % des types de sols majeurs diffèrent entre les deux cartes. Pour certains sols, les différences sont importantes. Par exemple, 53 % des sols classés comme des Luvisols (classification FAO 74) sont des Lixisols selon la classification BRM, 97 % des sols non identifiés deviennent des Cambisols. Les Petroferriés sont également classés comme Plinthosols (tabl. 2). Selon la classification BRM, trois types de sols (Arenosols, Leptosols et Plinthosols) représentent environ 60 % des sols en Afrique de l'Ouest (tabl. 3).

Tableau 3  
Répartition spatiale des types de sols en Afrique de l'Ouest  
selon les classifications BRM, FAO 74 et GIEC.

Types de sols (BRM)			Types de sols (FAO 74)			Types de sols (GIEC)**
Noms	Superficies		Noms	Superficies		
	1 000 km <sup>2</sup>	%*		1 000 km <sup>2</sup>	%*	
Acrisols	208	4	Acrisols	376	6	LAC/HAC
Alisols	113	2				
Andosols	1	0,01	Andosols	1	0,01	VOL
Arenosols	1 869	32	Arenosols	1 913	33	SAB
Calcisols	6	0,09				
Cambisols	481	8	Cambisols	83	1	HAC
			Yermosols	33	1	HAC
Ferralsols	152	3	Ferralsols	199	3	LAC
Fluvisols	110	2	Fluvisols	129	2	HAC
Gleysols	123	2	Gleysols	51	1	HUM
Gypsisols	17	0,29				
Histosols	0	0	Gleysols	0,39	0,01	HUM
Leptosols	823	14	Lithosol	808	14	HAC
Luvisols	74	1	Luvisols	957	16	HAC
Lixisols	510	9				
Nitisols	158	3	Nitisols	187	3	LAC
Phaeozems	3	0,05	Phaeozems	3	0,05	HAC
Planosols	19	0,31	Planosols	21	0,36	HAC
Plinthosols	817	14	Petroferric	450	8	LAC
Regosols	343	6	Regosols	8	0,14	HAC
Solonchaks	24	0,41	Solonchaks	49	1	HAC
Solonetz	1	0,02				
Vertisols	55	1	Vertisols	49	1	HAC
ND	23	0,39	ND	507	9	ND

\* % de la surface totale des sols d'Afrique de l'Ouest.

\*\* HAC : sols argileux très actifs.

HUM : sols humides. LAC : sols argileux peu actifs. SAB : sols sablonneux. VOL : sols volcaniques. ND : non défini.

## Estimation des stocks de carbone du sol

### Utilisation de la base de données HWSD

Le tableau 4 illustre la variabilité des stocks de COS pour les couches de sol 0-30 et 30-70 cm pour différents types de sols en Afrique de l'Ouest. Bien que

peu représentés géographiquement, les Histosols (386 km<sup>2</sup> au sud-est de la Côte d'Ivoire) et les Andosols (603 km<sup>2</sup> à São Tomé-et-Principe) contiennent le plus de carbone organique (respectivement 116 et 14 kg C.m<sup>-2</sup> pour 0-30 cm). Les sols qui contiennent le moins de COS sont les Yermosols (1,47 et 1,41 kg C.m<sup>-2</sup> pour les couches de sol 0-30 et 30-70 cm), et les Arenosols (1,8 et 2,24 kg C.m<sup>-2</sup> pour les couches de sol 0-30 et 30-70 cm). Ces deux types de sols représentent pourtant environ 40 % de l'Afrique de l'Ouest (tabl. 3 et fig. 1). Pour les Lithosols, dont les sols de surface contiennent entre 4,3 et 8,3 kg C.m<sup>-2</sup>, le stock de COS de la couche 30-70 cm est considéré comme inexistant.

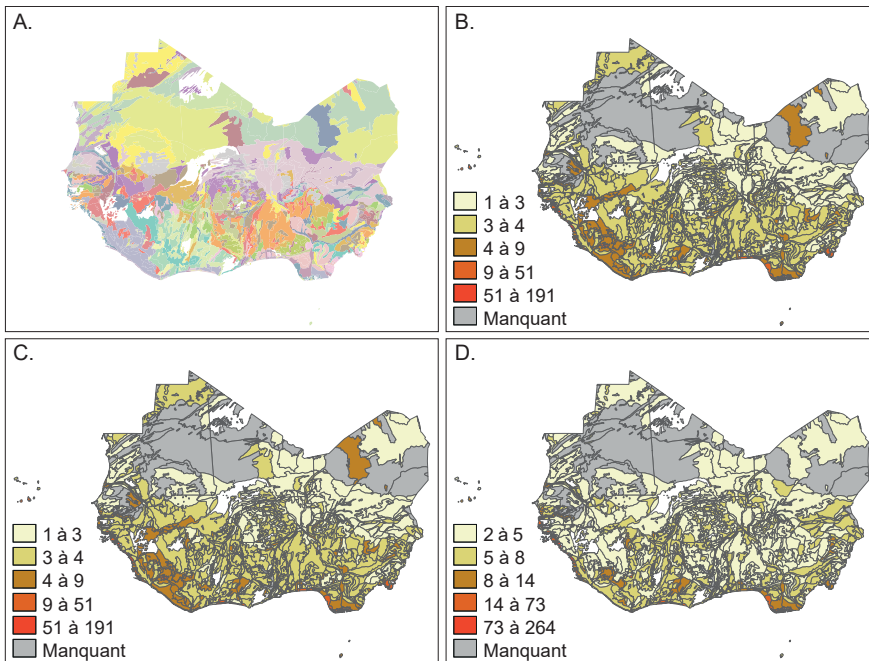
Tableau 4  
Les stocks de COS par types de sols (kg.m<sup>-2</sup>) en Afrique de l'Ouest.

