

LE CARBONE DU SOL DANS LES TERROIRS DES SAVANES SOUDANIENNES « COTONNIERES ».

Serpantié (G)¹, Yoni (M.)², Hien (V.)³, Abbadie, (L.)², Bilgo (A.), ³Ouattara (B.)³

Résumé : Une étude des facteurs de variation du contenu en carbone du sol (SOC) a été menée en zone cotonnière du Burkina Faso, sur des parcelles appartenant à 3 territoires villageois et deux milieux morpho-pédologiques : (1) « plateaux sableux » aux sols ferrugineux légers, pauvres en SOC et (2) « bas-glacis limono-sableux » aux sols plus lourds, plus riches en SOC. Des parcelles en végétation naturelle, culture ou jachère ont été échantillonnées sur des transects village-brousse et des pédo-séquences. L'historique de chaque parcelle, qu'elle soit en culture ou en végétation spontanée, permet de déterminer l'intensité culturale (ic) subie : pseudo-climax (ic=0), culture itinérante (ic<0,33), culture à jachère (0,33<ic<0,66), cultures prolongées (11-15ans), culture permanente(16-28ans). L'horizon 0-20 cm (SOC moyen 5,4 g.kg⁻¹) a été échantillonné sur 159 parcelles, et le sol entier sur 13 cas. La teneur de surface prédit bien le contenu total à l'équilibre, par type de sol. La teneur en éléments fins explique la moitié de la variabilité. Le type de sol (plus ou moins humide et engorgé), le type de végétation en sols hydromorphes, l'intensité culturale sont les principales autres variables explicatives. Les fluctuations de C entre stades culture et jachères dans les terroirs non surpâturés sont significatives mais de faible amplitude (+17%). Quelques parcelles anormalement riches reçoivent des apports importants (fumier, sédiments fins). Les teneurs décroissent en fonction de l'intensité culturale jusqu'à un pseudo-équilibre à 20 ans de culture. Comme l'usage général de 1950 était une culture itinérante de type savane, et puisque les terres mises en culture permanente sont les plus argileuses, la perte de SOC après changement d'utilisation du sol est bien moindre que dans les modèles en usage. D'après la dynamique d'usage du sol depuis 1950, 17% maximum de C des sols cultivables a donc disparu de façon peu réversible, essentiellement dans l'horizon 0-20cm, soit seulement 2,5t/ha. Cette baisse serait cependant arrivée à son terme (fin du stock de C labile, maintien de la culture à jachère sur les terres pauvres) à condition que le travail du sol ne s'intensifie pas plus. *Mots-clé :* savanes d'Afrique, carbone, changement global, développement agricole, sols ferrugineux, Burkina.

Mots-clés : Burkina Faso, stock de C organique, savanne soudanienne, culture cotonnière, .

Soil organic carbon in sudanian savanna and "cotton" farmland. Factors and dynamics.

Abstract. A study of the factors of soil organic carbon (SOC) was performed in cotton zone of Burkina Faso, on plots belonging to 3 village territories and two morpho-pedological zones: (1) " sandy plateau " with light, dry and weak Oxisols, and (2) " silty-sandy plains " with rich loamy and humid Oxisols. Plots in natural vegetation, culture or fallow were sampled on town-bush transects and soil transects. The history of each plot (under cultivation or not) makes it possible to determine the plot farming intensity (ic): pseudo-climax (ic=0), shifting cultivation (0<ic<0,33), fallow cultivation (0,33≤ic< 0,66), prolonged cropping (11-15 years), permanent cultivation (16-28 years). The 0-20 cm layer (average SOC 5,4 g.kg⁻¹) was sampled on 159 plots, and the whole soil on 13 ones. The surface content of C predicts the total content at equilibrium, by type of soil. The content of fine elements explains half of variability. The type of soil (more or less hydromorphic), the type of vegetation on hydromorphic soils, the farming intensity are the principal other explanatory variables. The fluctuations of C between culture and fallow stages in the not overgrazed zones appear significant but of weak amplitude (+17%). Some abnormally rich soils receive external contributions (manure, fine sediments). The contents decrease according to the farming intensity until a plateau at 20 years of cropping. As the general land use of 1950 was a savanna shifting cultivation, and since

¹ IRD adresse INRA-SAD-APT, Rte StCyr , bp 78026 Versailles cedex ; serpanti@versailles.inra.fr

² ENS 46 rue d'ULM, 75230 Paris cedex 05 myoni@yahoo.fr; abbadie@ecologie.ens.fr

³ INERA Bp7192 Ouagadougou Burkina faso ; jachere@ird.bf

the chosen soils for permanent crop are most argillaceous. The loss of SOC after land-use change is quite less than in the models of use. According to dynamics of land use since 1950, 17% is the maximum of disappeared SOC, in a difficultly reversible way ($2,5\text{t.ha}^{-1}$ on 0-20cm layer). However, this fall would have come to a end (end of the stock of C unstable, maintenance of fallow cultivation on the poor soils), provided one does not intensify tillage more.

Key-words : Africa savannas, soil carbon content, global change, agricultural extension, Alfisol.

1. Problématique

Le carbone (C) du sol renvoie à deux enjeux principaux, l'un de nature globale, le changement climatique, l'autre, de portée locale, la fertilité des terres. Relier ces deux problématiques est un atout essentiel pour la recherche de solutions (Sanchez, 2000).

Parmi les réserves globales de carbone « non permanentes », la réserve « carbone organique du sol » (SOC) est souvent présentée comme une réserve stratégique bien qu'elle ne soit que de 3,3% du total : on pourrait la manipuler à court terme en vue de compenser les émissions de gaz à effet de serre (Paustian *et al.*, 1997). L'autre raison d'étudier la répartition et la dynamique réelle du SOC est que la matière organique du sol (MOS) confère aux sols (et particulièrement aux sols à kaolinites) des propriétés physico-chimiques favorisant le fonctionnement durable des écosystèmes et particulièrement des agro-écosystèmes à faible intensité d'intrants: rétention d'eau, structure, CEC, effets tampon pour les variations de pH, réservoir-tampon d'azote et autres nutriments et substrat énergétique de la microflore et des invertébrés (Piéri, 1989 ; Ridder & Van Keulen, 1990 ; Woormer *et al.*, 1998 ; Chotte *et al.*, 2001 ; Serpantié et Ouattara, 2001). **Les sols tropicaux** contiennent le tiers du SOC global (Eswaran *et al.*, 1993). Le mode d'utilisation des terres tropicales, qui évolue fortement du fait du développement économique et de la croissance démographique rurale, de la demande urbaine en vivres et en matières premières pour l'exportation est un facteur essentiel du niveau de SOC. La défriche, puis la mise en culture de différents milieux forestiers proches du climax conduit à une perte de 15 à 40% du SOC sur 1m entre 2 et 8 ans après défriche (Siband, 1974 ; Sanchez *et al.*, 1989, Paustian *et al.*, 1997). Il est donc à craindre que les milieux tropicaux soient une source nette de CO_2 plutôt qu'un puits de carbone. Tiessen *et al.* (1998) ont mis en évidence un contraste entre régions au climat similaire, du aux systèmes d'occupation du sol. **Les dynamiques actuelles** du SOC doivent donc être abordées par région.

Les zones tropicales sub-humides et semi-arides, en particulier les savanes, sont particulièrement concernées par ces interrogations, du fait de leur importance en superficie. Cependant leurs sols sont généralement pauvres en SOC. Quelle est la part du SOC dans le C total de l'écosystème de savane ? Selon les données de Manlay (2001), à raison de $4,3\text{g.kg}^{-1}$ de carbone de MOS sur 0-40cm de profondeur (et $2,5\text{g.kg}^{-1}$ sur 40-100 cm selon nos propres données), un sol de texture sableuse en surface (11% d'éléments fins, d.a.=1,5) sous vieille jachère représente l'accumulation de 51t.ha^{-1} de carbone sur 1m, alors que la biomasse épigée et hypogée est composée d'environ 29t.ha^{-1} de carbone, dont une partie (quelques t.ha^{-1}) brûle annuellement. Sur un sol pourtant réputé pauvre, le sol contient donc 2/3 du carbone organique « permanent » (donc séquestré) du milieu. **Cette importance justifie que l'on s'intéresse particulièrement au SOC.**

En Afrique, un développement agricole dynamique s'est manifesté en savanes sub-humides, sous l'impulsion de filières agro-industrielles tournées vers l'exportation de matières premières, de capacités des paysanneries locales (Bassett, 2002) et de mouvements de population accroissant la population de ces zones. Leurs potentialités ont été reconnues pour le développement des cultures annuelles (cotonnier, céréales, tubercules) qui répondent aux besoins de populations rurales croissantes (Solbrig & Young, 1993).

Que sait-on de la **répartition et des facteurs de variation du SOC tropical et des savanes** ? Le carbone du sol est principalement contenu dans la matière organique, accessoirement dans les carbonates (quasi inexistantes en zones de savane) et les suies et charbons, mal connus. La distribution verticale est plus régulière qu'en forêt, où le carbone organique est surtout contenu dans les horizons de surface (Piéri, 1989 ; Lescuyer et Locatelli, 1999). La teneur en SOC résulte d'un équilibre dynamique, par bilan d'apports et de pertes jouant sur des réserves tampon de turn-over de différentes durées, Feller, 1995). Ce niveau d'équilibre dépend fortement de la texture, du fait de l'importance jouée par les éléments fins dans la protection de la MOS vis à vis des minéralisateurs (Jones et Wild, 1975 ; Feller, 1995 ; Zech *et al.*, 1997). La richesse du sol en bases et la structure influe aussi sur la teneur en MOS selon Dabin & Maignen (1979) ; Jones (1973) met en évidence l'importance du type de sol, les sols hydromorphes apparaissant plus riches que les autres sols. L'humidité du régime climatique est aussi un facteur d'augmentation (Feller *et al.*, 1993). **La MOS varie avec l'utilisation du milieu**, les cultures réduisant la teneur en MOS vis à vis des milieux végétaux pseudo-climaciques, les jachères apparaissant intermédiaires (Feller *et al.*, 1993). Le coefficient annuel de perte nette de matière organique sous culture après une situation forestière de départ avoisine 4,7% en sols sableux, 2% en sols plus lourds (Siband, 1974 ; Piéri, 1989). Depuis Greenland et Nye (1959), jusqu'à Manlay (2001), de nombreux auteurs ont étudié les fluctuations de MOS au cours des cycles culture-jachère, avec des résultats très variables mais généralement de faibles amplitudes en sols sableux (Balasubramanian *et al.*, 1984; Areola *et al.*, 1982 ; Jones, 1971 ; ; Somé, 1996 ; Dhillon, 2000 ; Manlay, 2001).

