

Estimation des stocks de carbone des sols du Bénin

B. Volkoff, P. Faure, D. Dubroeuq et M. Viennot

IRD (ex-ORSTOM), 32 avenue Henri Varagnat, 93143 Bondy, France

RÉSUMÉ

Une première estimation du stock de carbone organique des sols du Bénin est faite à l'aide d'une base de données constituée à partir de la carte pédologique à l'échelle du 1/200 000 et d'une collection de résultats d'analyses réalisées au moment de l'établissement de la carte durant les années 1960-1970. Le Bénin qui s'étend, en Afrique de l'Ouest, de 6° à 12° de latitude nord appartient, dans sa quasi-totalité, au domaine des savanes soudano-guinéennes.

La couverture pédologique est à dominante de sols classés sols ferrugineux tropicaux suivant le système français CPCS (1967). Elle comporte aussi des sols ferrallitiques. Les différents équivalents Légende FAO-UNESCO (1990) de ces sols, qui sont les Luvisols, Alisols, Lixisols et Acrisols, ont été recherchés en prenant comme critères la capacité d'échange de l'argile et le taux de saturation à 1 m de profondeur (horizons B) dont les valeurs ont été extraites de la base de données.

Les stocks exprimés en kg de carbone par mètre carré ont été calculés pour des épaisseurs de 0-20, 0-50 et 0-100 cm à partir des taux pondéraux, en prenant une même densité moyenne de 1,3 pour tous les types de sols et pour toutes les profondeurs. Les valeurs médianes ont été déterminées pour toutes les unités de la carte et pour des regroupements d'unités correspondant à des Groupes de la classification CPSC, des Grands Groupes de la Légende FAO-UNESCO ou encore à des subdivisions de ces Groupes et Grands Groupes faites d'après la texture des horizons de surface (taux d'argile de la couche 0-20 cm).

On montre que pour les sols dominants, c'est à dire pour tout ce qui n'est pas Vertisol, Sol Brun eutrophe ou sol hydromorphe, le stock de carbone est toujours dans une même fourchette de valeurs, quel que soit l'ensemble ou le sous ensemble taxonomique CPCS ou FAO considéré. Le stock de carbone moyen est de 2,2 kg/m² entre 0 et 20 cm, de 3,5 kg/m² entre 0-50 cm et de 4,5 kg/m² C entre 0-100 cm de profondeur. Les coefficients de variation sont toujours élevés et atteignent 50 %. Ainsi cette variabilité masque en grande partie l'effet des différences dans la nature du sol. Les valeurs obtenues doivent alors être vues plus comme des paramètres caractérisant un environnement bio-climatique que comme des stocks liés à un type de sol.

Au travers de la variabilité, les résultats donnent une première indication chiffrée des stocks de carbone des sols sous savanes de l'Afrique de l'Ouest. Ces stocks apparaissent toujours nettement inférieurs à ceux qui sont généralement attribués aux sols de ces régions. Ils ne représentent que la moitié du stock de carbone des sols sous forêts tropicales humides.

Mots clés

Sols, Stock de Carbone, Bénin

SUMMARY

ESTIMATING SOIL ORGANIC CARBON STORAGE IN BENIN

The total stock of organic carbon in the soils of the Benin Republic is estimated using a data base composed of a soil map at 1 : 200,000 scale and a set of analytical data obtained during the map elaboration in 1960-1970. The Benin Republic is located in West Africa from Latitudes 6° to 12° N and belongs almost entirely to the savanna Sudan-Guinea climatic areas.

The soil cover is composed mainly of tropical ferruginous soil according to the French system CPCS. Ferralitic soils are also present. The corresponding FAO-UNESCO legend of these soils were determined using parameters such as the clay exchange capacity and the base saturation at 1 m depth (horizon B), extracted from the data base.

Carbon stocks expressed in kg/m² were determined for depth 0-20, 0-50 and 0-100 cm. Calculation were made using ponderal rates and the same mean density (1.3) for all soil types and for all depths. Medians were determined for each cartographic unit and for groups of units corresponding to the CPCS classification, to the FAO classification or to subgroups defined according to the texture of the surface horizons (clay content in the 0-20 layer).

It is shown that for dominant soils, i.e. all soils except vertisols, cambisols, planosols and fluvisols, the stock value always varies within a same range regardless of the CPCS or FAO soil taxonomic group. The mean C stock is 2,2 kg/m² between 0 and 20 cm, 0,5 between 0-50 cm and 4,5 between 0-100 cm. Variation coefficients are high and reach 50 %. Therefore the variability masks the effects of the soil differences. Then the stocks determined here must be seen as reflecting a bioclimatic effect but not as values related to a soil unit.

This study is the first report of C stocks of the soils of the West African savanna areas. The C stocks appear to be significantly lower than those generally assigned to the soils of this region. They account for only half of the carbon stock of soils under tropical rain forests.

Key-words

Soil, carbon stock, Benin

RESUMEN

ESTIMACIÓN DEL CARBONO ALMACENADO EN LOS SUELOS DE BENIN

Una primera estimación del carbono orgánico almacenado en los suelos de Benin se hizo con una base de datos constituida a partir del mapa de suelos a escala de 1/200 000 y una recopilación de resultados analíticos realizados cuando se levantó el mapa, en el período 1960-1970. El Benin se sitúa en África del Oeste y se extiende desde el 6° hasta el 12° de latitud norte, pertenece, en su totalidad al dominio de las sabanas súdano-guineanas.

La cobertura edafológica es constituida por suelos ferruginosos tropicales lixiviados según el sistema francés de clasificación CPCS (1967), también incluye suelos ferralíticos. Los diferentes equivalentes -Leyenda FAO-UNESCO 1990-, de estos suelos (Luvisoles, Alfisoles, Acrisoles y Lixisoles) han sido buscados tomando en cuenta los criterios siguientes : capacidad de intercambio catiónico de la arcilla y la tasa de saturación a 1 m de profundidad (horizonte B) cuyos valores se sacaron de la base de datos.

El carbono almacenado se calculó por espesores de 0-20, 0-50 y 0-100 cm, a partir de las cantidades en peso, tomando una misma densidad de 1,3 para todos los tipos de suelos y para todas las profundidades. Los valores medios calculados para cada unidad cartográfica o para los conjuntos de unidades referentes a Grupos de la clasificación CPCS, para Grandes Grupos de la Leyenda FAO-UNESCO o para subdivisiones de las reagrupaciones efectuadas según la textura de los horizontes superficiales (tasa de arcilla en la capa 0-20), han sido comparados.

Es evidente que para los suelos mayoritarios, es decir para todo los que no son vertisoles, suelos pardos eutrópicos o suelos hidromórficos, el carbono almacenado se ubica siempre en el mismo rango de valores independientemente del conjunto o del subconjunto taxonómico considerado, CPCS o FAO. El carbono almacenado medio es de 2,2 kg/m² desde 0 hasta 20 cm, de 3,5 kg/m² (0-50 cm) y de 4,5 kg/m² (0-100 cm) de profundidad. Los coeficientes de variación son siempre elevados, alcanzando el 50%. La variabilidad disimula entonces un efecto de la naturaleza del suelo. El carbono almacenado obtenido se debe atribuir más al ambiente bio-climático que a valores relacionados al tipo de suelo.

A través de la variabilidad, los resultados dan una primera estimación numérica del carbono almacenado en los suelos de sabanas de África del Oeste. La cantidad almacenada parece siempre inferior a lo generalmente encontrado en los suelos de estas regiones ; representa la mitad del carbono almacenado en los suelos de los bosques tropicales húmedos.

Palabras claves

Suelos, carbono almacenado, Benin.

Au cours de ces dernières années on a montré l'importance du carbone organique stocké dans les sols et on s'est attaché à mesurer ses fluctuations sous différents modes d'occupation du sol pour essayer de mieux comprendre leurs effets sur la composition de l'atmosphère et sur les changements de l'environnement global (Post et al., 1982; Schlesinger, 1986; Eswaran et al., 1993; Batjes, 1996).

L'importance des sols tropicaux a été largement soulignée (Detwiler, 1986; Eswaran et al., 1993; Lugo and Brown, 1993; Sombroek et al., 1993). Les stocks de carbone sous végétation naturelle et les modifications sous l'effet des défrichements ont fait l'objet d'études récentes en zones tropicales humides forestières (Cerri et al., 1994; Moraes et al., 1995; Bernoux et al., 1998). Les études apparaissent beaucoup plus rares dans les écosystèmes de savanes tropicales pour lesquels la plupart des estimations publiées s'appuient sur des données généralement établies par unités taxonomiques faisant peu référence aux couvertures végétales. Les estimations sont faites sur la base des cartes à petite échelle existantes qui utilisent les systèmes de classification de l'USDA (Soil Survey Staff, 1975 et 1992) ou la Légende des Sols du Monde (FAO-UNESCO, 1974 et 1990).

Les informations concernant plus spécifiquement l'Afrique Occidentale sont rares, et celles qui sont disponibles sont difficilement exploitables parce que les systèmes de classification des sols qui ont été utilisés dans cette partie de l'Afrique sont divers et peu compatibles. Le système de classification CPCS (Aubert et Duchaufour, 1956; CPCS, 1967) utilisé dans la plupart des pays de l'Afrique francophone s'accorde en effet difficilement avec les systèmes USDA ou FAO. Aucune correspondance satisfaisante ne peut être établie directement.

Nous avons donc essayé de voir si les données anciennes accumulées au cours des travaux d'inventaire des sols réalisés entre 1960 et 1970, notamment au Bénin (ex-Dahomey), permettent d'une part de calculer des stocks de carbone et d'autre part de rapporter ces stocks à des ensembles géographiques issus d'une compartimentation géographique basée sur la légende FAO.