Types de sols		0-30 cm				30-70 cm				Superficies (1 000 km <sup>2</sup> )
Classification FAO 74	Classification BRM	COS	n	min	max	COS	n	min	max	
Acrisols	Alisols & Acrisols	3,26	110	2,52	3,78	3,07	110	2,29	3,49	376
Andosols	Andosols	14,03	1	14,03	14,03	13,65	1	13,65	13,65	1
Arenosols	Arenosols	1,80	94	1,72	2,00	2,24	94	2,19	2,37	1913
Cambisols	Cambisols & Calcisols	3,69	113	1,72	5,52	3,43	113	2,76	3,98	83
Ferralsols	Ferralsols	4,79	64	2,61	10,53	4,26	64	3,00	10,49	199
Fluvisols	Fluvisols	4,89	70	2,28	11,49	5,86	70	2,38	28,44	129
Gleysols	Gleysols	7,59	79	2,55	14,75	4,49	79	2,53	10,48	51
Histosols	Histosols	115,91	6	115,91	115,91	314,82	6	314,82	314,82	0,4
Lithosols	Leptosols	4,39	258	4,32	8,35	-	-	-	-	808
Luvissols	Luvissols & Lixisols	3,20	249	2,26	5,17	2,87	249	2,43	4,83	957
Nitossols	Nitossols	3,51	102	2,19	9,69	2,98	102	2,36	4,24	187
Petroferric	Plinthossols	3,21	1	3,21	3,21	3,02	1	3,02	3,02	3
Phaeozems	Phaeozems	7,05	1	7,05	7,05	6,08	1	6,08	6,08	21
Planossols	Planossols	3,22	33	2,02	4,91	3,40	33	1,99	4,13	450
Regossols	Regossols	3,17	140	2,05	4,60	3,05	140	2,69	3,85	8
Solonchaks	Solonchaks	1,77	26	1,65	2,08	2,70	26	2,02	3,29	49
Vertissols	Vertissols	3,10	51	2,61	5,16	4,07	51	3,62	5,83	33
Yermossols	Cambisols, Calcisols & Gypsisols	1,47	7	1,39	1,58	1,41	7	1,21	1,56	472

\*Nombre d'unités cartographiques.

\*\* Superficie par type de sol calculée en ne considérant que les sols majoritaires par unité de sol.

Comme le montre la figure 2, la distribution géographique des stocks de COS est très contrastée. Les zones géographiques ne possédant pas de carbone se trouvent essentiellement au nord de l'Afrique de l'Ouest et correspondent surtout à des dunes selon la classification FAO 74 et à des Arenosols selon la classification BRM. Les zones géographiques où se trouvent les stocks de COS les plus importants sont localisées près de la zone littorale. Il s'agit en majorité de sols dominés par les Fluvisols (73 %), et se trouvent essentiellement en Guinée.



**Figure 2**

Les stocks de carbone des sols d'Afrique de l'Ouest selon la base de données HWSD.

A. Cartographie des unités de sol.

B. Stocks de carbone pour la couche de sol 0-30 cm (kg C.m<sup>-2</sup>).

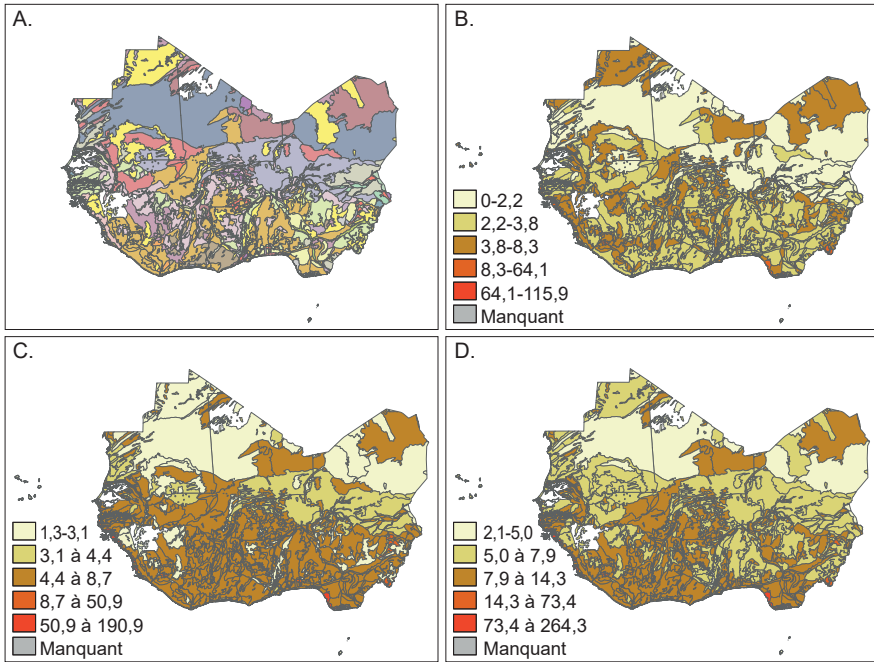
C. Stocks de carbone pour la couche de sol 30-70 cm (kg C.m<sup>-2</sup>).

