

HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

Constituants et propriétés des sols pour une mise en usage Effets du changement d'usage sur les constituants et les propriétés des sols.

Exemple des hautes terres d'altitudes ou páramos en Equateur



Cultures sur fortes pentes dans la cordillère occidentale près du village de Zumbahua (province du Cotopaxi, Equateur).

**Habilitation soutenue le 15 février 2007 à l'Université Pierre et Marie Curie, PARIS VI.
Laboratoire Bioemco**



Institut de recherche
pour le développement

Pascal PODWOJEWSKI

UR 176 SOLUTIONS

Sols, Usage des terres, Dégradation,
Réhabilitation

Résumé

Le sol, composante essentielle de tous les écosystèmes terrestres, est reconnu pour être à l'origine des 2/3 de la production primaire exploitée par l'humanité pour sa nourriture, son habitation, son énergie. L'étude des sols a d'abord été orientée vers sa fonction agronomique propre aux propriétés de ses constituants minéralogiques ou physico-chimiques qui est le reflet de son évolution. Mais il a également une fonction environnementale fondamentale régulatrice des flux hydriques ou sur l'activité biologique. Sous influence anthropique et par modification des changements d'usage, les constituants minéralogiques, physico-chimiques et biologiques du sol sont transformés en fonction d'une sensibilité propre à chaque type de pédogenèse, altérant de manière parfois durable les fonctions agronomiques et environnementales et en particulier la ressource en eau. Cette évolution est soulignée par 3 exemples :

Dans le premier exemple, en Nouvelle Calédonie j'ai montré que pour mieux valoriser la fonction agronomique des sols, très peu utilisée, la cartographie des sols et l'étude de ses constituants étaient un préliminaire indispensable. Ainsi les vertisols calcimagnésiens ont été considérés comme ayant plus grand potentiel agronomique. Leur disposition dans l'espace et leurs propriétés chimiques sont à la fois le fruit d'un héritage géologique et des paléoclimats souligné par traçage des constituants par les minéraux lourds, par la micromorphologie des sulfates (gypse) et des carbonates ou par les isotopes du Soufre et du Strontium.

Dans le deuxième exemple, le plus détaillé qui est une synthèse complète sur les sols de l'écosystème des hautes terres d'altitude (les páramos) en Equateur, j'ai montré que les effets de l'anthropisation et du changement d'usage agissaient sur les constituants des sols selon leur degré d'évolution et altéraient en retour les fonctions environnementales des sols. En effet les sols des páramos sont connus pour être le château d'eau des cordillères andines. Ils assument une fonction régulatrice des flux hydriques desservant tous les habitants de la cordillère andine. Mais du fait de l'accroissement démographique et de l'importante densité rurale cet écosystème sous cendres volcaniques longtemps marginalisé est soumis depuis les dernières réformes agraires à une fonction agronomique qui altère durablement la fonction environnementale comme la dynamique hydrique et les régimes d'infiltration et de ruissellement. Les sols les plus fertiles se développant sur pyroclastes et sont des andosols non allophaniques. Sous climat froid et humide et en fonction de la disponibilité des ions Al^{3+} , le carbone qui atteint des concentrations très élevées de plus de 200 g kg^{-1} forme des gels stables avec les éléments métalliques (Fe-Al). Plus les sols sont anciens et distants des sources d'émission, plus ils sont évolués. L'évolution pédogénétique conduit à la formation d'un épipédon mélanique aux propriétés hydriques où l'eau stockée dans les micropores peut atteindre 3000 g kg^{-1} de sol sec. Plus les sols sont évolués plus ils seront sensibles et soumis à des transformations irréversibles. Les feux répétés, le surpâturage diminuent la couverture végétale et mettent à nu des surfaces qui deviennent fortement hydrophobes. Dans la partie supérieure du sol, un effondrement de la structure conduit à une chute corrélée des teneurs en carbone et en eau de plus de la moitié de leur valeur. Le travail du sol conduit à exposer le sol à la pluie et aux orages de grêle et à une dessiccation irréversible. Les croûtes structurales se développent entraînant un ruissellement accru. L'effet durable de ce changement d'usage conduit à la diminution des capacités régulatrices des páramos, avec des pics de crue et des étiages plus prononcés. Les charges en sédiments érodés devraient augmenter par l'érosion par flottaison d'agrégats hydrophobes

Dans le troisième exemple, le programme MSEC en Asie nous a permis de mesurer les flux hydriques et particuliers dans des petits bassins représentatifs de 50 ha sous climat de mousson, à forte pente, composés d'acrisols et soumis à un changement d'usage. Ainsi au Vietnam l'abandon d'une culture de manioc qui occupait 40% du bassin versant au profit d'une jachère et d'une plantation d'arbres a vu diviser par 4 en 5 ans la perte en sédiments qui s'établit actuellement à 1 t ha^{-1} . L'augmentation de l'activité lombricienne et la formation de turricules hydrophobes ont contribué à la diminution de l'érosion par augmentation de leur stabilité structurale et de la rugosité de surface. En revanche puisque ces turricules sont enrichies en matière organique, et en nutriments, leur fragmentation en surface lors de cultures annuelles intensives conduit à une perte plus importante par érosion d'agrégats stables. Les flux hydriques de base ont diminué dans les nouvelles parties reboisées. Le changement d'usage a dans ce cas principalement affecté l'activité biologique qui elle-même influe sur les propriétés physiques chimiques et hydrodynamiques.

Abstract

The soil is an essential component of the terrestrial ecosystem and is the origin of 2/3 of the primary production exploited by man for food, shelter or energy. Initial soil studies focussed on its agronomical function linked to the mineralogical and physico-chemical properties that resulted in a clearer understanding of its pedological evolution. But it has also an environmental function in regulating water fluxes or biological activity. Under human influence through land-use change the mineralogical, physico-chemical and biological soil properties of soils are modified in function over time that has a pedological impact that influences both agronomical and environmental function, in particular water fluxes. Three examples are presented to illustrate this evolutionary process.

In the first example from New Caledonia, I demonstrate that to valorize the agronomical function of soils, the soil mapping and the determination of the soil components were essential. Vertisols when they are calcimagnesian present the best agronomic potential. Their distribution in landscape is function of the geology and paleoclimate heritage where their components can be traced by heavy minerals, by the micromorphology of sulphate (gypsum) and carbonates, or by the values of S and Sr isotopes.

In the second example more detailed which is a complete synthesis of soils in a high altitude grassland ecosystem (páramos) in Ecuador, I showed that the effects of human activities modified soil attributes in function through that drastically influenced in a negative manner their environmental function through alterations in the hydraulic properties of these soils that altered their runoff and infiltration regimes. The soils of the páramos are considered as the water reserves of the Andean cordilleras. During the last decades, the páramos which for a long time was considered as marginal for agricultural production is increasingly encroached by agricultural due to increased population pressure and agrarian reforms. This new agricultural function is suspected to disturb the primary hydrological function of the páramos, altering infiltration and run-off regimes. The most fertile soils develop on volcanic ashes are non-allophanic Andisols. Under humid and cold climatic conditions which are typical for the páramos, and depending on the Al availability of the parent rock, the organic carbon which can reach very high concentrations over 200 g kg^{-1} forms stable complexes with metallic elements (Al-Fe). The older the ashes deposits and more distant are the active volcanoes, the greater the degree of soil development. The evolution of the pedogenesis leads to the development of a melanic epipedon with hydric properties, where the water storage capacity mainly in the micro-pores can reach 3000 g kg^{-1} . The greater the degree of evolution of these soil the greater the sensitivity to irreversible changes after land-use. Repeated fires and overgrazing reduced the vegetation cover and foster the permanent drying of bare surfaces that become highly water-repellent. In the top 20 cm, the soil structure collapses and carbon and soil water-content decrease drastically to more than half of their initial value. Due to tillage, the soils are exposed to rain and hail storms and to irreversible drying. Structural crusts develop on the soil surface so that runoff increases three fold. Thus, due to ongoing land use change, several important changes in the hydrologic regime of the páramos region may be expected such as increased peak discharges during runoff events and a reduction of base flow. At the same time, sediment loads may go up due to increased soil erosion due to floating water-repellent aggregates.

The third example, which is the MSEC project in Asia, allowed us to measure hydric and eroded particles fluxes in a small 50 ha watershed within a monsoon climate, composed mainly of Acrisols with steep slopes and subjected to land-use changes. In Vietnam, the cultivation of cassava on 40% of the watershed was stopped and replaced by fallow nature grass recruitment and fast growing tree plantations. After 5 years, soil loss from the catchment was reduced 4 fold and stabilized at around $1\text{ t ha}^{-1}\text{ yr}^{-1}$. The increase of earthworm activity and the formation of water-repellent casts contributed to a decrease of soil loss by increasing the structural stability and surface roughness of these Acrisols. However, the earthworm casts are enriched in organic matter and nutrients, their fragmentation at the soil surface leads to an increase of erosion of stable aggregates in case of intensive annual cropping. The hydraulic fluxes also decrease in newly forested areas. The land use change affected first the biological activity which influenced also the physico-chemical and hydrodynamic soil properties.

Avant propos

Dans ce mémoire j'ai voulu d'une part montrer l'évolution de mes recherches au cours du temps mais d'autre part développer et faire une synthèse complète consacrée à l'évolution des sols dans un écosystème très sensible et en voie de dégradation : **les páramos d'Equateur**.

Ce travail est dédié à *Claude Zebrowski*, qui a initié cette recherche et qui est décédé accidentellement durant nos investigations en Avril 1998 sans avoir pu voir l'aboutissement de ce travail. Il est également dédié à *Michel Monzier* décédé sur le terrain en Equateur en 2004, collègue de travail depuis mon arrivée à l'ORSTOM en Nouvelle Calédonie, pétrographe des régions volcaniques et qui était toujours de bon conseil sur la géochimie des sources des cendres.

Le travail de terrain a commencé par l'encadrement de la thèse de *Jérôme Poulenard* soutenue l'an 2000. Jérôme a effectué l'essentiel des caractérisations des constituants chimiques et physiques des sols dérivant de pyroclastes. J'ai poursuivi ce travail pour les sols non dérivés de roches pyroclastiques puis dans ce mémoire j'ai réorganisé et synthétisé notre travail consacré aux mécanismes de dégradation de ces sols après mise en usage. Actuellement nous poursuivons notre collaboration dans d'autres régions montagneuses en particulier au Vietnam.

Nous pouvons également remercier les étudiants pour leur participation à ce travail et nous décernons une mention spéciale à *Tania Zambrana* étudiante Bolivienne à l'ISTOM qui de part sa facilité d'élocution a pu nouer des relations de travail très fructueuses à la fois en milieu paysan et universitaire pour mener à bien son travail à Quito.

Je tiens également à remercier *Robert Hofstede* écologiste de l'Université d'Amsterdam, pour son aide dans la compréhension du fonctionnement de cet écosystème. Robert Hofstede est fondateur du groupe de recherche sur les páramos (www.páramos.com) qui synthétise toutes les publications consacrées páramos.

