

STOCKAGE DU CARBONE DANS LES SOLS DES PARAMOS ANDINS ET CONSEQUENCE DES MISES EN USAGE SUR LES TENEURS EN CARBONE ET L'EROSION

Pascal Podwojewski¹, Jérôme Poulenard²

1. IRD, 32, avenue Henri Varagnat, 93143 Bondy cedex. France ; Podwo@bondy.ird.fr
2. Laboratoire des Sciences du sol. Centre Interdisciplinaire Scientifique de la Montagne (CISM); Université de Savoie. 73376 Le Bourget du Lac. France ; Jerome.Poulenard@univ-savoie.fr

Résumé

Dans les Andes centrales et septentrionales, l'étage sous-alpin des cordillères, localement dénommé páramo, apparaît à des altitudes comprises entre 3000 et 4800 m. Cet écosystème à hautes graminées en touffes est composé d'Andosols non allophaniques et de Rankers à horizon humifère très épais (> 40cm) et à teneurs en C exceptionnellement élevées (de 250 à plus de 800 T ha⁻¹ de C). Ce sont sans doute les stocks en Carbone les plus importants du monde à l'exclusion des tourbes. Ces stocks exceptionnels proviennent d'une conjonction de facteur : i) un climat froid et humide de hautes altitudes; ii) une formation en grande quantité de complexes organo-métalliques (Al, Fe) assurant une protection à la fois chimique et physique. Au cours de la pédogenèse, on constate en effet le développement d'un réseau tridimensionnel microporeux (pores de rayon < 0,1µm) qui contribue à protéger le carbone des bactéries minéralisatrices. Plus le sol est évolué, plus il est riche en carbone et plus les teneurs en eau sont importantes. Ainsi ces sols sont également considérés comme une "éponge" adsorbant jusqu'à 3 fois leur poids sec en eau et permettant le stockage d'eau et la régulation des flux hydriques vers l'aval.

Or, les páramos longtemps milieu marginal de production agricole, sont aujourd'hui pour une part intégrés à l'espace agricole. La croissance démographique d'une part et les différentes réformes agraires d'autre part ont conduit les populations des versants à occuper et utiliser de plus en plus les espaces de hautes altitudes. Ainsi, les páramos doivent assumer une fonction de production alimentaire pour une population de plus en plus nombreuse mais avec des rendements en forte baisse lorsque l'altitude s'accroît.

L'objectif de cette communication est de montrer l'influence des mises en usage du sol sur l'évolution de ces propriétés et en particulier des teneurs en carbone. Les sols les plus riches en carbone sont également les plus fragiles. La dessiccation irréversible des horizons superficiels lors des opérations agricoles (mise en culture et/ou pâturage intensif) modifient complètement l'organisation des particules. La structure des agrégats s'effondre, ils deviennent hydrophobes. La micro-porosité disparaît, la matière organique devient accessible aux bactéries et se minéralise. Les agrégats hydrophobes flottent sur la lame d'eau et par gravité descendent le long des pentes en particulier à partir des champs maintenus en jachère après les récoltes. Les pertes en carbones sont multipliées par 10 par le simple fait du labour et par 50 en cas de séchage des agrégats. Dans certaines zones du nord du pays, en culture depuis 50 ans à peine, plus de 60 cm de sol humifère ont disparu et le matériau sous-jacent (cendres anciennes non altérées) est infertile. Le páramo perd ses propriétés régulatrices du bilan hydrique.

Mots-clés : Equateur – Andosol – páramo – carbone – hydrophobie – changement d'usage.

CARBON STORAGE IN THE ANDEAN PARAMO SOILS OF ECUADOR AND CONSEQUENCES OF LANDUSE CHANGE ON CARBON CONTENTS AND EROSION

Abstract

In the northern Andes, the paramo, which is a high altitude grassland ecosystem, occurs at altitudes between 3000 and 4800m. In Ecuador, it covers 14 800 km², 6% of the country surface. This ecosystem with high graminaceous tussocks is composed of non-allophanic Andisols and Rankers with a very thick humiferous horizon (> 40 cm) and with exceptionally high carbon contents from 250 to over 800 T ha⁻¹. Histosols except, these are the highest world carbon contents. These exceptional storage result from concordant factors: i) A cold and humid climate of high altitudes; ii) formation of high amounts of organo-metallic complex (Al-Fe) forming a physical and chemical protection. During the pedogenesis, a tridimensional microporous red develops (pores of < 0.1 mm in diameter) and contributes to the protection of carbon from mineralizing bacteria's. More the soil is evolved, higher is their carbon content and higher is their water content. Therefore, these soils are considered as "sponge" absorbing water 3 times their dry weight per volume unit and which allows a water storage and a water fluxes regulation.

However the paramos long time considered as marginal space of agricultural production are more and more integrated to the agricultural space. The demographic increase and different agrarian reforms leads the local population to occupy and use more and more these high altitude lands. Thus the paramos have a function of agricultural production for a higher population but with decreasing yields when the altitude increases.

