

## Les sols des páramos Andins : changement d'usage et dégradation, conséquences sur l'érosion et sur la dynamique de l'eau

### Les sols des páramos andins : un rôle d'éponge dans le cycle de l'eau

#### La fonction hydrologique des paramos

Dans les Andes centrales et septentrionales (Colombie, Equateur), l'étage alpin des cordillères, localement dénommé páramo, est situé entre les neiges permanentes (vers 4 800 m d'altitude) et la forêt andine (vers 3 500 m d'altitude) (figure 1). Ce milieu d'altitude qui couvre plus de 25 000 km<sup>2</sup> en Colombie et en Equateur, jouit d'une très importante biodiversité floristique. Il est largement dominé par de hautes graminées en touffes (*Stipa* sp., *Calamagrostis* sp.) (figure 2) et localement par des rosettes géantes (*Espeletia* sp.) (figure 3). Cet écosystème est considéré comme une «éponge» permettant le stockage d'eau et la régulation des flux hydriques vers l'aval. Une large part de l'alimentation en eau des systèmes d'irrigation des versants et des cultures intensives des vallées (horticulture sous serre), en eau potable des villes du couloir inter-andin et des barrages hydro-électriques dépend des entrées et du cycle de l'eau dans les hautes terres.

#### La fonction agricole des paramos

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.

## Soil degradation and changes in land use in the Andean páramos: consequences for the erosion rate and water dynamics.

### The soil of the Andean páramos and its role as sponge within the water cycle

#### The hydrological function of the páramos

In the Central and Northern Andes (Colombia, Ecuador), the altitudinal belt called the páramo is located between the permanent snow line (about 4 800 m a.s.l.) and the altitudinal forest (about 3 500 m a.s.l.) (figure 1). This high altitude ecosystem, covering over 25 000 km<sup>2</sup> in Colombia and Ecuador, enjoys rich biodiversity with a high level of endemism. The vegetation is dominated by high tussock grasses (*Stipa* sp., *Calamagrostis* sp.) (figure 2) and locally by giant rosettes (*Espeletia* sp.) (figure 3). This ecosystem can be considered as a «sponge», able to store water and thus regulating water flow. Availability of water for the irrigation systems on the hillsides and in the intensely cultivated valleys (greenhouse horticulture), as well as for hydro-electric dams and the cities of the inter-Andean basin (such as Quito, Cuenca, Bogota, Cali) depends on the inputs and the cycle of water up in the high-lands.

#### The agricultural function of the páramos

The páramos are no longer the marginal lands for agriculture production they once were. Demographic growth and successive agrarian reforms have lead to increasing use of high

altitude land. The páramos must thus provide food for an increasing population from land where yield decreases as altitude increases.

#### Two contradictory functions?

These two functions of the páramos, hydrological and agricultural, appear to be at least partly contradictory. The

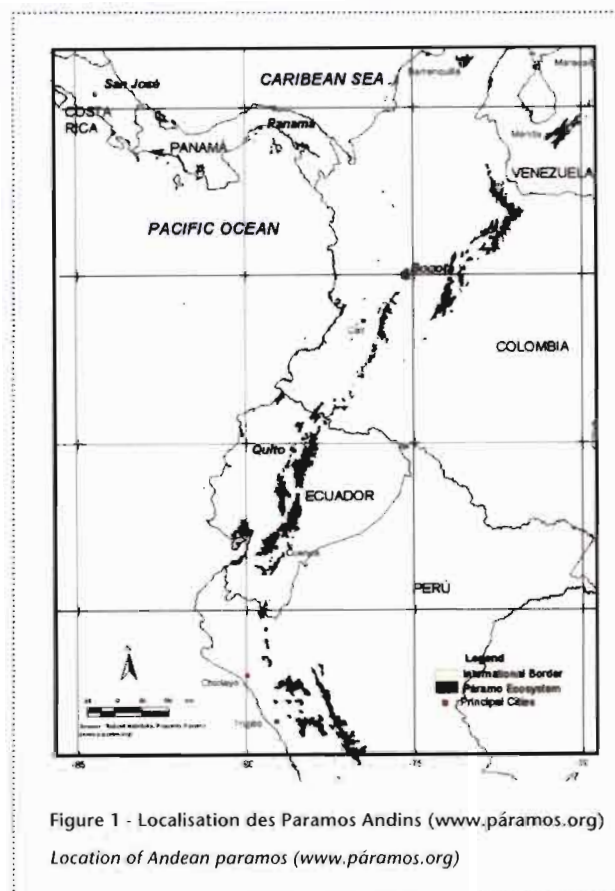


Figure 1 - Localisation des Paramos Andins ([www.páramos.org](http://www.páramos.org))