Table des matières

Première partie

Curriculum Vitae	11
Etudes Universitaires.....	11
Résumé de carrière	11
Apprentissage	11
Affectation en Nouvelle Calédonie	12
Affectation en métropole (Bondy puis Strasbourg)	13
Affectation à Quito - Equateur.....	13
Affectation en métropole a bondy.....	14
Affectation au Vietnam	14
Activités d'enseignement	15
Nouvelle Calédonie 1980-1989.....	15
Strasbourg 1990-1996	15
Equateur 1996-2000	15
Bondy 2000-2002.....	16
Encadrements	18
Sur le terrain en Equateur.....	18
Sur le terrain en Thaïlande	18
Encadrement au laboratoire de Bondy	19
Co-encadrement sur le terrain au Vietnam (2003-2005).....	19
Encadrement d'Etudiants du Sud en France.....	20
Liste des Publications	21
Revue à comité de lecture.....	21
2. Participation à des ouvrages.....	22
3. Diplômes	22
4. Rapport d'expertise et/ou de conventions	23
5. Rapports de conventions cartographiques, édition Orstom-Nouvelle-Calédonie,	23
6. Communication à des colloques ou congrès et forums	24
7. Rapports pédologiques	26
8. Autres rapports internes	26
9. Articles de presse	27
10. Support de cours.....	27

Deuxième partie

I. DES CONSTITUANTS DES SOLS A LA MISE EN USAGE	31
11. La cartographie des sols en nouvelle calédonie	31
De la cartographie de semi-détail (1/50 000 à 1/25 000) à la synthèse régionale et aux cartes de contraintes	31
L'organisation et la distribution des sols dans le paysage	31
Amélioration de la présentation des cartes pédologiques.....	31
Les travaux finalisés : la carte pédologique de synthèse au 1/200 000 de La Nouvelle Calédonie.	32
12. Les constituants des sols - exemple : les vertisols.....	32
121. L'étude des vertisols calcimagnésiques	32
121-1. La répartition des vertisols	32
121-2. La classification des vertisols.....	32
122. Les traceurs et la formation des sols.....	32
122-1. Etude macro-morphologique et traçage par minéraux lourds	32
122-2. Traçage isotope du gypse	33
122-3. Etude macro et micromorphologique au niveau du paysage, du profil et de l'horizon	33
123. Importance des constituants sur le comportement des sols	33
13. La mise en usage des vertisols	33
L'intérêt agronomique des vertisols.....	33

II. DE L'USAGE DES SOLS A LEURS CONSTITUANTS	35
1. Le Milieu et les méthodes d'étude.....	35
11. Pourquoi les étudier ?	35
12. Définition	37
13. Les facteurs climatiques	37
131. Les températures.....	37
132. La pluviométrie	38
133. Autres facteurs climatiques	39
14. La végétation	39
141. Les graminées en touffes	42
142. Les rosettes géantes et autres espèces herbacées érigées :	42
143. Les arbustes isolés	42
144. Les rosettes acaulescentes	43
145. Les plantes en coussins.....	43
15. Géologie-géomorphologie.....	43
151. Géomorphologie	43
Les páramos du Nord de l'Equateur.....	44
Les páramos du Sud de l'Equateur.....	44
152. Géologie	45
152-1 Le nord de l'Equateur	45
Dans le sud de l'Equateur.....	46
16. Sites d'étude	46
17. Méthodes d'études.....	47
171. Les mesures physiques	47
172. Les mesures chimiques.....	47
173. Les simulations de pluie	49
2. Les sols des páramos	50
21. Les sols sur cendres volcaniques.....	51
211. Les sols du supra-páramo	51
212. Morphologie et stratigraphie des sols du páramo.....	51
Les facteurs de formation des sols leur différenciation	52
213. Pédogenèse et classification	53
213-1-Evolution des Andosols	55
213-2-Propriétés	57
L'indice mélanique.....	59
215. La rétention en eau	59
22. Les sols formés sur une roche non pyroclastique.....	60
221. Les sols du supra-páramo	60
222. Morphologie des sols du páramo.....	60
222-1-Les zones de Saraguro et d'Oña	60
222-2-Le páramo du Podocarpus.....	61
223. Pédogenèse et classification	64
223-ud une individualisation des oxydes 1- Processus d'Andosolisation dans les sols non volcaniques : les zones de Saraguro et d'Oña	64
223-2-Le páramo du Podocarpus.....	65
224. Propriétés	66
224-1- Stockage du carbone :	66
224-2-Stockage de l'eau.....	66
3. Les usages du páramo et leur dégradation	68
31. Usages du páramo	68
32. La fertilité des sols des páramos.....	69
33. Les formes d'érosion des páramos.....	69
331. Les mouvements de masse	69
332. L'érosion linéaire	70
333. L'érosion éolienne.....	71
34. Impact des activités humaines sur la couverture végétale et les propriétés des sols.....	72
341. Les effets des sentiers, routes et passage d'engins mécaniques.....	72
342. Les effets des feux	73
343. Les effets du surpâturage.....	73

344. Les plantations forestières (pinus).....	76
345. Effets de la mise en culture	76
345-1- Effet sur la surface du sol.....	77
345-2- Effets de la dessiccation sur les sols des páramos	77
345-3- La mise en culture et l'érosion aratoire.....	79
345-4- Effets de la mise en culture sur l'érosion hydrique	79
35. Effets de la mise en usage sur les ressources en eau.....	81
Echantillons.....	82
36. Alternatives à la mise en usage des paramos : Les raisons de réhabiliter la cangahua	83
361. Caractérisation de la cangahua	83
362. Conclusion de l'étude pédologique de la cangahua réhabilitée.....	84
37. Bilan de la mise en usage des páramos - perspectives	84
III - EFFETS DU CHANGEMENT D'USAGE SUR LES FLUX EROSIFS.....	85
Activités de l'Unité de Recherche liés à l'érosion et à la dégradation des terres.....	85
Le questionnement scientifique.....	85
Sur les processus.....	85
Sur la quantification des flux.....	85
Méthodologie :	86
Premiers résultats au Vietnam.....	86
Premiers résultats en Asie	87
Contexte	89
Objectifs et démarche scientifique	89
IV. CONCLUSION	91
V. BIBLIOGRAPHIE.....	93
Chapitre I. Des constituants du sol à la mise en usage.....	93
Chapitre II. De l'usage des sols à leurs constituants.....	93
Chapitre III - Effets du changement d'usage sur les flux erosifs.....	99

I - PARTIE ADMINISTRATIVE

CURRICULUM VITAE

Pascal Podwojewski
Né le 7 octobre 1957 à Creutzwald (57)
Marié, trois enfants

Adresse personnelle

72, rue de Queuleu
57070 METZ
Tel. 03 87 56 95 72
Cel. 06 33 03 68 57

Situation administrative

CR1 - CSS 3 - Département des Ressources vivantes (DRV)
Membre de l'UR 176 SOLUTIONS (Sol, usage, dégradation, réhabilitation)
courriel : podwo@bondy.ird.fr

Affectation jusqu'au 31/12/2005

IRD-IWMI, Ambassade de France
57, Tran Hung Dao, HANOI, VIETNAM

Affectation du 1/1/2006 au 20/09/2006

Centre IRD de l'île de France
32, Av. H. Varagnat
93143 Bondy cedex

Affectation à partir de 01/10/2006

Université du KwaZulu Natal
Pietermaritzburg - AFRIQUE DU SUD

Etudes Universitaires

- 1974 : **Bac D** : Académie de Nancy-Metz
- 1976 : **Deug NV** (nature et vie), Université de Nancy I, option géologie, stage de terrain à Raon sur plaine (Vosges)
- 1979 : **maîtrise** de géologie à l'Université de Nancy I

ENTREE A L'ORSTOM

- 1979 : **Concours Elève ORSTOM**
- 1980 : **DEA** fédéral de pédologie (ORSTOM, INA Paris-Grignon, Paris VI).
- 1992 : **THESE** de l'Université Louis Pasteur à Strasbourg

RESUME DE CARRIERE

Apprentissage

- 1976 : **Deug NV** (nature et vie), Université de Nancy I, option géologie, stage de terrain à Raon sur plaine (Vosges)

Maîtrise de géologie

- 1977 : 1ère année de maîtrise de géologie :
C1 - pétrologie sédimentaire et cristalline, stage de terrain métamorphisme, haute

vallée de l'Ardèche.

1978 : 2ème année de maîtrise de géologie :

C2 - géologie historique, stage de terrain au Plan d'Aups (Bouches du Rhône) et à Brignolles (Var).

C3 - géologie structurale, étude de la carrière de l'entrouite d'Euville (Meuse) et stage de cartographie des isohypses du Jurassique à Thiocourt (Meuse).

1979 : C4 - pédologie, stage de terrain à Aubure (Haut Rhin).

Diplôme de la **maîtrise de géologie** de Nancy I, option pédologie.

Maître auxiliaire durant 3 mois en sciences naturelles, Académie de Nancy-Metz.

Stage durant l'année au CPB (CNRS) sous la direction de B. Guillet sur l'application des techniques analytiques appliquées à un loess sur arène granitique. 1979 : C4 - pédologie, stage de terrain à Aubure (Haut Rhin).

1979 : Recrutement à l'ORSTOM

1980 : DEA fédéral de pédologie (ORSTOM, INA Paris-Grignon, Paris VI).

Première année d'élève ORSTOM, stage de terrain à Grignon et de cartographie des sols dans le Morvan.

Affectation en Nouvelle Calédonie

1980 Novembre : Arrivée en Nouvelle Calédonie, 1ère affectation

1981 : Deuxième année d'élève ORSTOM. Stage de terrain à Oua-Tom, carte au 1/25 000 et mémoire d'élève sur les sols salés, diplôme ORSTOM.

1981-1984 : Cartographie de terrain au 1/50 000 de Kaala Gomen, de la Tontouta et au 1/25 000 des vallées de la Tiwaka et la Tchamba.

1982-1983 : VSN à l'ORSTOM de Nouméa, Nouvelle Calédonie.

1984 : Début de l'étude des sols à gypse, forages dans les colluvions et alluvions.

Titularisation fonctionnaire EPST. Première inscription en thèse à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, à l'Institut de Géologie chez J. Lucas.

1984 Septembre : Deuxième affectation en Nouvelle Calédonie

1985-1987 : Cartographie pour la synthèse au 1/200 000. Dessin et réalisation de la carte. Prospection pour la thèse, travaux à Tiaré (7 profils), à l'île Leprédour (30 profils), et dans la basse vallée de La Tamoia (14 profils).

1986 : Juin-septembre : mission de travail pour les cacaoyers à Malikolo (Vanuatu), description de 250 profils et production de 2 cartes au 1/10 000.

Congés de décembre 1986 à septembre 1987

Convention de travail avec M. Arnold du CRPG (CNRS) de Nancy pour les isotopes du soufre. Travail à Bondy, examen d'échantillons au MEB, programme de travail avec Marc Fournier pour ¹⁴C et avec Mireille Delaune pour les minéraux lourds.

1987 Septembre : Troisième affectation en Nouvelle Calédonie

1987 - 1989 : Responsable de la section pédologie ; complément de travail sur les vertisols et encadrement du travail de E. Bourdon sur les cuirassements des sols oxydiques.

1987 : Mission de travail à Wallis, étude BRGM sur l'épandage des eaux usées.

1988 : Visite des laboratoires du CSIRO d'Adelaide, Canberra et Brisbane (Australie), tournée sur le terrain dans les Darling Downs pour voir les vertisols.

- Mission aux îles Salomon, colloque sur l'agriculture familiale organisé par l'IBSRAM.

- Mission de travail sur la fertilité des sols sous cocotiers (étude de 15 profils) dans la station de recherche pour le développement du cocotier de l'IRHO (CIRAD)

à Santo (Vanuatu).

1989 : Mission de travail sur la fertilité des sols sous cocotiers à Ouvéa (Iles Loyauté), étude de 15 profils. Retour en France en juin

Affectation en métropole (Bondy puis Strasbourg)

1989 Novembre : Affectation à Bondy

1989 -1991 : Rédaction de la thèse et début de rédaction d'articles.

1991 Septembre : Affectation à Strasbourg à l'Institut de Géologie (Université Louis Pasteur) puis au Centre de Géochimie de la Surface (CNRS)

1992 : **THESE** de l'ULP de Strasbourg, option pédologie, soutenue le 8 novembre intitulée "les vertisols à gypse de Nouvelle Calédonie dans leur environnement pédologique".

- Mission à Nouméa : colloque sur la fertilité des îles du Pacifique, présentation d'une communication sur la fertilité des sols sous cocotiers.

- Mission en Indonésie, initiation à un programme de recherche sur les sols sur tourbes.

1993 : Mission en Indonésie, centre-sud de Kalimantan (Bornéo), visite de centres de transmigration dans les zones sur tourbières. Initiation à un programme de recherches sur l'évolution des sols sur tourbières.

1994 : Communication à la RST (Nancy) sur la dynamique pédologique et les variations climatiques sur la côte ouest de la Nouvelle Calédonie durant le Quaternaire récent.

1992-1996 : Rédaction de 6 articles (2 Geoderma, 3 CRAS et 1 EGS) et participation à la rédaction du chapitre du Référentiel Pédologique Français consacré aux vertisols.

Affectation à Quito - Equateur

1996 Avril : Affectation à l'Université Centrale de Quito

1996 : Septembre mise en place d'un essai au champ sur le site de La Tola. Défonçage de la cangahua, 1er cycle de culture. Participation active à l'organisation du colloque sur les sols volcaniques indurés en décembre à Quito. Préparation du guide de terrain. Suivi du travail de 2 étudiantes équatoriennes.

1997 : Préparation du second et troisième cycle de culture de la cangahua. Suivi des travaux de la thèse de Jérôme Poulenard d'une stagiaire ISTOM sur les páramos. Début de l'organisation d'un programme páramo. Préparation de cours pour postgraduados. Mission en Amazonie (Macas) pour le compte de l'IFEA.

1998 : Quatrième cycle de culture sur la cangahua. **Assurer la continuité du programme après le décès accidentel en avril de Claude Zebrowski**, responsable du programme. Expertise avec 2 collègues Orstom sur les glissements de terrain à Esmeraldas suite aux pluies El Niño. Suivi de 2 stagiaires DESS sur la dégradation par surpâturage de sols volcaniques.

1999 : Simulation de pluie sur l'essai agronomique avec stagiaire DESS. Mission en Bolivie (Cochabamba) pour la FAO et au Chili (Pucon) pour le Congrès latino-américain de science du sol. Travail dans le sud de l'Equateur pour étude de sols sous páramos non volcaniques (Stagiaire en DESS). Arrivée de Nicolas Germain, agronome ; développement de l'essai agronomique pour culture de Ray Gras.