A ces connaissances sur les variations du carbone dans les sols, il faut opposer leur difficulté de prise en compte dans le cadre d'une problématique du changement global et de la fertilité en savane, pour plusieurs raisons :

- Ces études ont plus fait référence à des **états élémentaires** d'occupation (culture, jachère, « durée de mise en culture ») qu'à **des modes de gestion à moyen terme**. Des études récentes sur les « flux de carbone » dans les terroirs ont eu lieu au Sénégal (Manlay, 2001), au Cameroun (Dugué, 1998), en montagne en Ouganda (Briggs et Twomlow, 2002), dans des conditions spécifiques mais sans toujours mettre l'accent sur les effets moyens des grands systèmes de culture : on travaille ainsi plus sur le **fonctionnement instantané d'un terroir que sur des mécanismes intégrés sur le moyen terme par zone homogène**. Une variable décrivant le mode d'utilisation d'une zone homogène pourrait être la notion de *farming system*, Ruthenberg, 1971, et plus spécialement le grand système de culture (GSC) c'est-à-dire l'agro-écosystème support du *farming system*. Ruthenberg (1971) décrit ainsi la « culture itinérante », la « culture à jachère », la « culture permanente » en fonction de la fréquence de récolte. Privilégier le GSC est une manière d'intégrer plus le facteur temps, complémentaire de la description des **états d'occupation ou des relations entre états d'occupation**. A ces modes de gestion correspond un équilibre du SOC, du moins peut-on le supposer moins variable qu'un état d'occupation.
- Les milieux de savane restent mal connus. Les effets de la mise en culture continue ont été surtout abordés par le cas de la mise en culture de situations pseudo-climaciques forestières (Siband, 1974 ; Moreau, 1993), et non à partir de savanes pseudo-climaciques. Les coefficients annuels de pertes utilisés pour la savane proviennent de recherches en conditions forestières. **Il faut reprendre la question pour une origine « savane ».**
- La culture n'intervient qu'exceptionnellement après des formations pseudo-climaciques, même de savane. Les zones anciennement désertes étant rares, la plupart des processus de mise en culture prolongée partent non pas d'un pseudo-climax mais d'une **situation antérieure de**

culture itinérante ou à jachères (Serpantié *et al.*, 2000). Une telle situation a été étudiée expérimentalement (Pichot *et al.*, 1981 ; Sédogo, 1993) sur la station de Saria (Burkina faso), mais doit être confrontée à la réalité diversifiée et complexe de territoires paysans.

- Les systèmes de culture actuels (rotations, labours annuels, engrais) sont différents des systèmes de culture de référence dans ces études souvent anciennes. Brown *et al.* 1994, et Ouattara *et al.*, 2000, indiquent que le travail du sol fréquent aggrave les pertes. **Il faudrait donc privilégier des études en milieu réel et actuelles.**

- Des travaux antérieurs réalisés dans la même région ont mis en évidence la difficulté d'analyser les variations organiques dues aux « **durées de culture** » en mode synchrone (Ouattara *et al.*, 1997): 1) les facteurs cultureux sont secondaires par rapport aux effets liés aux variations de milieu 2) La durée de culture n'est pas un critère pertinent, compte tenu des états initiaux très variés en début de mise en culture (liés à l'historique). Il faut prendre le GSC dans son ensemble.

- De plus ces GSC évoluent massivement par petites régions et zones homogènes de territoires villageois, ceux-ci constituant la maille élémentaire des paysages ruraux (Serpantié *et al.* 2000). Une cartographie des GSC intègre mieux le facteur temps qu'une cartographie de l'occupation des terres, véritable instantané. **Si on fait l'hypothèse qu'à chaque GSC, est associé un niveau moyen « quasi-stable » de MOS, on peut donc facilement modéliser l'évolution du SOC régional en couplant une étude des liens entre GSC et SOC (par voie d'enquête ou expérimentalement) à une connaissance des dynamiques agraires.**

Nous avons donc couplé à une étude des dynamiques agraires antérieure (Serpantié *et al.*, 2000) la recherche présentée ici sur les facteurs de variation dans les sols *in vivo*, particulièrement le facteur GSC. La démarche de base est donc **synchrone** : explorer sur une région pertinente la **variabilité** actuelle des teneurs des sols en les classant par type de milieu et grands systèmes de culture. La discussion établira des comparaisons entre ces données **synchrone**s et des recherches expérimentales **diachroniques**.

2. Cadre de l'étude

Notre propos visera plus précisément la grande zone cotonnière d'Afrique de l'Ouest (Sud-Mali ;Ouest-Burkina ;Nord Côte d'Ivoire) dont nous étudierons la zone cotonnière du Burkina (fig 1a). Elle est située dans la partie médiane de la zone soudanienne (pluviosité : 900 mm de mai à septembre). Dans cette région, la culture permanente et à travail du sol intensif, sans restitutions, s'est emparée des meilleurs sols (les sols limoneux du bas-glacis du Mou-houn; les sols limoneux sur schistes), réalisée en partie par des migrants ; tandis que les espaces aux sols moins attractifs et fragiles (plateaux, sols sur grès, sols sur granite, bas-glacis du Tuy), encore exploités en culture itinérante par les autochtones jusqu'à 1970, sont mis en culture localement de façon plus intense mais la jachère y reste toujours présente (cultures à jachères, cultures peu prolongées, Totte, 1996, Serpantié *et al.*, 2000). La densité démographique augmente peu sur les sols sableux et gravillonnaires, du fait que les migrants ne les recherchent pas et que les autochtones les défendent (Serpantié *et al.*, 2000) (fig 1c). Elevage extensif et agriculture à base d'une succession cotonnier-céréales sont moyennement intégrées (bétail de trait, bétail sédentaire pâture les jachères, résidus de récoltes et zones incultes, pratiques de fumier réservées aux plus aisés, transhumances de saison sèche suite aux feux qui détruisent la biomasse pâturable et au manque d'eau).

Sur le site de Bondoukuy qui est assez représentatif des plus anciennes zones cotonnières (Pvce Mouhoun, Burkina faso, 11°51'N ; 3°46'W, fig. 1b), l'étude a porté sur les **deux types de milieux** (1) « plateau sableux » aux sols ferrugineux lessivés peu désaturés (Alfisol –USA- ou Lixisols - FAO) très légers, pentus, où se développe une culture à jachère (C10J10, C7J20) à côté de reliques de culture itinérante et de quelques champs en culture permanente parfois fumée. 2) « plaines limoneuses » à sols hydromorphes et lixisols limono-sableux sous culture permanente. La zone étudiée, formant transect du plateau aux bas-glacis, est composée de quelques terroirs et d'une zone de savane pseudo-climacique réservée par le service des Eaux et Forêts.

3. Matériel et Méthodes

Deux types d'investigations ont été menées :

- la première porte sur la distribution verticale du carbone dans l'épaisseur du sol
- la seconde porte sur la répartition spatiale du contenu en C des sols à l'échelle d'un ensemble de terroirs contigus, avec recherche des facteurs de variation.

Figure 1 a : Carte de situation de la région de Bondoukuy

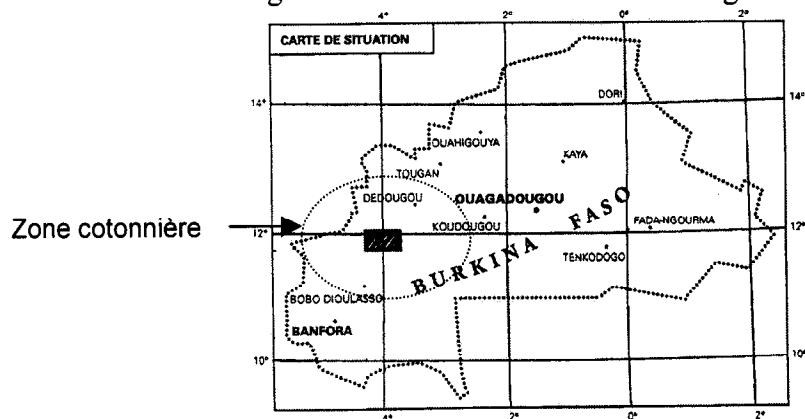


Figure 1b : Le département de Bondoukuy (1100 km², pluviosité annuelle = 900mm)

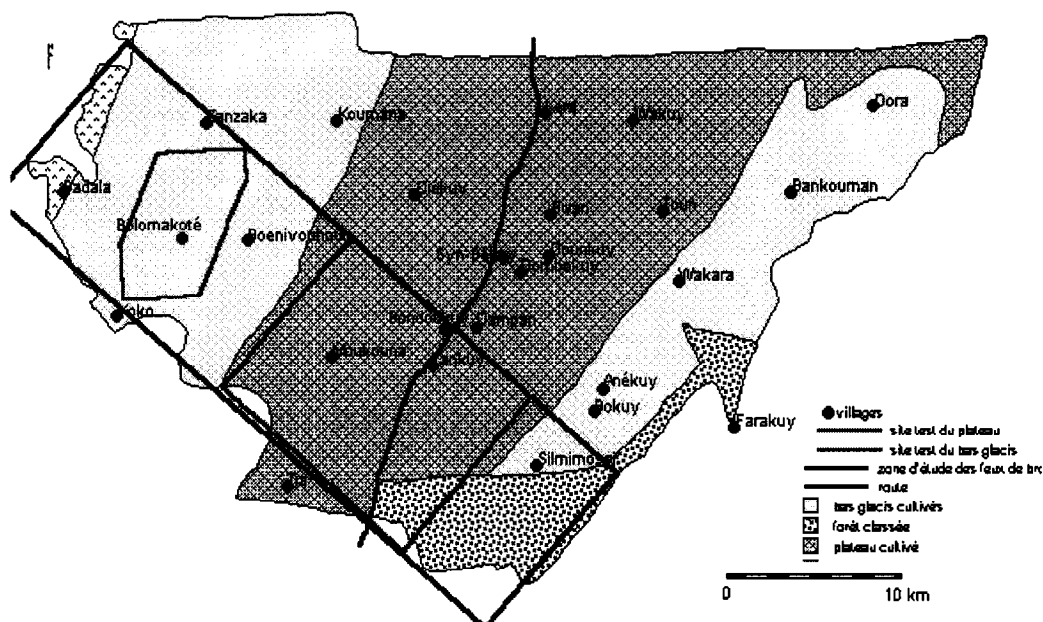
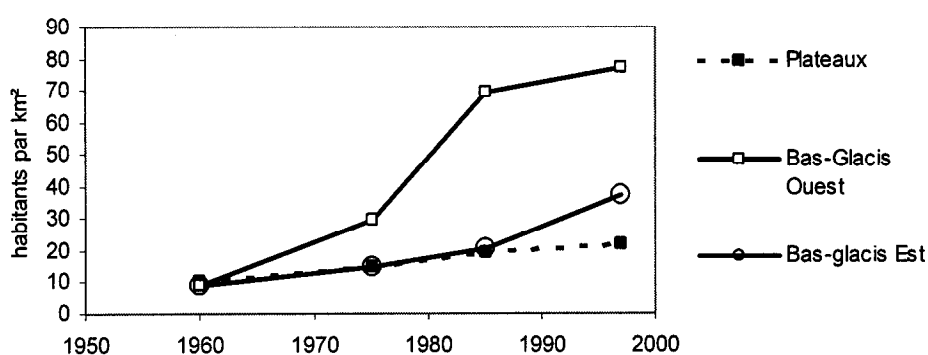