Location of Andean paramos ([www.páramos.org](http://www.páramos.org))

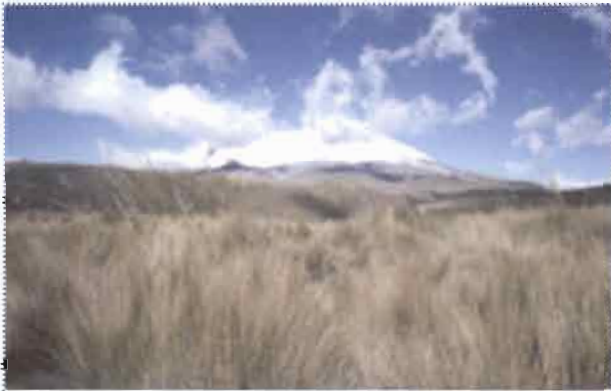


Figure 2 - Paramos graminéens (Antizana, Equateur).  
Herbaceous paramo (Antizana, Ecuador).



Figure 3 - Paramos à Espeletia sp (Carchi, Equateur).  
Páramos with Espeletia sp (Carchi, Ecuador.)

### Deux fonctions contradictoires ?

Ces deux fonctions des páramos (hydrologique et agricole) apparaissent pour une part en contradiction. Les changements d'usage de ces espaces de hautes altitudes semblent en effet profondément perturber la fonction hydrologique en transformant le régime d'infiltration et d'érosion de ces zones avec des conséquences néfastes sur l'alimentation en eau aval.

Une équipe de chercheurs français (IRD UR SOLUTIONS - Université de Savoie UMR CARRTEL) étudie depuis plusieurs années les propriétés hydriques exceptionnelles des sols volcaniques de ces páramos et les modifications de comportement hydro-érosifs qui font suite aux changements d'usage.

### Les sols des páramos sur cendres volcaniques : des propriétés hydriques exceptionnelles fortement reliées à la pédogenèse

Deux facteurs majeurs expliquent cette fonction hydrologique essentielle des páramos :

- le climat spécifique de cet étage altitudinal contribue à une faible évapotranspiration et donc à un bilan hydrique Précipitation-Evapotranspiration largement excédentaire ;
- les sols dérivés de cendres volcaniques qui s'y développent (Andosols) présentent des propriétés exceptionnelles en particulier une énorme capacité de rétention en eau au sein d'une porosité très fine.



Figure 4 - Profil d'Andosol typiques des páramos (Carchi, Equateur).  
Profile of an Andosol typic in the páramos (Carchi, Ecuador).

changes in land use in the highlands seem to be profoundly disrupting the hydrological function by changing the regime of infiltration and erosion in these zones, with a negative impact on water availability downstream.

A team of French scientists (IRD UR SOLUTIONS - Université de Savoie UMR CARRTEL) has for many years studied the exceptional hydrological properties of the volcanic soils of the páramos, and the modification of their hydro-erosive behaviour following changes in land use.

### Páramos soils on volcanic ash: exceptional hydrological properties strongly linked to pedogenesis.

Two major factors explain this essential hydrological function of the páramos:

- the specific climate of this altitudinal ecosystem contributes to low evapo-transpiration and to a large surplus in the rainfall-evapotranspiration balance;
- the volcanic ash soils (Andosols) formed in the páramos have exceptional properties, notably a huge capacity for water retention in very fine pores.