D. Stocks de carbone la couche de sol 0-100 cm (kg C.m<sup>-2</sup>).

### Utilisation de la carte du JRC

La distribution des stocks de carbone avec la carte JRC (fig. 3) est encore plus contrastée qu'en utilisant celle de HWSD (fig. 2). En effet, les stocks varient entre 0 et 431 kg C.m<sup>-2</sup>. Ceci est essentiellement dû au fait que la carte du JRC ne considère que les classes dominantes de sols HWSD dans chaque unité de sol et que les données sont plus complètes. Au final, les zones où les stocks de carbone sont supérieurs à 5 ou 15 kg C.m<sup>-2</sup>, ne représentent respectivement que 2 et 0,006 % de la superficie totale.





**Figure 3**

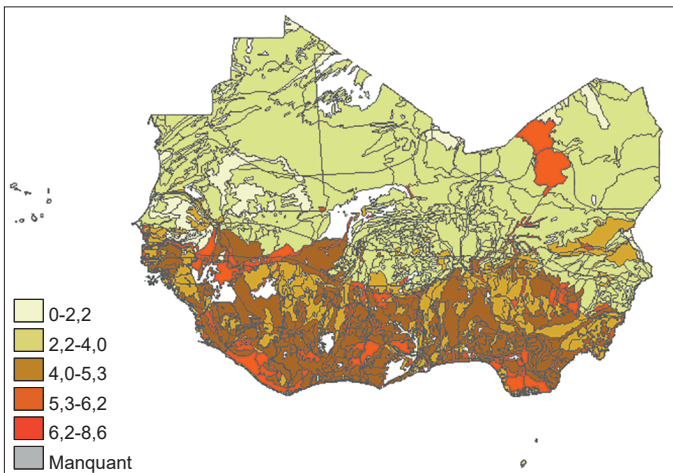
Les stocks de carbone d'Afrique de l'Ouest selon la carte JRC et la base de données HWSD.

A. Cartographie des unités de sols.

B. Stocks de carbone pour la couche de sol 0-30 cm (kg C.m<sup>-2</sup>).

C. Stocks de carbone pour la couche de sol 30-70 cm (kg C.m<sup>-2</sup>).

D. Stocks de carbone pour la couche de sol 0-100 cm (kg C.m<sup>-2</sup>).



**Figure 4**

Les stocks de carbone (kg C.m<sup>-2</sup>) d'Afrique de l'Ouest selon les cartes HWSD, FAO (2001) et les données par défaut du GIEC (couche de sol 0-30 cm).

### Utilisation de la carte du GIEC

La simplification de la classification dans cette troisième estimation (fig. 4) montre un contraste encore plus évident entre les stocks de carbone mais d'une amplitude moindre. En effet, la classification ne se base essentiellement que sur sept types de sols. Les valeurs par défaut ne sont disponibles que pour quatre d'entre eux. D'après les valeurs par défaut, les stocks de carbone varient entre 0 et 8,6 kg C.m<sup>-2</sup> pour les Histosols et les non-sols, et pour les Gleysols (tabl. 5). Au total, 2,5 % des sols de la région ne possèdent pas de valeurs de stocks de carbone par défaut (tabl. 5). Les estimations ne concernent que les couches de sol superficielles supérieures puisque le GIEC ne fournit pas de données par défaut pour la couche 30-70 cm.

Tableau 5  
Stocks de carbone estimés par type de sol à partir de la carte du GIEC pour 0-30 cm en Afrique de l'Ouest.

Zones climatiques	Zones écologiques		Stocks de COS 0-30 cm (Mg C.ha <sup>-1</sup> )	Superficie (1 000 km <sup>2</sup> )
<b>Sols à minéraux argileux à forte capacité d'échange</b>				
Tropical pluvieux	TAr*	Forêt tropicale ombrophile	44	91
Tropical humide	TAwa	Forêt tropicale humide décidue	65	284
Tropical sec	TAwb	Forêt tropicale sèche	38	305
	TBSh	Formation arbustive tropicale	38	731
	TBWh	Désert de la zone tropicale	38	921
Tropical montagneux	TM	Zone montagneuse tropicale	49	14
<b>Sols à minéraux argileux à faible capacité d'échange</b>				
Tropical pluvieux	TAr	Forêt tropicale ombrophile	60	559
Tropical humide	TAwa	Forêt tropicale humide décidue	47	826
Tropical sec	TAwb	Forêt tropicale sèche	35	242
	TBSh	Formation arbustive tropicale	35	53
	Tropical montagneux	TM	Zone montagneuse tropicale	47
<b>Sableux</b>				
Tropical pluvieux	TAr	Forêt tropicale ombrophile	66	4
Tropical humide	TAwa	Forêt tropicale humide décidue	39	3
Tropical sec	TAwb	Forêt tropicale sèche	31	27
	TBSh	Formation arbustive tropicale	31	823
	TBWh	Désert de la zone tropicale	31	728
Tropical montagneux	TM	Zone montagneuse tropicale	45	0
<b>Déserts de sel</b>				
Tropical sec	TBSh	Formation arbustive tropicale	0	

\* Code des zones climatiques et écologiques correspondantes (FAO, 2012)

Tableau 5 (fin)