Figure 1c : Densité de population sur les trois zones homogènes du département de Bondoukou



Distribution verticale du C

Un ensemble de 13 profils de sol en mode d'utilisation culture ou jachère, étudiés par ailleurs par les pédologues de l'équipe, ont été choisis de façon à représenter l'ensemble de la gamme de sols dans la zone d'étude. La teneur en C moyenne de chaque horizon homogène a été mesurée. Nous avons ensuite testé la valeur prédictive de la mesure de teneurs de l'horizon de surface 0-20cm vis à vis du contenu en C des sols.

Dispositif extensif de prospection

Un échantillonnage par quadrillage systématique ou au hasard donnerait le stock moyen mais ne permettrait pas d'identifier les facteurs d'évolution. Nous avons donc raisonné l'échantillonnage des parcelles de façon à faire varier à la fois milieux et modes d'utilisation. Pour ce dernier domaine, nous avons étudié séparément les effets de la fréquence de récolte ou **intensité culturelle** (rapport de la durée de culture sur le temps culture+jachère dans l'historique culturel, Ruthenberg, 1971), et les effets **du stade occupé par la parcelle dans le cycle culture-jachère**. Nous avons en pratique prospecté l'ensemble des modes d'occupation possibles (formations non cultivées, jachères ou friches, cultures), les milieux édaphiques et des types de végétations principaux, et sérié

l'échantillon ensuite en fonction du type d'historique cultural, après enquêtes, tout en essayant de respecter un équilibre des effectifs de chaque modalités (tableau 1). pratiquement, la sélection fut opérée sur des pédo-séquences et des gradients d'éloignements aux zones de culture permanente. La prospection a concerné 159 parcelles d'au moins 2500 m²

Tableau 1. Facteurs de variation pris en compte dans la prospection

Type d'historique cultural ou « grand système de culture » (GSC) : pseudo-climax, culture itinérante (IC<.33), culture à jachère (0-33-0,66) (Ruthenberg, 1971). En culture permanente, les GSC se différencient suivant la durée de culture cumulée depuis l'abandon de la pratique temporaire (11-15ans ou culture prolongée, 16-28ans ou culture permanente). On classe chaque parcelle en prenant en compte la phase actuelle (culture, ou jachère) et les 2 phases précédentes. S'il existe deux jachères ou deux cultures, dont une inachevée dans l'historique, la période de référence est la plus longue .
Différents stades du « système à jachère » (phase culture 1-5, 6-10ans), phases jachère (1-5, 6-10, 11-20ans).
Les pseudo-climax de référence (savanes boisées, forêts claires, forêts denses, White, 1986) ont été prospectés dans les réserves de la zone d'étude (Forêt du Tuy) ou protégées par les villageois eux-mêmes (forêts denses de bas-fonds).
Zone morpho-pédologique (plateau, bas-glacis), Kaloga (1997), Sur le plateau, les systèmes « à jachère » ont les effectifs les plus nombreux, tandis que sur les bas-glacis, les « cultures prolongées et permanentes » sont plus nombreuses.
Végétation de type forestier (fermé, >80% de recouvrement ligneux) ou savanicole, ouvert (White, 1986).
Types de sols (induré, ferrugineux modaux, ferrallitiques, lessivé à taches, hydromorphes). Nous avons exploité les cartes pédologiques au 1/20000 de Zombre (1995), Kissou (1994) et Djimadoum & Serpantié (non publié) qui sont basées sur la classification française tropicale CPCS (1967). La classification cartographique du site a été confirmée ou corrigée par observation du sol par sondage
Distance aux villages (donnant l'intensité culturale ainsi que le degré de « dégradation » de la végétation d'origine.

Prélèvement, analyses, traitement de données

A l'échelon de la station écologique ou de la parcelle de culture, existe une forte variabilité de la teneur en C des sols. La prospection a concerné spécifiquement les espaces homogènes, cultivés, herbacés ou arbustifs, à l'exclusion des couronnes d'arbres, grosses souches et termitières, zones érodées. Il a été choisi la technique de l'échantillon unique composite. Les prélèvements ont été réalisés en saison sèche, par 8 prises d'horizons 0-10 cm et 10-20 cm effectuées sur un parcours en forme de carré de 40m de côté. Les 16 prises ont été mélangées pour donner un seul échantillon composite représentant l'horizon moyen 0-20 cm de la parcelle.

La granulométrie 5 fractions (A<2μ, Lf 2-20μ, Lg 20-50μ, Sf 50-200μ, Sg 200-2000μ) a été systématiquement mesurée sur la fraction minérale de la terre fine. Les éléments fins EF sont les particules inférieures à 20μ. Le carbone total a été dosé par la méthode de Walkley-Black.

Le traitement des données a recouru à trois niveaux d'analyse.

- Sur le tableau de 159 données : les variables descriptives qualitatives (sols, GSC) ont été codées. La variable quantitative EF est conservée en variable descriptive continue. La teneur en C, variable à expliquer, a été soumise à une ANOVA selon la procédure GLM type III, appropriée aux dispositifs non équilibrés (programme SAS 8.2 sous Linux, 2002).

- Des ajustements par régression linéaire, par type de sol et par type de végétation conduisent à des modèles précis $C = f(Ef)$. L'ajustement des résidus de ces modèles à une loi de probabilité normale permet d'identifier des teneurs anormales, à éliminer ou conserver après élucidation.

- Les facteurs GSC ont des effets subtils. L'importance du rôle des éléments fins conduit à distinguer deux grands types de texture (sols légers, 5-25% EF, appartenant soit aux plateaux, soit au bas-glacis), sols lourds (25-60%EF, sur bas-glacis seulement). Compte tenu du déséquilibre de l'échantillon, les données de C sont standardisées pour une teneur en EF de référence par correction des données à partir de la pente du modèle linéaire $C=f(Ef)$. On analyse les effets des facteurs sur les données corrigées, par ANOVA.

3. Résultats

Répartition verticale du carbone et valeur prédictive des mesures de C en surface

La fig.2 présente les profils verticaux de teneurs en carbone. On distingue fig 2a deux ensembles, les profils sableux, pauvres en C, et les sols limoneux de bas-glacis, deux fois plus

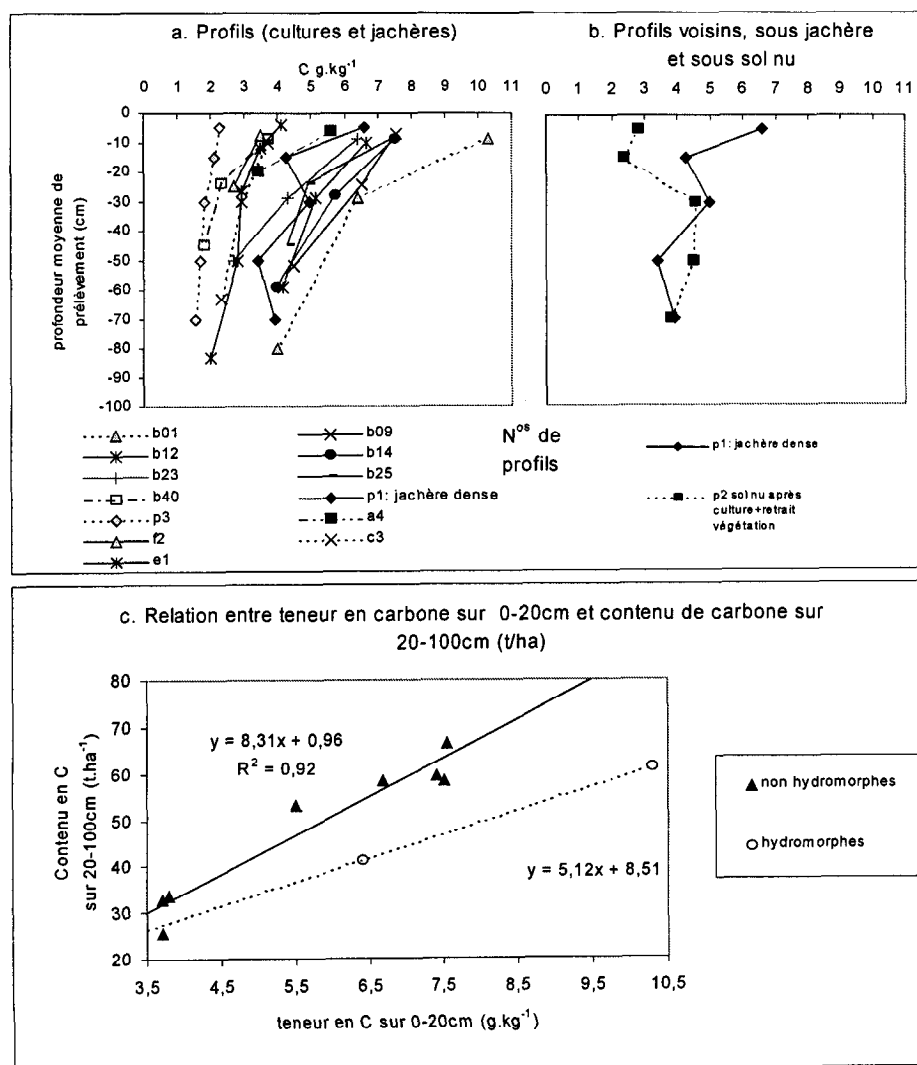


Figure 2. Profils de carbone et valeur de l'indice de teneur de C sur 0-20cm

riches.