These soils are in fact able to store up to three times their dry weight in water. Recent studies show that this water reserve is dependent on a high degree of micro-porosity that develops during pedogenesis. This structural organisation is in turn conditioned by the accumulation of organic matter (> 100g kg<sup>-1</sup> of soil) establishing stable bonds with metallic elements (Al, Fe). The carbon content in these páramos soils is among the

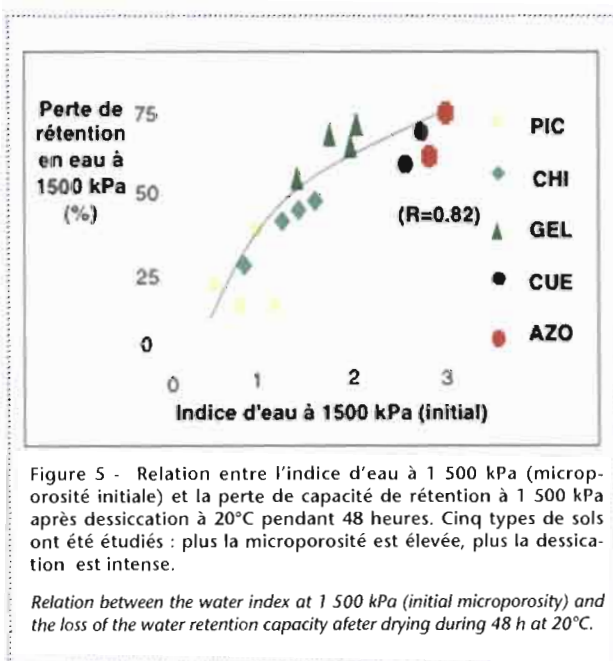
Ces sols sont en effet capables de retenir jusqu'à 3 fois leur poids sec en eau. Les études récentes ont montré que cette importante réserve hydrique dépend d'une abondante microporosité se développant au cours de la pédogenèse. Cette organisation structurale est elle-même conditionnée par l'accumulation de matières organiques ( $C > 100 \text{ g kg}^{-1}$  de sol) qui établissent des liaisons stables avec des éléments métalliques (Al, Fe). Les stocks de carbone de ces sols sont donc parmi les plus élevés au monde pour des sols minéraux (figure 4). Cette caractéristique est due à une très faible activité de la microflore minéralisatrice (Temps Moyen de Résidence du carbone  $> 2\,000$  ans à 40 cm dans la plupart des cas) et au fait que ces sols se développent fréquemment sur des dépôts de cendres volcaniques superposés et qu'ainsi leurs stocks en carbone résultent de plusieurs cycles successifs de pédogenèse récente. Le pouvoir tampon exceptionnel des sols des páramos en termes de régulation des précipitations semble largement dépendant de la dynamique des matières organiques et de leurs associations avec les éléments métalliques abondamment libérés par l'altération des verres. Il existe ainsi une relation très forte entre les propriétés hydriques des sols, leur stock en carbone et leur histoire pédo-génétique. En conséquence, les sols les plus évolués sont aussi les sols qui présentent les plus grandes capacités de rétention en eau.

Or les résultats des études montrent que ces sols sont également les plus fragiles et que la dessiccation des horizons superficiels lors des opérations agricoles (mise en culture et/ou pâturage intensif) modifie complètement l'organisation des particules et donc les propriétés de rétention en eau. La structure engendrée par la dessiccation apparaît extrêmement rigide et la dessiccation est donc en partie irréversible. L'ensemble de ces modifications est très clairement conditionné par l'ampleur de la microporosité initiale (figure 5). Nos études mettent par ailleurs en évidence l'apparition de phénomènes d'hydrophobie de surface après dessiccation avec une augmentation très forte des angles de contact eau-sol au cours du séchage.