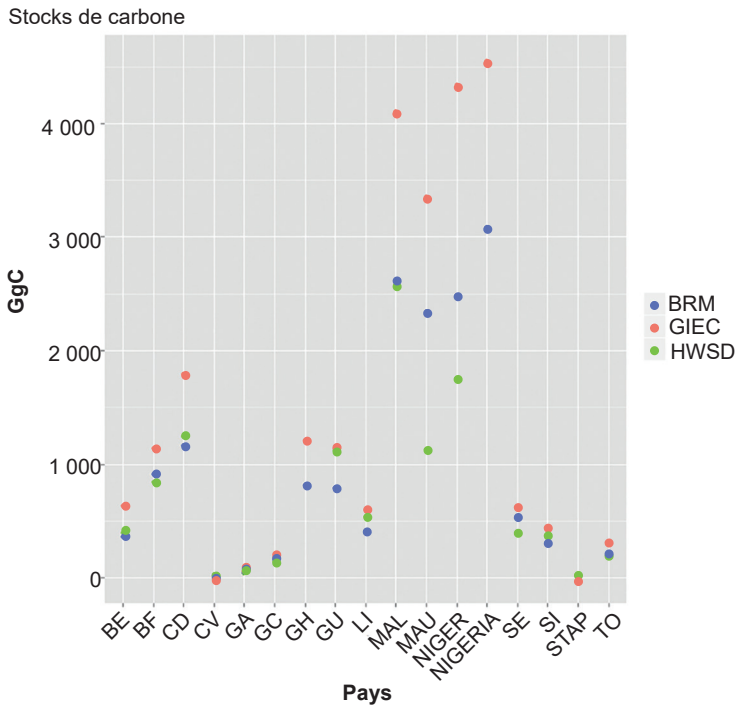
Zones climatiques		Zones écologiques	Stocks de COS 0-30 cm (Mg C.ha <sup>-1</sup> )	Superficie (1 000 km <sup>2</sup> )
<b>Gleysols</b>				
Tropical pluvieux	TAr*	Forêt tropicale ombrophile	86	25
Tropical humide	TAwa	Forêt tropicale humide décidue	86	4
Tropical sec	TAwb	Forêt tropicale sèche	86	9
	TBSh	Formation arbustive tropicale	86	14
<b>Histosols</b>				
Tropical pluvieux	TAr	Forêt tropicale ombrophile	0	0
<b>Affleurements rocheux</b>				
Tropical sec	TBSh	Formation arbustive tropicale	-	3
	TBWh	Désert de la zone tropicale	-	29
<b>Étendues d'eau</b>				
	TAr	Forêt tropicale ombrophile	-	6
	TAwa	Forêt tropicale humide décidue	-	11
	TAwb	Forêt tropicale sèche	-	0
	TBSh	Formation arbustive tropicale	-	5
<b>Non classifié</b>				
Tropical humide	TAwa	Forêt tropicale humide décidue	-	2
Tropical sec	TAwb	Forêt tropicale sèche	-	29
	TBSh	Formation arbustive tropicale	-	43
	TBSh	Formation arbustive tropicale	-	1

\* Code des zones climatiques et écologiques correspondantes (FAO, 2012)

## Comparaison des estimations entre pays

Les estimations obtenues par les trois cartes sont très différentes. Les estimations réalisées à partir de la carte GIEC (« estimation 3 ») sont supérieures (environ 66 %) à celles à partir de la base de données HWSD (« estimation 1 ») (fig. 5 et tabl. 6). L'estimation 1 est également inférieure (de 15 %) à celle obtenue à partir de la carte du JRC et de la classification BRM (« estimation 2 »).

Si nous comparons les estimations obtenues par pays en utilisant la base de données HWSD, les stocks de COS varient entre 7 Gg C à São Tomé-et-Príncipe et 3 084 Gg C au Nigeria (tabl. 6). Par ailleurs, le stock moyen de COS le plus faible est trouvé en Mauritanie (1,07 kg C.m<sup>-2</sup>) et le plus important à São Tomé-et-Príncipe (7,3 kg C.m<sup>-2</sup>) (tabl. 6). Les stocks de COS par pays ne sont pas toujours inférieurs via l'estimation 1. C'est par exemple le cas au Sierra Leone, où l'estimation 1 est supérieure à l'estimation 2.



**Figure 5**

Variations des stocks de carbone (0-30 cm) par pays et par méthode.

BE : Bénin, BF : Burkina Faso, CD : Côte d'Ivoire, CV : Cap Vert ; GA : Gambie, GC : Guinée, GH : Ghana, GU : Guinée Bissau ; LI : Libéria ; MAL : Mali, MAU : Mauritanie ; SE : Sénégal ; SL ; Sierra Leone ; STAP : São Tomé-et-Príncipe ; TO : Togo.

## Discussion

Environ 21 Pg C d'après le Global Forest Resources Assessment (FRA) de 2015 (FAO, 2015) et entre 22 et 30 Pg C d'après notre étude sont stockés dans les sols d'Afrique de l'Ouest, ce qui représente environ 24 % et entre 25 et 35 % des stocks de carbone totaux respectivement. Pour la profondeur 0-30 cm, nos estimations varient entre 14,6 et 24,4 PgC selon les méthodes utilisées ; elles restent du même ordre de grandeur que celles de HENRY *et al.* (2009). Ces différences peuvent être attribuées à de nombreux facteurs (SOMBROEK *et al.*, 1993) tels que les limites côtières imprécises et l'attribution des teneurs de carbone pour les différents types de sol. La densité apparente par type de sol et le long d'un profil contribue également à générer des différences importantes ainsi que les diverses classifications et les propriétés attribuées à chaque type de sol.

La variabilité des stocks de carbone observée dans le tableau 4 reflète des propriétés de sol qui diffèrent selon les types de sols et les textures. Au niveau local, la variabilité des stocks de COS peut être encore plus importante comme

Tableau 6  
Estimations des stocks de carbone par pays d'Afrique de l'Ouest dans les couches de sol 0-30 et 30-70 cm.