2000 : Renforcement de l'essai sur la stabilité structurale et achèvement de l'essai sur la cangahua. Présentation de nos travaux au sein de forum sur les páramos.

Affectation en métropole a bondy

2000 Septembre : Affectation au centre IRD de l'Île de France à Bondy

- 2000 : Implication dans l'UR 049 ECU (Erosion et changements d'usages), sous la direction de Christian Valentin. Mission avec CEA au Laos et Vietnam pour mesures du ¹³⁷Cs. Rédaction d'articles sur l'Equateur.
- 2001 : mission en Thaïlande sur le site MSEC suivie d'une mission au Vietnam: suivi du Bassin versant de Don Cao, traitements des données pédologiques des différents sites. Formation de 2 étudiants sur les techniques d'extraction d'argiles à Bondy.
- 2002 : mission au Vietnam : suivi du Bassin versant de Don Cao avec assistance à un étudiant. Suite du traitement des données et mission en Equateur sur un colloque consacré à l'érosion en milieu Andin.

Affectation au Vietnam

2003 Janvier : Affectation au National Institute for Soils and Fertilizers à Hanoi

- 2003 : au sein du programme MSEC (Management of Soil Erosion Consortium) dans le cadre de l'IWMI (International Water Management Institute). Gestion d'une équipe de 10 personnes avec Didier Orange. Suivi hydrologique et pédologique d'un petit bassin versant. Missions en Chine et Thaïlande consacré à la gestion du changement d'usage d'un bassin versant à fortes pentes.
- 2004 : Suite du suivi du bassin versant experimentation de parcelles d'infiltration et collecte de turricules de vers de terre. Mission en Equateur et Colombie pour le compte du groupe Paramo et Thaïlande. Congrès internationaux en Thaïlande et au Laos.

ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT

Nouvelle Calédonie 1980-1989

Bien qu'il n'y eût pas encore d'université en Nouvelle Calédonie lors de mes trois affectations, la section pédologique de l'ORSTOM étant la seule du territoire, elle intervenait dans toutes les requêtes faites sur le territoire.

Formation des techniciens des services ruraux par stages d'initiation à l'utilisation des cartes pédologiques. Ces stages étaient à la fois théoriques et pratiques sur le terrain. Création d'une note explicative.

Formations dans les classes de seconde, 1ère et terminale D' (section agricole, cette spécificité a été supprimée depuis lors) par des cours de présentation de la pédologie et une intervention journalière annuelle sur le terrain.

Une participation à l'ouvrage "*Ecologie en Nouvelle Calédonie*" édité pour le compte du Centre Territorial de Documentation Pédagogique m'a mobilisé pour la partie consacrée aux sols et à leur fertilité.

Réalisation d'un atlas scolaire de la Nouvelle Calédonie (édité par Hachette) pour le compte le Centre Territorial de Documentation Pédagogique pour les classes du secondaire m'a mobilisé non seulement pour la feuille consacrée à la carte pédologique et aux sols de Nouvelle Calédonie, mais aussi pour une lecture critique des autres chapitres de cet ouvrage lors de réunions collectives hebdomadaires durant près d'une année .

Accueil et organisation de tournées pour les étudiants Fidjiens.

Le premier séjour a été organisé en 1982 par B. Denis. J'ai organisé le suivant en 1988. Ce séjour a duré une semaine dont 3 jours passés sur le terrain et a concerné une dizaine d'étudiants en géologie de l'Université du Pacifique Sud à Suva.

Formation des techniciens de l'IRFA (CIRAD) lors d'une tournée de terrain en mars 1989 et la visite de la plupart des vergers de comportement pour un diagnostic concernant la mise en place cinq ans auparavant de vergers expérimentaux d'arbres fruitiers pour le compte de l'IRFA (Institut de recherche pour les fruits et agrumes - CIRAD).

Participation aux journées portes ouvertes. La science s'ouvre au public. 4 pages.. Nouméa : ORSTOM. 11/06/88. Article de presse dans les "Nouvelles Calédoniennes du 9/06/88, page 6.

Présentation à la presse de la carte pédologique de la Nouvelle Calédonie. Article dans "Les Nouvelles Calédoniennes" du 1/04/89 "Les fosses vérités de demain", page 1 et double page centrale.

Strasbourg 1990-1996

Cours de licence de géographie à Strasbourg,, au CEREG 1995 par une étude de cas du milieu insulaire (Resp. D. Schwartz).

DEA de géographie, option aménagement, à Strasbourg,, au CEREG 1995, cours sur l'altération des péridotites et les conséquences géomorphologiques (Resp. M. Mietton).

Equateur 1996-2000

Cours de 4 heures en esp. sur la réhabilitation de la cangahua. 5ème années de la faculté d'agronomie de l'Université Centrale. Support de cours en esp.: Trujillo G., Zebrowski C. et Podwojewski, P. Rehabilitación de la cangahua. 10p.

Cours de 4 heures en esp. sur la classification des sol en Equateur. 5ème années de la faculté d'agronomie de l'Université Centrale. Support de cours en esp. Clasificación de los

suelos. Cours pour les élèves de l'Université Centrale d'Equateur, Facultad de Ciencias agrícolas. 7p

Examen de contrôle sous la forme d'une vingtaine de questions se rapportant au 2 cours.

Support de cours de physique du sol pour le consortium CAMAREN en espagnol, Modulo 2 Manejo, conservación y recuperación de suelos, Tema 2 : Propiedades físicas del suelo, 10p. + annexes.

Cours de 2 heures sur la dégradation des páramos.

1. Dans le cadre des journées françaises à la faculté de géologie de l'Université Centrale

2. Dans le cadre de mon partenariat avec la faculté d'agronomie de Université Centrale

Conférence INIAP (Institut national Recherche agronomique Equatorien) 1998, Los suelos de las altas tierras andinas.

Grupo de Trabajo de Páramos, 19 janvier 2000, Quito (Equateur).

Conférence, 4eme réunion du groupe de travail de páramos. La experiencia del IRD en la investigación de los suelos de los páramos en el Ecuador. Hotel Savoy Inn (Yasuní 304 y Av. El Inca, Quito).

Bondy 2000-2002

Exposé aux étudiants de l'INAPG de Paris-Grignon en Février 2002 - Cours de P. Horemans. Pédogenèse et dégradation des sols volcaniques d'Equateur.

Cours de DESS- Université de Savoie, Le Bourget du Lac. Intervention le 17/10/2002.

Utilisation des paysages de fortes pentes dans quelques régions tropicales. Contraintes physiques et socio-économiques. DESS développement durable et territoires montagnards. Unité d'enseignement 11: Enjeux, risques et protection des sols de montagne : connaissance des sols de montagne et de leur fragilité. Contraintes, risques et enjeux (techniques et économiques) liés à la mise en valeur des sols.

Réalisation de supports d'enseignement (manuel, cours)

Ouvrages

Encyclopédie de Nouvelle Calédonie., 1983, Tome 1, Géographie physique, Nouméa, Nefo Diffusion. Beaudou, A.G., Latham, M., Denis, B., Iltis, J., Petit, M., Podwojewski, P., Les sols et paysages morpho-pédologiques de Nouvelle Calédonie, p. 141-163.

réédition *Encyclopédie de Nouvelle Calédonie.*, 1989. Tome 1, Géographie physique, Nouméa, Nefo Diffusion. Podwojewski, P., Les sols et paysages morpho-pédologiques de Nouvelle Calédonie, p. 141-163.

Ecologie en Nouvelle Calédonie, 1987. CTRDP de Nouvelle Calédonie. Participation au chapitre le sol et les êtres vivants, p 140-155.

Atlas de Nouvelle Calédonie, 1989, réédité en 1992. Coordination éditoriale J. Mathieu-Daudé, Nouméa, édition du Cagou, Hachette Calédonie. Podwojewski, P., La pédologie ou la Science du sol, p 26-27.

Rapports

Podwojewski, P., 1988. Compte rendu et synthèse du stage de formation des agents de la DIDER pour l'utilisation des cartes pédologiques en Nouvelle-Calédonie. Nouméa : ORSTOM. 15 p.

Podwojewski, P. 1997. Camaren, Modulo 2 Manejo, conservación y recuperación de suelos, Tema 2 : Propiedades físicas del suelo, 10p. + annexes.

Trujillo G., Zebrowski C. et Podwojewski P., 1998. Camaren, Modulo 2 Manejo, conservación y recuperación de suelos. Cours pour les élèves de l'Université Centrale d'Equateur, 5eme année de la Facultad de Ciencias agrícolas Rehabilitación de la cangahua, 10p.

Podwojewski P., 1998. Clasificación de los suelos. Cours pour les élèves de l'Université Centrale d'Equateur, 5eme année de la Facultad de Ciencias agrícolas. 7p.

Supports de presse

Podwojewski, P. et Bourdon, E., 1988. La science s'ouvre au public. 4 pages. Journées portes-ouvertes. Nouméa : ORSTOM. 11/06/88. Article dans "*Les Nouvelles Calédoniennes*" du 9/06/88, page 6.

Podwojewski, P. 1989. "Les fosses vérités de demain". Présentation de la carte pédologique de la Nouvelle Calédonie. Article dans "*Les Nouvelles Calédoniennes*" du 1/04/89, page 1 et double page centrale.

El Comercio, Quito (Equateur). 16/11/1999. Sociedad: El páramo es la cisterna natural de las ciudades. p. C12

El Comercio, Quito (Equateur). 14/03/2000. Sociedad: El suelo de los páramos sin estudios. P C8

ENCADREMENTS

Sur le terrain en Equateur

Encadrements en thèse de doctorat française

Poulenard Jérôme - Encadrement sur le terrain en 1996-1997, soutenance en 2000. Choix des sites d'échantillonnage, échantillonnage, terrain et interprétation des données pédologiques. Les sols des Páramos d'Equateur sur couverture pyroclastique. Diversité, genèse et propriétés physiques. Université Nancy, Directeurs de thèse : A. Herbillon (Prof. Nancy I) et C. Zebrowski† (IRD) que j'ai du remplacer au pied levé, financement 185 p.

- Financement intégral de la thèse sur mon budget,
- co-publications acceptées de 4 articles dans des revues internationales, 2 soumises, 2 articles acceptés dans une encyclopédie américaine.
- Jérôme Poulenard est Maître de conférences à l'Université de Savoie.

Encadrement de stagiaires métropolitains

Viard Eric, 1997. Sierra équatorienne, étude sur l'usage du sol en altitude. Étude de l'étendue de la dégradation du Páramo de Llangahua (Ambato, province de Tungurahua). Mémoire de fin d'études, ISTOM, Cergy-Pontoise, 60 p. Stage effectué 1/07/96 au 1/12/96. Membre du jury de correction le 6/05/97.

Zambrana Tania, 1998. Etude du processus de dégradation du páramo au niveau de ses principales composantes et de ses implications et conséquences humaines. Mémoire de fin d'études. ISTOM, Cergy-Pontoise, 86p. Stage effectué de juillet à décembre 1997. Membre du jury de correction, le 1/07/98.

Ritossa Sylvia, 1998. Contribution à l'étude de certains paramètres physiques d'un sol volcanique induré (cangahua) réhabilité. DESS de l'Université de Créteil, Paris XII. Stage effectué d'avril à aout 1998. Soutenance le 28/09/98.

Schott Céline, 1998. 1998. Diagnostic de l'érosion anthropique et propositions de gestion conservatoire des sols de la zone haute du bassin d'El Angel (Carchi, Equateur). DESS de l'Université de Dijon, 58p. Stage effectué d'avril à juin 1998. Soutenance le 28/09/98

Martin Raphael, 1999. Etude du milieu naturel correspondant à la partie haute du Parc Podocarpus, sud de l'Equateur. DESS de l'Université de Créteil, Paris XII, 69p.

Encadrement d'étudiants équatoriens en thèse d'ingénieur d'agronomie

Aymara Patricia, 1998. Características de la materia orgánica en suelos volcánicos endurecidos (cangahua) Tumbaco-Pichincha. Tesis de Ingeniera Agrícola de la Facultad de Ciencias Agrícolas. Universidad Central del Ecuador. 70p.

Norma Alvarez 1999. Estabilidad de la estructura en suelos volcánicos endurecidos (cangahua) Tumbaco-Pichincha. Tesis de Ingeniera Agrícola de la Facultad de Ciencias Agrícolas. Universidad Central del Ecuador. 70p.

Navarette Victor, 2000. Influencia del cultivo de maiz sobre el contenido de materia organica y propiedades fisico quimicas del suelo, en cuarto ciclo de rehabilitacion de cangahua, Tumbaco, Pichincha. Tesis de Ingeniera Agrícola de la Facultad de Ciencias Agrícolas. Universidad Central del Ecuador. 88p.