Le Bénin dont le territoire s'étend de 6° à 12°N de latitude avec une pluviosité annuelle de 900 à 1400 mm, est représentatif, tant par ses sols que par sa couverture végétale à dominante de savanes, du vaste domaine de l'Afrique de l'Ouest soudano-guinéenne (figure 1). On n'y trouve de la forêt que dans le sud qui est sa partie la plus humide.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Carte pédologique de référence

La carte de reconnaissance des sols du Bénin à 1/200 000 a

été dressée entre 1965 et 1970. Elle comporte des unités morphopédologiques qui ont été délimitées par interprétation de photographies aériennes à 1/50 000. Le contenu pédologique de chacune des unités a été caractérisé par un profil type correspondant au sol dominant. Chacune de ces unités porte le nom de l'unité taxonomique de ce type de sol dominant.

Le document de base utilisé est constitué des 8 feuilles publiées (Volkoff, 1976, Volkoff et Willaime, 1976, Dubroeuq, 1977a et 1977b; Faure, 1977a et 1977b; Viennot, 1978a et 1978b) qui ont été numérisées et traitées avec les logiciels Forban (Faure et Benizri, 1988) et Arclnfo®.

La carte originale contient 109 unités cartographiques. Seize d'entre elles, qui sont réparties sur plusieurs régions, ont été subdivisées pour tenir compte de quelques différences morphologiques régionales. La carte numérisée comporte ainsi 125 unités cartographiques. A chacune de ces unités a été attribué un code numérique (identifiant) : 123 représentent des unités cartographiques pédologiques, un code étant affecté aux roches nues et un aux surfaces d'eau.

Les unités taxonomiques et cartographiques élémentaires sont rangées en classes, sous-classes, groupes, sous-groupes et familles suivant la hiérarchie du système CPCS (1967). Les familles sont définies d'après la nature de la roche et le type d'altération de façon à distinguer les sols sur altérations kaoliniques anciennes des sols sur altérations récentes dans le cas des sols ferrugineux. Des groupes nouveaux ont été introduits dans la sous-classe des sols ferrugineux tropicaux. Le groupe peu lessivé comporte les sols présentant soit des horizons de surface faiblement éluviés en argile soit des horizons éluviés peu épais. Le groupe appauvris comporte les sols dont le profil présente des horizons éluviés en argile relativement épais en l'absence d'horizon d'accumulation d'argile différencié.

Base de données analytiques de profils

La base a été construite à partir des résultats d'analyses effectuées lors du travail de cartographie et consignés dans des rapports techniques. Des fiches complémentaires ont été extraites de différents rapports antérieurs ou postérieurs à la prospection. La base de données contient 405 profils qui sont distribués sur l'ensemble du territoire du Bénin (figure 2). Les rapports ne donnent pas les coordonnées géographiques des profils analysés mais fournissent les indications nécessaires qui ont permis leur localisation sur chaque carte. Le calcul des coordonnées n'a pas été fait.

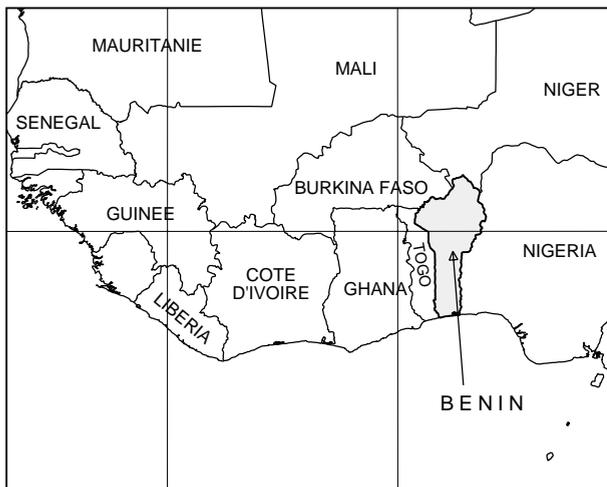
Une liste des documents consultés est donnée en annexe.

Méthodes d'analyse

Les résultats d'analyse qui seront utilisés dans ce travail concernent le carbone organique total, le taux d'argile, la capacité d'échange cationique et le taux de saturation du complexe adsorbant. Ces résultats se rapportent à la terre fine (fraction < 2 mm). Il a été également tenu compte des proportions d'élé-

Figure 1 - Situation géographique du Bénin

Figure 1 - Location map of Benin



ments grossiers (fraction > 2 mm) déterminées par tamisage à sec de l'échantillon brut.

Le carbone organique total a été dosé par voie humide par la méthode Anne (1945).

Le taux d'argile est donné par l'analyse granulométrique faite par la méthode pipette Robinson après destruction de la matière organique et dispersion au pyrophosphate de sodium.

La capacité d'échange (T) a été obtenue par saturation à CaCl_2 à pH 7 et extraction du Ca fixé par KNO_3 (Ollat et Combeau, 1960). La somme des bases échangeables (S) a été déterminée sur l'extrait à l'Acétate d'Ammonium à pH 7.

Correspondance CPCS-Légende FAO

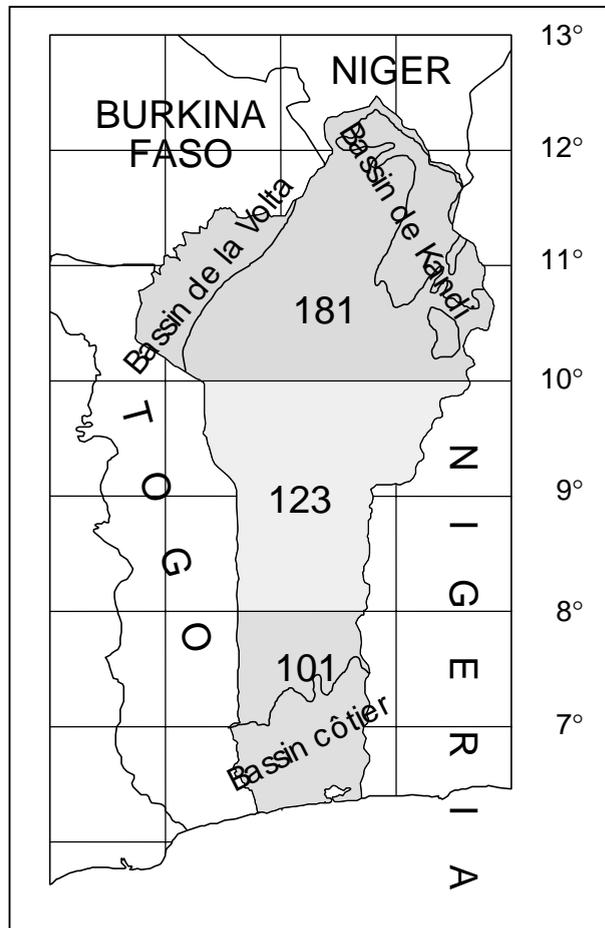
La correspondance entre la légende taxonomique CPCS utilisée dans la carte de base et la Légende des sols du monde (FAO-UNESCO, 1974 et 1990) est implicite pour un certain nombre de sols remarquables, tels que les vertisols, sols bruns eutrophes, sols hydromorphes, sols peu évolués de la classification CPCS, qui deviennent des Vertisols, Cambisols, Gleysols et Histosols, Fluvisols et Leptosols. Les autres sols du Bénin, c'est à dire les Sols Ferrallitiques et les Sols Ferrugineux Tropicaux, se distribuent entre les Acrisols, Luvisols, Lixisols et les Alisols. La répartition a été faite sur les critères capacité d'échange de l'argile (T/argile) et taux de saturation du complexe adsorbant (S/T) des horizons B.

On a utilisé pour établir la correspondance les valeurs de S, T et argile extraites de la base de données et se rapportant à un échantillon prélevé à une profondeur comprise entre 75 et 115 cm.

Les fiches d'analyse de 249 profils de sols ferrugineux tropicaux et ferrallitiques ont été utilisées. Elles concernent 97

Figure 2 - Nombre de profils analysés par grandes divisions régionales en latitude et limites des bassins sédimentaires du Bénin

Figure 2 - Number of profiles analyzed within major regional divisions and sedimentary basin limits of Benin



identifiants. Il y a généralement peu de profils analysés par identifiant. Il y en a 5, ou plus de 5, pour seulement 17 d'entre eux. Ces 17 identifiants ne représentent qu'une partie (37,6 %) de la surface totale du Bénin (tableau 1). Les statistiques montrent que la variabilité des paramètres capacité d'échange de l'argile et taux de saturation est élevée pour toutes ces unités (tableau 2). Les coefficients de variations sont compris entre 30 et 50 %. Du fait de cette grande dispersion des résultats, les moyennes, marquées par des valeurs extrêmes, peuvent donner une image déformée de la réalité. Le risque est d'autant plus grand que le nombre de profils est réduit. On utilisera donc les médianes, moins sensibles aux valeurs extrêmes, plutôt que les médianes pour caractériser les unités.

A chaque unité cartographique on a attribué une valeur T/argile égale au rapport des médianes de la capacité d'échan-

Tableau 1 - Nombre de profils utilisés et surfaces occupées pour le calcul de la capacité d'échange (T) de l'argile à 100 cm de profondeur par unités cartographiques (identifiants) correspondants aux sols ferrugineux tropicaux et ferrallitiques de la carte de base et pour le calcul du taux d'argile dans la couche 0-20 cm par unités cartographiques de la carte de base (tous les identifiants).