A l'échelle du profil, le C diminue toujours en profondeur, mais plus ou moins. Les profils s'ordonnent de la même façon en surface et en profondeur, ce qui annonce la possibilité d'estimer le contenu total de carbone à partir de la seule teneur de surface. Les profils hydromorphes (B1, B23) représentent une exception, car ils ont des teneurs en C élevées en surface et faibles en profondeur. Aussi l'horizon de surface y est un indicateur surestimant le contenu total. La teneur en carbone varie fortement dans les couches de surface, ce qui impose d'évaluer la teneur moyenne de surface sur une couche épaisse d'au moins 0-20cm.

Les profils de densité apparente n'ayant pas été systématiquement réalisés, nous ferons des hypothèses à partir des mesures répétées en surface sur de nombreux cas. En profondeur seuls quelques profils ont été mesurés : 0-20cm : $d_a=1,5$; 20-40cm : $d_a=1,6$; <40cm : $d_a=1,7$.

La teneur en C sur 0-20cm est hautement corrélée au contenu sous-jacent sur 20-100cm à condition de différencier les types de sols entre hydromorphes et non hydromorphes (fig 2c). Aussi on peut prédire le contenu en C (en $t \cdot ha^{-1}$) (y) du sol sur 1m par la teneur x (en $g \cdot kg^{-1}$) sur 0-20cm selon la formule, valable pour les sols non hydromorphes :

$$Y=11,31x+0,96$$

Cependant, cette bonne prédictivité a des limites. La mise en culture puis la mise en sol nu par éradication de la végétation pendant une dizaine d'années aboutit à appauvrir surtout l'horizon 0-20cm (fig 2b). L'application du modèle basé sur C_{0-20cm} reste donc approché tant qu'un équilibre entre surface et profondeur n'est pas atteint. En cas d'accroissement d'intensité culturale, du fait de l'inertie des horizons profonds, les pertes estimées sur 1m seront donc fortement surestimées.

Variation spatiale du C

ANALYSE GLOBALE

La **gamme totale** varie de 0,19%C à 2,12%C, avec une moyenne de 0,54%C. La variabilité s'accroît avec le taux d'éléments fins. Il existe une corrélation significative ($p=0,05$) entre le **taux de C et le taux d'éléments fins**, ($b= 0,0174$; $r^2=0,50$) et entre le taux de C et le taux d'argile ($r^2=0,50$). La corrélation est meilleure avec le taux d'éléments fins dans le cas des sols légers, qui sont les plus fréquents ($r^2=0,41$ au lieu de 0,35).

Une analyse de variance par la procédure SAS GLM type III, a été opérée sur l'ensemble des données. Le tableau 2 en donne les résultats. Les éléments fins, les sols, les grands systèmes de culture ont des effets hautement significatifs.

Tableau 2 : Analyse de variance globale

Variables analysées	Pr>F
Eléments fins	0,0001
Sols	0,0001
Grands systèmes de culture	0,0001
$R^2 = 0,83$ C.V. = 21,66	

ANALYSE DETAILLEE, FACTEURS DU MILIEU

Effets sols

Les sols hydromorphes (10 à 40cm de profondeur d'apparition du pseudo-gley), situés en bas-de pente à faible distance des thalwegs, ou sur des zones inondables, se distinguent de tous les autres sols par leurs plus fortes teneurs en C et particulièrement sous leur variante forestière (figs 3). La présence d'un fort rapport illite/kaolinite dans certains sols ferrugineux argileux hydromorphes des bas-glacis, a été révélée par des CEC anormalement élevées après comparaison du CEC observé à un modèle de régression $CEC = f(C, pH)$. Elle ne s'accompagne cependant pas d'une teneur en carbone plus élevée que les sols à kaolinite dominante.

Il s'agit globalement d'une progression selon l'engorgement et l'humidité : les sols hydromorphes sont les plus chargés en C, et les sols ferrugineux lessivés à taches et concrétions (pseudogley entre 40 et 60cm) possèdent significativement plus de C que les sols « ferrugineux modaux », rougeâtres, drainants et aérés.

Tableau 3 : Analyse de variance, effets sols sur le carbone

(Pr>F=0.001)	MOYENNE C% ET TEST DUNCAN P=0,05	ERREUR STANDARD	SANS MILIEUX FORESTIERS NI PSEUDO-CLIMAX
HYDROMORPHE FORESTIER	1,02 a	0,03	
FERRALLITIQUE	0,58 b	0,04	0,56 c
INDURÉ (PARFOIS HYDROMORPHE)	0,56 b	0,03	0,52bc
HYDROMORPHE PROFONDS AVANE	0,55 b	0,03	0,55c
LESSIVÉ, TACHES ET CONCRÉTIONS	0,48 b	0,02	0,48b
FERRUGINEUX MODAL	0,34 c	0,03	0,32a

Les sols indurés et ferrallitiques ont des teneurs en C non significativement distinctes des sols hydromorphes. Une partie des sols indurés sont hydromorphes juste au dessus de l'induration lorsqu'elle est peu perméable et le sol limoneux. Une analyse plus précise montre que parmi les sols ferrallitiques ce sont les plus limoneux; situés en piémont de collines dans les bas-glacis qui ont les plus fortes teneurs. Plus que le type de sol, ce serait donc cette position dans le paysage qui aurait favorisé cette accumulation.

Effets des types de végétation

La physionomie de végétation ligneuse des espaces non cultivés est plus ou moins dense et fermée. Alors que les sols secs sont le plus souvent couverts de végétation arborée lâche, arbustive ou buissonnante, les physionomies sont plus contrastées en sols humides. Sur les sols hydromorphes et profonds trois cas se présentent. 1) Ceux portant actuellement un couvert forestier dense ou juste défriché, généralement des forêts galeries et forêts de sources à base d'espèces de biotopes hémio-mbrophiles et ripicoles 2) Ceux déjà défrichés mais ayant porté un couvert végétal de type forestier dense dans les années 1950. Cette histoire écologique récente est attestée par interprétation de photos-aériennes de 1952, par l'observation de reliques actuelles de forêts denses, et dans les parcs arborés résultants, de reliques d'espèces sensibles au feu telles que certaines Mimosacées (*Acacia arborescens*, *Albizia*, *Dichrostachys*), ou *Anogeissus leiocarpus*. 3) ceux ayant porté dans les années 1950 une savane à bosquets. Il s'agit de prairies inondables à *Andropogon gayanus* var *bisquamulatus* et *Hyparrhennia* spp et monticules de termitières portant des bosquets). Les trois types de terrains se distinguent fortement (fig 3b). Les sols de savanes présentent près de deux fois

moins de carbone que les sols forestiers. Les forêts anciennement défrichées ont des teneurs intermédiaires. Il y a interaction avec le taux d'éléments fins : plus le sol est argileux, et plus les classes de végétation discriminent fortement la teneur en C, révélant une interaction positive entre végétation et argile.

Effets de la zone morpho-pédologique

La situation morpho-pédologique joue aussi un rôle : à teneur en EF et type de sols identiques (par exemple sur les sols ferrugineux modaux), les sols de plateau sur grès grossiers ($\text{pH} < 6$) sont plus pauvres en C que les sols sur grès schisteux des plaines de bas-glacis, parfois carbonatés ($\text{pH} > 6$). C'est pourquoi nous étudierons séparément, pour les sols légers, les terroirs de bas-glacis et ceux de plateau.

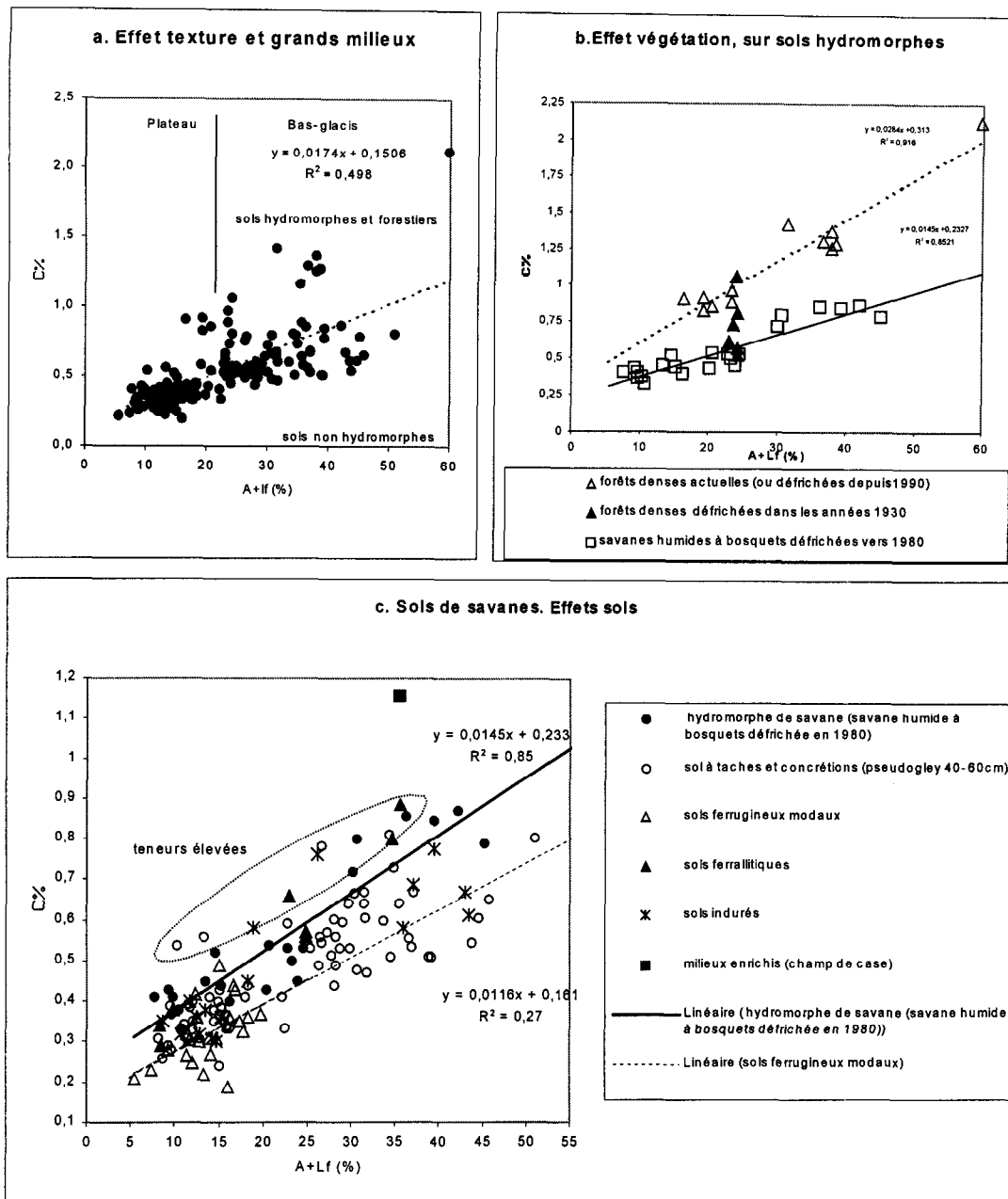


Figure 3 : Effets des caractères permanents du milieu sur la teneur en carbone du sol