Sur le terrain en Thaïlande

Encadrement de stagiaires métropolitains

Bayer Agnès, 2002: Influence de la pente sur l'infiltration et la perte en terre de l'échelle du mètre carré à celle du bassin versant dans le Nord de la Thaïlande. Mémoire de fin d'études,

ISTOM, Cergy-Pontoise, 122 p. Stage effectué au sein de l'IRD, sur le site de Mae Yom en THAILANDE. Stage du 28 mai au 28 novembre 2001. Membre du jury de correction, le 21/05/02..

Encadrement au laboratoire de Bondy

Encadrement de stagiaires métropolitains

Bayer Agnès, 2002, analyse granulométrique d'échantillons de la Mae Yom au laboratoire de sédimentologie de Bondy ; Stage pratique en janvier –février 2002.

Lorent Céline, 2002. Mémoire de maîtrise de l'Université libre de Bruxelles. Etude de la sédimentation dans un lac de retenue à l'exutoire du bassin de la Nam Mae Thang, province de Phrae-Thaïlande. Stage effectué en Thaïlande du 8 mai au 28 juin. Analyse granulométrique d'échantillons de la Mae Yom au laboratoire de sédimentologie de Bondy. Stage pratique en juillet-août 2002.

Co-encadrement sur le terrain au Vietnam (2003-2005)

Encadrement en alternance avec Didier Orange (Hydrologue, CR1, UR 176), qui s'est chargé de la phase recrutement et a assuré le début de l'encadrement (Mai-Juin) que j'ai poursuivi pendant ses congés au plus fort de la saison des pluies (Juillet-Août).

Encadrement de stagiaires métropolitains

Maugin Julien, juin 2002. Stagiaire de l'Ecole nationale supérieure d'agronomie de Rennes. Initiation à la pédologie de terrain, caractérisation des sols du site de Don Cao, Vietnam. Mesure des coordonnées GPS de l'ensemble du site, aide à la mise en place du préleveur automatique d'échantillons et prises de mesures de densité apparente. *Pilotage assuré par D. Orange (IRD)*. Terrain réalisé en mai-juin 2002.

2003 - Encadrement sur le terrain de Dong Cao de 2 étudiantes suédoises de l'université d'Uppsala affectées au projet Luslof (farmer field school) de l'ICRAF et modélisation. Visite du terrain et description des sols.

Bayer Agnès, 2003. Comportement hydrologique d'un petit bassin versant agricole sur forte pente au nord Vietnam. Master 2 professionnalisant Eaux souterraines hydrogéologie chimique et physique. Université de Grenoble. *Pilotage assuré par D. Orange (IRD)*.

Renaud Julien, 2003 Cartographie des sols de la région de Dong Cao (bassin du fleuve rouge, Vietnam du Nord). Création d'un SIG et modélisation de l'érosion sur des bassins versant à fortes pentes. Mémoire de Maîtrise, IUP Montagne 3^o année. CISM. Université de Savoie. 73370 le Bourget du Lac. Soutenu le 23 Juin 2003

Nieullet Nicolas, 2004. Impact d'une culture de fourrage sur l'érosion et le développement socio-économique dans un village du Nord Vietnam (Province de Hoa Binh) étudiant en 5^{ème} année à l'E.S.I.T.P.A (Ecole Supérieure d'Ingénieurs et de Techniciens Pour l'Agriculture) (Rouen, 76). *Pilotage assuré par D. Orange (IRD)*.

Hoareau Jehan, 2004. Impact des pratiques culturales sur le fonctionnement hydrologique d'un petit bassin versant agricole sur colline dans le Nord Vietnam (Province de Hoa Binh). étudiant en deuxième année de magistère de sciences de la Terre ENS Paris. *Pilotage assuré par D. Orange (IRD)*

Ballesteros Sebastien, 2005. Suspended matterflow in a small agricultural watershed of North Vietnam. INAPG, 2eme année. *Pilotage assuré par D. Orange (IRD)*.

Vottier Damien, 2005. Utilisation de la turbidimétrie comme méthode de mesure des concentrations en Matières En Suspension (MES). Mesures sur le Fleuve Rouge et sur un bassin versant expérimental de montagne, Calibration et validation de la méthode, Préparation d'un protocole. Master 1 expertise et management en Environnement. Université du littoral. *Pilotage assuré par D. Orange (IRD)*.

Botinelli Nicolas, 2005. Collecte de la faune lombricienne du sol dans un petit bassin versant agricole sur colline dans le Nord Vietnam (Province de Hoa Binh). Impact des usages culturels sur l'abondance et la distribution des lombrics dans un profil de sol. Master 1 EBE Université Paris VI orienté en ingénierie en écologie.

Encadrement de stagiaires Vietnamiens

Master en faculté de Chimie de l'Université de Hanoi

Ngo Van Viet, 2004. Caractérisation chimique des exportations solides d'un terroir agricole sur collines dans le nord du Vietnam. Master en faculté de Chimie de l'Université du Vietnam à Hanoi, filière francophone. Participation au jury de maîtrise à l'Université de Hanoi.

Phan Ha Hai An, 2004. Etudiante en maîtrise de Chimie de l'Université de Hanoi. Etude du comportement du carbone dissous et particulaire dans le ruissellement de surface durant un pic de crue. *Pilotage assuré par D. Orange (IRD).*

Nguyen Kim Ngoc, 2004. Etudiante en licence de Chimie de l'Université de Hanoi. Etude bibliographique du cycle du carbone dans l'atmosphère et lithosphère terrestre.

Luu Thi Nguyet Minh, 2004 : Etudiante en licence de Chimie de l'Université de Hanoi Etude bibliographique du carbone organique dissous (COD) et particulaire COP) du champ au fleuve. *Pilotage assuré par D. Orange (IRD).*

Nguyen Kim Ngoc 2005, Etudiante en maîtrise de Chimie de l'Université de Hanoi. Comparaisons entre l'extraction des cations échangeables et de la capacité d'échange à l'acétate d'ammonium à pH 7,0 et la capacité d'échange effective à pH du sol effectuée par la cobaltihexamine sur les 34 échantillons de sols de la séquence du Mont Fansipan.

Luu Thi Nguyet Minh, 2005 : Etudiante en maîtrise de Chimie de l'Université de Hanoi. Comparaison des exportations des matières en suspension (SM) et du carbone organique dissous des petits cours d'eau aux grandes rivières dans le bassin du Fleuve Rouge : Comparaison of SM and DOC exportations from the small to the large rivers in the Red River Basin. *Pilotage assuré par D. Orange (IRD).*

Encadrement d'Etudiants du Sud en France

Master de science et technologie de l'Université de ParisVI (ex DEA)

Ngo Van Viet, 2005. Distribution du carbone organique et des métaux dans des sols et turricules de vers sur un bassin versant cultivé dans le nord du Vietnam. Master de science et technologie de l'Université de ParisVI, fonctionnement physique, chimique et biologique de la biosphère continentale.

Luu Thi Nguyet Minh 2006. Caractérisation de la séquestration du Carbone en fonction de l'Altitude et du couvert végétal d'une séquence de sols du Mont Fansipan (3143m) au Vietnam. Master de science et technologie de l'Université de ParisVI, fonctionnement physique, chimique et biologique de la biosphère continentale.

Ngo Van Viet, 2003-2004. Etudiant en maîtrise de Chimie de l'Université de Hanoi. Erosion et transfert de fertilité dans un terroir agricole en zone de collines en ASE.

Nguyen Kim Ngoc, 2003-2004. Etudiant en licence de Chimie de l'Université de Hanoi. Analyse du carbone organique dans les sols cultivés sur pente dans un terroir agricole en zone de collines en ASE.

LISTE DES PUBLICATIONS

Revue à comité de lecture

- Podwojewski, P., 1988 - Les vertisols de Nouvelle Calédonie, *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XXIV, n°4, 279-301.
- Podwojewski, P. et Delaune, M., 1993. Mise en évidence d'une source détritico-ultrabasique dès l'Eocène moyen dans les flyschs du bassin de Nouméa (Nouvelle Calédonie). *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 316, Série II, 1423-1430.
- Podwojewski, P., 1994. Signification pédologique et paléoclimatique de la présence de gypse dans des vertisols de la côte ouest de l'île de Malekula (Vanuatu). *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 319, série II, 111-117.
- Podwojewski, P. and Arnold, M., 1994. The origin of gypsum in Vertisols in New Caledonia determined by isotopic composition of sulphur. *Geoderma*, 63: 179-195.
- Podwojewski, P., 1995. The occurrence and interpretation of carbonate and sulfate minerals in a sequence of vertisols in New Caledonia. *Geoderma*, 65: 223-248.
- Podwojewski, P., et Bourdon, E., 1996, Le processus d'induration des oxydisols goethitiques sur péridotites en Nouvelle Calédonie : un mode particulier d'induration de type plinthite. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 322 série IIa, 453-459.
- Podwojewski, P. et Pétard, J., 1996. Comparaisons entre différentes méthodes d'extraction des sels solubles et des cations échangeables dans un vertisol à gypse de Nouvelle Calédonie. *Etude et gestion des sols*, 3, 3, 193-206.
- Toulkeridis, T., Podwojewski, P., and Clauer, N., 1998. Tracing the source of gypsum in New Caledonian soils by REE contents and S-Sr isotopic composition. *Chemical Geology*, Vol. 145, 1-2: 61-71.
- Poulenard, J., Podwojewski, P., Janeau, J.L. and Collinet, J., 2001. Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian Páramo : Effect of tillage and burning. *Catena* 45, 185-207.
- Podwojewski, P., Poulenard, J., Zambrana, T. and, 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., Podwojewski, P., Herbillon A.J. 2003 - Characteristics of non-allophanic Andisols with hydric properties from the Ecuadorian páramos. *Geoderma* 117 (3-4) 267-281
- Poulenard, J., Michel, J.C., Bartoli, F., Portal, J.M and Podwojewski, P., 2004. Water repellency of volcanic ash topsoils from Ecuadorian páramo related to hydrophobic organic materials and material contents. *European Journal of Soil Science*, 55, 487-496.
- Podwojewski, P. and Germain, N., 2005. Evolution of the soil structure in a deep tilled hardened volcanic ashsoil (Cangahua) in Ecuador. *European Journal of Soil Science*, 39, 39-51.
- Podwojewski, P., Poulenard, J., Toulkeridis, T., Larqué, P. and Delaune, M. 2005. Polygenic soils of the southern central Ecuadorian highlands: A result of rapid tectonic uplift ? *Submitted to geoderma*

Proposal

- Podwojewski, P. and Poulenard, J., 2005. Volcanic ash-soils in the Paramos of Ecuador. Consequences of the Land-use change on their properties. *Submitted to Land degradation and development*.

Podwojewski, P.¹ Janeau J.L.² and Leroux Y.¹, Effects of agricultural practices on the hydrodynamicS of a deep tilled hardened volcanic ash-soil (*Cangahua*) in Ecuador. *Submitted to Catena*.

2. Participation à des ouvrages

books participation

Encyclopédie de Nouvelle Calédonie., 1983, Tome 1, Géographie physique, Nouméa, Nefo Diffusion. Beaudou, A.G., Latham, M., Denis, B., Iltis, J., Petit, M., Podwojewski, P., Les sols et paysages morpho-pédologiques de Nouvelle Calédonie, p. 141-163.

réédition *Encyclopédie de Nouvelle Calédonie.*, 1989. Tome 1, Géographie physique, Nouméa, Nefo Diffusion. Podwojewski, P., Les sols et paysages morpho-pédologiques de Nouvelle Calédonie, p. 141-163.

Ecologie en Nouvelle Calédonie, 1987. CTRDP de Nouvelle Calédonie. Participation au chapitre le sol et les êtres vivants, p 140-155.

Atlas de Nouvelle Calédonie, 1989, réédité en 1992. Coordination éditoriale J. Mathieu-Daudé, Nouméa, édition du Cagou, Hachette Calédonie. Podwojewski, P., La pédologie ou la Science du sol, p 26-27.

Podwojewski, P. and Beaudou, A., 1991. Vertisols of New Caledonia ; morphological, chemical and physical properties ; and classification. In : Proceedings of the sixth international soil correlation (VI ISCOM) : Characterization, classification, and utilization of cold aridisols and vertisols, J.M. Kimble ed., Soil conservation service, Soil management support services, USDA., 151-158.

Référentiel pédologique, 1995. Baize, D. et Girard, M.C. (Coordination scientifique) Techniques et pratiques, AFES-INRA éditions. Baize, D., Boulaire, J., Kaloga, B., Podwojewski, P. et Rossignol, J.P. (Groupe de travail vertisols), Leptosmectisols, p. 191-192 ; Vertisols, p. 263-272.

Podwojewski, P. and J. Poulénard. 2004. Paramos soils. In: The Encyclopedia of Soil Science, R. Lal (ed.), Marcel Dekkers New York.

Poulénard J. and P. Podwojewski, 2004. Alpine soils. In: The Encyclopedia of Soil Science, R. Lal (ed.), Marcel Dekkers New York.