The aim of this paper is to present the effects of land-use on the soil properties especially their carbon content. Soil with the highest Carbon contents are also the most fragile. Irreversible drying of surface horizon during land-use (cultivation or grazing) modify completely the particles organisation. The aggregate structure collapses and they became water repellent. The micro-porosity disappear and organic matter is accessible to bacteria's and it mineralizes. Erosion occurs in the form of floating hydrophobic and stable sand-size aggregates. Carbon soil losses are multiplied by a factor 10 after simple tillage and by a factor 50 in case of dry aggregates on fallows. In some areas in northern Ecuador, 60cm of soil disappeared in the last 50 years and the material beneath (unweathered old volcanic ashes) becomes sterile. The paramo loses their properties of water regulation.

Key-words : Ecuador – Andisol – paramo – carbon – erosion – land-use – water-retention.

1. Introduction

Dans les Andes centrales et septentrionales (Colombie, Equateur), l'écosystème des páramos est situé entre les neiges permanentes et la forêt andine. Il s'agit d'un milieu herbacé, composé de hautes graminées en touffes recouvrant complètement le sol parfois associé à des plantes en rosettes. En Equateur, il se situe à une altitude supérieure à 3000 m d'altitude au Sud du pays, 3800 m d'altitude au Nord et jusqu'à 4800 m d'altitude. Il couvre 14 800 km² soit 6% de la surface du pays (Figure 1).



Figure 1 Les páramos d'Equateur. Les numéros correspondent aux profils de référence du Tableau 1

Figure 1 Paramos of Ecuador. Numbers represent the studied profiles of Table 1.

Ces zones de hautes altitudes contribuent fortement à la régulation des flux hydriques à l'échelle régionale et à l'alimentation en eau des zones avales (périmètres irrigués et alimentation hydrique des grandes villes comme Quito) (Luteyn, 1992). Cet article présente un résumé étendu des activités de la pédologie IRD et de ses partenaires (Université de Savoie, Université d'Amsterdam) durant ces 5 dernières années sur l'importance des páramos dans l'écosystème andin et de son impact sur les populations. Il s'appuie sur des études précises sur le terrain et en laboratoire de sites référencés individualisant les principaux types de sols rencontrés dans cet écosystème et définis par la carte générale des sols (PRONAREG/ORSTOM).

Cette communication s'articule autour de 3 parties:

1. Caractériser l'importance des páramos sur le stockage du carbone et du cycle de l'eau qui sont associés ;
2. Caractériser l'importance de la colonisation du milieu par les feux, le surpâturage et la mise en culture ;
3. Évaluer l'impact de ces mises en usage sur le fonctionnement de l'écosystème et d'essayer d'apprécier les pertes en terres, mais aussi en carbone et en eau.

2. Les páramos andins et leur importance sur le stockage du carbone

Le stockage du carbone sensu stricto dans les sols est la résultante entre des intrants : la production végétale (feuilles, tiges ou racines) qui après sa mort se transforme en humus stable dans les sols et la minéralisation de cette biomasse en dioxyde de carbone qui en est l'exutoire. Le stockage de carbone des sols des páramos d'Equateur est exceptionnellement élevé. Après les Histosols (les tourbes), les Andosols non allophaniques qui constituent la majorité des sols de ces páramos comptent des teneurs en carbones extrêmement élevées de 250 à plus de 800 T ha⁻¹ de C (Tableau 1).

Tableau 1. Stockage du carbone (T ha⁻¹) dans les sols du paramo.

Table 1. Carbon storage (T ha⁻¹) of some paramos soils

A : premier mètre du profil ; B : profil entier

Lieu	Pichincha (1)	Chimborazo (2)	Carchi (3)	Cuenca (4)	Azogues (5)	Fierro Urcu (6)	Oña (7)	El Tiro (8)	Cerro Toledo (9)	Sabanilla (10)
A	356	479	463	364	466	341	239	176	158	112
B	567	717	864	364	676					

Sur cendres volcaniques, du moins évolué vers le plus évolué :

1 : Andosol vitrique polyphasé ; 2. Andosol à allophanes polyphasé ; 3 : Aluandosol mélanique polyphasé ; 4 : Aluandosol ; 5 Aluandosol polyphasé.

Sur substrat non constitué de cendres volcaniques

6 : Aluandosol sur schistes métamorphiques ; 7 : sol andique dérivant de sol ferrallitique ancien sur dacite ; 8 et 9 : Sol ocre podzolique sur pélites ; 10. Podzol humo-ferrugineux sur gneiss.

Les raisons de ces teneurs élevées sont à la fois dues aux facteurs climatiques et aux facteurs d'une pédogenèse spécifique à cet environnement.