Table 1 - Number of soil profiles, and corresponding areas, used in the estimate of clay cation exchange capacity (T) at a depth of 100 cm in Ferrugineux Tropical and Ferralitic soils, and of clay content in the 0-20 cm layer in all soil map units (all label numbers)

couche 0-20 cm	T de l'argile à 100 cm		Taux d'argile de la	
	Nombre de profils concernés	Surfaces correspondantes (% du Bénin)	Nombre d'identifiants concernés	Surfaces correspon- dantes (% du Bénin)
0	6	3,0	7	3,9
1	38	13,5	34	7,3
2	21	15,6	27	16,1
3	8	9,2	18	16,7
4	7	8,1	10	9,2

Tableau 2 - Statistiques sur la capacité d'échange en cmol (+) par kg d'argile et taux de saturation à 100 cm de profondeur sur quelques unités cartographiques correspondant à des sols ferrugineux tropicaux ou ferrallitiques (IDENT : n° identifiant de l'unité; NB : nombre de profils; MOY : moyenne; MED : médiane; MIN : valeur minima; MAX : valeur maxima; ET : écart type)

Table 2 - Statistics on the cation-exchange capacity (cmol(+) per kg clay) and base saturation at a depth of 100 cm in some map units corresponding to Ferrugineux Tropical and Ferralitic soils (IDENT: label number of the unit; NB : number of profiles; MOY: mean; MED: median; MIN: minimum value; MAX: maximum value; ET: standard deviation)

IDENT	NOM CPCS	NB	Capacité d'échange cmol (+) par kg d'argile					Taux de saturation				
			MOY	MED	MIN	MAX	ET	MOY	MED	MIN	MAX	ET
16	Ferrugineux peu lessivé	5	21	18	14	39	10	65	81	24	90	30
31	Ferrugineux lessivé	6	29	25	14	48	14	62	62	37	89	17
32	Ferrugineux lessivé	6	16	16	11	20	3	57	56	32	87	20
35	Ferrugineux lessivé	5	18	18	15	20	2	83	90	42	100	24
40	Ferrugineux lessivé	5	16	15	14	19	2	51	43	27	83	26
41	Ferrugineux lessivé	5	23	19	13	36	9	84	90	53	100	24
44	Ferrugineux lessivé	5	16	15	8	25	7	61	49	26	100	34
45	Ferrugineux lessivé	10	28	27	14	57	12	75	72	42	100	23
46	Ferrugineux lessivé	5	26	22	18	39	8	77	76	60	109	19
48	Ferrugineux lessivé	13	26	26	13	44	8	63	60	44	99	17
53	Ferrugineux lessivé	6	20	21	9	26	6	61	62	40	74	13
57	Ferrugineux lessivé	5	16	14	12	25	5	48	55	15	64	19
570	Ferrugineux lessivé	9	22	20	8	46	11	64	53	26	100	32
68	Ferrugineux lessivé	8	14	14	12	17	2	65	65	36	99	24
80	Ferrugineux appauvris	7	25	26	16	35	6	69	73	11	95	28
85	Ferrallitique faibl. désat. app.	9	12	12	9	20	3	43	40	26	62	11
86	Ferrallitique faibl. désat. app.	8	22	24	10	29	7	55	68	17	86	26

IDENT	NOM CPCS	NB	MOY	MED	MIN	MAX	ET
16	Ferrugineux peu lessivé	6	13	12	4	29	9
31	Ferrugineux lessivé	7	7	6	3	13	3
32	Ferrugineux lessivé	6	8	8	4	12	3
35	Ferrugineux lessivé	10	11	8	7	24	6
40	Ferrugineux lessivé	10	7	6	4	15	3
41	Ferrugineux lessivé	8	10	9	4	17	5
44	Ferrugineux lessivé	5	13	14	5	18	6
45	Ferrugineux lessivé	11	9	9	4	12	2
46	Ferrugineux lessivé	6	9	8	5	16	4
48	Ferrugineux lessivé	14	9	8	5	17	3
53	Ferrugineux lessivé	6	11	9	8	19	5
57	Ferrugineux lessivé	6	11	11	7	15	3
570	Ferrugineux lessivé	13	16	12	9	43	10
68	Ferrugineux lessivé	9	12	10	7	19	5
80	Ferrugineux appauvris	10	6	6	2	9	2
85	Ferrallitique faibl. désat. app.	9	9	9	5	15	3
86	Ferrallitique faibl. désat. app.	10	16	14	11	24	5
105	Hydromorphe à pseudo-gley	6	10	8	2	21	6

Tableau 3 - Statistiques sur le taux d'argile en g/100 g de terre fine de la couche 0-20 cm sur quelques unités cartographiques (IDENT : n° identifiant de l'unité; NB : nombre de profils, MOY : moyenne; MED : médiane; MIN : valeur minima; MAX : valeur maxima; ET : écart type)

Table 3 - Statistics on the clay content (percent fine earth) in the upper 20 cm layer in various soil map units (IDENT: label number of the unit; NB : number of profiles; MOY: mean; MED: median; MIN: minimum value; MAX: maximum value; ET: standard deviation)

ge et du taux d'argile des profils appartenant à l'unité. On lui a attribué de la même façon une valeur V ($V = S/T$) correspondant au rapport en % des médianes de S et de T des profils de l'unité. Les seuils suivants ont été utilisés :

- Acrisols : $T/\text{argile} < 24$ et $V < 50$
- Luvisols $T/\text{argile} > 24$ et $V > 50$
- Lixisols : $T/\text{argile} < 24$ et $V > 50$
- Alisols : $T/\text{argile} > 24$ et $V < 50$

A chacune des 6 unités sans données analytiques (tableau 1) on a attribué les valeurs des unités qui leurs étaient typologiquement les plus proches.

Du fait de la variabilité des paramètres pris en compte, chaque Grand Groupe FAO ainsi défini peut donc comporter des profils qui, s'ils avaient été considérés individuellement, auraient été rattachés à un autre Grand Groupe FAO. Nous ne discuterons pas ces contradictions qui ne devraient pas influencer beaucoup sur les résultats du travail. Nous constaterons en effet que les stocks de carbone ne sont jamais très différents et que, de ce point de vue, la plupart des Grands Groupes FAO se différencient peu les uns des autres.

Classes de texture de surface (couche 0-20 cm)

Les taux d'argile ont été calculés pour la couche 0-20 cm par interpolation linéaire des résultats d'analyse par profil. Le

calcul a été fait sur les 405 profils et a concerné toutes les unités cartographiques. Seulement 29 des 125 unités de la carte de base comportent au moins 5 profils utilisables pour le calcul. Ces unités représentent 46,9 % de la surface du Bénin (tableau 1). Pour un identifiant donné la dispersion des résultats est grande : le coefficient de variation est toujours supérieur à 30 % et peut dépasser 60 % (tableau 3).

La valeur médiane de chaque unité cartographique a été utilisée pour définir son appartenance à une classe de texture. Les seuils suivants : 5, 10, 15, 20, 30 et 50 % d'argile ont été utilisés.

Calcul des stocks de carbone

Le calcul a d'abord été fait par profils. Les corrections nécessaires pour tenir compte de la présence des éléments grossiers ont été appliquées. Le calcul volumique a été fait en prenant une densité apparente moyenne de 1,3 (Kimble et al., 1990; Sombroek et al., 1993; Batjes, 1996). Il a été fait en considérant des tranches de sol successives de 5 cm d'épaisseur. On a procédé par interpolation linéaire pour estimer leurs taux de carbone entre deux couches échantillonnées et analysées. On a extrapolé les résultats jusqu'à 1 m de profondeur en utilisant la fonction "croissance" de Excel® de Microsoft. Il s'agit d'un modèle exponentiel de la forme $x = b \cdot m^y$ reliant le taux de carbone x à la profondeur y , b et m étant des constantes calculées à partir des valeurs de x et de y connues,

Tableau 4 - Nombre de profils intervenant dans les statistiques par entités cartographiques et surfaces occupées par ces entités (CEC : capacité d'échange ; CPCS : groupes de la classification CPCS ; FAO : Grands Groupes de la Légende FAO)

Table 4 - Number of soil profiles used for statistics for each mapping unit and corresponding areas (CPCS: soil groups according to

Regroupement des profils pour le calcul des stocks de carbone										
nombre de profils	Par identifiant		par Groupe CPCS		par Grand Groupe FAO		par classe de texture et CPCS		par classe de texture et FAO	
	nombre d'entités concernées	surfaces correspondantes (%)	nombre d'entités concernées	surfaces correspondantes (%)	nombre d'entités concernées	surfaces correspondantes (%)	nombre d'entités concernées	surfaces correspondantes (%)	nombre d'entités concernées	surfaces correspondantes (%)
0	9	4,3	2	1,0	2	1,0	2	1,0	2	1,0
1	34	8,0	2	1,5	2	1,5	13	3,0	4	1,5
2	31	19,2	4	3,3	1	3,0	6	4,9	7	6,4
3	12	12,8	0	0,0	1	1,8	4	1,3	4	2,5
4	12	9,9	1	1,0	0	0,0	6	5,1	0	0,0
5 et >5	27	45,8	11	93,1	8	92,7	15	84,7	19	88,5
total	125	00,0	20	100,0	14	100,0	46	100,0	36	100,0

et qui correspond au modèle "puissance" de Bennema (1974).

Le calcul a porté sur 376 profils. Les valeurs du stock correspondant aux tranches 0-20, 0-50 et 0-100 cm de profondeur ont été retenues.

Les profils ont ensuite été triés et regroupés suivant différentes classifications (tableau 4) :

- par unités cartographiques de la carte de base (identifiants),
- par Groupes CPCS,
- par Grands Groupes de la Légende FAO,
- par classes de texture de surface des Groupes CPCS
- par classes de texture de surface des Grands Groupes FAO.

Une statistique simple a été faite dans chaque cas avec calcul de la moyenne, de la médiane, et de l'écart type pour les couches 0-20, 0-50 et 0-100 cm.

Dans le cas du tri par classes de texture de surface des Grands Groupes FAO on a fait un calcul complémentaire. On a considéré séparément les classes appartenant aux plateaux du bassin sédimentaire côtier (figure 2) de manière à dissocier les sols des zones des savanes typiques des sols du sud qui se trouvent sous une végétation à dominante forestière.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Stocks de carbone par unités de la carte de base

Lorsqu'on calcule le stock de carbone par unité cartographique on constate que certaines n'ont de profils analysés (tableau 4). Pour 49,9 % du territoire du Bénin, il y a 1 à 4 profils analysés seulement. Il y a 5, ou plus de 5, profils analysés pour 27 unités qui représentent ensemble 45,8 % de la surface totale du Bénin (tableau 4). On note aussi qu'à l'intérieur de ces unités la variabilité des valeurs du stock est toujours grande (tableau 5).