Huon, S., Bellanger, B., Bonté, Ph., Sogon S., Podwojewski, P., Girardin C., Valentin C., de Rouw A., Velasquez F., Bricquet J.-P., Mariotti ; A., 2005. Monitoring soil organic carbon erosion with isotopic tracers: two case studies on cultivated tropical catchments with steep slopes (Laos, Venezuela). *Advances in Soil Science*, 302-328, CRC Press, Boca Raton FL.

3. Diplômes

mémoire de DEA ORSTOM

Podwojewski, P., 1980. Caractérisation de quelques sols du Morvan. Extraction, détermination, interprétation des produits amorphes. Interprétations pédogénétiques. DEA fédéral de pédologie et aménagement des sols. Université de Paris VI, INA, ORSTOM. multigr., 41 p.

Rapport d'élève ORSTOM

Podwojewski, P., 1981. Etude pédologique de la basse vallée de la Oua Tom. Eléments de pédogenèse salée et gypseuse. Nouméa : ORSTOM. Mémoire de stage. 97 p. multigr., 2 cartes au 1/25 000.

Thèse d'Université –

Podwojewski, P., 1992. Les vertisols à gypse de Nouvelle Calédonie dans leur environnement pédologique. Thèse de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg. Tome 1: 261p., Tome 2: Annexes 247p.

Edition ORSTOM, T.D.M., N°105, F5, 1993, 261p.

4. Rapport d'expertise et/ou de conventions

Podwojewski, P., 1986. Etude morphopédologique de la station Metenesel de la baie de Lambubu, Malakula-Vanuatu. - *Morpho-pedological study of Lambubu Bay Metenesel station Malakula-Vanuatu*. Convention ORSTOM/Metenesel Estates Limited. ORSTOM Nouméa, Tome I, 2 fois 37p. Beaudou, A. G., Fromaget, M.,

Podwojewski, P., Bourdon E. et Le Martret H., 1986. Cartographie typologique des sols - *Typological soil mapping*. ORSTOM Nouméa, Tome II, 2 fois 26p

Podwojewski, P., Bourdon, E., Blavet, D., 1986 - Description des sols, analyses chimiques - Soil description, chemical analyses, 243p. + 1 carte pédologique au 1/10 000 + légende + notice des caractères édaphiques + 1 carte de localisation des profils + 1 carte de profondeur des sols des sols pour la culture du cacao.

Blanchard, F., 1988. avec la collaboration de Podwojewski P. pour la partie pédologie. Protection et gestion de la lentille d'eau douce de l'île d'Ouvéa (Wallis). Rapport BRGM, Eau environnement énergie, n° 88WLF 060 E.

Podwojewski, P. et Bourdon, E., 1991. Identification des sols sous cocoteraie présentant des carences difficiles à éliminer . Problématique de la mise en valeur de ces sols. In : Recherches préliminaires pour le développement de la culture du cocotier sur les petits archipels du Pacifique Sud. Bonzon, B., Podwojewski, P., Bourdon, E., L'huillier, L, et De Montpezat, P. Eds., Convention, sciences de la vie, agronomie n°8. ORSTOM Nouméa, 91-129.

Perrin, J.L., Janeau, J.L. et Podwojewski, P., 1998. Glissement de terrain, inondations et coulées boueuses à Esmeraldas, Equateur. Diagnostic général de la situation de la ville. Mission d'expertise. rapport multigr. 22p. réalisé à la demande de l'ambassade de France.

Podwojewski, P., 1999. Conséquences de la mise en culture d'un site de bofedal dans la région de Cochabamba, Bolivie. Rapport de mission d'expertise effectuée en Bolivie en Novembre 1998 pour le compte de Guido d'Onofrio, Directeur International du projet fertilisuelos-FAO.

P. Podwojewski et J. Poulénard. La degradación de los suelos de los páramos del Ecuador. Note d'information remise à Yolanda Kakabatse, ministre de l'environnement du gouvernement Mahuad. Quito le 15/12/1998.

5. Rapports de conventions cartographiques, édition Orstom-Nouvelle-Calédonie,

Podwojewski, P., Latham, M. et Bourdon, E., 1983. Etude des sols de la région de Kaala Gomen. Nouméa : ORSTOM, multigr., 54 p. + 2 cartes au 1/50 000.

Beaudou, A. G., Fromaget, M., Podwojewski, P. et Bourdon, E., 1983. Etude morphopédologique de la région de La Tontouta. Nouméa : ORSTOM 31p. + 2 cartes au 1/50 000 + 2 légendes.

Beaudou, A. G., Fromaget, M., Podwojewski, P. et Bourdon, E., Le Martret, H. et Blavet, D., 1983. Cartographie typologique des sols : méthodologie. Nouméa : ORSTOM, 31p.

Beaudou, A. G., Fromaget, M., Podwojewski, P. et Bourdon, E., 1983. fiche de description du milieu et des sol. Nouméa : ORSTOM, 12p.

Podwojewski, P. et Bourdon, E., 1984. Etude morpho-pédologique de la vallée de la Tiwaka. Nouméa : ORSTOM. 47p. Notice des caractères édaphiques et carte au 1/25 000.

- Podwojewski, P. et Bourdon, E., 1984. Etude morpho-pédologique des vallées de la Tchamba-Yahoué. Nouméa : ORSTOM. 44p. Notice des caractères édaphiques et carte au 1/25 000.
- Podwojewski, P. et Beaudou, A.G., 1987. Carte morpho-pédologique de la Nouvelle Calédonie au 1/200 000. Conventions sciences de la Terre pédologie n°1, convention n°585, Nouméa : ORSTOM. Tome 1: Avant-propos et présentation générale, 15p. Tome 2: Légende de la carte, 17 planches. Tome 3 : possibilités d'utilisation du milieu, 5 planches. 4 cartes au 1/200 000.

6. Communication à des colloques ou congrès et forums

- Podwojewski, P., 1994. Identification et aménagement des sols sous cocotier dans le Pacifique sud. Sols et fertilité des petites îles du Pacifique Sud. Atelier de synthèse et prospective. Novembre 1992.
- Podwojewski, P., 1994. Dynamique pédologique et variations climatiques sur la côte ouest de la Nouvelle Calédonie durant le Quaternaire récent. 15ème réunion des Sciences de la terre, Nancy, Société Géologique de France, édit. Paris, T4, p. 15.
- Podwojewski, P. and Bourdon, E., 1995. The hardening process of ferruginous accumulations in New Caledonian oxisols. Eurolat 1995, International summer school, 6-7 july, Orstom Bondy, p. 156.
- Podwojewski, P. and Toulkeridis, T., 1995. Origin of single gypsum crystals in surficial formations of New Caledonia as revealed by sulfur isotopic and geochemical investigations. Minéralogie 1995, Journées de minéralogie du 11 au 14/09 à Strasbourg. European journal of mineralogy, vol.7, n°1, p. 188.
- Podwojewski, P. 1996. Symposium "Suelos volcanicos endurecidos" (Sols volcaniques indurés), du 7 au 14 décembre 1996. Réalisation du guide de terrain, (Espagnol), Tour Nord (7-8 décembre), Tour Sud (13-14 décembre), Orstom, Quito, 36p.
- Poulenard, J., Zebrowski, C., Podwojewski, P., Jeanroy, E., Collinet, J., Herbillon, A.J., 1998. Les sols sur pyroclastes des páramos d'Equateur : caractérisation générale. Séance thématique de l'Association française pour l'étude des sols, "les sols de montagne : de la genèse à la réhabilitation". paris, 2 avril 1998.
- Poulenard, J., Zebrowski, C., Jeanroy, E., Collinet, J., Podwojewski, P., Herbillon, A.J., 1998. Volcanic ash soils of the ecuadorian páramos : Characteristics and classification. Iceland meeting of COST Action 622 : Soils resource of European Systems.
- Poulenard, J., Podwojewski, P., Janeau, J.L. et Viveros, P., 1998. Landuse and degradation of an altitudinal ecosystem : the páramo. Consequences on hydrodynamic properties of the recent volcanic ash soils. 16th World Congress of Soil Science, symposium n°38, vol. II, page 701.
- Podwojewski, P. y Poulenard, J., 1998. Los suelos de los páramos del Ecuador. Tipos de degradación y consecuencias sobre las propiedades de los suelos. III. Simposio Internacional de desarrollo sustentable en Montañas. Taller especial. La Sustentabilidad de Paisajes de Páramo. Miércoles, 9 de Diciembre 1998. Planetario del Instituto Geográfico Militar, Quito.
- Podwojewski, P. 1998, Los suelos de las altas tierras andinas:Conférence INIAP.
- Podwojewski, P., 1999. Los suelos de las altas tierras andinas: los páramos del Ecuador. Boletín informativo de la sociedad ecuatoriana de la ciencia del suelo, Quito, n°18, 9-14.
- Podwojewski, P. , Zambrana, T. and Poulenard, J., 1999. Overgrazing effects on soil properties in the páramo of Llangahua and Esperanza (Tungurahua, Ecuador). 14° Congreso Latino-americano de Ciencia del Suelo CLACS-99, Comisión VI, Universidad de la Frontera, Temuco, Chile, p. 525.

- Podwojewski, P., Toulkeridis, T. and Poulénard, J., 1999. Evidence of pedologic changes due to rapid tectonic uplift: the Oña massif, southern part of Central Ecuador. 14^o Congreso Latino-americano de Ciencia del Suelo CLACS-99, Comisión IV, Universidad de la Frontera, Temuco, Chile, p. 256.
- Poulénard 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.
- Podwojewski, P. La experiencia del IRD en la investigación de los suelos de los páramos en el Ecuador. Grupo de Trabajo de Páramos, conférence, 4eme réunion du groupe de travail de páramos. Hotel Savoy Inn (Yasuní 304 y Av. El Inca, Quito), 19 janvier 2000, Quito (Equateur).
- Podwojewski, P. et Poulénard, J., 2000. Los suelos de los Páramos del Ecuador. En Los suelos del Páramo. Serie Páramo 5. GTP/Abya Yala. Quito, 5-26.
- Podwojewski, P. et Poulénard, J., 2000. La degradación de los suelos en los Páramos. En Los suelos del Páramo. Serie Páramo 5. GTP/Abya Yala. Quito, 27-36.
- Germain N., Duran M. et Podwojewski, P., 2000. Fertilité d'un sol volcanique induré récupéré et fertilisation raisonnée d'un ray grass. Fertility of reclaimed volcanic ashsoil and comprehensive fertilizer management of ryegrass. Résumé étendu et présentation orale. Symposium " Soil functioning under pastures in intertropical areas ". Brasilia, 16-20 octobre 2000.
- Podwojewski, P., Gavilanez A et Germain N., 2000. Evolution de la structure d'un sol volcanique induré récupéré après un an de culture de raygrass. Structure evolution of a reclaimed volcanic ashsoil. Résumé étendu et poster. Symposium " Soil functioning under pastures in intertropical areas ". Brasilia, 16-20 octobre 2000.
- J. Poulénard, P. Podwojewski et P. Faivre, 2002. Rôle des páramos sur la ressource en eau dans les Andes: Importance des propriétés des sols et impacts des mises en usage en Equateur. Colloque international « L'eau en montagne et la gestion intégrée des hauts bassins versants » les 5 et 6 septembre 2002 à Megève.
- Podwojewski, P. et Poulénard J., 2002. Stockage du carbone dans les sols des páramos andins et conséquence des mises en usage sur les teneurs en carbone et l'érosion. Colloque International "Land use, carbon sequestration & erosion" du 24/09 au 28/09 à Montpellier. Session 6: management of village territory, rangelands, fallows, crop residues & manure/compost Communication orale +publication dans le bulletin érosion.
- Podwojewski, P. et Poulénard J., 2002. Influence of soil properties and land use on the water availability of the Paramos in the Andes of Ecuador. Colloque International "Landuse change and geomorphic, soil and water processes in tropical mountain environments". Quito, Ecuador. December 16-21 2002.
- Tran Duc Toan, Orange D., Podwojewski, P., Do Duy Phai, Thai Phien, 2003. Erosion control within a cultivated sloping land in North Vietnam. The second International Conference on Soil Quality Evolution Mechanism and Sustainable Use of Soil Resources. *Soil quality, environment and sustainable agriculture in tropical and subtropical regions*. September 23-28, 2003, Yingtian, China
- Podwojewski, P. et Poulénard J., 2004. Suelos de los páramos, propiedades físicas y químicas, Uso de la tierra y cambios de las propiedades de los suelos en los Páramos del Ecuador. Présentation orale. Atelier consacré aux priorités de recherches sur les Páramos (Taller de prioridades de investigación en Páramos). CIAT, Cali, Colombie, 17-19 Mars, 2004.
- T.D. Toan, P. Podwojewski, D. Orange, N.D. Phuong, D.D. Phai, A. Bayer, N.V. Thiet, P.V. Rinh, J. Renaud and J. Koikas, 2004. Effect of land use and land management on water budget and soil erosion in a small catchment in northern part of Vietnam. International