Facteurs expliquant des teneurs anormalement élevées ou basses

Au sein des sols classés profonds non hydromorphes représentés par 118 parcelles, les résidus de la régression $C=f(Ef)$ suivent une loi normale, cependant les fortes valeurs s'écartent de la fonction de répartition normale (fig.3c). Ces teneurs anormales ne correspondent pas à des systèmes de culture particulièrement enrichissants. Il s'agit de cultures de longue durée sans restitutions et de jachères arbustives. L'historique connu n'indique pas de parc à bétail. La CEC observée correspond à celle prédite par le modèle $f(pH, C)$ des sols à kaolinite. Nous avons aussi vérifié qu'ils ne correspondent pas à des sols dont les éléments fins seraient surtout composés d'argile. Ces 8 cas particuliers ont été cependant élucidés en prenant en compte leurs constituants et des phénomènes de transferts.

- un cas de fumure organique à forte dose sur sol induré (champ de case, non pris en compte dans la régression),

- 2 cas de sols indurés limoneux à pseudogley au dessus de l'induration (donc hydromorphes),
- 3 cas de sols ferrallitiques limoneux rouges-bruns situés en piémont de relief cuirassé. Une hypothèse explicative porte sur une teneur en fer libre élevée permettant une séquestration efficace du carbone par les sesquioxydes (complexes humo-ferriques, Perraud *et al.*, 1971). Ces sols sont aussi très favorables à une végétation de forêt claire, de part leur bonne profondeur utile (Kaloga, 1997). Ils peuvent donc aussi receler une grande quantité de MOS d'origine forestière.
- 2 cas de sols ferrugineux lessivés situés à l'aval d'une vaste zone cultivée. Pour ces terrains, l'explication porte sur une situation actuelle ou passée d'écotone « absorbant » situé à l'aval d'un espace « ruisselant ». Dans un cas, la jachère est dense et enrichie en C sur tout le profil. Le processus de captures d'eaux de surface et de leur charge solide sur de tels écotones a été prouvé expérimentalement à Bondoukuy même (Fournier *et al.*, 2000 ; Bilgo *et al.*, 2002).

Les teneurs très basses s'écartant aussi de la courbe de répartition de probabilité normale s'expliquent facilement. Ce sont des sites en culture prolongée ou permanente, sur sols ferrugineux drainants du plateau, et des cultures permanentes labourées chaque année sur sols sableux « à taches et concrétions ». Le mode de gestion explique donc ces valeurs.

ANALYSE DÉTAILLÉE, FACTEURS HUMAINS

Pour cette analyse, les cas particuliers à teneur anormalement élevée ont été éliminés. Nous travaillons ici sur les données corrigées par rapport à une teneur en EF standard, par type de sol.

Sols légers

Les trois types de sols pour lesquels nous disposons de nombreuses données (hydromorphes, à taches, modaux) ont des coefficients de correction b proches : $b=0,0076$ (hydromorphes de savane, $r^2=0,51$) ; $0,0094$ (ferrugineux lessivés à taches, $r^2=0,31$) ; $0,0099$ (sols ferrugineux modaux, $r^2=0,21$)

Le carbone corrigé décroît avec l'intensité culturale (fig 4a, tab 4). **Il existe un effet du système de culture significatif et à forte amplitude.** Cette amplitude est d'autant plus forte que les sols sont humides. La différence entre sols humides et sols secs s'annule en cas de persistance de la culture, **ce qui indique que la matière organique qui s'accumule en sols humides dans les systèmes temporaires est une matière organique peu stable.**

Tableau 4. Analyse de variance du C% corrigé, sur sols légers du plateau

Facteur système de culture S (Pr>F 0.001)	N	MOYENNE C%	TEST DUNCAN À P=0,05
PSEUDO-CLIMAX	2	0,45	non pris en compte
CULTURE ITINÉRANTE	7	0,41	a
CULTURE PERMANENTE, FUMIER	3	0,41	non pris en compte
CULTURE À JACHÈRES	40	0,34	b
TRANSITION VERS CULTURE PERMANENTE (11-15 ANS)	5	0,29	bc
CULTURE PERMANENTE 16-25 ANS	8	0,28	c

Les pseudo-climax, culture itinérante, et culture avec fumier intensif (rare) ont le meilleur taux de carbone.

La culture à jachère a une moindre teneur que la culture itinérante (-17%). Dans les sols les plus secs, les cultures à jachères constituent un pallier avant la culture prolongée.

La culture permanente donne un taux de carbone encore plus faible, mais peu différent de la transition (moins 3,5%) ce qui suggère un **relatif équilibre atteint dès la transition**. La perte de carbone après culture itinérante est donc forte pendant la phase de transition puis diminue ensuite (**moins 2,8% par an pendant 12 ans puis -0,3% par an pendant les 8 ans suivants**).

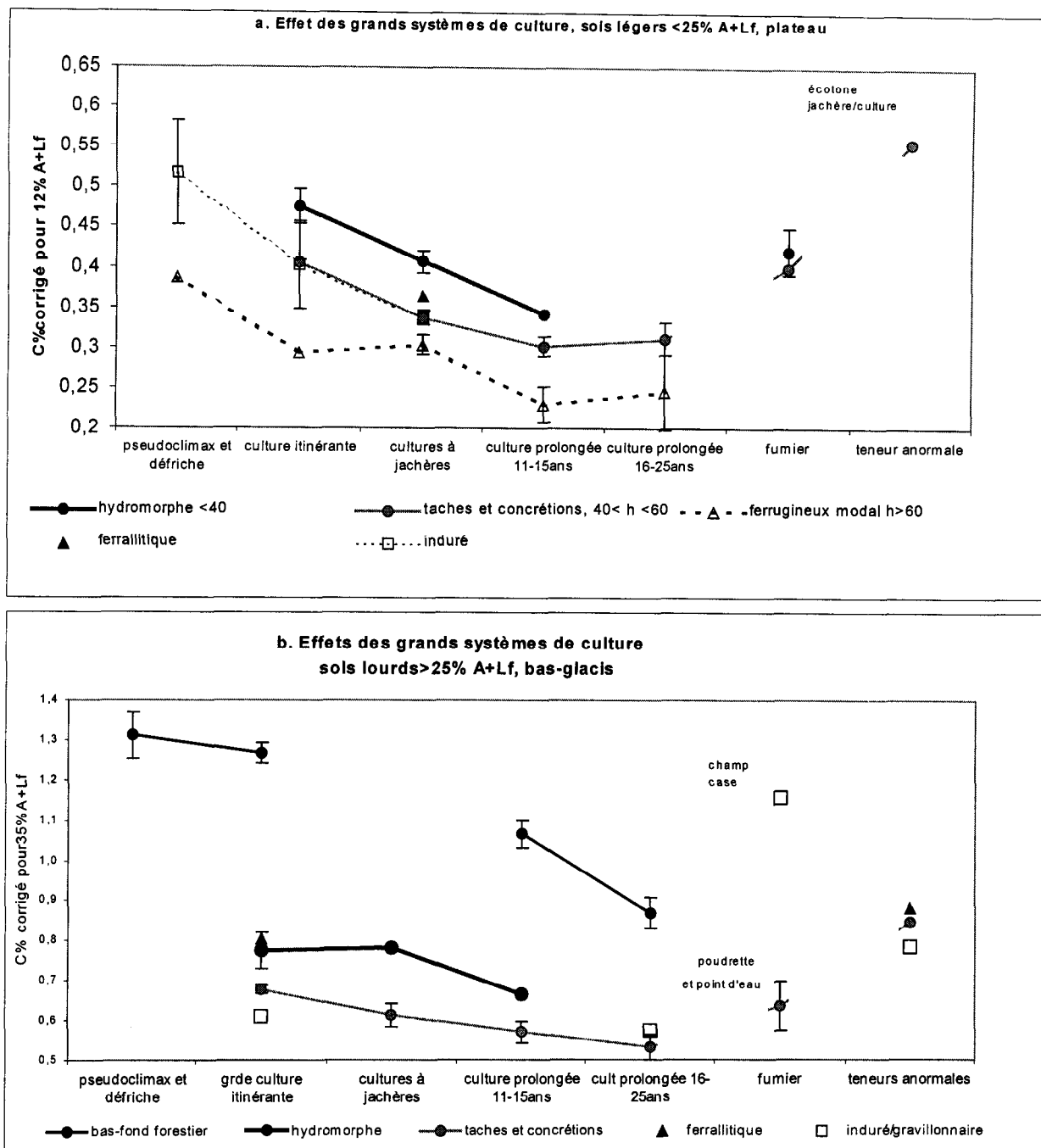


Figure 4. Effet des grands systèmes de culture

Les stades de la culture à jachère ne ressortent pas comme des facteurs de variation significative sur l'ensemble des données. En revanche, l'analyse par terroir et par sol **montre qu'il existe cependant un effet** de faible amplitude (différence de 17%C entre fin de phase culture et fin de phase jachère non surpâturée). Les jachères non surpâturées conservent des graminées pérennes et sont éloignées des concentrations animales ou résistent sur les sols les plus limoneux. La variation entre C1-10ans, J1-10ans et J11-20 a été trouvée significative ($p=0,07$) seulement si l'on groupe les données sur milieu comparables (même sol, même roche-mère).