Pays	Résultat 1 Carte HWSD et base de données HWSD				Résultat 2 Carte JRC et base de données HWSD				Résultat 3 Carte HWSD et données GIEC	
	Moy. (kg C.m <sup>-2</sup> )**		Stocks (Tg C)*		Moy. (kg C.m <sup>-2</sup> )		Stocks (Tg C)		Moy. (kg C.m <sup>-2</sup> )	Stocks (Tg C)
	0-30 cm	30-70 cm	0-30 cm	0-70 cm	0-30 cm	30-70 cm	0-30 cm	0-70 cm	0-30 cm	0-30 cm
Bénin	3,41	396	146	542	3,07	357	324	681	5,41	629
Burkina Faso	3,09	841	419	1260	3,35	911	811	1722	4,16	1132
Côte d'Ivoire	3,94	1240	843	2083	3,69	1161	1140	2302	5,69	1791
Cap Vert	6,67	26	1	27	4,54	18	2	20	0,00	0
Gambie	3,39	36	30	67	4,54	49	38	87	5,18	55
Ghana	3,65	811	382	1193	3,64	810	670	1480	5,41	1204
Guinée	5,77	1114	474	1588	5,49	1060	624	1684	5,89	1136
Guinée-Bissau	4,17	140	59	199	4,83	162	177	339	5,21	175
Liberia	5,59	536	133	668	4,16	399	333	732	6,18	592
Mali	2,40	2577	1158	3735	2,78	2993	2661	5654	3,82	4107
Mauritanie	1,07	1131	664	1795	2,22	2343	909	3252	3,18	3357
Niger	1,48	1754	1443	3197	2,09	2481	1963	4444	3,65	4342
Nigeria	3,36	3084	1377	4461	3,36	3081	2550	5632	4,95	4546
Sao Tome & Principe	7,30	7	0	7	2,82	3	2	4	4,08	4
Sénégal	2,08	396	253	649	3,25	619	597	1216	3,17	604
Sierra Leone	4,78	347	138	485	4,28	311	248	559	5,76	419
Togo	3,40	200	45	245	3,52	207	139	346	5,30	311
Total	2,51	14639	7564	22203	2,91	16965	13189	30155	4,19	24405

\* 1 000 Tg = 1 Pg

\*\* 1 kg C.m<sup>-2</sup> = 10 Mg C.ha<sup>-1</sup>

l'ont illustrées des études menées au nord du Togo (POCH et UBALDE, 2006) ou au Sénégal (WOOMER *et al.*, 2004). Au niveau national, les estimations 1 sont proches de celles d'autres études menées au Bénin et au Sénégal, (tabl. 7) alors que les estimations 2 et 3 sont supérieures.

Tableau 7  
Comparaison des stocks de carbone estimés avec d'autres études  
à l'échelle nationale (Bénin et Sénégal).

Pays	Superficie (km <sup>2</sup> )	Autres études			Nos estimations par couche de sol	
		Profondeur	COS (Tg C)	Référence	Profondeur	COS (Tg C)
Bénin	115 141	0-20 cm	251-260	VOLKOFF <i>et al.</i> (1999)	0-30 cm	396 (1), 357 (2), 629 (3)
		0-50 cm	408-424		0-100 cm	542 (1), 681 (2)
		0-100 cm	526-543			
Sénégal	199 823	0-40 cm	452	WOOMER <i>et al.</i> (2004)	0-30 cm	396 (1), 619 (2), 604 (3)
					0-100 cm	649 (1), 1 216 (2)

\* (1) Estimation 1 (base de données HWSD).

(2) Estimation 2 (carte JRC et classification WRB).

(3) Estimation 3 (carte Giec).

En comparant les cartes HWSD et JRC, il apparaît que 36 % des types de sols majeurs ne correspondent pas. Ceci est dû à des différences entre la distribution géographique des sols et à l'utilisation de systèmes de classification variés. L'utilisation de la classification BRM est une amélioration. Cependant, elle a des limites. D'une part, seuls les types de sols majoritaires à chaque unité cartographique sont considérés. Les informations concernant les autres types de sols sont ainsi perdues. Pourtant malgré cette simplification, la variabilité spatiale du carbone du sol au sein de chaque unité cartographique reste élevée (CERRI *et al.*, 2000). Le passage d'un système de classification à un autre est souvent arbitraire (BATJES, 2010). Bien que la représentation spatiale et l'allocation des types de sols soient améliorées, la précision des estimations des stocks de carbone est réduite. D'autre part, les différentes étapes de traduction des systèmes de classification entre eux peuvent mener à la perte d'informations des cartes d'origine. Par exemple, le Sénégal utilise un système de classification décrivant plus d'une cinquantaine d'unités. Celui-ci a été ensuite traduit dans le système FAO 74 puis dans le système BRM (KHOUMA, 2002). Les problèmes relatifs à l'interopérabilité entre les systèmes de classification limitent le passage d'une classification à l'autre et les possibilités d'amélioration des cartes des sols. Par ailleurs, il est également important qu'un système de classification prenne en compte les besoins d'information qui peuvent varier entre pays et qu'il puisse être applicable sur le terrain (KHOUMA, 2002).