### Réformes agraires et mise en usage actuelle des páramos

Comme dans toutes les régions inter-tropicales du monde, du fait de la fertilité des cendres volcaniques, la densité rurale est très forte ( $> 150 \text{ hab km}^{-2}$ ) dans la partie Nord de l'Équateur soumise aux dépôts volcaniques. Depuis quelques

highest in the world for mineral soils (figure 4). This characteristic is due to the very low bacterial activity (mean carbon residence time  $> 2000$  years at 40cm depth in most cases) and to the fact that soils often develop on superimposed ash deposits so that the carbon stock results from several successive cycles of recent pedogenesis. The exceptional buffering power of páramos soils in terms of rainfall regulation seems to be largely dependent on the dynamics of organic matter and its bonds with metallic elements massively liberated during the weathering of volcanic glasses. There is thus a very close link between the hydrological properties of the soils, their carbon content and their pedogenetic history; the most evolved soils are also the soils presenting the highest water retention capacities.



However, our results show that these soils are also the most fragile, and that drying out of the surface horizon during agricultural management (cropping or intensive grazing) completely modifies the organisation of soil particles and therefore water retention capacity. The structure that forms after soil drying appears very rigid and the drying is thus partly irreversible. These transformations clearly depend on the initial micro-porosity (figure 5). Our studies have also highlighted the occurrence of surface water-repellency after drying, with a very marked increase in the contact angle between water drops and soil during the drying process.

### Agrarian reforms and present land use of the páramos

As in most of the world's inter-tropical areas, and because of the fertility of volcanic ash, the rural density is very high ( $> 150 \text{ inhabitants/km}^2$ ) in the northern part of Ecuador characterised by volcanic deposits. Over recent decades population has progressively increased in the Ecuadorian highlands. In 1964 and 1974 two successive agrarian reforms obliged major landowners to concede parts of their land to their employees. For the most part landowners kept the land in the valleys and at middle altitudes, and conceded land on steep slopes and in the highlands. The steep slopes were then resettled by small peasant owners. These areas being generally unable to provide food for a growing population, small peasant holdings (minifundios) then gradually spread across previously neglected marginal areas and into the cold highlands up to 4 000 m a.s.l.

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. Les grands propriétaires conservèrent majoritairement les terres des vallées et les espaces de moyennes altitudes et redistribuèrent les zones de forte pente et de haute altitude. On assista alors à une recolonisation des versants par le petit paysannat. Les surfaces octroyées ne suffisant généralement pas à nourrir une population en pleine croissance démographique, les petites exploitations agricoles paysannes (minifundio) vont peu à peu s'étendre sur les zones marginales jusqu'alors délaissées, puis coloniser les terres froides de parcours jusqu'à 4 000 m d'altitude

### Agriculture et élevage

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

- 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 fève) (figure 6) avec des temps de jachère très longs (entre 5 et 7 ans) après au maximum 2 cycles de



Figure 6 - Culture de pommes de terres dans un páramo à rosettes géantes (Carchi, Equateur).

Potatoe crop in a páramo with giant rosettes (Carchi, Ecuador).

cultures consécutifs à cause de la rétention du phosphore (et du soufre) par les complexes organo-métalliques,

- 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 (figure 7).

### Distribution de ces activités

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)

### Agriculture and grazing

These activities in the highlands have led to two new types of land use:

- The upper limits of agriculture have risen into the transition zone between mountain forest and páramo (sub-páramo); this area is now more and more frequently used for short-cycle crops (potatoes, barley, onions, beans) (figure 6), with long fallow time (5 to 7 years) after at most two consecutive plantings, due to retention of phosphorus (and also sulphur) by organo-mineral complexes.



Figure 7 - Pâturage bovin après brûlis d'un páramo (Pichincha, Equateur).

Cattle grazing after páramo burning (Pichincha, Ecuador).

- Extensive grazing now occurs in most of the páramo area, generally associated with burning to obtain regrowth grass that is more nutritious and more palatable for the herds (figure 7).

### The geographical distribution of these activities

These two main types of new land use have very complex spatial distribution as a function of local geography (slope, exposure to winds, altitude of the lower limit of the páramo, access to the highlands...) and of the conditions of life among the small-holders (socio-economic structure, possibilities of auto-financing, presence of jobs in the valley since the development of horticulture). However if cultivation at the lower limits of the páramo concerns only limited areas of the Ecuadorian Sierra, grazing and burning are widespread. Of the 20,000 km<sup>2</sup> of the Ecuadorian páramo area, over 8,000 km<sup>2</sup> are already heavily used for agricultural activities.