Sur les terroirs surpâturés, les vieilles jachères ont des teneurs en C égales ou inférieures à celles des cultures, exprimant que le bilan organique est aussi mauvais sous jachère que sous culture.

Tableau 5 : Effet des stades du cycle, sols ferrugineux profonds légers, non hydromorphes

Stade du cycle Culture-Jachère	Moyenne C% corrigé . S (Pr>F =0,007)	n	Test Duncan à p=0,05
Cultures 1-10ans	0,31	14	a
J1-10ans non surpâturées	0,30	6	a
J11-20ans non surpâturées	0,34	8	b

Sols lourds

Les données de carbone sont corrigées pour une teneur de 35% d'éléments fins. Les coefficients de correction dépendent du sol : 0,0264 (sols hydromorphes forestiers), 0,0113 (sols hydromorphes de savane), 0,0061 (sols ferrugineux beiges à taches et concrétions et indurés)

Les résultats en sols lourds de savane sont du même type qu'en sols légers : le carbone diminue peu entre culture itinérante et culture à jachère (-7%), diminue fortement en cas de prolongations 11-15ans (-1,3% par an depuis le niveau moyen de culture itinérante), puis diminue lentement ensuite (-0,4%par an) et remonte en cas de fumure jusqu'au niveau de la culture à jachère. Cependant toutes les variations ne sont pas significatives (tab 6).

Tableau 6. Résultats de l'analyse de variance, sols lourds à taches et concrétions

Système de culture S Pr>F= 0,05	n	Moyenne C%	Erreur standard	Duncan p=0,05
Culture itinérante	5	0,665	0,037	a
Culture à jachère	12	0,631	0,024	Ab
Culture prolongée	6	0,570	0,034	B
Culture permanente	10	0,554	0,026	B

L'effet des stades des cycles culture jachère a une même amplitude apparente qu'en sols sableux cependant la variation ne peut être testée statistiquement.

Ces résultats des **sols de savane** contrastent avec ceux **des sols forestiers**, qui perdent beaucoup de carbone en culture prolongée (-1,5% en phase initiale et -2,3% par an ensuite). Cet accroissement pourrait venir du travail du sol accru après 10ans (labours annuels pour une rotation cotonnier-maïs). On retient que les stocks élevés de carbone des sols forestiers sont **instables sous travail du sol mais contribuent longtemps à la fertilité**.

4. Discussion et conclusion

INTERACTIONS TEXTURE, VEGETATION, ENGORGEMENT DES SOLS

Notre contribution a été de distinguer dans les facteurs de milieu le rôle joué spécifiquement par les éléments fins, de celui joué par d'autres facteurs qui sont aussi corrélés aux éléments fins, à savoir types de sols, et type de végétation. En sols secs en savane, les EF jouent un rôle secondaire, alors que ce rôle est essentiel en sols humides forestiers. **Les pentes b des droites de régression $C\% = f(Ef\%)$ diminuent si l'on classe les milieux en groupes homogènes (texture, sols) et que**

L'on passe des situations humides à sèches et des plus forestières aux plus herbeuses. Les corrections à apporter aux teneurs en carbone pour une texture de référence sont donc plus faibles en savane que ne le suppose la régression générale de pente 0,0174. Il y a donc interaction positive entre le facteur humidité des sols, densité de végétation et le facteur éléments fins. Cette interaction suppose que les éléments fins ne représentent pas des « contenants » de stockage comme il est parfois suggéré mais jouent un double rôle, facilitateur de l'humification et protecteur de la MOS.

DISCUSSION PAR RAPPORT AUX DONNEES NATURALISTES ET EXPERIMENTALES

Bien que réalisés dans une petite région, nos résultats sont applicables à de nombreux espaces soudanais. Les sols ferrugineux y sont les plus fréquents, et les gammes texturales de Bondoukuy sont plus larges que celles observables en de nombreux terroirs soudanais. Les références disponibles cependant renseignent surtout sur les pseudo-climax et les mises en culture prolongées.

Les pseudo- climax

L'existence d'un niveau de carbone équilibré sous forêt climacique (Nye & Greenland, 1964) ou dans un climax anthropogénique tel que la savane est admise (Areola *et al*, 1982). Sous forêt claire soudano-guinéenne du Cameroun sur sol ferrugineux lessivé modal ou à concrétions de haut de pente (Pluie = 1400 mm), la teneur en C est de 8 g.kg⁻¹ pour 20% EF, 5 g.kg⁻¹ en savane à graminées sur sol hydromorphe de bas de pente (même texture), et 15 g.kg⁻¹ sur sol de bas-fond à gley à 44%EF (Brabant, 1991). Les sols des savanes boisées des terres neuves au Sénégal contiennent 3,7 g.kg⁻¹ de C pour 14% d'EF (Feller & Milleville, 1977). Siband (1974), sous forêt dense sèche de Casamance (P = 1300 mm), donne une teneur de 8 à 10 g.kg⁻¹ de carbone pour 15 % EF. Ces données régionales recoupent bien les données des milieux pseudo-climaciques obtenus à Bondoukuy et les effets constatés de la texture, du sol et de la végétation.

On suppose que les anciennes forêts denses sensibles au feu, dont il ne reste que des reliques près des cours d'eau et sources, et sur termitières et effondrement de cuirasses, ont cédé la place à la savane à une époque reculée, à l'occasion de changements climatiques puis du feu. On négligera donc le passage de la forêt sèche à la savane dans notre approche de l'évolution actuelle du SOC.

Cultures itinérantes

Le GSC « culture itinérante en savane » introduit un équilibre à un niveau organique inférieur au pseudo-climax « savane ». Nous trouvons une perte de 24% en savane. En revanche, en sols forestiers, la variation apparaît faible, de l'ordre de -5% seulement. Cette valeur est sous-estimée, car la culture itinérante de notre échantillon est surtout constituée de jachères forestières de 30-40ans et de cultures de 1 à 10ans. Il y manque les jeunes jachères. Nye & Greenland (1964) trouvaient une perte de -25% du niveau climacique en zone forestière humide. Si l'on retient la valeur de -25% entre pseudo-climax et culture itinérante, les sols **ont donc perdu depuis longtemps le quart de leur teneur en C par le passage de la savane à la culture itinérante.** Celle-ci était quasiment généralisée dans les années 1950, avec une faible densité de population (10hab/km²). Il subsistait cependant 10% de milieux pseudo-climaciques (zones tampon, forêts protégées, sols marginaux) dont la moitié est remplacée aujourd'hui par les forêts classées qui étaient alors en culture itinérante. La culture itinérante a fortement régressé depuis, puisqu'on ne la trouve plus aujourd'hui qu'à l'état de reliques (jachères de 30 à 40ans nommées « duiré » et défriches récentes de duiré). Le problème est que cette rareté confère à ces reliques un rôle économique important ce qui accroît les prélèvements, mais aussi accroît l'importance des ligneux.

Culture à jachère

A présent l'essentiel du paysage du plateau relève de la culture à jachères (C10J10, C10J20). Le passage de la culture itinérante à la culture à jachère se réalise au détriment des teneurs moyennes en carbone du sol. On trouve des réductions de teneur sur 0-20cm de **-17% en sols légers** et **-7% en sols lourds**. En terme de quantité, les pertes de C sont semblables. Cependant, dans les sols lourds la culture à jachère est rarement observée, puisque les migrants comme les autochtones y sont passés directement de la culture itinérante à la culture permanente. La perte de 17% ne concerne donc que les situations de plateau de 1950 à 1990 (c'est-à-dire les 3/4 de la région, de densité démographique 20hab/km² en 1995).

Yoni (à paraître) confirme par des observations plus précises la variation positive du C pendant la phase jachère **en zone non dégradée**. Il met en évidence que cette régénération concerne essentiellement le C des fractions organo-grossières (minéralisées pendant la phase culture) et secondairement le C des fractions organo-limoneuses (partiellement minéralisées pendant la phase initiale de la jachère). Jointe à la minéralisation des litières souterraines issues des défriches, et aux effets de désherbage et déparasitage, ce gain de MOS modique, et sa concentration locale (touffes, souches, termitières) sont des fonctions attendues des jachères, pour les paysans en sols légers.

Cultures prolongées et permanentes

Depuis une situation pseudo-climacique, la culture permanente sans restitution conduit à la chute drastique du taux de matière organique (Siband, 1974 ; Juo *et al.*, 1995). La constante annuelle de décomposition K de la matière organique du sol sous culture **après forêt** vaut 3,3 %, et 4,5 % après savane (Nye & Greenland, 1964). Les sols dont la matière organique se décompose le plus vite sont les sols sableux. Le coefficient *k* apparent (c'est-à-dire la perte nette observée) en culture traditionnelle est de 4,7 % en sol sableux, 2 % en sol limono-sableux (Piéri, 1989). A Bondoukuy, nous n'avons comme exemple que quelques forêts de bas-fond récemment défrichées, ce qui ne permet pas de calculer cette perte avec précision. Cela reste une situation exceptionnelle et donc peu utile pour notre réflexion sur la dynamique du C.

Partant de jachères de culture itinérante de savane (durée de 25 à 40ans), la constante de décomposition est beaucoup plus faible et sa valeur varie fortement dans le temps. Nous avons trouvé en savane les taux de perte annuel de 1,3% (sols lourds) et 2,8% (sols légers) pendant les 12 premières années de culture, et respectivement 0,4% et 0,3% les 8 années suivantes. Nye & Greenland, 1964 pour leur part trouvaient comme coefficient de perte après jachère en savane de 0,8 à 0,9 %, ce qui est proche de nos valeurs si on les moyenne sur 20ans. Le quasi-arrêt de la décroissance vers 12ans de culture peut être considérée comme la fin des matières organiques non protégées (fractions organo-grossières), et donc l'apparition d'une dynamique beaucoup plus lente, aux dépens des fractions organo-limoneuses, voire d'un quasi-équilibre organique vers 20ans.