Le climat

Cet écosystème montagnard est en permanence froid et humide. Les précipitations occultes (bruines, brouillards), la grêle sont fréquents. Le climat des páramos se caractérise d'abord par des températures froides (9°C vers 3500 m) et une moyenne des températures journalières constantes tout au long de l'année, caractéristique des milieux inter-tropicaux. Avec un gradient d'une baisse de température de 0,6°C pour une élévation de 100m d'altitude, la nuit les températures avoisinent souvent les 0°C. La pluviométrie moyenne se situe aux alentours de 1000 mm/an (Ayabaca, 1984). Les pluies de faibles intensités sont réparties en 2 saisons: de janvier à avril et de septembre à novembre. Elles sont associées à de nombreuses précipitations occultes sous forme de bruines et de brouillards. L'évapotranspiration est faible et le bilan hydrique précipitation-évapotranspiration est largement excédentaire. Dans ce milieu montagnard froid et humide, tous les sols sont très humifères. Cette caractéristique est en partie due à une très faible activité de la microflore minéralisatrice avec un Temps Moyen de Résidence du carbone > 2000 ans à 40 cm à une altitude de 4000m environ (Poulenard, 2000). L'altitude favorise donc la séquestration du carbone, la vitesse de minéralisation décroît et les teneurs en carbone du sol s'accroissent (Abcouwer, 2001), mais à partir de 4800m d'altitude, la production végétale atteint sa limite et le stockage de carbone par la force des choses décroît très rapidement.

La pédogenèse – cas des sols sur dépôt pyroclastique (Andosols non-allophaniques)

Les sols se développant à partir de cendres volcaniques occupent tous les páramos situés au nord de Cuenca tandis que les sols de la partie sud des páramos, beaucoup moins étendus, se développent sur des roches très variées (roches volcano-sédimentaires, métamorphiques, etc...) (Figure 1).

Dans le cas des cendres volcaniques, les sols se développent fréquemment sur des matériaux superposés. Leur stock en carbone résulte donc de plusieurs cycles successifs de pédogenèse récente. L'enfouissement de ces sols très organiques sous de nouveaux dépôts pyroclastiques contribue au développement du stock pour les raisons suivantes :

- i) ces paléosols sont en partie fossilisés et donc à taux de minéralisation faible,
- ii) il existe dans ces sols des horizons très riches en matière organique en profondeur (la valeur traditionnel d'un mètre pour le calcul des stocks est limitative) (Tableau 1)

Le processus pédogénétique dominant consiste en une Andosolisation acido-complexolytique. Cette Andosolisation se développe principalement sur les cendres volcaniques au nord du pays, mais apparaît également sur des roches non volcaniques (roches métamorphiques, paléosols) mais disposant de suffisamment d'Alumine pour se complexer avec la matière organique (Aran et al., 2001). Ces complexes sont extrêmement stables avec un taux de minéralisation très faible (Boudot et al., 1986). Cette faible minéralisation serait en partie provoquée par la toxicité des cations métalliques associés au carbone (Al en particulier) qui limitent l'activité bactérienne (Sollins et al., 1996 ; Van Noordwijk et al., 1997)

Le carbone n'est pas seulement stocké en abondance, mais il participe étroitement à l'élaboration du réseau tridimensionnel Al-Carbone, délimitant une très forte microporosité à parois souples résistantes en milieu saturé d'humidité. On constate en effet une corrélation très significative entre les teneurs en carbone associé aux fractions fines (< 50 µm) et la capacité de rétention en eau à 1500 kPa (Figure 3).

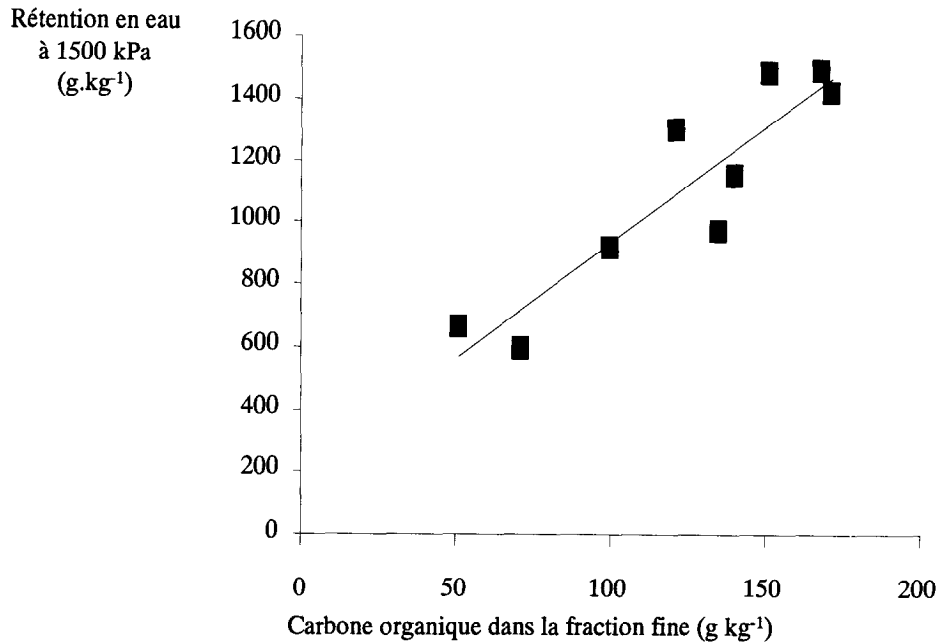


Figure 2. Relation entre les teneurs en carbone associé à la fraction fine (<50 μm) et les capacités de rétention en eau à 1500 kPa pour des sols des paramos équatoriens développés sur dépôts pyroclastiques.