La perte d'informations relatives à l'utilisation de classes moins précises amène à des estimations très différentes des nôtres, jusqu'à 30 % inférieures dans le cas

des valeurs par défaut du GIEC. L'accessibilité et la possibilité d'harmoniser les données sont des éléments importants de l'amélioration des estimations des stocks de carbone du sol. Différentes bases de données (BATJES, 1995 ; BATJES, 2005 ; LEENAARS, 2012) ou initiatives sont en cours pour encourager les mesures de stocks de carbone dans les sols d'Afrique de l'Ouest. La mise en place de protocoles et de systèmes de classification communs doit permettre une meilleure connaissance ainsi que l'intégration des données à l'échelle régionale (FAO, 2000). La mise en place d'un système de classification des sols qui soit similaire au LCCS (*Land cover classification system*) et de catégorisation des types d'occupation des sols (DI GREGORIO, 2015), serait une grande avancée dans l'amélioration de l'interopérabilité entre les systèmes de classification des sols. Par ailleurs, afin d'assurer l'intégration des données de terrain avec des données nationales ou régionales, leur codification grâce à un logiciel adapté présente un avantage évident en termes de gain de temps et de qualité (THIOMBIANO *et al.*, 2002).

L'utilisation de différentes méthodes pour l'estimation du COS aboutit à différentes valeurs de stocks de carbone dont les écarts peuvent être importants (tabl. 6). Ces erreurs se répercutent ensuite sur les stocks de carbone estimés à partir de ces données et de modèles de changement d'usage. Les directives du GIEC fournissent des éléments méthodologiques afin d'assurer la transparence, l'exhaustivité, la cohérence, la comparabilité et l'exactitude des estimations (GIEC, 2006). Ces éléments sont fondamentaux afin d'assurer des estimations ni surestimées ni sous-estimées et dont les incertitudes sont réduites autant que possible. Lors de l'estimation des changements de stocks de COS, il faudra s'assurer que ces changements ne résultent pas de différences liées à l'utilisation de différentes méthodologies, bases de données ou systèmes de classification. À l'avenir, il est fort probable que de nouvelles cartes soient développées avec de nouvelles mesures de terrain. Il faudra donc recalculer les estimations de changements de stocks de carbone et pour cela s'assurer que les méthodes et données utilisées restent disponibles et soient reproductibles.

La prise en compte de la variabilité spatiale des stocks et de leurs changements dans le temps est nécessaire pour évaluer (1) l'impact de la contribution des activités humaines sur le cycle du carbone et (2) la fertilité des sols. Une meilleure estimation des stocks de carbone et de leur dynamique est un enjeu de plus en plus important dans le cadre de la mise en place de plans d'action pour l'atténuation des changements climatiques (DIAGANA *et al.*, 2007 ; LAL, 2008) ou de systèmes de paiements pour services environnementaux, et ce afin de promouvoir des pratiques agricoles sequestrantes et une meilleure gestion de l'usage des terres (LIPPER *et al.* 2010 ; THE AFRICAN DEVELOPMENT BANK, 2015). Les incertitudes dans les estimations des stocks sont un frein à la modélisation socio-économique des pratiques agricoles et à la mise en place de ces systèmes de compensation financière comme par exemple les paiements pour services environnementaux (KNOKE, 2013). La dynamique du carbone des sols en Afrique de l'Ouest et dans le monde reste mal connue (BATJES, 1996 ; GIEC, 2013) et leur caractérisation et compréhension sont nécessaires (HOUGHTON et GOODALE, 2004).

## Conclusion

Cette étude illustre la variabilité des estimations des stocks de carbone des sols d'Afrique de l'Ouest et montre les différents facteurs qui influencent ces estimations. Il apparaît que les incertitudes restent importantes à l'heure où la lutte contre le changement climatique est un enjeu mondial. Par ailleurs, nombreuses sont les questions qui restent sans réponse quant au bilan de l'ensemble des gaz à effet de serre des sols africains (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> et N<sub>2</sub>O), plus particulièrement le rôle des zones tropicales sèches dans le cycle du carbone. L'intensification des études régionales et nationales conduites sur le long terme en Afrique de l'Ouest devrait aboutir à une meilleure compréhension de l'interaction entre activités humaines et cycle du carbone, en particulier dans le sol. Leur réussite nécessite de prendre en compte les données existantes ainsi que la mise en place d'un cadre afin d'intégrer les efforts communs sur ces questions de variabilité spatiale et temporelle du carbone des sols agricoles.

## Bibliographie

### **AKHMAD F., ZUZY A., 2013**

The complexity of the institution of payment for environmental services: a case study of two Indonesian PES schemes. *Ecosystem Services*, 6 : 54-63.

### **AMUNDSON R., 2001**

The soil carbon cycle. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences*, 29 : 535-562.

### **BAD, 2011**

*L'Afrique dans 50 ans : vers une croissance inclusive*. Banque africaine de développement 84 p.

### **BATJES N. H., 1995**

*A homogenized soil data file for global environmental research: a subset of FAO, ISRIC and NRCS profiles (Version 1.0)*. International Soil Reference and Information Centre, 47 p.

### **BATJES N. H., 1996**

Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 47 : 151-163.

### **BATJES N. H., 2001**

Options for increasing carbon sequestration in West-African soil: an exploratory study with special focus on Senegal. *Land Degradation & Development*, 12 : 131-142.

### **BATJES N. H., 2002**

Soil parameters estimates for the soil types of the world for use in global and regional modelling (Version 2.1. July 2002). *ISCRI report, 2002/02c*. Wageningen, International Food Policy Research Institute (IFPRI) International Soil Reference and Information Centre (ISRIC), 52 p.

### **BATJES N. H., 2005**

*ISRIC-WISE global data set of derived soil properties on a 0.5 by 0.5 degree grid (Version 3.0). Report 2005/08*. Wageningen : ISRIC-World Soil Information. 24 p.

### **BATJES N. H., 2006**

*ISRIC-WISE derived soil properties on a 5 by 5 arc-minutes global grides. Report 2006/02*. Wageningen : ISRIC-World Soil Information. Téléchargeable : [www.isric.org](http://www.isric.org)



**BATJES N. H., 2008**

Mapping soil carbon stocks of Central Africa using SOTER. *Geoderma*, 146 : 58-68.