- conference on Innovative Practices for Sustainable Sloping Lands and Watershed Management, 5 – 9 September 2004, Chiang Mai, Thailand.
- P. Podwojewski, T.D. Toan, F. Agus, R. Alamban, A. Boonsaner, A. deRouw, 2004. Effects of innovative agriculture systems on soil protection and erosion at a water-catchment level in 5 countries of SE Asia. International conference on Innovative Practices for Sustainable Sloping Lands and Watershed Management, 5 – 9 September 2004, Chiang Mai, Thailand.
- P. Bonté, S. Huon, C. Valentin, V. Telès, A. de Rouw and P. Podwojewski, 2004. Monitoring soil erosion with ¹³⁷Cs inventory measurements on small-cultivated catchments with steep slopes in SE Asia (Laos, Vietnam, Thailand). Second International Symposium on Land use change and soil and water processes in tropical mountain environments. 14 - 17 December 2004, Luang Phrabang, Lao PDR.
- Podwojewski, P., Janeau JL, Boosaner, A., Chanthavongsa, Chaplot, V.A., Toan T.D., Valentin, C., 2004. Interactions between soil characters and soil erosion processes in Northern Thailand, Laos and Vietnam. Second International Symposium on Land use change and soil and water processes in tropical mountain environments. 14 - 17 December 2004, Luang Phrabang, Lao PDR.
- Poulenard, J., Podwojewski, P., Bartoli, F., Michel, J.C. 2005. Water repellency of high altitude soils in the ecuadorian páramo : measurements, origin and consequences on soil erosion. European Geoscience Union general assembly Vienna Avril 2005. Geophysical research letter.
- Podwojewski, P., and Janeau J.L., 2005. Short-term effects of agricultural practices on the soil structure and hydrodynamic in a deep tilled hardened sandy-silty volcanic-ash soil (cangahua) in Ecuador. 1st International symposium on the management of tropical sandy soils for sustainable agriculture “a holistic approach for sustainable development of problem soils in the tropics”. 28th November – 2nd December 2005. Khon Kaen, Thailand, CD-rom.

7. Rapports pédologiques

- Podwojewski, P., 1984. Les sols de Nouvelle Calédonie à accumulation de gypse. Nouméa: ORSTOM. multigr., 44p.
- Podwojewski, P., 1985. Les sols à gypse de l'îlot Leprédour, caractérisations morphologiques. Nouméa : ORSTOM. multigr., 36p.
- Podwojewski, P., 1988. Les vertisols de Nouvelle Calédonie, Nouméa : ORSTOM. Rapport scientifique et technique n°1, multigr., 36p.
- Bourdon, E. et Podwojewski, P., 1988. Morphopédologie des formations superficielles dans le Sud de la Nouvelle Calédonie (Rivière des pirogues et plaine des lacs). Nouméa : ORSTOM. Rapport scientifique et technique n°2, multigr., 41p.
- Podwojewski, P. et Petard, J., 1988. Expression des sels solubles et des bases échangeables sur un vertisol calcimagnésique à gypse et à carbonates (La Tamoá, Nouvelle Calédonie). Nouméa : ORSTOM. Notes techniques n°2, multigr., 75p.

8. Autres rapports internes

- Podwojewski, P., 1988. Compte rendu et synthèse du stage de formation des agents de la DIDER pour l'utilisation des cartes pédologiques en Nouvelle-Calédonie. Nouméa : ORSTOM. 15 p.
- Podwojewski, P., 1988. Mission préparatoire à un inventaire des sites pédologiques sous les cocotiers sur lesquels apparaissent des carences et des déséquilibres. Nouméa : ORSTOM, 7 p.

Podwojewski, P., 1988. Rapport de mission à Honiara, Iles Salomon. Aménagement des sols pour les petits agriculteurs dans les îles du Pacifique. Colloque organisé par l'IBSRAM du 16 au 22 Septembre 1988. Nouméa : ORSTOM, 9 p.

Podwojewski, P. et Petard, J., 1988. Rapport de mission en Australie. Visite des laboratoires de la division des sols du CSIRO (Adelaide, Canberra, Brisbane). Mission effectuée du 17 octobre au 3 novembre 1988. Nouméa : ORSTOM, 15 p.

9. Articles de presse

Podwojewski, P. et Bourdon, E., 1988. La science s'ouvre au public. 4 pages. Journées portes ouvertes. Nouméa : ORSTOM. 11/06/88. Article dans "*Les Nouvelles Calédoniennes*" du 9/06/88, page 6.

Podwojewski, P. 1989. "Les fosses vérités de demain". Présentation de la carte pédologique de la Nouvelle Calédonie. Article dans "*Les Nouvelles Calédoniennes*" du 1/04/89, page 1 et double page centrale.

El Comercio, Quito (Equateur). 16/11/1999. Sociedad: El páramo es la cisterna natural de las ciudades. p. C12

El Comercio, Quito (Equateur). 14/03/2000. Sociedad: El suelo de los páramos sin estudios. P C8

10. Support de cours

Podwojewski, P. 1997. Camaren, Modulo 2 Manejo, conservación y recuperación de suelos, Tema 2 : Propiedades físicas del suelo, 10p. + annexes.

Trujillo Germán, Zebrowski Claude et Podwojewski P., 1998. Camaren, Modulo 2 Manejo, conservación y recuperación de suelos. Cours pour les élèves de l'Université Centrale d'Equateur, 5eme année de la Facultad de Ciencias agrícolas Rehabilitación de la cangahua, 10p.

Podwojewski P., 1998. Clasificación de los suelos. Cours pour les élèves de l'Université Centrale d'Equateur, 5eme année de la Facultad de Ciencias agrícolas. 7p.

PARTIE 2 - TRAVAUX DE RECHERCHE

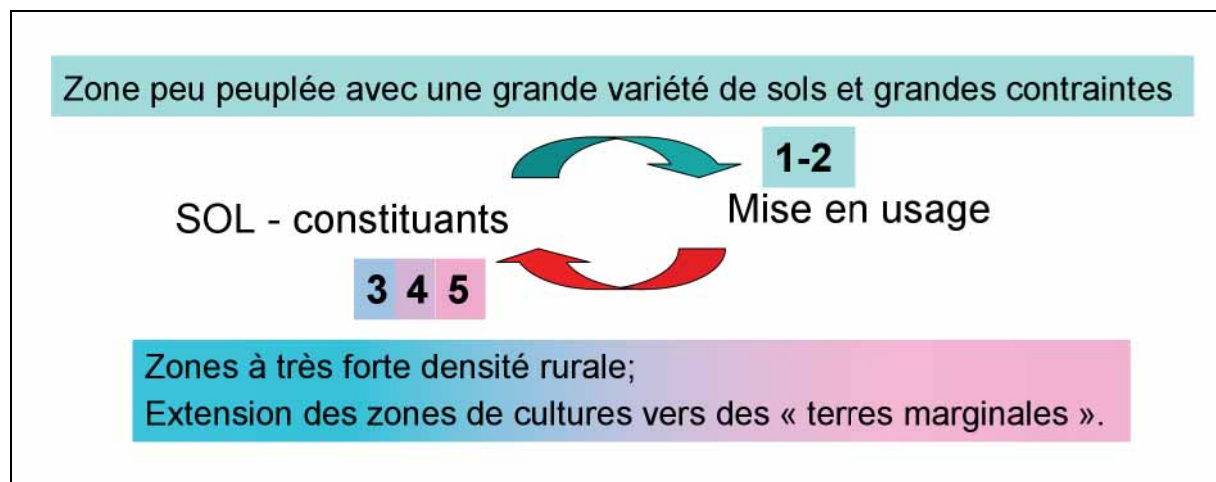
Depuis mon entrée à l'IRD mon travail de pédologie se scinde en 3 grandes périodes :

- ❶ Une période en Nouvelle-calédonie et au CNRS où j'ai travaillé principalement sur la *caractérisation minérale et chimique* des sols principalement à des fins de mise en usage
- ❷ Une période passée en Equateur, où j'ai travaillé à la fois sur les caractérisation minérales et physico-chimiques des sols d'une part puis d'autre part sur l'effet en retour de la mise en usage sur les *caractérisations physiques* et sur les **processus** d'érosion et de dégradation (Tableau 1)
- ❸ Enfin au Vietnam où nous avons pu caractériser l'évolution des propriétés *biologiques* des sols en plus des constituants minéraux et des propriétés physico-chimiques lors d'un changement d'usage. Puis nous avons pu quantifier l'évolution du processus érosif après mise en usage en mesurant les modifications des flux hydriques et particulaires à l'échelle d'un petit bassin versant.

Tableau 1 : Evolution de mon travail de recherche au cours du temps

	80	90	95	00	05	
	1.Nouvelle Calédonie	2.CNRS-Strasbourg	3.Equateur	Bondy	4.VietNam	5.AFSUD
Inventaire des sols						
CARACTERISATION						
constituants chimiques						
constituants physiques						
constituants biologiques						
EROSION-DEGRADATION						
Processus de dégradation						
Quantification de l'érosion						
REHABILITATION						

Figure 1 : Evolution de mon activité scientifique. Etapes 1 et 2 du Tableau 1. caractérisation des constituants du sol à des fins de mise en usage. Etapes 3, 4 et 5 : effets de la mise en usage sur les propriétés et constituants du sol.



Les cartographies pédologiques en Nouvelle Calédonie où les caractérisations des sols pour le cacao ou le cocotier montraient les relations importantes existant entre les propriétés des sols dont certains peuvent être qualifiés d'endémiques (Bockheim, 2005) comme les oxisols ferritiques ou les sols hypermagnésiens et la mise en usage dans des régions peu peuplées (la Nouvelle Calédonie a une densité rurale $< 10 \text{ hab. km}^{-2}$).

En revanche en Equateur sur les versants contigus à la plaine inter-andine, avec une densité rurale de plus de 150 hab. km^{-2} ou le delta du fleuve rouge au Vietnam où elle peut atteindre 600 hab. km^{-2} , les paysans les plus défavorisés cherchent à étendre leurs cultures vers des

zones marginales soit les hautes terres d'altitude andines soit les zones à forte pente des collines entourant la plaine de delta ou les zones de montagne jusqu'à lors délaissées. Les paysans ne connaissant pas leur nouveau milieu n'ont encore eu le temps d'intégrer la notion de la durabilité de leurs cultures. Or les changements d'usage de ces terres marginales s'accompagnent en retour de changements des constituants minéralogiques, chimiques et biologiques pouvant les dégrader très rapidement et pour une longue période. **L'étude des processus de dégradation, propre aux caractéristiques intrinsèques des sol, leur quantification et la possible réhabilitation est donc nécessaire à la compréhension des effets au long terme d'un changements d'usage des sols.**

Ce mémoire se scinde en 3 parties

1: Un chapitre très bref des **constituants du sol à la mise en usage** consacré à mon travail en Nouvelle Calédonie et dans les îles du Pacifique avec les références scientifiques annexées

2. Un chapitre très détaillé sur les sols des páramos et les **effets de la mise en usage sur les constituants chimiques et physiques des sols** en incluant les **mécanismes de dégradation** des sols. Ce chapitre est la première synthèse à ce jour sur l'usage de cet écosystème et ses conséquences.

Ce travail a été initié par Jérôme Poulénard alors préparant sa thèse encadrée par Claude Zebrowski que j'ai remplacé lors de son décès. La thèse a été soutenue en 2000 et le travail se poursuit suite à la nomination de Jérôme Poulénard comme Maître de conférences à l'Université de Chambéry.

3. Un chapitre sur les travaux en cours au Vietnam et la prospective en Afrique du sud résumant les **effets de la mise en usage sur les constituants chimiques et physique et biologiques des sols** en incluant les **mécanismes de dégradation des sols, leur quantification et leur possible réhabilitation.**

I. DES CONSTITUANTS DES SOLS A LA MISE EN USAGE

Exemple des VERTISOLS à gypse de Nouvelle Calédonie

11. La cartographie des sols en nouvelle calédonie

De la cartographie de semi-détail (1/50 000 à 1/25 000) à la synthèse régionale et aux cartes de contraintes

Avant les années 1980, l'essentiel des travaux des pédologues et des géochimistes (Trescases) était orienté vers l'étude de l'altération des péridotites, en liaison avec la concentration du minerai de nickel dont la Nouvelle Calédonie est le 3ème producteur mondial. A partir des années 1977-1978, la principale activité des pédologues de l'ORSTOM a donc été *l'établissement d'une cartographie de semi-détail (1/50 000 à 1/25 000) de zones représentatives des différents paysages de l'archipel*. Outre des contraintes pédo-climatiques sévères, l'absence de marché, l'isolement insulaire et l'éloignement des sites d'exportation, **les propriétés particulières des sols** représentent probablement le handicap majeur pour la promotion du secteur agricole qui ne représentait en 1985 que 5% du PIB de l'archipel.