Cette variabilité et le faible nombre de profils analysés posent le problème de la validité d'une estimation du stock total qui serait basée sur un petit nombre d'échantillons par unité cartographique.

Stocks de carbone par Groupes CPCS et par Grands Groupes FAO

On a procédé dans ce cas à un très large regroupement (20 Groupes CPCS et 14 Grands Groupes FAO). Seuls 11 des 20 Groupes CPCS et 8 des 14 Grands Groupes FAO ont plus de 5

Tableau 5 - Statistiques sur les stocks de carbone en kg/m² des tranches 0-20 cm et 0-100 cm dans quelques unités cartographiques de la carte de base (IDENT : n° identifiant de l'unité; CT* : classe de texture de 0 à 20 cm de profondeur; NB : nombre de profils; MOY : moyenne; MED : médiane; MIN : valeur minima; MAX : valeur maxima; ET : écart type)

Table 5 - Statistics on the organic-carbon stocks (kg/m²) in the upper 20 cm and 0-100 cm layers in various units of the reference soil map (IDENT: label number of the unit; CT* : texture class of the upper 20 cm layer; NB : number of profiles; MOY: mean; MED: median; MIN: minimum value; MAX: maximum value; ET: standard deviation)

IDENT	SOUS CLASSE CPCS	CT*	Carbone 0-20 cm (kg/m ²)						Carbone 0-100 cm (kg/m ²)					
			NB	MOY	MED	MIN	MAX	ET	NB	MOY	MED	MIN	MAX	ET
85	Ferrallitique	2	10	3,0	2,4	1,8	5,2	1,2	10	6,6	6,4	2,9	9,8	2,0
86	Ferrallitique	3	10	2,9	2,6	1,6	4,3	0,9	10	6,9	7,3	3,9	9,4	2,4
88	Ferrallitique	5	5	5,2	4,3	2,2	10,1	3,0	5	12,1	12,2	4,3	25,6	8,7
80	Ferrugineux	2	10	2,4	2,0	1,3	4,4	1,1	10	4,8	4,5	3,1	7,3	1,4
31	Ferrugineux	2	6	2,1	1,8	1,5	3,6	0,7	6	4,6	3,8	3,2	6,9	1,7
32	Ferrugineux	2	6	2,2	2,2	1,5	2,6	0,4	6	5,2	5,3	3,5	7,1	1,5
35	Ferrugineux	2	9	2,4	2,5	1,2	3,5	0,8	9	5,0	5,1	3,0	7,0	1,2
40	Ferrugineux	2	10	1,4	1,4	0,8	2,1	0,4	10	3,1	3,0	2,3	4,4	0,6
41	Ferrugineux	2	7	1,7	1,4	1,0	3,0	0,8	6	3,4	3,0	2,3	5,3	1,1
42	Ferrugineux	2	5	1,9	1,7	1,1	3,9	1,1	5	4,5	4,2	2,3	6,3	1,6
43	Ferrugineux	2	7	2,8	3,6	1,0	3,8	1,3	7	5,7	6,4	2,1	8,8	2,4
45	Ferrugineux	2	10	2,2	2,1	1,3	3,6	0,7	10	5,1	4,8	3,5	8,0	1,5
46	Ferrugineux	2	6	1,6	1,6	1,1	2,1	0,4	6	3,8	3,7	2,4	4,9	0,9
48	Ferrugineux	2	11	2,6	2,3	1,3	3,9	0,9	11	4,7	4,7	2,7	6,2	1,3
53	Ferrugineux	2	6	2,4	2,3	1,6	4,0	0,9	6	5,4	4,9	4,3	8,8	1,7
560	Ferrugineux	2	5	1,9	1,2	1,0	3,1	1,1	5	4,2	2,9	2,6	8,5	2,5
44	Ferrugineux	3	5	1,7	1,6	1,1	2,5	0,5	5	3,6	3,2	3,0	4,6	0,8
57	Ferrugineux	3	6	2,5	2,1	1,9	4,3	0,9	6	5,2	4,9	3,4	8,1	1,6
68	Ferrugineux	3	9	2,8	2,8	1,7	4,3	1,0	9	5,8	6,4	3,0	9,3	2,1
570	Ferrugineux	3	13	2,6	2,0	1,3	6,2	1,3	13	4,8	4,5	3,3	8,5	1,5
16	Ferrugineux	3	6	1,6	1,6	0,9	2,6	0,6	6	4,1	3,6	3,4	6,2	1,1
18	Ferrugineux	4	5	2,4	2,5	1,4	3,7	0,8	5	4,4	4,0	3,1	6,5	1,4
19	Ferrugineux	4	5	2,5	2,6	0,9	3,7	1,0	5	4,8	4,9	2,3	6,6	1,6
29	Ferrugineux	4	7	2,8	2,3	1,5	5,0	1,2	6	5,7	5,0	3,2	9,9	2,3
98	Hydromorphe	5	7	6,3	6,4	1,7	11,1	3,5	6	10,0	9,5	5,2	18,7	4,7
99	Hydromorphe	7	5	13,7	10,6	6,5	23,5	6,8	4	60,8	65,3	21,0	91,6	29,6
105	Hydromorphe	2	5	3,5	3,1	2,2	6,7	1,9	5	7,9	6,6	3,4	14,1	4,0

* 1 : <5% d'argile; 2 : 5 à 10 %; 3 : 10 à 15 %; 4 : 15 à 20 %; 5 : 20 à 30 %; 6 : 30 à 50 %; 7 : > 50 %

profils analysés (tableau 4). Les regroupements à plus de 5 profils analysés représentent néanmoins plus de 90 % de la surface totale du Bénin.

Lorsqu'on fait les regroupements par Groupes de la classification CPCS on trouve pour les sols ferrugineux lessivés, groupe de loin le plus important (204 profils), un stock moyen

de 2,2 kg/m² dans la tranche 0-20 cm et de 4,5 dans la tranche 0-100 cm. Le coefficient de variation reste élevé, de l'ordre de 40 % (tableau 6). Pour la tranche 0-50 cm les valeurs sont de 3,2 kg/m². On obtient des stocks semblables pour les autres Sols Ferrugineux et les Sols Ferrallitiques. Seuls les sols ferrallitiques faiblement désaturés appauvris, qui constituent

Tableau 6 - Statistiques sur les stocks de carbone en kg/m² des tranches 0-20 cm et 0-100 cm dans quelques groupes de sols selon CPCS (NB : nombre de profils; MOY : moyenne; MED : médiane; MIN : valeur minima; MAX : valeur maxima; ET : écart type)

Table 6 - Statistics on the organic-carbon stocks (kg/m²) in the upper 20 cm and 0-100 cm layers in various soil mapping units defined according to the soil groups of the CPCS classification (NB : number of profiles; MOY: mean; MED: median; MIN: minimum value; MAX: maximum value; ET: standard deviation)

NOM CPCS	Carbone 0-20 cm (kg/m ²)						Carbone 0-100 cm (kg/m ²)					
	NB	MOY	MED	MIN	MAX	ET	NB	MOY	MED	MIN	MAX	ET
Peu évolué d'apport	9	2,8	2,7	0,7	5,4	1,5	9	5,3	5,1	1,2	11,8	3,4
Sol brun eutrophe	5	3,6	2,3	1,2	8,1	2,8	5	7,3	5,4	2,7	12,8	4,8
Ferrugineux peu lessivé	49	2,4	2,3	0,9	5,0	1,0	47	4,9	4,7	2,3	9,9	1,7
Ferrugineux lessivé	204	2,2	2,0	0,8	10,7	1,0	199	4,5	4,1	1,9	17,6	1,9
Ferrugineux appauvris	14	2,4	2,2	1,3	4,4	0,9	13	5,1	5,4	3,1	7,3	1,3
Ferral. faibl. désat. appauvris	33	3,8	3,4	1,6	10,1	1,8	33	7,9	7,3	2,9	25,6	4,2
Ferral. faibl. désat. rajeunis	8	2,1	1,7	1,0	5,3	1,4	8	4,1	4,0	1,9	7,9	1,8
Ferral. moyen. désat. typique	6	2,6	2,4	1,3	4,3	1,3	6	5,8	4,8	3,3	9,2	2,6
Hydromorphe humique à gley	12	9,4	8,4	1,7	23,5	6,2	10	30,3	14,8	5,2	91,6	31,5
Hydromorphe à gley	10	4,3	2,5	1,3	11,6	3,6	9	9,3	6,7	3,1	21,4	6,8
Hydromorphe à pseudo gley	12	4,6	4,6	2,2	7,8	1,8	10	9,8	10,5	3,4	16,1	4,1

l'essentiel de la couverture des plateaux du bassin sédimentaire côtier (figure 2), présentent des valeurs nettement plus élevées. Le stock moyen de carbone de ces sols ferrallitiques est de 3,8 kg/m² dans la tranche 0-20 cm et de 7,9 kg/m² dans la tranche 0-100 cm (tableau 6). Il est à noter qu'il s'agit des sols de la zone la plus humide du Bénin.

Avec les Grands Groupes FAO on a un autre mode de regroupement qui présente l'avantage de prendre en compte la nature de l'argile et l'acidité, deux paramètres déterminants pour le carbone du sol. Les Luvisols et Alisols sont des sols à argile du type 2/1 à capacité d'échange élevée, et les Lixisols et Acrisols sont à argile du type 1/1 à capacité d'échange faible. Les Lixisols et Luvisols ont une réaction neutre alors que les Acrisols et Alisols sont des sols acides. Lorsqu'on fait le calcul du stock pour chacun de ces Grands Groupes on n'obtient cependant pas de différences significatives. En effet, quel que soit le Grand Groupe FAO considéré, les moyennes varient toujours dans un même intervalle : 2,2 à 2,6 kg/m² dans la tranche 0-20 cm, 4,6 à 5,2 kg/m² dans la tranche 0-100 cm. Les coefficients de variation restent élevés, de l'ordre de 40 % (tableau 7). On peut noter que les stocks de carbone des Lixisols, Luvisols, Acrisols et Alisols du Bénin sont systématiquement inférieurs à ceux qui ont été calculés par Sombroek et al. (1993) et Batjes (1996) pour l'ensemble de la zone tropicale. L'écart est particulièrement net pour les Acrisols.