Figure 2. Relationship between organic carbon in the < 50 μm fraction and water retention at 1500 kPa in volcanic ash soils of ecuadorian paramos

Cette abondante porosité (pores de rayon < 0,1 μm) semble difficilement accessible aux bactéries minéralisatrices (Poulenard et al., 2002a. in press) et pourrait contribuer à une protection physique du carbone (Sollins et al, 1996). Cette microporosité permet la rétention de très fortes teneurs en eau et participe ainsi pouvoir tampon exceptionnel des sols des paramos en terme de régulation des précipitations.

Le pourcentage de carbone pondéral augmente avec l'altitude tout comme la porosité du sol. Par conséquent la densité apparente du sol décroît ce qui fait que l'augmentation du pourcentage de carbone dans le sol est compensée par la baisse de la densité apparente. Le stockage du carbone atteint un maximum de 10 g cm⁻³ qui dans le parc du Cajas (Cuenca) a été établi entre 3800 et 3900 m d'altitude (Abcouwer, 2001).

Les résultats de nos études montrent que l'âge et les conditions de mises en place des pyroclastes sont prépondérants pour quantifier le stockage du carbone (Poulenard et al. 2002 sous presse). Ce sont les sols les plus âgés de notre séquence (+/- 3000 ans) ou les plus éloignés des sources d'émission et donc plus finement divisés qui possèdent les propriétés caractéristiques d'Andosols très évolués, qui stockent les plus grandes quantités de carbone et sont les plus micro-poreux (teneurs en eau à 1500 kPa de potentiel matriciel > 1000 g kg⁻¹).

Cas des autres types de sols:

Les tourbières (Histosols) sont très localisées dans les zones dépressionnaires. Leur stock de carbone est encore plus élevé que celui des Andosols, mais leur distribution reste marginale. Les sols non-allophaniques évoluent en fonction de la disponibilité de l'Aluminium. Les sols ocres podzoliques et les Rankers sur les matériaux pauvres en quartz disposent tous d'un horizon organique de 30 à 40 cm d'épaisseur avec des stocks de carbone dépassant les 200T ha⁻¹. En cas de faible disponibilité de l'aluminium dans les roches acides riches en quartz comme dans les micaschistes et gneiss du sud du páramo de Podocarpus (Loja), les acides fulviques en excès complexent tout l'aluminium disponible et migrent. C'est

le phénomène de podzolisation qui est alors dominant. La matière organique s'accumule à l'état non humifié, les stocks de carbone sont aussi très importants.

3. La mise en usage actuelle des páramos

Depuis quelques décennies, on assiste en Equateur, à une colonisation progressive de cet étage d'altitude. En 1964 et 1974, deux réformes agraires furent promulguées pour obliger les grands propriétaires terriens à concéder une partie de leurs terres à leurs employés. Cette redistribution des terres concernait surtout les zones de forte pente et de haute altitude et l'on assista alors à une recolonisation des versants par le petit paysannat. Dans des zones rurales de basse altitude avec une densité de population entre 100 à 150h km⁻² la croissance démographique annuelle entre 1 et 2% (Delaunay et al., 1990). Les surfaces octroyées ne suffisant généralement pas à nourrir une population en pleine croissance démographique. les petites exploitations agricoles paysannes (minifundio) vont s'étendre sur les zones marginales jusqu'alors délaissées, vont coloniser les fortes pentes atteignant 70 à 100% (Huttel et al, 1999) puis coloniser les terres froides de parcours jusqu'à 4000 m d'altitude (De Noni et Viennot, 1993). Or les rendements baissant avec l'accroissement de l'altitude, le taux de mise en culture de nouvelles terres dans certaines région dépasse le taux d'accroissement de la population (Podwojewski et al., 2002)

Cette occupation des zones hautes a conduit à deux types de mises en usage des sols:

- i). une remontée de la frontière agricole dans la zone de transition Forêt andine-páramos (sub-páramo). Cet espace est aujourd'hui de plus en plus utilisé pour des productions à cycle court (pommes de terre, orge, oignons).
- ii). un élevage extensif dans l'essentiel de la zone des páramos proprement dit. Il est généralement associé à des brûlis afin d'obtenir des repousses de plus grande valeur nutritive et plus appétentes pour les troupeaux. Cet élevage extensif s'opérant sur des surfaces de plus en plus restreintes, le surpâturage devient fréquent.

Ces deux types principaux de mise en usage ont des distributions spatiales très complexes en fonction des conditions géographiques (pentes, altitude de la limite inférieure des páramos, possibilité d'accès aux zones hautes...) et des conditions humaines (structure socio-économique du paysannat, possibilité d'autofinancement, présence d'emploi dans les vallées depuis le développement de l'horticulture). Cependant, si la mise en culture des limites inférieures des páramos ne concerne que quelques régions de la sierra équatorienne, l'élevage et le brûlis sont généralisés (Hofstede et al., 1998). Sur les 14 800 km² qu'occupent les páramos équatoriens, près de 8 000 km² seraient déjà fortement utilisé pour des activités agricoles (Hofstede et al., 1998).