La cartographie systématique des différents paysages de l'archipel a été l'occasion d'intégrer l'équipe au sein d'une *unité de recherche axée sur la cartographie et la spatialisation à l'échelle régionale*. Les prospections ont, pour ma part, nécessité une semaine par mois de terrain durant environ 6 années consécutives. Au sein d'une équipe alors constituée de 7 personnes, j'ai pu décrire **plus de 1200 profils de sols** rien que sur la Grande Terre. De plus, la Nouvelle Calédonie offre une variété de types de sols très spectaculaire: on relève en Nouvelle Calédonie pratiquement tous les types de sols référencés dans le WRB (à l'exception des sols des régions froides, désertiques ou volcaniques), sur des unités de surface extrêmement réduites nécessitant bien souvent une échelle de prospection au 1/25 000.

L'organisation et la distribution des sols dans le paysage

La cartographie avait pour but primordial de comprendre l'organisation et la distribution des sols dans le paysage. Dans ce cadre précis, j'ai participé à trois grandes cartographies sur la côte Ouest, sous le vent et dirigé deux autres sur la côte Est (Tiwaka et Tchamba). La distribution de ces sols n'est pas aléatoire. La plupart du temps, les sols sont litho-dépendants en raison du relief vigoureux qui favorise l'érosion et rajeunit les sols (Podwojewski, 1989a).

Amélioration de la présentation des cartes pédologiques

La présentation des cartes pédologiques a été améliorée dans le but d'optimiser l'outil de développement. La notice a été réduite au profit d'une légende de carte améliorée et attenante mettant l'accent dans l'ordre d'importance sur les principales contraintes du paysage, du sol, des horizons, puis des contraintes physiques et chimiques. Les traditionnelles *cartes d'aptitudes culturales* étaient inadaptées. D'une part elles reprenaient simplement les contours d'unités pédologiques préexistants en faisant quelques regroupements, d'autre part ces cartes devenaient à plus long terme souvent désuètes car le pédologue n'a pas la maîtrise des variations des coûts de production ou des lois du marché, de l'amélioration des techniques de culture ou de l'amélioration des caractéristiques génétiques des plantes cultivées. Il était donc préférable de ne proposer qu'une seule carte avec un descriptif *des contraintes* et l'intégrer à la carte pédologique dans une *légende des caractères édaphiques*. En effet, les contraintes liées au paysage ou aux sols (pente, risque d'inondation, sols peu épais) sont souvent beaucoup plus limitatives que les caractères liés à la fertilité chimique des sols.

Les travaux finalisés : la carte pédologique de synthèse au 1/200 000 de La Nouvelle Calédonie.

Cette synthèse a été réalisée à partir d'une quinzaine de cartographies de détail (1/10 000) ou de semi-détail (1/25 000 et 1/50 000) réalisées depuis une dizaine d'années. Si la partie étude pédologique au sens strict a été réalisée par Alain Beaudou et moi-même, la partie relative à l'utilisation de la carte pédologique pour les grands types de culture de la Nouvelle Calédonie (céréaliculture, pâturage, arboriculture fruitière, caféiculture et sylviculture) a été réalisée avec le concours des services ruraux de la Nouvelle Calédonie et de membres du CIRAD spécialistes des grands types de culture. Ces derniers ont établi une hiérarchie des contraintes à laquelle se sont superposés les caractéristiques pédologiques permettant le classement des unités pédologiques selon trois grands groupes : contrainte très importante, contrainte moyenne et à surveiller, peu ou pas de contraintes. La carte pédologique au 1/200 000 a donc été la synthèse des acquis concernant l'organisation et la distribution des sols dans le paysage. Elle a de surcroît mobilisé la plupart des tenants du développement agricole de l'île par une réelle collaboration entre une dizaine de personnes de l'ORSTOM, des services ruraux de la Direction de l'économie rurale et du CIRAD (Podwojewski et Beaudou, 1987 ; Podwojewski, 1989b).

12. Les constituants des sols - exemple : les vertisols

121. L'étude des vertisols calcimagnésiques

121-1. La répartition des vertisols

Au cours de l'inventaire cartographique, il s'est avéré que sur la côte ouest, les vertisols, appelés localement "argiles noires", occupent de vastes surfaces planes ou à faible pente, généralement constitués de glacis colluviaux proches du bord de mer ou de terrasse alluviales anciennes. Ces "argiles noires" à gypse sont localisées sur la côte ouest de la Nouvelle Calédonie, le long de la bordure littorale, sous une pluviométrie contrastée ne dépassant pas 1000 mm/an. Ces sols dérivent toujours de l'altération de roches plutôt basiques (basaltes, tufs, grauwackes, flyschs carbonatés) ou ultrabasiques (serpentinites). Les vertisols sont souvent constitués de plus de 50% d'argile gonflante, possèdent de larges fentes de rétraction en saison sèche, et à partir de 40 cm de profondeur par des faces de glissement luisantes et striées rendant ces sols impropres à la culture arbustive (Podwojewski, 1988).

121-2. La classification des vertisols

Suite à mon article de synthèse rédigé consacré à la classification des vertisols et publié par l'US Department of Agriculture (Podwojewski and Beaudou, 1991), j'ai pris une participation active au *nouveau Référentiel Pédologique* (1995) dans sa deuxième version en particulier pour le chapitre consacré aux vertisols. Les vertisols y sont décrits en fonction de leurs propriétés chimiques sodiques et acides, hypermagnésiens ou calcimagnésiens comme ceux qui existent en Nouvelle Calédonie.

122. Les traceurs et la formation des sols

Trois types de traceurs ont permis de connaître l'origine des constituants et le mode de fonctionnement des sols i) la caractérisation des minéraux lourds et l'origine des matériaux des vertisols, ii) sur la caractérisation des minéraux secondaires carbonates (calcite, aragonite, dolomite) et sulfates (gypse et barytine) et iii) sur l'origine du gypse dans les sols par les déterminations isotopiques du Soufre $\delta^{34}\text{S}$ et $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$.

122-1. Etude macro-morphologique et traçage par minéraux lourds

Seuls les vertisols calcimagnésiques issus de l'altération de roches volcano-sédimentaires basiques contiennent du gypse. Toutefois ces roches sédimentaires basiques ont également été

influencées par une introduction détritique de matériau hypermagnésien (Podwojewski et Delaune, 1993). Les argiles à gypse affleurent à des altitudes bien plus élevées que celles des anciens niveau marins du quaternaire. A cette période, les mouvements néotectoniques étaient de faible amplitude et les sites étudiés sont localisés sur des panneaux subsidents. Une origine marine et quaternaire de ces argiles à gypse est donc hautement improbable.

122-2. Traçage isotope du gypse

Le traçage du soufre ($\delta^{34}\text{S}$) a permis de déterminer une double origine du gypse : une origine marine dominante, provenant des embruns contenus dans l'eau de pluie, et une origine continentale provenant de l'oxydation de sulfures continentaux (Podwojewski and Arnold, 1994). Cette part continentale augmente dans les terrasses alluviales et lorsque l'on s'éloigne de la bordure côtière. Elle a été confirmée par la suite par les *analyses isotopiques du Strontium* (traçage de Ca^{++} ; Toulkeridis et al., 1998).

122-3. Etude macro et micromorphologique au niveau du paysage, du profil et de l'horizon

Les vertisols sont des témoins enregistreurs des variations climatiques du Quaternaire. La succession des différents climat peut être appréciées dans l'espace au niveau du paysage par l'échelonnement des terrasses alluviales de composition différente, par les profils pédologiques à horizons différenciées à gypse, oxyde de manganèse et de carbonates, enfin à l'échelle microscopiques où carbonates et sulfates puis oxydes et enfin carbonates se succèdent en liserai de quelques microns.

Les vertisols et leurs constituants et en particulier **les éléments figurés** comme les minéraux secondaires carbonates (calcite, aragonite, dolomite) et sulfates (gypse et barytine) reflètent une succession de différents climats. Les vertisols à gypse se sont formés sous un climat plus sec, plus contrasté et plus venteux que l'actuel, affectant d'abord la côte, puis gagnant l'intérieur du pays. La fin de cette période glaciaire a été suivie par un climat de type méditerranéen, moins contrasté et à pluviométrie hivernale, favorable au développement des croûtes calcaires. Durant la transgression flandrienne, le climat était à nouveau plus humide que l'actuel. Il était caractérisé par une remontée des nappes phréatiques, par le développement de l'hydromorphie remobilisant le gypse et les carbonates, par une dégradation des argiles à la surface des vertisols, et par une altération du gypse et sa pseudomorphose en carbonates. Le climat actuel est à nouveau plus sec que durant la transgression flandrienne et se traduit par une carbonatation discrète en calcite et même en aragonite lorsque le milieu est magnésien (Podwojewski, 1995).

Les argiles à gypse de la côte ouest de Malikolo (Vanuatu) ont enregistré les mêmes fluctuations climatiques que les vertisols de Nouvelle Calédonie et ont permis d'effectuer une bonne datation relative des événements climatiques, avec des valeurs isotopiques du soufre comparables (Podwojewski, 1994).

123. Importance des constituants sur le comportement des sols

L'étude du fonctionnement des sols s'est effectuée à l'aide du rétractomètre (Bondy) et par modélisation de précipitation des sels (Strasbourg). Ces vertisols riches en smectites ont la propriété de se rétracter en saison sèche. L'eau de pluie, riche en sels, pénètre profondément dans les profils. Ceux-ci sont lixiviés de la partie supérieure du sol et se concentrent à une profondeur supérieure à 1,00 m, dans des horizons très peu drainants. Dans les vertisols hypermagnésiens, le manque de calcium et la grande solubilité du sulfate de magnésium ne permettent pas au gypse de se former (Podwojewski, 1992).

13. La mise en usage des vertisols

L'intérêt agronomique des vertisols

En Nouvelle Calédonie, ces *vertisols* *présentaient un potentiel intéressant*, cependant peu

exploité alors que dans d'autres régions du monde, y compris sur le continent australien tout proche, ces sols comptent parmi les plus fertiles. En effet, les vertisols occupent des surfaces planes ou à faible pente ; facilement mécanisables, ils sont profonds, peu sensibles à l'érosion, aisément accessibles et offrent souvent des possibilités d'irrigation (en particulier lorsque ces sols occupent les terrasses alluviales des cours d'eau principaux). En Nouvelle Calédonie, les vertisols couvrent près de 100 000 ha, à peine 6% de la superficie totale de la Grande Terre, mais *près de 50% de celle des terres facilement cultivables*. Les principales contraintes d'utilisation de ces vertisols sont liées à leurs propriétés physiques et aussi à leurs propriétés chimiques : il existe des vertisols sodiques et acides (10 000 ha), des vertisols hypermagnésiens (30 000 ha) et des vertisols calcimagnésiens (55 000 ha). Ces derniers posent le moins de contraintes chimiques et peuvent être le support de cultures intensives avec un minimum d'aménagements (Podwojewski et Beaudou, 1987 ; Podwojewski, 1988). Cette étude permettait ainsi d'optimiser les essais agronomiques menés en parallèle au centre ORSTOM de Nouméa par B. Denis, pédologue et B. Bonzon, agronome sur les carences des vertisols calcimagnésiques et sur les amendements gypseux et carbonatés des vertisols hypermagnésiques. Ces essais ont fait l'objet de plusieurs conventions entre les services ruraux de Nouvelle Calédonie et la section d'agro-pédologie de l'ORSTOM-Nouméa.

II. DE L'USAGE DES SOLS A LEURS CONSTITUANTS

Etude d'un écosystème d'altitude : LES PÁRAMOS en Equateur

1. LE MILIEU ET LES METHODES D'ETUDE

11. Pourquoi les étudier ?

Le mot páramo emprunté de l'espagnol (vraisemblablement d'origine celte, antero-main ou latin) signifie étendue montagneuse déserte et froide. Ce milieu de hautes altitudes (3200/3600-4800/5000m d'altitude selon la latitude), recouvert de larges graminées en touffes (Photo 1) a toujours suscité la curiosité des scientifiques (La Condamine, 1751) et notamment des botanistes séduits par le haut degré d'endémisme de la végétation qui s'y développe (Luteyn et al., 1992. C'est un milieu unique composé de 3000 à 4000 espèces végétales dont 60% sont endémiques (chaque cime composant autant d'îlots dispersés dans le paysage).

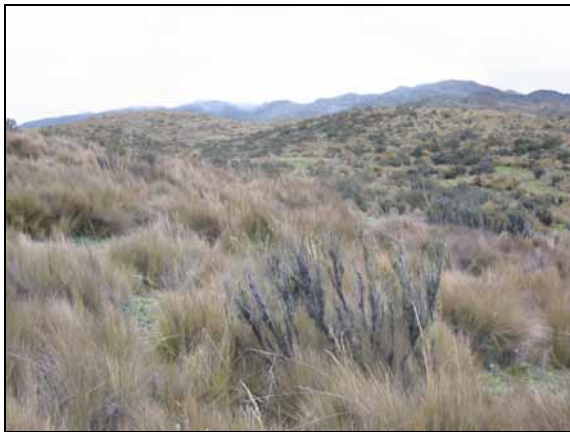


Photo 1 : Páramo herbacé de l'Antizana (cordillère orientale) avec quelques arbustes.