On peut supposer que des différences qui pourraient exister entre ces regroupements sont masquées du fait des disparités

des textures de surface des unités cartographiques regroupées. Les regroupements peuvent en effet comporter des unités à texture de surface très différentes. La diversité de texture des unités regroupées est certainement plus grande pour les Grands Groupes FAO que pour les Groupes CPCS qui intègrent davantage la notion d'intensité de différenciation texturale des profils dans leur définition. Nous comparons les résultats obtenus ici à ceux du calcul fait par classes de texture.

Stocks de carbone par classes de texture de surface des Groupes CPCS et des Grands Groupes FAO

La prise en compte de la texture de surface (couche 0-20 cm) dans les Groupes CPCS permet de définir 44 combinaisons classes de texture/Groupes CPCS. L'ensemble des unités comportant 5, ou plus de 5, profils analysés occupe une part importante (85 %) de la superficie du Bénin (tableau 4). Pour les sols ferrugineux et pour les sols ferrallitiques les valeurs de stock sont sensiblement celles qui avaient déjà été trouvées (tableau 8). On constate que les coefficients de variation restent toujours élevés. L'effet de la texture - réduction normale du stock de carbone pour les textures les plus sableuses - semble marquer davantage les sols ferrallitiques que les sols ferrugineux.

La prise en compte de la texture de surface dans les Grands Groupes FAO permet de définir 34 combinaisons; 19 d'entre elles comportent au moins 5 profils analysés et occupent 88,5 % de la

Tableau 7 - Statistiques sur les stocks de carbone en kg/m² des tranches 0-20 cm et 0-100 cm dans quelques Grands Groupes de sols selon FAO (NB : nombre de profils; MOY : moyenne; MED : médiane; MIN : valeur minima; MAX : valeur maxima; ET : écart type)

Table 7 - Statistics on the organic-carbon stocks (kg/m²) in the upper 20 cm and 0-100 cm layers in various soil mapping units defined according to FAO Legend Great Groups (NB : number of profiles; MOY: mean; MED: median; MIN: minimum value; MAX:

NOM FAO	Carbone 0-20 cm (kg/m ²)						Carbone 0-100 cm (kg/m ²)					
	NB	MOY	MED	MIN	MAX	ET	NB	MOY	MED	MIN	MAX	ET
Fluvisol	27	4,2	3,6	0,7	11,6	2,6	24	8,7	6,7	1,2	21,4	5,4
Cambisol	5	3,6	2,3	1,2	8,1	2,8	5	7,3	5,4	2,7	12,8	4,8
Lixisol	121	2,6	2,2	0,8	10,7	1,5	119	5,2	4,4	2,2	25,6	3,1
Luvisol	78	2,2	2,0	1,0	5,0	0,9	75	4,7	4,5	1,9	9,9	1,5
Acrisol	85	2,4	2,0	1,0	6,8	1,2	83	5,0	4,4	2,1	13,9	2,1
Alisol	33	2,2	2,1	1,1	4,2	0,8	32	4,6	4,2	1,9	10,2	1,8
Vertisol	8	6,1	5,5	3,4	9,9	2,0	8	14,9	15,2	9,5	20,2	3,6
Histosol	12	9,4	8,4	1,7	23,5	6,2	10	30,3	14,8	5,2	91,6	31,5

Tableau 8 - Statistiques sur les stocks de carbone en kg/m² des tranches 0-20 cm et 0-100 cm dans quelques classes de texture de surface de Groupes de sols selon CPCS (CT* : classe de texture de 0 à 20 cm de profondeur; NB : nombre de profils, MOY : moyenne; MED : médiane; MIN : valeur minima; MAX : valeur maxima; ET : écart type)

Table 8 - Statistics on the organic-carbon stocks kg/m²) in the upper 20 cm and 0-100 cm layers in some soil texture classes of the mapping units defined according to the soil groups of the CPCS classification (CT* : texture class of the upper 20 cm layer; NB : number of profiles; MOY: mean; MED: median; MIN: minimum value; MAX: maximum value; ET: standard deviation)

NOM CPCS	CT*	Carbone 0-20 cm (kg/m ²)						Carbone 0-100 cm (kg/m ²)					
		NB	MOY	MED	MIN	MAX	ET	NB	MOY	MED	MIN	MAX	ET
Ferrugineux peu lessivé	2	5	1,9	1,8	1,3	3,1	0,7	5	4,3	4,3	3,0	6,4	1,4
Ferrugineux peu lessivé	3	10	1,8	1,8	0,9	2,7	0,6	10	4,5	3,9	3,4	6,3	1,2
Ferrugineux peu lessivé	4	24	2,4	2,3	0,9	5,0	1,0	23	4,8	3,8	1,7	8,6	1,6
Ferrugineux peu lessivé	5	10	3,1	3,4	1,6	5,0	1,1	9	6,0	6,4	2,8	8,8	2,2
Ferrugineux lessivé	2	137	2,0	1,9	0,8	4,0	0,8	135	4,2	3,9	1,9	8,8	1,5
Ferrugineux lessivé	3	49	2,4	2,2	1,0	6,2	1,0	47	4,8	4,5	2,6	9,3	1,5
Ferrugineux lessivé	4	12	3,2	2,5	1,3	10,7	2,5	12	6,6	4,8	3,2	17,6	4,1
Ferrugineux appauvris	2	14	2,4	2,2	1,3	4,4	0,9	13	5,1	5,4	3,1	7,3	1,3
Ferral. faibl. désat. appauvris	2	10	3,0	2,4	1,8	5,2	1,2	10	6,6	6,4	2,9	9,8	2,0
Ferral. faibl. désat. appauvris	3	16	3,6	3,3	1,6	6,3	1,4	16	7,1	7,3	3,9	9,8	2,1
Ferral. faibl. désat. appauvris	5	6	5,0	4,2	2,2	10,1	2,8	6	11,3	9,7	4,3	25,6	8,0
Ferral. faibl. désat. rajeunis	2	5	1,6	1,9	1,0	2,1	0,5	5	3,9	4,4	2,4	4,6	0,9
Hydromorphe humique à gley	5	7	6,3	6,4	1,7	11,1	3,5	6	10,0	9,5	5,2	18,7	4,7
Hydromorphe humique à gley	7	5	13,7	10,6	6,5	23,5	6,8	4	60,8	65,3	21,0	91,6	29,6
Hydromorphe à pseudo gley	2	5	3,5	3,1	2,2	6,7	1,9	5	7,9	6,6	3,4	14,1	4,0

* 1 : <5% d'argile; 2 : 5 à 10 %; 3 : 10 à 15 %; 4 : 15 à 20 %; 5 : 20 à 30 %; 6 : 30 à 50 %; 7 : > 50 %

Tableau 9 - Statistiques sur les stocks de carbone en kg/m² des tranches 0-20 cm et 0-100 cm dans quelques classes de texture de surface de Grands Groupes de sols selon FAO (CT* : classe de texture de 0 à 20 cm de profondeur; NB : nombre de profils, MOY : moyenne; MED : médiane; MIN : valeur minima; MAX : valeur maxima; ET : écart type)

Table 9 - Statistics on the organic-carbon stocks (kg/m²) in the upper 20 cm and 0-100 cm layers in some soil texture classes of the mapping units defined according to FAO Legend Great Groups (CT* : texture class of the upper 20 cm layer; NB : number of profiles; MOY: mean; MED: median; MIN: minimum value; MAX: maximum value; ET: standard deviation)

NOM FAO	CT*	Carbone 0-20 cm (kg/m ²)						Carbone 0-100 cm (kg/m ²)					
		NB	MOY	MED	MIN	MAX	ET	NB	MOY	MED	MIN	MAX	ET
Fluvisol	2	8	2,9	2,5	1,5	6,7	1,7	8	6,1	5,7	1,8	14,1	4,0
Fluvisol	5	5	3,5	3,6	2,0	4,3	0,9	4	7,3	6,2	5,0	11,8	3,1
Fluvisol	6	5	4,8	5,2	2,1	7,8	2,1	4	8,3	7,5	5,9	12,5	2,9
Fluvisol	7	7	6,8	5,6	4,0	11,6	2,8	6	15,6	15,0	12,0	21,4	3,7
Lixisol	2	54	1,9	1,8	0,8	4,0	0,7	53	4,0	3,7	2,2	8,8	1,5
Lixisol	3	37	2,8	2,6	0,9	6,3	1,3	36	5,8	5,2	2,6	9,8	2,3
Lixisol	4	21	2,7	2,5	0,9	10,7	2,0	34	5,4	4,7	2,3	17,6	2,9
Lixisol	5	9	4,9	4,3	2,2	10,1	2,2	9	10,3	8,1	4,3	25,6	6,5
Luvisol	2	50	2,0	1,9	1,0	4,4	0,7	49	4,3	4,0	1,9	8,0	1,4
Luvisol	3	7	2,7	2,4	1,9	4,1	0,7	7	5,1	5,2	3,6	5,8	0,7
Luvisol	4	13	2,6	2,3	1,2	5,0	1,2	12	5,5	5,0	2,8	9,9	2,0
Luvisol	5	6	2,7	2,9	1,6	3,6	0,8	5	5,5	5,1	3,3	8,1	1,8
Acrisol	2	44	2,3	2,0	1,0	5,2	1,1	44	4,9	4,4	2,1	9,8	2,0
Acrisol	3	33	2,2	2,0	1,0	6,2	1,0	32	4,6	4,4	3,0	8,5	1,4
Acrisol	5	6	2,6	2,2	1,3	4,3	1,3	5	5,9	4,8	2,9	9,2	3,0
Alisol	2	23	2,3	2,1	1,3	3,9	0,8	22	4,5	4,0	2,6	6,9	1,4
Alisol	3	3	2,0	2,3	1,3	2,5	0,6	3	5,5	5,8	4,3	6,3	1,1
Vertisol	6	6	5,9	5,3	3,4	9,9	2,2	6	15,3	15,2	11,1	20,2	3,3
Histosol	5	7	6,3	6,4	1,7	11,1	3,5	6	10,0	9,5	5,2	18,7	4,7
Histosol	7	5	13,7	10,6	6,5	23,5	6,8	4	60,8	65,3	21,0	91,6	29,6