La fonctions agricole altère les propriétés de stockage d'eau et de carbone des páramos ; nombreux auteurs ont fait état des risques de modification du cycle globale de l'eau en milieu Andin à la suite aux mises en usages des sols des páramos (Luteyn, 1992 ; Harden, 1996 ; Laegaard, 1992). Or l'impact des activités agricoles et pastorales sur le fonctionnement hydriques des páramos est largement conditionnée par la nature, la diversité et les propriétés des sols de ce milieu (White and Maldonado, 1991).

4. Impact de l'anthropisation sur les propriétés des sols et leur teneurs en carbone.

L'anthropisation des Andosols se manifeste principalement par un changement des propriétés physiques comme la dessiccation irréversible, bien connue des Andosols. Les fortes intensités du rayonnement solaire ainsi que la couleur noire du sol contribuent à l'absorption de chaleur qui favorise l'évaporation.

Les dégradations liées au surpâturage

L'étude des conséquences des mises en usage agricole sur le couvert végétal et les propriétés des sols a été menée dans une zone représentative des páramos Equatoriens soumise à une intense colonisation humaine depuis 20 ans sur la cordillère occidentale, à l'ouest d'Ambato – province de Tungurahua (Podwojewski et al., 2002). Le surpâturage (essentiellement ovin) conduit à une modification drastique du couvert végétal à la fois dans sa structure (fractionnement et réduction de la hauteur des mottes des grandes herbacées comme *Stipa Ichu* et développement de larges espaces de sols nus entre les graminées) et dans sa composition (disparition dans un premier temps des espèces rasantes inter-touffes puis des grandes graminées elles-mêmes). Cette diminution de la biodiversité des espèces végétales s'accompagne d'une diminution de la biomasse (de plus de 2T ha⁻¹ dans les zones non perturbées à moins de 1T ha⁻¹ dans les zones pâturées). Dans les zones les plus fortement et anciennement pâturées, cette dégradation peut aller jusqu'à la mise à nu totale des sols dans les zones de pentes et à la recolonisation progressive des zones de faibles pentes par quelques espèces résistantes au piétinement et présentant un faible pouvoir énergétique (*Agrostis breviculmis*, *Lachemilla orbiculata*) (Luteyn, 1999).

Dans les páramos pâturés, les teneurs en carbone du sol augmentent. Les plantes qui se régénèrent stimulent leur production racinaire et le stock de carbone s'accroît (Hofstede and Rosenaar, 1995). Mais dans le cas d'un surpâturage, les 20 premiers centimètres des Andosols de ces zones mises en usages subissent alors une intense dessiccation et une forte diminution conjointe des stocks en carbone (de 10 kg m⁻² à moins de 5 kg m⁻²) (Figure 3) des teneurs en eau et des teneurs en complexes organo-aluminiques (Figure 4).

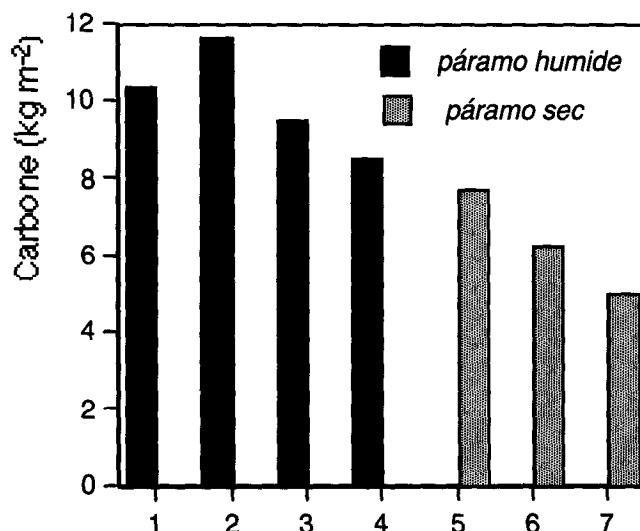


Figure 3. Stockage de carbone (0-15cm de profondeur) dans deux séquences de dégradation dans un paramo pâturés par des ovins. Région de La Esperanza - Province de Tungurahua (d'après Podwojewski et al., 2002). 1 : Non perturbé ; 2 : Recolonisé (pâturé) ; 3 : légèrement dégradé ; 4 : Fortement dégradé ; 5 : Non dégradé ; 6 : Fortement dégradé sur zones planes ; 7 : Fortement dégradé sur zones en pente.

Figure 3. Carbon storage (0-15cm depth) in two sequences of degradation in a paramo grazed by sheep. Region of La Esperanza, Province of Tungurahua (After Podwojewski et al., 2002). 1: Undisturbed, 2: Recolonized, 3: Slightly degraded, 4: Strongly degraded, 5: Undisturbed, 6: Strongly degraded on flat areas, 7: Strongly degraded on slope.