**BATJES N. H. 2010**

*IPCC default soil classes derived from the Harmonized World Soil Data Base*. World Soil Information, ISRIC, Colorado State, UNEP, GEF.

**CERRI C., BERNOUX M. C., ARROUAYS D., FEIGL B., PICCOLO M., 2000**

« Carbon stocks in soils of the Brazilian Amazon. *Advances in Soil Science*. » In Press C. (éd.) : *Global climate change and tropical ecosystems*, Boca Raton, USA, CRC Press : 33-50.

**D'ANNUNZIO R., SANDKER M., FINEGOLD Y., MIN Z., 2015**

Projecting global forest area towards 2030. *Forest Ecology and Management*, 352 : 124-133.

**DETWILER R. P., 1986**

Land use change and the global carbon cycle: the role of tropical soils. *Biogeochemistry*, 2 : 67-93.

**DEWITTE O., JONES A., SPAARGAREN O., BREUNING-MADSEN H., BROSSARD M., DAMPHA A., DECKERS J., GALLALI T., HALLETT S., JONES R., KILASARA M., LE ROUX P., MICHÉLI E., MONTANARELLA L., THIOMBIANO L., VAN RANST E., YEMEFACK M., ZOUGMORE R., 2013**

Harmonisation of the soil map of Africa at the continental scale. *Geoderma*, 211-212 : 138-153.

**DIAGANA B., ANTLE J., STORVOGEL J., GRAY K., 2007**

Economic potential for soil carbon sequestration in the Niore region of Senegal's Peanut Basin. *Agricultural Systems*, 94 (1) : 26-37.

**DI GREGORIO A., 2015**

*Land cover classification system, classification concepts, software version 3*. Rome, The Food and Agriculture Organization of the United Nations.

**FAO, 2000**

*Quatorzième réunion du sous-comité ouest et centre africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres*. Abomey, Bénin, 9-13 octobre 2000.

**FAO, 2001**

*Global ecological zoning for the Global Forest Resources Assessment 2000*. Rome, The Forest Resources Assessment Programme.

**FAO, 2010**

*Global Forest Resources Assessment 2010*. Rome, The Food and Agriculture Organization of the United Nations.

**FAO, 2012**

Global ecological zones for FAO forest reporting: 2010 update. *FRA working paper*, 179. Rome.

**FAO, 2015**

*The Global Forest Resources Assessment, How are the world's forests changing?* Rome, The Food and Agriculture Organization of the United Nations.

**FAO ET ITP, 2018**

*Global Soil Organic Carbon Map (GSOCmap). Technical Report*. Rome, 162 p. Téléchargeable : [www.fao.org/3/I8891EN/i8891en.pdf](http://www.fao.org/3/I8891EN/i8891en.pdf)

**FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC, 2008**

*Harmonized world soil database (version 1.0)*. Rome, Italie et Luxembourg, Autriche, FAO, IIASA, 42 p.

**FAO/UNESCO, 1971-1981**

*The FAO/UNESCO Soil Map of the World. Legend and 9 volumes*. Paris, UNESCO.

**GIEC, 2006**

*Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre*. Hayama, Japon, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

**GIEC, 2013**

« Summary for Policymakers. » In Stocker T. F. et al. (éd.) : *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume Uni et New York, NY, USA, Cambridge University Press.

**GUO L., GIFFORD R. M., 2002**

Soil carbon stocks and land use change: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 8 : 345-360.

**HENRY M., VALENTINI R., BERNOUX M., 2009**

Soil carbon stocks in ecoregions of Africa. *Biogeosciences for discussions*, 6 : 797-823.

**HENRY M., MANIATIS D., GITZ V., HUBERMAN D., VALENTINI R., 2011**

Implementation of REDD+ in sub-Saharan Africa: state of knowledge, challenges and opportunities. *Environment and Development Economics*, 16 (4) : 381-404.