* 1 : <5% d'argile; 2 : 5 à 10 %; 3 : 10 à 15 %; 4 : 15 à 20 %; 5 : 20 à 30 %; 6 : 30 à 50 %; 7 : > 50 %

surface du Bénin (tableau 4). Dans tous les cas la variabilité des valeurs du stock est élevée puisque le coefficient de variations reste compris entre 30 et 50 % (tableau 9). La relation entre le stock de carbone et la classe de texture n'est pas flagrante. On constate néanmoins (tableau 9), en ce qui concerne les Lixisols, Luvisols et Acrisols, que les moyennes et médianes les plus basses correspondent toujours aux classes de textures les plus sableuses (5 à 10 % d'argile) et que les plus élevées correspondent aux classes de textures les plus argileuses (20 à 30 % d'argile). Ceci était aussi vrai pour les classes de texture des sols ferrugineux et des sols ferrallitiques.

Des trois modes de calcul, par unité cartographique, par Groupe ou Grand Groupe, par classes de texture des Groupes et Grand Groupes, le dernier est certainement celui qui donne les résultats les plus significatifs. Il permet en effet d'attribuer

des valeurs de stock à des unités caractérisées par un nombre raisonnable de profils, ce qui n'était pas le cas avec les unités cartographiques, et de prendre en compte séparément dans un même Groupe, ou un même Grand Groupe, les sols les plus sableux à stock de carbone faible ou les sols les plus argileux à stock de carbone élevé.

Les résultats peuvent être améliorés si l'on considère que des variations de stock de carbone liées à la texture peuvent être aussi masquées lorsque les regroupements mêlent des sols de zones écologiquement différentes. C'est en particulier vrai pour les regroupements qui incluent les sols des plateaux du bassin sédimentaire côtier qui appartiennent au domaine forestier. Beaucoup de ces sols sont ferrallitiques et de ce fait ils sont pris séparément dans les calculs basés sur les unités taxonomiques CPCS. Ils se trouvent confondus avec les sols

du domaine des savanes lorsqu'on calcule le stock de carbone par Grands Groupes FAO.

Le calcul par classes de texture de surface des Grands Groupes FAO a donc été fait en isolant les Lixisols, Luvisols, Acrisols et Alisols des plateaux du bassin sédimentaire côtier des sols homologues situés dans les autres régions. Les résultats montrent que les sols sur sédimentaire sud, considérés comme "hors savanes", sont systématiquement plus riches que leurs homologues sous savane (tableau 10). Ce serait là la traduction de l'effet du climat qui est plus humide dans le sud à tendance forestière que dans la zone

de savane proprement dite. Pour les sols des plateaux du Sud les valeurs des stocks trouvées sont proches de celles qui avaient été données plus haut pour les sols ferrallitiques : 3,8 kg/m² pour la tranche 0-20 cm, 7,9 kg/m² pour la tranche 0-100 cm. Pour les sols sous savanes les stocks sont de 2,2 kg/m² dans la tranche 0-20 cm, 4,5 kg/m² dans la tranche 0-100 cm.

Stock de carbone dans les sols du Bénin

Le stock total a été calculé par identifiant, par Groupe CPCS, par Grand Groupe FAO, par classe de texture de surfa-

Tableau 10 - Comparaison des stocks de carbone en kg. m⁻² des tranches 0-20 cm et 0-100 cm de sols sous savane et de sols hors savanes (Plateaux du sédimentaire Sud) : exemple d'une classe de texture de surface de Lixisols et d'une classe de texture de surface d'Acrisols (CT* : classe de texture de 0 à 20 cm de profondeur; NB : nombre de profils, MOY : moyenne; MED : médiane; MIN : valeur minima; MAX : valeur maxima; ET : écart type)

Table 10 - Organic-carbon stocks (kg/m²) in the upper 20 cm and 0-100 cm layers in a Lixisol texture class and a Acrisol texture class : comparison between soils under savanna vegetation and soils outside of the savanna areas (Soils of the South sedimentary basin plateaus) (CT* : texture class of the upper 20 cm layer; NB : number of profiles; MOY : mean; MED : median; MIN : minimum value; MAX : maximum value; ET : standard deviation)

NOM FAO	CT*	Carbone 0-20 cm (kg. m ²)						Carbone 0-100 cm (kg. m ²)					
		NB	MOY	MED	MIN	MAX	ET	NB	MOY	MED	MIN	MAX	ET
Lixisol sous savanes	3	21	2,3	1,9	0,9	4,4	0,9	20	4,7	3,8	2,6	9,3	1,9
Lixisol hors savanes	3	16	3,6	3,3	1,6	6,3	1,4	16	7,1	7,3	3,9	9,8	2,1
Acrisol sous savanes	2	27	1,9	1,8	1,0	3,9	0,8	21	4,1	4,2	2,2	8,5	1,4
Acrisols hors savanes	2	17	2,9	2,6	1,0	5,2	1,2	17	6,2	6,4	2,1	9,8	2,1

* 2 : 5 à 10 % d'argile; 3 : 10 à 15 % d'argile

Tableau 11 - Stock de carbone dans les sols du Bénin, stock total en Pg (1 015 g) et moyennes en kg par mètre carré dans les couches 0-20, 0-50 et 0-100 cm, selon les entités cartographiques utilisées (FAO# valeurs calculées en considérant séparément les unités en dehors des zones de savanes).

Table 11 - Soil organic-carbon stocks in Benin: total stock (Pg = 1 015 g) and mean values (kg/m²) in the 0-20, 0-50 and 0-100 cm layers according to the used mapping units (FAO# separate estimates for soils under savanna and soils outside of the savanna areas)

Entités cartographiques	0-20 cm		0-50 cm		0-100 cm	
	C total (Pg)	C (kg/m ²)	C total (Pg)	C (kg/m ²)	C total (Pg)	C (kg/m ²)
Identifiants*	0,2513	2,26	0,4105	3,70	0,5258	4,74
Groupes CPCS**	0,2525	2,19	0,4116	3,57	0,5428	4,71
Grands Groupes FAO**	0,2521	2,19	0,4076	3,54	0,5266	4,57
Classes texturales CPCS**	0,2601	2,26	0,4243	3,69	0,5422	4,71
Classes texturales FAO**	0,2572	2,23	0,4196	3,64	0,5341	4,64
Classes texturales FAO#**	0,2559	2,22	0,4152	3,61	0,5388	4,68

*seulement 96 % de la surface a été prise en compte

** pour une surface totale estimée à 115141,4 km²

ce des Groupes CPCS et par classe de texture de surface des Grands Groupes FAO. Dans tous les cas on a utilisé les valeurs des médianes. Il y a, en effet, toujours une certaine proportion d'unités comportant peu de profils analysés. De plus, les résultats étant toujours très dispersés avec de grands écarts entre les extrêmes.

Tous les modes de calcul donnent sensiblement les mêmes résultats (tableau 11).

Ceci est la conséquence du fait que, dans les catégories de sols les plus largement représentées (sols ferrallitiques et ferrugineux ou Acrisols, Luvisols, Lixisols et Alisols), le stock de carbone varie toujours dans une même large fourchette qui n'est pas, ou qui est peu modifiée lorsqu'on considère des sous ensembles définis sur des critères taxonomiques ou texturaux. Cette dispersion des valeurs est très certainement liée à la nature de l'environnement bio-climatique, c'est à dire au type de végétation et aux actions anthropiques (agriculture et feux de brousse). On constate qu'elle est de l'ordre de grandeur de la variabilité de la plupart des propriétés du sol observée à l'intérieur d'une même unité cartographique régionale (Wilding et Drees, 1983). Elle n'est donc pas particulière aux sols du Bénin.

L'imprécision due à cette variabilité serait donc toujours supérieure à l'imprécision introduite par la méconnaissance de la densité. Si l'on suppose que, pour les sols non exagérément humifères et non tourbeux, les valeurs de la densité se situent dans l'intervalle 1,0-1,6 (Kimble et al., 1990; Sombroek et al., 1993; Badjes, 1996) cela signifie, puisqu'une densité de 1,3 a été arbitrairement utilisée pour tous les sols et toutes les profondeurs, que les stocks réels peuvent varier de 25 %, en plus ou en moins, par rapport aux stocks calculés. Or on a vu que les coefficients de variations étaient toujours supérieurs à cet intervalle.

Si l'on ramène le total à une unité de surface on trouve : 2,2 kg/m² pour la tranche 0-20 cm, 3,6 kg/m² pour la tranche 0-50 cm et 4,7 kg/m² pour la tranche 0-100 cm (tableau 11). Ces valeurs sont donc très proches de celles des médianes obtenues par calcul sur les ensembles Acrisols, Luvisols, Lixisols, Alisols d'une part et sur les ensembles sols ferrugineux tropicaux d'autre part (tableau 6 et tableau 7). Le fait de prendre en compte en compte le domaine forestier du Sud ne modifie pas le résultat moyen.

Ces résultats conduisent à penser qu'au Bénin les critères taxonomiques tant CPCS que FAO, même lorsqu'ils sont associés à des critères de texture, ne sont pas pertinents vis à vis du caractère considéré, le stock de carbone à une échelle régionale. On pourrait donc envisager d'estimer ce stock sans classification en utilisant la moyenne ou la médiane d'une population de données, plus une erreur associée basée par exemple sur l'écart type de la population.