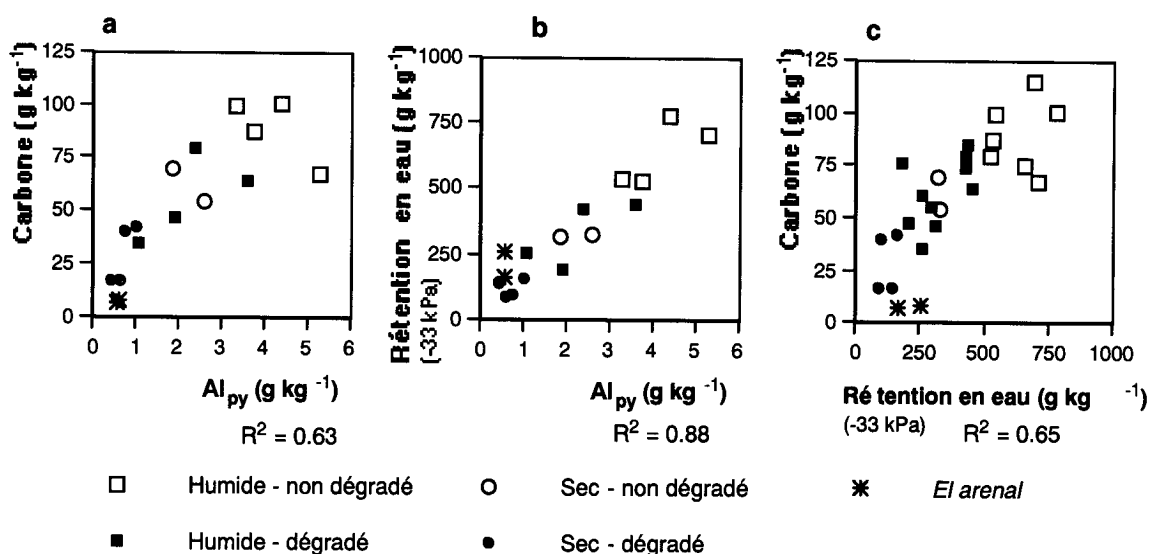


Figure 4. Relations entre les propriétés de différents profils dans un paramo pâturé par des ovins. : (a) Al_{py} - Carbone; (b) Al_{py} - Rétention en eau (à -33 kPa potentiel matriciel); (c) Rétention en eau (à -33 kPa potentiel matriciel) - Carbone. Valeurs de R²; n=16 (a), (b); n=25 (c). Significatif à P < 0,001. (d'après Podwojewski et al., 2002).

Figure 4. Relationships between various soil properties: (a) Al_{py} - Carbon; (b) Al_{py} - Water-retention (at -33 kPa matrix potential); (c) Water-retention (at -33 kPa matrix potential) - Carbon. R² values; n=16 for graph (a), (b); n=25 for (c). Significant at P < 0,001. (After Podwojewski et al., 2002)

Ces modifications conduisent à une altération durable des propriétés physiques avec une perte de capacités de rétention en eau (de 800g kg⁻¹ à 200g kg⁻¹ à -33 kPa de potentiel matriciel). La destruction de la macrostructure et du réseau micro-poreux est complète et son remplacement par une microstructure hautement hydrophobe permet une minéralisation rapide du carbone.

Un autre phénomène contribue à la diminution du stock de carbone. La principale source de revenus des paysans de la zone étudiée est la vente de fientes de mouton aux maraîchers situées dans les basses vallées du sillon inter-andin. Ainsi chaque mois, plusieurs camions de matière organique descendent vers les vallées. On assiste d'une part à une non-restitution d'une partie du carbone consommé par les animaux, mais d'un réel transfert de fertilité vers les zones situées plus en aval, donc plus chaudes qui seront minéralisées plus rapidement.

Comportements hydrodynamiques et érosifs

Les sols des páramos et en particulier les Andosols sont des sols très bien structurés, très filtrants et connus pour être résistants à l'érosion. Plusieurs campagnes de simulation de pluie ont été menées in situ sur des páramos à l'état naturel et après mises en usages (brûlis, pâturage, labour, jachère). Elles ont été menées sur Andosol vitrique (province du Pichicha au-dessus de la ville de Quito) et dans la Carchi près de la frontière Colombienne, dans la réserve d'El Angel sur un Andosol non allophanique très développé. Les résultats montrent que les conductivités hydrauliques à saturation des sols non perturbés sont très élevées (de l'ordre de 60 mm h⁻¹) et qu'elles ne varient que peu en fonction du degré d'altération.

À l'inverse, après les différents types de mises en usages (brûlis, pâturages, labour), on observe i) une augmentation drastique des lames ruisselées et des pertes en sédiments et ii) de fortes différences de comportements entre les types de sols.

Les sols les plus récents sont soumis à de fortes réorganisations superficielles avec un éclatement des agrégats sous l'effet de l'énergie cinétique des pluies (effet "splash"), une réduction importante de la rugosité de surface et la formation de croûtes à conductivité hydraulique réduite. Les coefficients de ruissellement sont alors augmentés d'un facteur 3. Les pertes en terres sont très importantes pendant le processus de formation de ces croûtes, mais réduites dès lors que celles-ci sont formées. Ce comportement est mis en relation avec les faibles stabilités structurales des agrégats de surface.