Après **jachères forestières**, nous trouvons -1,5 %par an sur 12 ans puis -2,3% sur 8ans ce qui peut être comparé aux -3% après jachère forestières de Nye et Greenland (1964). **La matière organique accumulée sous jachères forestière resterait plus longtemps disponible à la minéralisation activée par le travail du sol qu'après savane**, ce qui explique l'engouement pour ces sols.

L'équilibre (ou plutôt une très faible décroissance) à 20ans se réalise à moins 17 % de déficit par rapport au niveau moyen de la culture-itinérante pour les sols lourds et moins 32 % pour les sols

sableux. Le labour annuel et profond (tracteur) aggrave ce déstockage (moins 50 %) mais il faut aussi compter sur l'effet de dilution dans un profil cultural approfondi.

Les états de C enregistrés en culture prolongée sont compatibles avec les mesures effectuées dans d'autres contextes de la même région. L'essai de longue durée (1960-1990) de Saria (Burkina Faso, P = 800 mm ; taux d'éléments fins : 12 % ; dans Pichot *et al.*, 1981 ; Piéri, 1989 : p. 332 ; Sédogo, 1993) fournit une possibilité de comparaison. Plusieurs traitements ont été comparés en monoculture de sorgho avec enfouissement de fumier et d'engrais minéraux. On y part en 1960 d'une vieille jachère à 3,7 g.kg⁻¹ de C. La première décennie, le sol perd 2,65% par an, que l'on peut assimiler au passage culture itinérante à culture à jachère. La seconde décennie on perd, 1,6% par an et la troisième, 0,7% par an, comparables aux 1,3 et 0,4% de Bondoukuy. Si l'on admet qu'après trente ans, des pseudo-équilibres organiques se sont mis en place, le niveau de SOC atteint en fonction de la dose de fumier est une fonction linéaire dont l'ordonnée à l'origine (2,3 g C.kg⁻¹) peut être considérée comme la teneur en matières organiques du sol très stable. La perte est de moins 38% de l'origine en culture itinérante, que l'on peut comparer aux -32% en sols sableux observés à Bondoukuy. Il existe donc une concordance entre l'essai de Saria et les parcelles observées sur le plateau de Bondoukuy, en milieu réel. La culture permanente après une vieille jachère sur sol sableux ne perd donc que 30 à 40% de la MOS de surface en 30ans et c'est un maximum. En revanche la MOS minéralisable (organo-grossière, organo-limoneuse) est effectivement consommée entre 12 à 20ans de culture prolongée, imposant une fourniture minérale et des apports organiques.

L'apport régulier de fumier relève la teneur du sol parfois jusqu'au niveau de la culture itinérante. Selon l'abaque de l'essai de Saria, le maintien de la teneur au niveau « culture itinérante de savane » exige 6t.an⁻¹.ha⁻¹ de fumier. Les parcelles fortement fumées restent rares (3% de l'échantillon). La présence d'une induration accroît l'efficacité de la fumure organique à relever la teneur, puisque dans un cas de champ de case induré, on atteint une teneur « forestière », ce qui supposerait l'application de 15 t.an⁻¹.ha⁻¹ selon l'abaque de Saria, ce qui est très improbable.

Taux minima

Le taux de carbone **minimal observé**, 0,19%, est moindre que la valeur de 0,23% de C observée à Saria après 40 ans de culture de sorgho sans restitutions organiques (Sédogo, 1993). Il s'agit à Bondoukuy de cultures de 25ans (maïs-coton) labourées chaque année. Le rôle des labours fréquents, identifié par Ouattara *et al.* (1997), en est vraisemblablement à l'origine. Il est à craindre que des labours répétés joints à des apports minéraux, parviennent à s'attaquer ainsi aux fractions organo-argileuses les mieux protégées au sein des micro-agrégats.

APPLICATION A LA DYNAMIQUE PASSEE, ACTUELLE ET PREVISIBLE DES STOCKS DE CARBONE

En partant de ces données bien confirmées, il est possible d'estimer les pertes de carbone dans les sols des zones cotonnières depuis les années 1950. Les sols forestiers, les pseudo-climax et les cultures fumées peuvent être ignorées, vu leur faible représentation en superficie.

Les bas-glacis limono-sableux (1/4 du département de Bondoukuy) sont passés de 1950 à 2000 d'une culture itinérante à une culture permanente de 20ans (Serpantié *et al.*, 2000), et ont donc perdu 17% de leur teneur de carbone entre 0 et 20cm. Les pertes ultérieures seront très lentes, car les pratiques de labours annuels, liées aux rotations maïs-cotonnier qui pourraient aggraver les

pertes (Brown *et al.*, 1994 ; Ouattara *et al.*, 2000) restent peu répandues, à cause des difficultés qu'ont les petits paysans pour obtenir des engrais pour le maïs.

Les plateaux sableux (et bas-glacis sablo-limoneux) qui ont aussi perdu 17% de leur teneur entre 1950 et 1990 (passage c. itinérante à c. à jachères) voient actuellement le passage très progressif et encore local d'une culture à jachère à une culture prolongée. Cette prolongation reste rare, car la culture prolongée sur sols sableux suppose la maîtrise de l'enherbement et une fertilisation qui ne sont rentables que pour une élite de paysans aisés (Serpantié, à paraître). Le maintien d'une culture à jachère sauve ainsi non seulement le carbone arbustif, mais aussi 6g.kg^{-1} de SOC.

On n'a donc à déplorer la disparition que de 17% des teneurs moyennes de C de 1950, en surface, sur toutes les terres cultivables des savanes « cotonnières ». Il s'agit d'une donnée estimée très grossièrement. Il existe certes des pertes et des gains secondaires. La dégradation des jachères près des villages est une source de pertes. Une partie des pertes sous culture est due, non à la minéralisation, mais à l'érosion (Bilgo *et al.*, 2002), le carbone érodé persistant dans un autre lieu, bas-fond ou zones d'épandage. Il faut aussi compter avec les cas de culture fumée, bien que rares.

Si on part d'une moyenne générale en 1995 de 0,54% de C sur 0-20cm (moyenne des 159 parcelles), la teneur moyenne en 1950 était alors de 0,65%. Sur 0-20cm, la perte est donc de 3,3tSOC/ha, **soit 2,5 t SOC/ha sur l'ensemble des terres (1/4 incultes)**. Lorsque cette perte s'équilibrera avec la couche profonde, en utilisant la relation surface-profondeur pour les sols non hydromorphes, on sera passé de 67t/ha à 57t/ha sur 1m soit une perte de carbone de 10t/ha ou -15%. Cette perte potentielle reviendra à 7,5t/ha de C sur l'ensemble des terres. La perte réelle est faible si l'on compare à la perte annuelle de 4,7 à 2% sous culture, utilisée dans les modèles courants. C'est beaucoup si on les ajoute aux pertes liées au déboisement pendant le même temps. Il existe un important ralentissement actuel de ces pertes, voire un arrêt dans un proche avenir, faute de carbone instable dans les sols et de raisons économiques de faire de la culture prolongée sur sols légers et des labours intensifs sur sols lourds. La consommation du SOC trouve ici des limites socio-économiques. C'est en revanche dans les « zones pionnières », régions en cours de développement agricole et d'immigration, que ces pertes auront désormais lieu. Le déboisement en revanche se poursuivra dans les régions déjà développées, dont la population augmente désormais à un rythme faible. C'est ce dernier qui contribuera le plus aux pertes de carbone du milieu, s'il n'y a pas reboisement.

Afin de réaliser un bilan réel des pertes de carbone des savanes, ne faudrait-il pas aussi examiner le devenir des productions agricoles elles mêmes ? Si les productions vivrières sont métabolisées à court terme, les productions de fibres sont en revanche conservées et recyclées sur de longues périodes, dans les processus d'abord textiles puis papetiers.

Bibliographie

AREOLA (O.), AWETO (A.O.) & GBADEGESIN (A.S), 1982. — « Organic matter and soil fertility restoration in forest and savanna fallows in South Western Nigeria », *Geojournal*, vol. VI, n° 2 : pp. 183-192.

BALASUBRAMANIAN (V.), SINGH (L.), NNADI (L.A.) & MOKWUNYE (A.U.), 1984. — « Fertility status of some upland savanna soils of Nigeria under fallow and cultivation », *Samaru Journal of Agricultural research*, vol. II, n° 1-2.

BASSETT (T.J.), 2002. « Le coton des paysans. Une révolution agricole (Côte d'Ivoire, 1880-2002) », IRD, Paris, coll A travers champs, 220p.

BILGO (A.) ET AL. (CE COLLOQUE). Déplacement de matières organiques et nutriments dans les mosaïques culture-jachère. Données expérimentales sur parcelles. Poster.