- HENRY M., VALENTINI R., BERNOUX M., 2009**  
Soil carbon stocks in ecoregions of Africa. *Biogeosciences for discussions*, 6 : 797-823.
- HOUGHTON R., GOODALE C., 2004**  
« Effects of land-use change on the carbon balance of terrestrial ecosystems ». In Defries R. S., Asner G. P., Houghton R. A. (éd.) : *Ecosystems and land use change* : 85-98.
- IPCC, 2006**  
*2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories. Volume 2 Energy.*
- IUSS WORKING GROUP WRB, 2014**  
*World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps.* Rome, FAO.
- KHOUMA M., 2002**  
*Les grands types de sols du Sénégal.* Présenté à la 14<sup>e</sup> réunion du sous-comité ouest et centre africain de corrélation des sols, Abomey, Bénin.
- KNOEPP J. D., SWANK W. T., 1997**  
Forest management effects on surface soil carbon and nitrogen. *Soil Science Society of America*, 61 : 928-935.
- KNOKE T., 2013**  
Uncertainties and REDD+: implications of applying the conservativeness principle to carbon stock estimates. *Climatic Change*, 119 (2) : 261-267.
- LAL R., 2008**  
Sequestration of atmospheric CO<sub>2</sub> in global carbon pools. *Energy & Environmental Science*, 1 (1) : 86-100.
- LEENAARS J.G.B., 2012**  
Africa soil profiles database, Version 1.0. A compilation of geo-referenced and standardized legacy soil profile data for sub Saharan Africa (with dataset). *ISRIC report 2012/03.* Africa Soil Information Service (AfsIS) project, ISRIC – World Soil Information, Wageningen, the Netherlands.
- LE QUÉRÉ C. et al., 2016**  
Global carbon budget 2016. *Earth Syst. Sci. Data*, 8 (2) : 605-649.
- LIPPER L., DUTILLY-DIANE C., MCCARTHY N., 2010**  
Supplying carbon sequestration from West African rangelands: opportunities and barriers. *Rangeland Ecology & Management*, 63 (1) : 155-166.
- MARCO P., HENRY M., BLAVET D., BERNOUX M., 2010**  
Variation in organic carbon stocks in soils after forest planting: meta-analysis attempt covering several situations in Latin America. *Bois et Forêts des Tropiques*, 305 : 21-32.
- MERCIER J.-R., 2012**  
Revisiting deforestation in Africa (1990–2010): one more lost generation. *Madagascar Conservation & Development*, 7 (1) : 5-8.
- MURTY D., KRISCHBAUM M. F., MCMURTRIE R. E., MCGILVRAY H., 2002**  
Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? A review of the literature. *Global Change Biology*, 8 : 105-123.
- PARTON W., TAPPAN G., OJIMA D., TSCHAKERT P., 2004**  
Ecological impact of historical and future land-use patterns in Senegal. *J Arid Environ*, 59 : 605-623.
- PASTOR J., POST W. M., 1986**  
Influence of climate, soil moisture, and succession on forest carbon and nitrogen cycle. *Biogeochemistry*, 2 : 3-27.
- POCH R. M., UBALDE J. M., 2006**  
*Diagnostic of degradation processes of soils from northern Togo (West Africa) as a tool for soil and water management.* Workshop IC-PLR 2006.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2006**  
*R: a programming environment for data analysis and graphics version 2:7.*
- RHOADES C. C., ECKERT G. E., COLEMAN D. C., 2000**  
Soil carbon differences among forest agriculture and secondary vegetation in lower montane Ecuador. *Ecological Applications*, 10 : 497-505.
- SCHJONNING R., THOMSEN I. K., MOBERG J. P., DE JONGE H., KRISTENSEN K., CHRISTENSEN B. T., 1999**  
Turnover of organic matter in differently textured soils: I. Physical characteristics of structurally disturbed and intact soils. *Geoderma*, 89 : 177-198.
- SCHLESINGER W. B., 2000**  
Carbon sequestration in soil: some cautions amidst optimism. *Agricultural Ecosystems and Environment*, 82 : 121–127.

- SCHLESINGER P., PALMER WINKLER J., 2000**  
« Soils and the global carbon cycle . » In Wigley T. M. L. et Schimel D. S. (éd.) : *The carbon cycle*, Cambridge University Press, Cambridge.
- SOMBROEK W., NACHTERGAELE F. O., HEBEL A., 1993**  
Amounts, dynamics and sequestering of carbon in tropical and subtropical soils. *Ambio*, 22 (7) : 417-426.
- TAN Z., TIESZEN L. L., TACHIE-OBENG E., LIU S., DIEYE A. M., 2008**  
Historical and simulated ecosystem carbon dynamics in Ghana: land use, management, and climate. *Biogeosciences Discussion*, 5 : 2343-2368.
- THE AFRICAN DEVELOPMENT BANK., 2015**  
*Payment for environmental services: a promising tool for natural resources management in Africa.*
- THIOMBIANO L., NÉBIÉ A. K., SEMDE A., YAGO K. J., 2002**  
*La base mondiale de données sur les sols : avantages et faiblesses pour la connaissance et l'utilisation des milieux édaphiques au Burkina Faso.* Présenté à la 14<sup>e</sup> réunion du Sous-comité ouest et centre africain de corrélation des sols, Abomey, Bénin.
- TSCHAKERT P., 2004**  
Carbon for farmers: assessing the potential for soil carbon sequestration in the old peanut basin of Senegal. *Climate change*, 67 : 273-290.
- VALENTINI R., ARNETH A., BOMBELLI A., CASTALDI S., CAZZOLLA GATTI R., CHEVALLIER F., CIAIS P., GRIECO E., HARTMANN J., HENRY M., HOUGHTON R. A., JUNG M., KUTSCH W. L., MALHI Y., MAYORGA E., MERBOLD L., MURRAY-TORTAROLO G., PAPAIE D., PEYLIN P., POULTER B., RAYMOND P. A., SANTINI M., SITCH S., VAGLIO LAURIN G., VAN DER WERF G. R., WILLIAMS C. A., SCHOLES R. J., 2014**  
The full greenhouse gases budget of Africa: synthesis, uncertainties and vulnerabilities. *Biogeosciences*, 11 : 381-407.
- VOLKOFF B., FAURE P., DUBROEUCQ D., VIENNOT M., 1999**  
Estimation des stocks de carbone des sols du Bénin. *Étude et gestion des sols*, 6 : 115-130.
- WILLIAMS P., HANAN N. P., NEFF J. C., SCHOLES R. J., BERRY J. A., DENNING A. S., BAKER D. F., 2007**  
Africa and the global carbon cycle. *Carbon balance and management*, 2 (3) : 1-13.
- WOOMER P. L., TOURÉ A., SALL M., 2004**  
Carbon stocks in Senegal's Sahel transition zone. *Journal of Arid Environments*, 59 (3) : 499-510.
- YANAI R. D., CURRIE W. S., GOODALE C. L., 2003**  
Soil carbon dynamics after forest harvest: an ecosystem paradigm reconsidered. *Ecosystems*, 6 : 197- 212.