Les sols les plus évolués présentent en surface des agrégats séchés stables fortement cimentés par des constituants organiques. La formation de croûte est alors un phénomène mineur. En revanche, le tassement des sols et le développement de l'hydrophobie conduisent ici comme dans d'autres milieux (Barret et Slaymaker, 1989) à de fortes réductions des conductivités hydrauliques. Parallèlement, les pertes en sédiments sont extrêmement élevées (jusqu'à plus de 1500 g.m⁻²) et se produisent par un phénomène original de flottaison d'agrégats hydrophobes sur la lame d'eau ruisselée (Poulenard et al., 2001). Pour ces sols évolués possédant les stocks en carbone les plus élevés, il en résulte une perte en carbone par érosion extrêmement forte (Tableau 2).

Tableau 2. Perte en terre cumulée (g m⁻²) et en carbone (en gras) lors de 4 pluies simulées de fortes intensité successives.

Table 2 . Cumulated soil loss (g m⁻²) and carbon (in bold) during 4 successive simulated rainfalls.

Site	Pichincha (1)		Carchi (3)	
	Vitric Andosol		Melano-Aluandosol	
	terre	carbone	terre	carbone
Naturel	49	6.2	37	7.9
Labouré	661	82	284	60
Jachère			1465	310

Les pertes d'agrégats par flottaison ont été décrits par Collinet dans les mêmes types de sols en Amérique Centrale. En Equateur, les principales manifestation de cette érosion sont visibles après la récolte (en particulier de pommes de terre). Dans les zones cultivées, sur très forte pente, les billons ne sont plus maintenus en état, le couvert végétal ne se reconstitue pas rapidement, la une jachère naturelle met plusieurs mois à s'implanter laissant le sol à nu sur de longues périodes. Durant ce laps de temps, on peut observer de mini-loupes de glissement du billon amont vers le billon aval, à 50 cm en contrebas. (Schott, 1997). L'ensemble du sol glisse vers l'aval. Dans la région de la Libertad (Carchi) avec des occupations de sol de minifundios datant de plus de 70 ans, l'horizon humifère a totalement disparu par endroits. Les cendres anciennes infertiles affleurent sous forme de taches claires. Plus de 70 cm de sol ont disparu et se sont redéposés en aval. Dans ces cas précis, l'érosion par le travail du sol est également très important et aucune étude précise n'a permis de souligner son ampleur dans la région.

Mais quel est le devenir de ces agrégats érodés? Dans les zones plus en aval, plus sèches et plus chaudes, la minéralisation de la matière organique est beaucoup plus rapide. Mais une partie de ce carbone sous forme soluble ou particulière migre comme les sédiments

et peut se retrouver piégée soit associée à des composés argileux stables soit sous forme réduite dans des zones anaérobies (comme dans les sédiments des barrages). Ainsi dans certains cas, le carbone érodé ne va-t-il pas être stocké de manière durable ? Aucune étude précise n'est venue corroborer ces observations.

5. Conclusion

Nos résultats mettent en évidence l'importance de l'écosystème des paramos dans le stockage du carbone qui peut sans doute s'étendre à d'autres milieux herbacés d'altitude. Dans le cas des Andosols non allophaniques, le stockage du carbone est lié à la pédogénèse et aux conditions climatiques du milieu en particulier le degré d'humidité et la température. On a observé que ce stockage était concomitant au stockage de l'eau. Lors des processus de dégradation de ces milieux, les deux stocks sont affectés de la même manière.

Les sols des paramos très riches en matière organique apparaissent de prime abord comme résistants à l'érosion. Mais, au vu de leurs propriétés physiques et de leurs spécificités génétiques, les sols des paramos équatoriens, particulièrement les plus évolués parmi les Andosols, apparaissent comme des sols très fragiles. Leur comportement vis-à-vis de l'eau et, par là, leur résistance à l'érosion, risquent d'être considérablement altérés par les manipulations que requiert leur mise en usage.

En revanche il subsiste un grand nombre d'incertitudes quant à la dynamique du carbone dans ce milieu. Il faudrait en particulier estimer la part relative des pertes en carbone par minéralisation et par érosion. Nous ne disposons pas davantage de données au niveau du bassin versant capables de quantifier les transferts de matériaux et leur exportation vers les zones en aval. Ces données permettrait de quantifier les pertes en terre et les pertes en carbone à la fois sous forme solide et sous forme dissoute en fonction du taux d'occupation des sols.

Bibliographie

- Abcouwer, K.M. 2001.** Soil bound carbon in the Ecuadorian Páramo: Soil carbon pool estimation based on an empiric model and validated by field study in Cajas National Park, Azuay. Unpublished doctoral dissertation, University of Amsterdam, Amsterdam
- Aran D, Gury M, Jeanroy E. 2001.** Organo-metallic complexes in an Andosol. Comparative study with a cambisol and podzol. *Geoderma*, **99**: 65-79.
- Ayabaca EJ. 1984.** La escurrentia del Teritorio ecuatoriano. *Thesis PhD*. University of Lomonosov. Faculty of geography, Moscow, 174 p.
- Boudot, J.P., Hadj, A.B., and Chone, T., 1986.** Carbon mineralization in Andosols and aluminium-rich highland soils, *Soil Biology and Biochemistry* 4, 457-461.
- Barret, G., Slaymaker, O., 1989.** Identification, characterization and hydrological implications of water repellency in mountain soils, Southern British Columbia. *Catena*, 16 477-489.
- De Noni, G., Viennot, M., 1993.** Mutations récentes de l'agriculture équatorienne et conséquences sur la durabilité des agrosystèmes andins. *Cah. ORSTOM, sér. pédol.*, Vol. XXVIII, n°2 277-288.
- Delaunay, D., 1990.** La fecundidad. In "transición demográfica en el Ecuador", *Geografía básica del Ecuador*, Tomo II, vol.1, CEDIG-IPGH-ORSTOM-IGM, Quito, 129-185.
- Huttel, C., Zebrowski, C., Gondard, P., 1999.** Paisajes agrarios del Ecuador. *Geografía básica del Ecuador*, Tomo V, Vol. 2, IRD (ex ORSTOM)-IPGH-IFEA-IGM-PUCE, Quito, 285p.