### Impact of human activities on vegetal cover and soil properties

The impact of agricultural land use on vegetal cover and

mos, 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. Sur les 20 000 km<sup>2</sup> qu'occupent les páramos équatoriens, près de 8 000 km<sup>2</sup> seraient déjà fortement utilisés pour des activités agricoles.

### Impact des activités humaines : le ruissellement favorisé au détriment de l'infiltration

L'étude des conséquences des mises en usage agricole sur le couvert végétal et sur les propriétés des sols a été menée dans



Figure 8 - Pâturage ovin et mise à nu du sol d'un páramo (Chimborazo, Equateur).

*Sheep overgrazing and development of bare surface in a páramo (Chimborazo, Ecuador).*

une zone représentative des páramos Equatoriens soumise à une intense colonisation humaine depuis 20 ans. 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 herbacés comme *Stipa Ichu* et *Calamagrostis sp.* 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) (figure 8).

#### Diminution des stocks en carbone

Cette diminution de la biodiversité des espèces végétales conduit, dans les zones les plus fortement et anciennement pâturées, jusqu'à la mise à nu complète des sols dans les zones de pentes (figure 9). Les 20 premiers centimètres des Andosols de ces zones mises en usages subissent alors une intense dessiccation et une forte diminution des stocks en carbone (de 10 kg m<sup>-2</sup> à moins de 5 kg m<sup>-2</sup>). Ces modifications conduisent à une altération durable des propriétés physiques avec une perte de capacités de rétention en eau (de 800 g kg<sup>-1</sup> à 200 g kg<sup>-1</sup> à -33 kPa de

*soil properties has been studied in a representative area of the Ecuadorian páramo that has undergone intense human colonization over the last 20 years. Overgrazing, essentially by sheep, leads to a drastic change in the vegetal cover, both in its structure (the tussocks of tall grasses like *Stipa Ichu* and *Calamagrostis sp.* are broken up, and are lower, and large bare areas develop between tussocks) and in its composition (disappearance first of ground-hugging species between the tussocks, and later of the tall grasses themselves) (figure 8).*

#### Decrease in carbon content

*In the oldest and the most severely overgrazed zones, this decrease in floristic biodiversity leads to completely bare soils on sloping ground (figure 9). The first 20 cm of the topsoil of these degraded areas suffers intense drying out and a severe decrease in carbon content (from 10 kg m<sup>-2</sup> to less than 5 kg m<sup>-2</sup>). These modifications lead to long-term deterioration of the soil's physical properties, including a decrease in water-retention capacity (from 800 g kg<sup>-1</sup> to 200 g kg<sup>-1</sup> at -33 kPa of matrix potential), destruction of the macro-structure, and development of a microstructure with highly water-repellent properties that favour water runoff instead of infiltration.*



Figure 9 - Stade avancé de dégradation d'un páramo par surpâturage (Tungurahua, Ecuador).

*Severely degraded páramo by sheep overgrazing (Tungurahua, Ecuador).*

#### Different soil type, different behaviour

*Many rainfall simulation campaigns have been conducted in situ on natural páramos and after different types of land use (burning, grazing, tillage, fallow). Results show that hydraulic conductivity in unperturbed saturated soils is very high (60 mm h<sup>-1</sup>) and that there is little variation with the state of deterioration of the soil. After burning, grazing or tilling, on the other hand, we can observe:*

- a drastic increase in runoff rate and sediment loss,
- marked differences in the behaviour of different soil types (figure 10).

*The most recent soils are submitted to intense superficial*

potentiel matriciel), une destruction de la macrostructure et le développement d'une microstructure hautement hydrophobe favorisant le ruissellement au détriment de l'infiltration.

### Différents types de sols : différents comportements

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). Les résultats montrent que les conductivités hydrauliques à saturation des sols non perturbés sont très élevées (de l'ordre de 60 mm h<sup>-1</sup>) 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 :

- une augmentation drastique des lames ruisselées et des pertes en sédiments,
- de fortes différences de comportements entre les types de sols (figure 10).