- BRABANT (P.), 1991. — *Le sol des forêts claires du Cameroun*, t. I et II, Orstom, 530 p. et 278 p.
- BRIGGS (L.), TWOMLOW (S.J.), 2002. Organic material flows with a smallholder highland farming system of south west Uganda. *Agric. ecos. & Envirnt*, 89 (2002), 191-212
- BROWN (S.), ANDERSON (J.M.), WOOMER (P.L.), SWIFT (M.J.), BARRIOS (E.), 1994. Soil biological processes in tropical ecosystems. IN WOOMER P.L., SWIFT (M.J.) (EDS), *The biological management of tropical soil fertility*. John Wiley & Sons, Chichester, pp15-46.
- CHOTTE (J.-L.), DUPONNOIS (R.), CADET (P.), ADIKO (A.), VILENAVE (C.), AGBOBA (C.) & BRAUMAN (A.), 2001. — « Jachère et biologie du sol », in Floret & Pontanier (éd., 2001 : vol. II, pp. 123-168.
- DABIN (B.) & R. MAIGNEN, 1979. — « Les principaux sols d'Afrique de l'Ouest et leurs potentialités agricoles », *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, vol. XXIII, n° 4 : pp. 235-257.
- DEVINEAU, J.L., FOURNIER, A., KALOGA, 1997. — « Les sols et la végétation de la région de Bondoukuy (Ouest burkinabe) » Présentation générale et cartographie préliminaire par télédétection satellitaire (SPOT), ORSTOM, Paris. 118p.
- DHILLION (S. S.), 2000. — « Are bio-indicators useful. Cases of set aside land from Mali, Lao PDR, Indonesia and Norway », in Floret & Pontanier (éd., 2000-a) : vol. I, pp. 000-000.
- DUGUÉ (P.), 1998. les transferts de fertilité dus à l'élevage en zone de savane. *Agriculture et développement*, 18, 99-107
- ESWARAN (H.), VAN DEN BERG (E.), REICH (P.), 1993. Organic carbon in soils of the world. *Soil Sc. Soc. Am. J.* 57 :192-1994
- FELLER (C.) & MILLEVILLE (P.), 1977. — « Évolution des sols de défriche récente dans la région des terres Neuves (Sénégal Oriental). I. Présentation de l'étude et évolution des principales caractéristiques morphologiques et physico-chimiques », *Cah. Orstom sér. Biologie*, vol. XII, n° 3 : pp. 199-211.
- FELLER (C.), 1995. — « La matière organique dans les sols tropicaux à argile 1:1. Recherche de compartiments fonctionnels. Une approche granulométrique », Paris, Orstom, 393 p. (coll. *T.D.M.*, vol. 144).
- FELLER (C.), LAVELLE (P.), ALBRECHT (A.) & NICOLARDOT (B.), 1993. — « La jachère et le fonctionnement des sols tropicaux. Rôle de l'activité biologique et des matières organiques. Quelques éléments de réflexion », in Floret & Serpantié (éd., 1993) : pp. 15-32.
- FLORET (C.) & PONTANIER (R.) (éd.), 2000. — « La jachère en Afrique tropicale. Rôles, aménagements, alternatives », vol. I, Actes du séminaire international, Dakar, 13-16 avr. 1999, Paris, John Libbey, 2 vol., vol. I, 000 p.
- FLORET (C.) & SERPANTIE (G.) (éds.), 1993. — « La Jachère en Afrique de l'Ouest », Actes de l'Atelier international, Montpellier, 2-5 déc. 1991, Paris, Orstom, 494 p. (coll. *Colloques et séminaires*).
- FLORET (C.) & PONTANIER (R.) (éds.), 1997. — « Jachère et maintien de la fertilité », Actes de l'Atelier international, Bamako, 2-4 oct. 1997, Dakar, Coraf-Union européenne, 146 p.
- FOURNIER (J.), G. SERPANTIE, J.-P. DELHOUME & R. GATHELIER, 2000. — « Rôle des jachères sur les écoulements de surface et l'érosion en zone soudanienne du Burkina Faso. Application à l'aménagement », in FLORET & PONTANIER (éd., 2000-a) : vol. I, pp. 179-188.
- GREENLAND (D. J.) & NYE (P.H.), 1959. — « Increase in carbon and nitrogen contents of tropical soils under natural fallows », *Journal of Soil Science*, n° 10 : pp. 284-299.
- JONES (M. J.), 1971. — « The maintenance of soil organic matter under continuous cultivation at Samaru, Nigeria », *Journal of Agricultural Science*, n° 77 : pp. 473-482.
- JONES (M. J.), 1973. — « The organic matter content of the savanna soils of West Africa ». *J. Soil Sc.*, n° 24 : pp. 42-53.
- JONES (M.J.), WILD (A.), 1975. Soils of the West African Savanna. Technical communications, vol 55. Commonwealth Agricultural Bureaux, Farnham Royal, 246p.
- JUO (A. S. R.), FRANZLUEBBERS (K.), DABIRI (A.) & IKHILE (B.), 1995. — « Changes in soil properties during long-term fallow and continuous cultivation after forest clearing in Nigeria », *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. LVI, n° 1 : pp. 9-18.

- KALOGA (B.), 1997. — « Les sols » in DEVINEAU, J.L., FOURNIER, A., KALOGA (Eds sc.), 3-28
- KISSOU (R.), 1994 - Carte morpho-pédologique du plateau de Bondoukuy (1/20000).
- LESCUYER (G.), LOCATELLI (B.), 1999. Rôle et valeur des forêts tropicales dans le changement climatique. *Bois et Forêts des tropiques*, 260 (2), pp 5-17
- MANLAY (R.), 2001. — « *Dynamique de la matière organique dans un terroir agro-pastoral de savane Ouest-Africain (Sud-Sénégal)* », th. doct., Engref, 192 p. + ann.
- MOREAU (R.), 1993. — « Influence de la mise en culture et de la jachère forestière sur l'évolution des sols forestiers tropicaux ». FLORET (C.) et G. Serpantié, 1993, pp 245-256.
- NYE (P. H.) & GREENLAND (D.J.) , 1964. — « Changes of the soil after clearing tropical forest », *Plant and Soil* : pp. 101-113.
- OUATTARA (B.), SERPANTIE (G.), OUATTARA (K.), HIEN (V.), BILGO (A.), 2000. « Etats structuraux des sols de culture et de jachère en zone cotonnière du Burkina Faso ». *De la jachère naturelle à la jachère améliorée en Afrique tropicale, Le point des connaissances*, vol I, FLORET Chr. & R. PONTANIER éd, Paris, John Libbey, 170-178
- OUATTARA (B.), SERPANTIE (G.), OUATTARA (K.), HIEN (V.), LOMPO (T.) & BILGO (A.), 1997. — « États physico-chimiques des sols cultivables en zones cotonnière du Burkina Faso. Effets de l'histoire culturale et du type de milieu », in FLORET & PONTANIER (éd., 1997) : pp. 17-32.
- PAUSTIAN (K.), ANDREN (O.), JANZEN (H.H.), LAL (R.), SMITH (P.), TIAN (G), TIESSEN H., VAN NOORDVIJK (M.), WOOMER (P.L.), 1997. Agricultural soils as a sink to mitigate CO2 émissions. *Soil use & Mgmt*, 13, 230-244
- PERRAUD (A.), NGUYEN KHA, JACQUIN (F.), 1971.-« Essai de caractérisation des formes de l'humine dans plusieurs types de sols » C.R.Acad. Sci. (Paris), D272, 12 : 1594-97.
- PICHOT (J.), SEDOGO (M. P.), POULAIN (J.-F.) & ARRIVETS (J.), 1981. — « Evolution de la fertilité d'un sol ferrugineux tropical sous l'influence de fumures minérales et organiques », *Agr. trop.*, vol. XXXVI, n° 2 : pp. 122-133.
- PIERI (C.), 1989. — « Fertilité des terres de savane. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara », Paris, ministère de la Coopération-Cirad-Irat, 444 p.
- RIDDER (N. DE) & VAN KEULEN (H.), 1990. — « Some aspects of the role of organic matter in sustainable intensified arable farming systems in the West-African semi-arid tropics », *Fertilizer research*, n° 26 : pp. 299-310.
- RUTHENBERG (H.), 1971. — « Farming systems in the tropics », réédité 1990, Oxford, Clarendon Press, 424 p.
- SANCHEZ (P. A.), C. A. PALM., L. T. SZOTT., E. CUEVAS, & R. LAL, 1989. — « Organic input management in tropical agroecosystems », in COLEMAN *et al.* (éd., 1989) : pp. 125-152.
- SANCHEZ (P.A.), 2000.-linking climate change research with food security and poverty reduction in the tropics. In *Agric, Ecos, & Env.* 82 (2000), 371-383.
- SEDOGO (P. M.), 1993. — « Évolution des sols ferrugineux lessivés sous culture : incidence des modes de gestion sur la fertilité », th. doct. science, univers. Abidjan, 343 p.
- SEINY BOUKAR (L.), POULAIN (J.F.), FAURE (G.), 1997. (Eds sci.) « Agriculture des savanes du Nord-Cameroun : vers un développement solidaire des savanes d'Afrique Central ». Actes de l'Atelier d'échange, 25-29 novembre 1996, Garoua, Cameroun, Montpellier, France, Cirad CA, 528p.
- SERPANTIE (G.), OUATTARA (B.), 2001. « Fertilité et Jachères ». In *De la jachère naturelle à la jachère améliorée en Afrique tropicale, Le point des connaissances*, vol II, FLORET Chr. & R. PONTANIER éd, Paris, John Libbey, pp 21 :83
- SERPANTIÉ (G.), THOMAS (JN), DOUANIO (M.), 2000. « Evolution contemporaine de la place de la jachère dans les savanes cotonnières ». *De la jachère naturelle à la jachère améliorée en Afrique tropicale, Le point des connaissances*, vol I, FLORET Chr. & R. PONTANIER (éd.) Paris, John Libbey Eurotext, 80-91
- SIBAND (P.), 1974. — « Évolution des caractères et de la fertilité d'un sol rouge de Casamance », *Agron. trop*, 29 (12) : pp. 1228-1248.
- SOLBRIG (O.T.), YOUNG (M.D.), 1993. Economic and ecological driving forces affecting tropical savannas. In *The World's savannas. Man & Biosphere Series*, vol XII. UNESCO & Parthenon Publishing Group, Paris, 3:18

SOME (N. A.), 1996. — « Les systèmes écologiques post-culturels de la zone soudanaise (Burkina Faso) : structure spatio-temporelle des communautés végétales et évolution des caractères pédologiques », th. doct., univers. Pierre-et-Marie-Curie, Paris-VI, 212 p.

TIESSEN (H.), FELLER (C.) SAMPAIO (E.V.S.B), GARIN (P), 1998. Carbon sequestration and turnover in semi-arid savannas and dry forest. In *Climatic change*, vol 40, issue1, 105-117.

TOTTE (M.), 1996. Systèmes agraires, problématique de l'intensification agricole et télédétection. Exemples au Burkina Faso. Thèse de Doctorat, U. Catholique de Louvain-la Neuve. 800p.

WHITE (F.), 1986- « La végétation de l'Afrique ». Orstom-Unesco, 384 p + cartes.

WOOMER (P.L.), PALM (C.A.), QURESRI J.N., KOTTO SAME (J.), 1998. Carbon sequestration and organic resource management in African smallholder agriculture. In "LAL R., KIMBLE J.M., FOLETT (R.F.), STEWART (B.A.) (eds). management of carbon sequestration in soil. CRC press Inc, Boca RATON, PP 153-173

YONI (M.) *et al.* (à paraître). Le carbone et l'azote du sol pendant le cycle culture jachères à *Andropogon gayanus*.

ZECH (W), SENESI (N.), GUGGENBERGER (G.), KAISER (K.), LEHMANN (J.), MIANO (T.M.), MILTNER (A.), SCHROTH (G.), 1997. factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. *Geoderma* 79 (1-4), 117-161.

ZOMBRE (P.), 1995.-Carte morpho-pédologique du bas-glacis de Bondoukuy (1/20000)+notice.