- Guhl E., 1968** - Los páramos circundantes de la Sabana de Bogota : Su ecología y su importancia para el regimen hidrológico de la misma. In *Geo-ecology of the mountainous regions of the tropical Americas*. C. Troll (Ed.) Coll. Geography. 9, pp. 195-212.
- Harden, C.P. 1996** - Interrelationships between land abandonment and land degradation: a case from the Ecuadorian Andes. *Mtn research and development* 16(3): 274-280.
- Hofstede, R.G.M., 1995**. Effects of burning and grazing on a Colombian Páramo ecosystem. PhD dissertation, University of Amsterdam, 199p.
- Hofstede RGM & Rossenaar AGA 1995**. Biomass of grazed, burned and undisturbed páramo grasslands, Colombia.II. Root mass and above ground: below ground ratio. *Arctic and Alpine Research* 27 (1), 13-18.
- Laegaard, S., 1992**. Influence of fire in the grass páramo of Ecuador. In : Balslev, H. and Luteyn, J.L. eds. *Páramo. An andean ecosystem under human influence*. Academic Press, 151-175.
- Luteyn J. L., 1992** - Páramos : why study them ? In *Páramo : An andean ecosystem under human influence*. H. Baslev and J. L. Luteyn, Academic Press, London, 1-14.
- Luteyn, J.L. 1999**. Páramos. A checklist of plant diversity, geographical ditribution and botanical literature. *Memoirs of the New York Bot. Gardens* Vol. 84. New York 278 p.
- Podwojewski, P., Poulenard, J., Zambrana, T., Hofstede, R. 2002-** Overgrazing effects on vegetation cover and volcanic ash soil properties in the páramo of Llangahua and La Esperanza (Tungurahua, Ecuador). *Soil Use and Management* 18 (1) 45-55
- Poulenard J., Toulkeridis, T. and Podwojewski, P., 1999**. Rapid tectonic uplift as revealed by pedologic changes: The Oña Massif, southern part of central Ecuador. 4th International Symposium on Andean geodynamics. ISAG. GAU Göttingen – IRD Paris pp. 597-599.
- Poulenard, J., 2000**. Les sols des páramos sur couverture pyroclastique : genèse, diversité et propriétés physiques. Thèse de l'Université Henri Poincaré Nancy I. 296 p.
- Poulenard, J., Podwojewski, P., Janeau J.L., Collinet J., 2001**. Effects of tillage and burning on hydrodynamic properties of volcanic ash soil in Ecuadorian páramos. *Catena* 45 185-207
- Poulenard, J., Bartoli, F., Burtin, G. 2002a** - Shrinkage and drainage in volcanic soil aggregates : a structural approach using air under vaccum drying kinetics and mercury porosimetry.- *European Journal of Soil Science*. 53 (4) (in press)
- Poulenard J., Podwojewski P., Herbillon A.J. 2002b** - Characteristics of non-allophanic Andisols with hydric properties in Ecuadorian Páramo.- *Geoderma* (in press)
- PRONAREG/ORSTOM 1978**. Cartografía de los suelos de la Republica de Ecuador. 1/200.000. Colmet-Daage Ed., Quito.
- Schott C., 1998**. Diagnostic de l'érosion anthropique et propositions de gestion conservatoire des sols de la zone haute du bassin d'El Angel (Carchi). DESS de l'Université de Dijon, 58p.
- Sollins, P., Sline, S.P., Verhoeven, R., Sachs, D., and Spycher, G., 1996**. Stabilization and destabilization of soil organic matter – mechanisms and controls. *Geoderma*. 74: 65-105
- Van Noordwijk M, Cerri C, Woomer PL, Nugroho K, Bernoux M. 1997**. Soil carbon dynamics in the humid tropical forest zone. *Geoderma*, 79:187-225.
- White, S. and Maldonado, F., 1991**. The use and conservation of natural resources in the Andes of Southern Ecuador. *Mountain Research and Development*, 11(1) 37-55.
- Winckell A, Zebrowski C, Sourdat M. 1997**. Los paisajes andinos de la sierra del Ecuador. In *Los paisajes naturales del Ecuador*. Winckell A (Ed). Geografía básica del Ecuador. Tomo IV, volumen 2. CEDIG Quito 3-207.