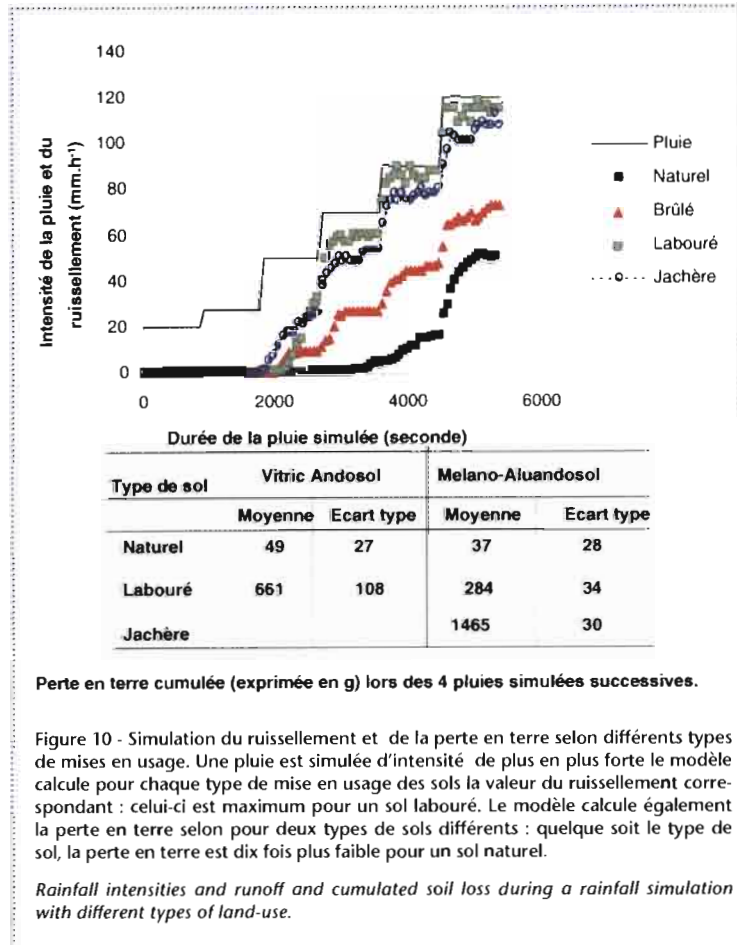
Les sols les plus récents sont soumis à de fortes réorganisations superficielles avec un éclatement des agrégats sous l'effet de l'énergie cinétique des pluies (effet « splash »), une réduction importante de la rugosité de surface et la formation de croûtes à conductivité hydraulique réduite. Les coefficients 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. Ici, le tassement des sols et le développement de l'hydrophobie conduisent à de fortes réductions des conductivités hydrauliques. Parallèlement, les pertes en sédiments sont extrêmement élevées (jusqu'à plus de 1500 g m<sup>-2</sup>) et se produisent par un phénomène original de flottation d'agrégats hydrophobes sur la lame d'eau ruisselée.

*reorganisation, with breaking up of aggregates by the kinetic energy of raindrops (splash effect), considerable decrease in surface roughness, and formation of crusts with low hydraulic conductivity. Runoff coefficients increase by a factor of 3. Soil losses are very heavy while crusts are being formed, but reduced after their formation. This behaviour is related to the weak structural stability of surface aggregates.*

*The most evolved soils present surface aggregates that are very stable and strongly cemented by organic components. Soil compaction and the development of water repellency lead to a marked decrease in hydraulic conductivity. At the same time soil losses are very high (over 1500 g m<sup>-2</sup>) and are produced by an original phenomenon of flotation of water repellent aggregates above the runoff water.*

*The available data for watersheds with considerable uncontrolled agro-pastoral activity in their upper reaches confirm our selective measurements, as concerns increased erosion rates (data from the hydro-electric dam on the Rio Paute) and also increased occurrence of extreme water regimes (prolonged periods of low water levels and rapid intense flooding).*



*cerns increased erosion rates (data from the hydro-electric dam on the Rio Paute) and also increased occurrence of extreme water regimes (prolonged periods of low water levels and rapid intense flooding).*