Variations régionales des stocks

Notre analyse de la distribution spatiale du stock de carbone dans les sols du Bénin s'appuie sur une carte (figure 3) établie à partir des valeurs médianes du stock de carbone de la tranche 0-100 cm calculées par classes de texture de surface des Grands Groupes FAO en isolant les sols des plateaux sédimentaires du Sud. On a considéré les seuils arbitraires suivants : 3, 4, 5, 6 et 10 kg C/m².

Il faut se rappeler que les limites définies par ces seuils n'ont qu'une faible signification du fait de la variabilité et de la similitude des valeurs centrales du stock des différentes unités cartographiques et que les correspondances FAO-CPCS ne sont qu'approximatives car elles sont tirées d'une statistique basée sur un nombre limité de profils.

On dispose néanmoins d'une carte qui rend compte de l'existence d'une distribution régionale des stocks de carbone que l'on peut associer à certains caractères de la couverture pédologique.

On constate en effet que les valeurs élevées du stock de carbone (6 à 10 kg/m²) sont surtout concentrées dans le sud, dans la zone qui correspond aux plateaux du bassin sédimentaire côtier (figure 2). La couverture de sols y est à base d'Acrisols et de Lixisols. Elle est essentiellement ferrallitique si on considère les critères CPCS. Les secteurs où les valeurs de stock sont comprises entre 4 et 5 kg/m² se regroupent au nord du 9° parallèle. Ils occupent la partie du socle cristallin où subsistent d'abondantes reliques d'un manteau d'altération kaolinique ancien (Faure et Volkoff, 1996 et 1998). Les sols qui dominent ici sont également des Acrisols et des Lixisols mais leurs équivalents CPCS sont surtout des sols ferrugineux. Les valeurs de stock faibles (3 à 4 kg/m² ou moins) se trouvent dans la partie centrale du Bénin entre les parallèles 7° et 9° sur socle cristallin à Luvisols associés à des Alisols, dans le Nord-Ouest sur les formations sédimentaire du bassin de la Volta (figure 2) où les sols dominants sont des Luvisols et sur les formations gréseuses du bassin de Kandi où les sols dominants sont des Lixisols.

Cette différenciation géographique se calque sur celle des grands ensembles pédologiques régionaux identifiés et caractérisés par Faure et Volkoff (1996 et 1998).

CONCLUSION

Les sols du Bénin constituent un ensemble géographique relativement homogène si on considère leur contenu en carbone. Les statistiques faites sur des regroupements basés sur des critères taxonomiques et texturaux montrent que, quels que soient les regroupements réalisés, la variabilité est toujours très grande et que, pour les sols les plus largement représentés, les valeurs moyennes sont toujours très proches. Il est, dans ces conditions, impossible de préciser la spécificité de tel ou tel mode de regroupement.

Toutes les valeurs varient dans une même fourchette qui semble être caractéristique des sols de l'écosystème de savanes du Bénin. Les valeurs moyennes sont de 2,2 kg de carbone par mètre carré entre 0 et 20 cm de profondeur, 3,5 kg de carbone par mètre carré dans la couche 0-50 cm et 4,5 kg de carbone par mètre carré dans la couche 0-100 cm. Il est possible que ces stocks soient sous-estimés parce qu'on a utilisé une valeur de densité arbitraire de 1,3 pour les calculer. S'il y avait sous-estimation celle-ci ne pourrait être supérieure à 25 %.

Les valeurs de stock trouvées caractérisent indistinctement l'ensemble des sols ferrugineux tropicaux si l'on se place dans le contexte de la classification CPCS et l'ensemble constitué des Acrisols, Luvisols, Lixisols et Alisols si on utilise la Légende FAO. Aucune différence significative ne peut être mise en évidence entre ces dernières catégories. L'analyse de la répartition spatiale du stock révèle cependant quelques tendances : les Luvisols et Alisols du Bénin stockeraient globalement moins de carbone que les Acrisols et Lixisols. Les Acrisols et Lixisols des zones forestières du sud contiennent généralement plus de carbone que leurs homologues sous savanes.

On montre donc ainsi que dans les sols sous savanes de cette partie de l'Afrique Occidentale, le stock de carbone organique est de 1/3 inférieur à ce qu'il a été évalué à l'échelle mondiale dans les sols appartenant aux mêmes ensembles taxonomiques (Sombroek et al., 1993; Batjes, 1996). Ce qui indiquerait que ces ensembles couvrent une gamme d'écotypes variés et différenciés du point de vue de leurs stocks de carbone, le Bénin ne représentant qu'un de ces écotypes caractérisé par des stocks de carbone faibles. On notera enfin que le stock des sols du Bénin est d'à peu près la moitié de celui que l'on trouve généralement dans les sols des écosystèmes forestiers tropicaux humides (Bernoux et al., 1998).

LISTE DES DOCUMENTS SOURCE DES DONNÉES D'ANALYSES

- Dubroeuq D., 1969 - Carte pédologique de reconnaissance du Dahomey au 1/200 000 : feuille Parakou. ORSTOM, Cotonou, 65 p. multigr.
- Dubroeuq D., 1970 - Carte pédologique de reconnaissance du Dahomey au 1/200 000 : feuille Savé. ORSTOM, Cotonou, 107p. multigr.
- Dubroeuq D., 1971 - Carte pédologique de reconnaissance du Dahomey au 1/200 000 : feuille Bante. ORSTOM, Cotonou, 122 p. multigr.
- Faure P., 1969 - Carte pédologique de reconnaissance du Dahomey au 1/200 000 : feuille Djougou. ORSTOM, Cotonou, 205p. multigr.
- Faure P., 1971 - Carte pédologique de reconnaissance au 1/200 000 du Dahomey : feuille Kouandé. ORSTOM, Cotonou, 277 p. multigr.
- Fritz C., 1996 - Soil and Site Pattern in Geomorphic Units of South Benin (West Africa). Hohenheimer Bodenkundliche Hefte n° 29, Universität Hohenheim, Stuttgart, 143 p.
- Jeanneret, J.-C. et Viennot, M., 1971 - Notice explicative de la carte pédologique à 1 : 20 000 de la vallée de l'Ouémé : Azaourissé-Hozin.

ORSTOM, Cotonou, 60 p. multigr.

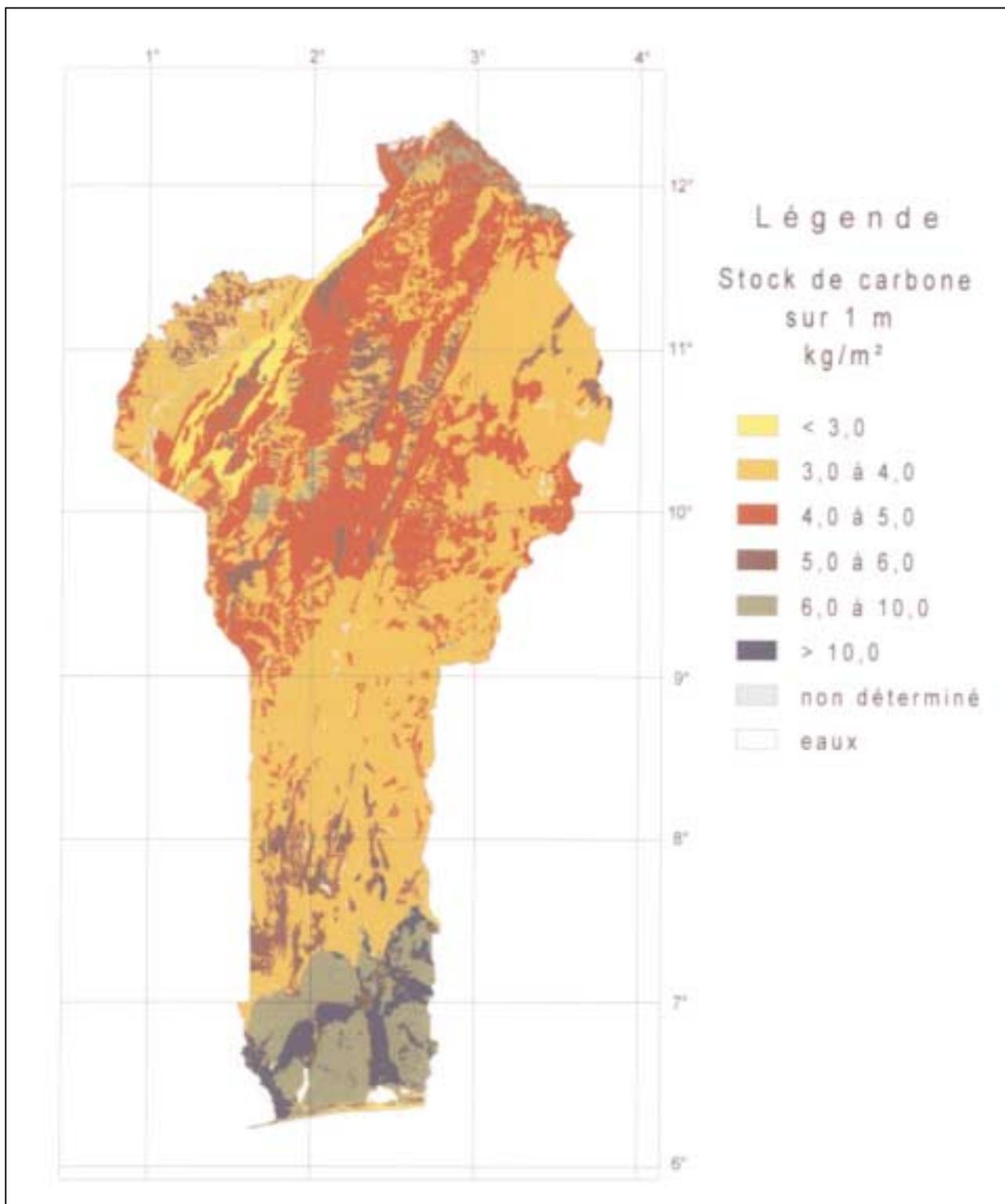
- Viennot M., 1966 - Etude de la dépression de la Lama et de ses bordures : Toffo-Sehoué-Agrimé, carte de reconnaissance au 1 : 50 000. ORSTOM, Cotonou, 85 p. multigr.
- Viennot M., 1969 - Carte pédologique de reconnaissance au 1/200 000 du Dahomey : feuille Tanguieta. ORSTOM, Cotonou, 73 p. multigr.
- Viennot M., 1969 - Carte pédologique de reconnaissance du Dahomey au 1/200 000 : feuille Bimbereke. ORSTOM, Cotonou, 71 p. multigr.
- Viennot M., 1969 - Carte pédologique de reconnaissance au 1/200 000 du Dahomey : feuille Dunkassa. ORSTOM, Cotonou, 65 p. multigr.
- Volkoff B., 1963 - Etude des sols de la région littorale : Guézin-Ouidah (carte des sols à 1/20 000). ORSTOM, Cotonou, 101 p. multigr.
- Volkoff B., 1966 - Les sols de la zone littorale du Dahomey. Notice explicative de la carte pédologique au 1/20 000 des secteurs de Ahozon-Pahou et de Djeregebe. ORSTOM, Cotonou, 50 p. multigr.
- Volkoff B., 1969 - Carte pédologique de reconnaissance au 1/200 000 du Dahomey : feuille Dassa-Zoume (socle cristallin). ORSTOM, Cotonou, 66 p. multigr.
- Volkoff B., 1970 - Carte pédologique de reconnaissance au 1/200 000 du Dahomey : feuille Porto-Novo (sédimentaire sud). ORSTOM, Cotonou, 102 p. multigr.
- Willaime P., 1959 - Les sols du confluent Tchi-Couffo. ORSTOM, Cotonou, 45 p. multigr.
- Willaime P., 1964 - Contribution à l'étude des sols de la basse vallée du Mono, carte au 1/50 000. ORSTOM, Cotonou, 87 p. multigr.
- Willaime P., 1965 - Reconnaissance pédologique de la région Nord-Est de Kétou. Notice explicative de la carte de reconnaissance au 1/50 000. ORSTOM, Cotonou, 32 p. multigr.
- Willaime P., 1965 - Les sols alluviaux du Bas Mono : Région de Lokossa-Nord. Notice explicative de la carte de reconnaissance au 1/50 000. ORSTOM, Cotonou, 79 p. multigr.
- Willaime P., 1965 - Reconnaissance pédologique de la région Nord-Est de Kétou. Notice explicative de la carte de reconnaissance au 1/50 000. ORSTOM, Cotonou, 32 p. multigr.
- Willaime P., 1965 - Notes sur les sols des régions de Dogbo et de Hinvi. ORSTOM, Cotonou, 69 p. multigr.
- Willaime, 1965 - Note sur les sols de la région Nord Kandi (Notice explicative de la carte de reconnaissance à 1/200 000). ORSTOM, Cotonou, 64 p. multigr.
- Willaime P. et Volkoff B., 1963 - Notice explicative de la carte des sols du Bénin au 1/1 000 000. ORSTOM, Cotonou, 70 p. multigr.
- Willaime P. et Volkoff B., 1966 - Notice explicative de la carte des sols au 1/5 000 du périmètre d'Agonkamey. ORSTOM, Cotonou, 18 p. multigr.