### Differentiated soil management according to soil history

*The Ecuadorian páramos, which have sustained profound changes in land use and increased pressure from grazing, are in the process of losing their capacity to store water and to regulate water flow. Erosion rates on burned and cultivated páramos have also increased dramatically. Our results clearly demonstrate that the diversity and history of the soils must be taken into account in all proposals for sustainable long-term management of this ecosystem and its water resources. Our own recommendations would be for differentiated management of these highlands in terms of their response to changing land use. Areas where the soils are the*

Les données disponibles à l'échelle de bassin-versants à forte activité agropastorale non maîtrisée dans leur partie amont confirment les mesures ponctuelles effectuées tant en terme d'accroissement de l'érosion (données sur le remplissage du barrage hydroélectrique du rio Paute) que d'accroissement des régimes hydrologiques extrêmes (étiages prolongée et crues intenses et rapides).

### Une gestion différenciée selon l'histoire des sols

Les páramos d'Equateur soumis à une dynamique de mise en usage et d'augmentation des charges pastorales perdent en partie leurs propriétés de stockage et de régulation des flux hydriques. On constate également une augmentation drastique de l'érosion des páramos brûlés et mis en culture. Nos résultats montrent clairement que dans ce milieu, la diversité et l'histoire des sols doivent être pris en compte dans les propositions de gestion durable de l'écosystème et des ressources en eau. Ainsi nous sommes en mesure de recommander des méthodes de gestion différenciées de ces espaces d'altitudes en fonction de la réponse du milieu face à des changements d'usages. Les zones avec les sols les plus évolués doivent être mis en défends (parc nationaux) alors qu'une activité pastorale paraît possible sans mise en danger de la fonction hydrologique (avec des charges adaptées aux milieux) dans d'autres zones dans lesquels des programmes de conservation participative peuvent être mis en place en lien avec les ONG.

### En conclusion, la fragilité des sols de montagne...

Les relations que nous avons établies entre constituants organiques et propriétés hydriques mettent donc en évidence la nécessité de promouvoir des méthodes de gestion commune des réserves en carbone et en eau, toutes deux exceptionnelles dans les páramos. Cette interdépendance particulièrement forte entre matières organiques, structure des sols et propriétés hydro-physiques constitue un trait commun à l'ensemble des sols de montagne. Cette caractéristique semble dès lors un élément clef pour expliquer la fragilité et la sensibilité particulière des écosystèmes de montagnes jusqu'alors peu anthropisés aux changements d'usages. L'évolution de ces interactions dans les sols de montagne soumis à des changements d'usages et à des changements climatiques et ses conséquences en terme de minéralisation et perte par dégazage de stock de carbone préalablement constitué et en terme de dynamique hydrique doit être poursuivi dans les Andes mais également dans d'autres zones de montagne (Alpes, Asie...).

*most degraded must be protected (national parks), whereas controlled grazing would appear to be possible without endangering the hydrological properties of the land in other areas where participative conservative programmes can be established in cooperation with NGOs.*

### Conclusion: the fragility of mountain soils...

*The connexions we have established between organic components and hydrological properties highlight the need to promote joint management of carbon and water reserves, both of which are exceptional in the páramos. A particularly high level of interdependence between organic matter, soil structure and its hydro-physical properties is common to all mountain soils. This characteristic is a key to understanding the particular fragility and sensitivity of relatively untouched mountain ecosystems when suddenly confronted with changes in land use. It is important to continue monitoring the reactions of mountain soils to changes in use and in climate, and the consequences of these changes in terms of water dynamics and of mineralisation and loss of stored carbon; this monitoring is relevant not only in the Andes but also in other mountainous areas (the Alps, Asia, etc...).*

#### Contact : Pascal Podwojewski (IRD)

UR 176 SOLUTIONS  
IRD, Centre de l'Île de France  
32 Avenue H. Varagnat 93143 Bondy cedex  
podwo@bondy.ird.fr

#### Jérôme Poulénard

CARTELE, UMR A42 INRA/Univ. Savoie  
Université de Savoie  
73376 Le Bourget du Lac cedex  
jerome.poulénard@univ-savoie.fr