BIBLIOGRAPHIE

- Anne P., 1945 - Sur le dosage rapide du carbone organique des sols. Ann. Agron., 2 : 161-172.
- Aubert G. et Ph. Duchaufour, 1956 - Projet de classification des sols. Congrès Inter. Sc Sols, 6, Paris E : 597-604.
- Bennema J., 1974 - Organic carbon profiles in Oxisols. Pédologie, 24 (2) : 119-146.
- Batjes N.H., 1996 - Total carbon and nitrogen in the soils of the world. European Journal of Soil Science, 47 : 151-163
- Bernoux M., D. Arrouays, C. Cerri, P.M. de Alencastro Graça, B. Volkoff et J. Trichet, 1998 - Estimation des stocks de carbone des sols de Rondônia (Amazonie brésilienne). Etude et Gestion des Sols, 5 (1) : 31-42.
- Cerri C.C., M. Bernoux et G.J. Blair G.J., 1994 - Carbon pools and fluxes in

Figure 3 - Carte de la distribution de différentes classes de valeurs des médianes du stock de carbone ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) de la couche 0-100 cm, calculées par classe de texture de surface des Grands Groupes FAO.

Figure 3 - Map of the distribution of the median values of the organic-carbon stocks ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) in the 0-100 cm layer, calculated on the



- Brazilian natural and agricultural systems and the implication for the global CO₂ balance. *Trans. 15 th Int. Cong. of Soil Sci., Acapulco, Mexico, Va* : 399-406.
- CPCS (Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols). 1967. *Classification des sol*. Grignon, France, 96 p.
- Detwiler R.P., 1986 - Land use change and the global carbon cycle : The role of tropical soils. *Biogeochemistry*, 2 : 67-93
- Dubroeuq D. - 1977a - Carte pédologique de Reconnaissance de la République Populaire du Bénin à 1/200 000 : Feuille Savé. ORSTOM, Notice explicative n° 66 (3), 45 p.
- Dubroeuq D., 1977b - Carte pédologique de Reconnaissance de la République Populaire du Bénin à 1/200 000 : Feuille Parakou. ORSTOM, Notice explicative n° 66 (5), 37 p.
- Eswaran H., van Den Berg E. et Reich P., 1993 - Organic carbon in soils of the world. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57 : 192-194.
- FAO-UNESCO, 1974 - *Soil Map of the World 1 : 5 000 000, Vol. IV, Africa*, Unesco, Paris
- FAO-UNESCO, 1990 - *Soil Map of the World : Revised Legend*. Reprinted, FAO, Unesco, ISRIC, Rome, 119 pp.
- Faure P., 1977a - Carte pédologique de Reconnaissance de la République Populaire du Bénin à 1/200 000 : Feuille Djougou. ORSTOM, Notice explicative n° 66 (4), 49 p.
- Faure P., 1977b - Carte pédologique de Reconnaissance de la République Populaire du Bénin à 1/200 000 : Feuilles de Natitingou et de Porga. ORSTOM, Notice explicative n° 66 (6 et 8), 68 p.
- Faure P. et Benizri. C., 1988 - FORBAN : Un logiciel infographique de cartographie thématique développé et portable sur micro-ordinateur compatible PC. SEMINFOR 1 - Premier Séminaire Informatique ORSTOM, 6-8 octobre 1987, Collection Colloques et Séminaires. ORSTOM, Paris : 299-320.
- Faure P. et Volkoff B., 1996 - Différenciation régionale des couvertures pédologiques et litho-géomorphologie sur socle granito-gneissique du Bénin (Afrique Occidentale). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, série II a*, 322 : 393-400.
- Faure P. et Volkoff B., 1998 - Some factors affecting regional differentiation of the soils in the Republic of Benin (West Africa). *Catena*, 32 : 281-306.
- Kimble, J.-M., Eswaran H. et Cook T., 1990 - Organic carbon on a volume basis in tropical and temperate soils. *Transactions of the 14 th International Congress of Soil Science*, 5 : 248-253.
- Lugo A.E. et Brown S., 1993 - Management of tropical soils as sinks or sources of atmospheric carbon. *Plant and Soil*, 149 : 27-41.
- Moraes J.-L., Cerri C.C., Melillo J.-M., Kicklighter D., Neill C., Skole D.L. et Steudler P.A., 1995 - Soil carbon stocks of the Brazilian Amazon basin. *Soil Science Society of America Journal*, 59 : 244-247.
- Ollat C. et Combeau A., 1960 - Méthode de détermination de la capacité d'échange et du pH d'un sol ; relations entre le complexe absorbant et le pH. *Sols Africains*, 5 (3) : 343-372
- Post W.M., Emmanuel W.R. , Zinke P.J. et Stangenberger G., 1982 - Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 298 : 156-159.
- Schlesinger W.H., 1986 - Changes in soil carbon storage and associated properties with disturbance and recovery. In: Trabalka, J.R.; Reichle, D.E. (eds.) *The changing carbon cycle, a global analysis*. Springer-Verlag, New York, pp. 194-220.
- Soil Survey Staff, 1975 - *Soil taxonomy. Basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. USDA, Washington, Agric. Handbook, 436, 754 p.
- Soil Survey Staff, 1992 - *Keys to Soil Taxonomy*. Agency for International Development. USDA Soil Management Support Services. Technical monograph 19, 5 th edition. Pocahontas Press Inc. Blackburg, Virginia, 541 p.
- Sombroek W.G., Nachtergaele F.O. et Hebel A., 1993 - Amounts, Dynamics and Sequestering of Carbon in Tropical and Subtropical Soils. *Ambio*, 22 (7) : 417-126.
- Viennot M., 1978a - Carte pédologique de Reconnaissance de la République Populaire du Bénin à 1/200 000 : Feuille Bimbéréké. ORSTOM, Notice explicative n° 66 (7), 45 p.
- Viennot M., 1978b - Carte pédologique de Reconnaissance de la République Populaire du Bénin à 1/200 000 : Feuille Kandi-Karimama. ORSTOM, Notice explicative n° 66 (9), 45 p.
- Volkoff B., 1976 - Carte pédologique de Reconnaissance de la République Populaire du Bénin à 1/200 000 : Feuille d'Abomey. ORSTOM, Notice explicative n° 66 (2), 40 p.
- Volkoff B. et Willaime P., 1976 - Carte pédologique de Reconnaissance de la République Populaire du Bénin à 1/200 000 : Feuille de Porto Novo. ORSTOM, Notice explicative n° 66 (1), 39 p.
- Wilding L.P. et Drees L.R., 1983 - Spatial variability in pedology. In L.P. Wilding et al. (eds) *Pedogenesis and soil taxonomy. I : Concepts and interac-*