C'est le château d'eau des Andes. 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) (Guhl, 1968). On constate ainsi un stockage massif de l'eau dans les sols en période humide et une re-largage progressif de cette réserve hydrique en période sèche (Photo 2).

Environ 70% de la population du Venezuela, 50% de l'Equateur et 75% en Colombie vivent dans les zones de moyenne et haute montagne. L'accroissement de la population de 3% par an sont parmi les plus élevées d'Amérique latine (Delaunay, 1990).



Photo 2 :Prélèvement d'eau canalisée issu du páramo. Páramo du Pichincha.

L'intérêt des scientifiques pour le páramo est actuellement relancé par la colonisation humaine de ce milieu, jusqu'alors peu ou pas anthropisé (Luteyn, 1992).



Photo 3 : Mise en usage du páramo : traces de feux, pâturage, mise en culture discontinue, jachères. Páramo du Cayambe, Imbaburra.

On assiste en effet, à une occupation agricole progressive de cet étage andin (Photo 3) par brûlis et pâturage d'une part et pour mise en culture dans sa limite

inférieure d'autre part (De Noni et al., 1990 ; Hofstede, 1995). Cette mise en usage des páramos, généralisée en Equateur risque d'entraîner des changements profonds du fonctionnement hydrique du milieu. Or, une large part de l'alimentation en eau des systèmes d'irrigation des versants et des villes du couloir inter-andin dépend des entrées d'eau dans les hautes terres (Photo 4 Luteyn, 1992). En préalable à une étude sur le fonctionnement hydrique et hydrodynamique des páramos intacts et dégradés, une bonne connaissance des sols de ce milieu s'avère une nécessité. Or, comme tous les milieux de hautes altitudes, marginales pour la production agricole, les sols des páramos ont été quelque peu négligés lors des grandes études pédologiques et cartographiques du passé. Quelques pédologues, notamment français (Colmet-Daage et al., 1967, 1969 ; Faivre, 1988 ; Quantin et Zebrowski, 1997), ont

pourtant étudié quelques sols des páramos au cours de leurs travaux sur l'évolution des sols le long de séquences andines. Ces travaux ponctuels ont montré que ces sols étaient fortement influencés par des dépôts pyroclastiques. Ils ont également mis en évidence le caractère amorphe des minéraux secondaires et des capacités de rétention en eau exceptionnelles pour un certain nombre d'entre eux. Au cours de l'important travail de cartographie des sols de l'Equateur, réalisé sous la direction de Colmet-Daage, il est apparu que cette propriété de rétention en eau variait considérablement selon les sites et elle a été utilisée comme critère de classification de ces sols (PRONAREG/ORSTOM, 1978). Par ailleurs, un travail considérable a été réalisé au Nord du Pérou sur l'étude des sols des páramos peu ou pas influencés par des dépôts de cendres volcaniques (Escobedo-Urquizo, 1980).

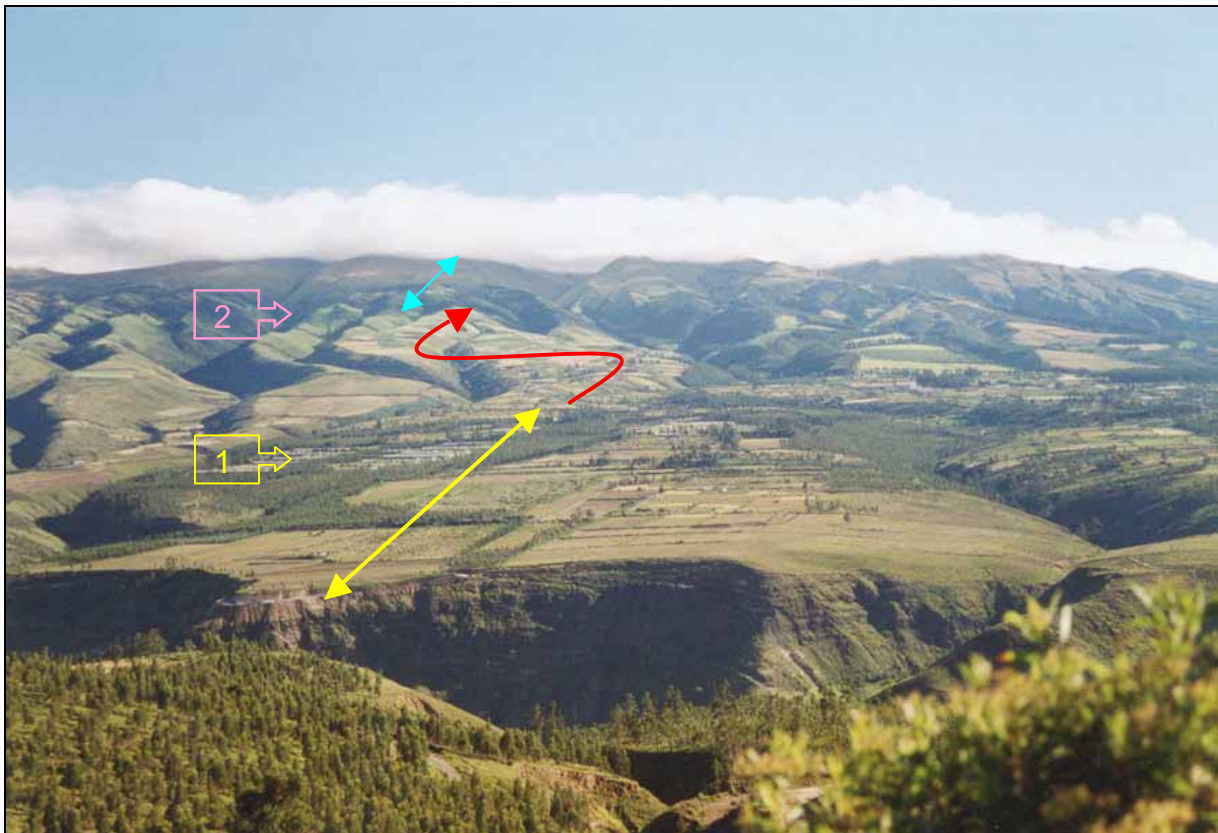


Photo 4 : Colonisation des páramos à partir de la plaine inter-andine.

- la flèche jaune indique l'extension de la plaine avec les grands propriétaires terriens **1** : développement des serres pour la floriculture (roses principalement) ;
- la flèche rouge indique la répartition sur les pentes des petites parcelles des *minifundios* qui montent vers les páramos. **2** : forêt d'altitude en voie de défrichement ;
- la flèche bleue indique l'extension des páramos avec des sommets souvent à forte nébulosité.

Aucune étude n'a jamais été consacrée spécifiquement aux sols de ce milieu, particulièrement en zone volcanique. Par ailleurs, les méthodes d'étude, les critères et l'esprit des classifications des sols volcaniques ont profondément évolué depuis quelques années (Aran et al., 2001). Ces changements justifiaient à eux seuls un réexamen de tous les sols dérivés de pyroclastes dans l'écosystème andin d'altitude. L'objectif du travail ici présenté était donc i) d'améliorer les connaissances de tous les types de sols des páramos équatoriens soumis aux dépôts pyroclastiques ou non influencés par les pyroclastes, d'étudier leur diversité et de préciser les facteurs qui président à leur évolution et à leur répartition spatiale puis ii) d'étudier les facteurs de dégradations des sols soumis aux changements d'usage en particulier dans la zone pyroclastique (feux, surpâturage, mise en culture) et iii) de comprendre les effets des dégradations sur les propriétés des sols et leur érodibilité.

12. Définition

Entre la forêt d'altitude et les neiges permanentes : le páramo constitue un écosystème altitudinal caractéristique du milieu tropical de l'Amérique Centrale et du Sud (Figure 2. Hofstede et al., 2003). Il se répartit sous forme dispersée, comme autant d'îles entre 11° de latitude nord et 8° de latitude sud, principalement au Venezuela en Colombie et en Equateur, mais aussi au Costa Rica et au Panama pour son extension septentrionale et au Nord du Pérou pour sa partie méridionale (Luteyn, 1992).

Tableau 2 : Extension des páramos dans différents pays (Hofstede et al. 2003).

Pays	Surface (km ²)	% du total
Colombie	14 430	1,3
Costa Rica	80	0,2
Equateur	12 600	5,1
Pérou	4 200	0,3
Vénézuela	3 990	0,4

En Equateur elle couvre une surface d'environ 12 600 km² soit un peu plus de 5% de la surface du pays (Tableau 2). Ce

milieu original andin se localise de manière irrégulière à des altitudes généralement comprises entre 3800 et 4700 m d'altitude pouvant atteindre des altitudes inférieures à 3200 dans la partie sud (Cuatrecasas, 1968, Hofstede, 1995).

Figure 2 : Répartition des páramos dans le monde



13. Les facteurs climatiques

Les conditions climatiques régnautes sur les páramos sont mal connues de par le manque de stations climatiques mais également de par la grande variété des situations locales.

13.1. Les températures

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 (Figure 3). Avec une baisse de température d'un gradient de 0.6°C pour une élévation de 100m d'altitude, les températures avoisinent souvent 0°C la nuit à 4000m d'altitude. A altitude égale, les températures sont plus fraîches au sud de l'Equateur qu'au Nord. Ainsi dans le Nord de l'Equateur le páramo s'établit à partir de 3800m d'altitude contre 3000m dans le sud du pays (Winckell et Zebrowski, 1997).

Figure 3 : Moyenne des températures minimales et maximales enregistrées à El-Angel (Carchi, site GEL) à 3500m d'altitude au pied du páramo du même nom. (INAMHI-Quito).

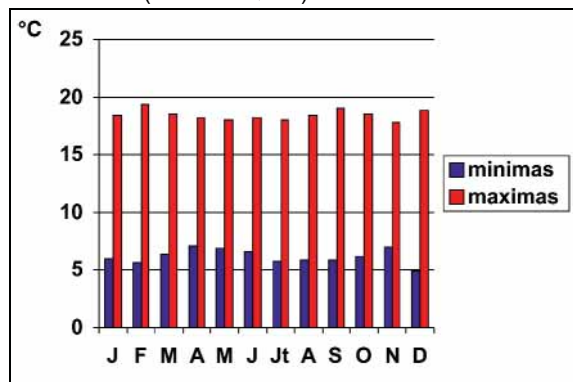


Photo 5 : Effet du climat constant sur les cultures d'orge près du páramo d'El Angel (Carchi). Champ labouré, semé, culture jeune, culture mature et récoltée dans un même terroir.

Les amplitudes thermiques diurnes nocturnes sont importantes, bien plus importantes que les variations annuelles, ce qui a fait dire à Hedberg (1964) : " *été tous les jours et hiver toutes les nuits*". L'essentiel des páramos possède donc un régime de température du sol de type "cryic" au-dessus de 4000m d'altitude et "isomesic" en dessous (SSS, 1999) avec de faibles variations annuelles "isofrigid" et de fortes variations journalières notamment jour/nuit (Photo 5).

Dans un cadre plus général, les flancs externes des cordillères reçoivent une quantité de précipitations supérieures au flanc internes. Sur ces versants, la pluviométrie décroît lorsque l'altitude augmente au contraire des flancs internes où la pluviométrie décroît fortement en même temps que l'altitude (Ayabaca, 1984). Le sillon inter andin a un climat d'autant plus sec que son altitude est basse (Photo

6). Ce milieu est donc caractérisé par une très forte hétérogénéité des conditions à l'échelle locale.

132. La pluviométrie

Les effets de versants jouent un rôle considérable sur les précipitations et l'on a relevé des pluviométries annuelles depuis moins de 600 mm jusqu'à plus de 3000 mm (INEFAN, 1996). Les vents dominants proviennent de l'Amazonie et donc de l'est et se heurtent à des remontées pluvieuses sur la ligne de crête de la cordillère occidentale.

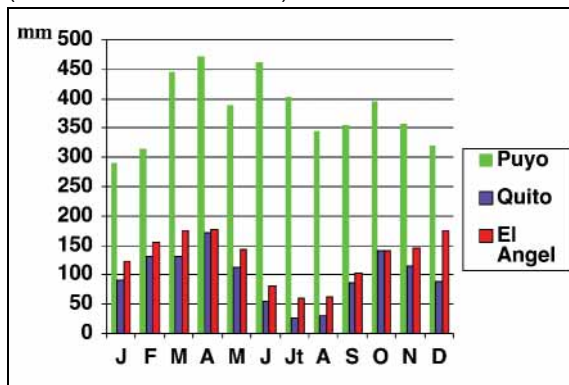


Photo 6 : Influence de l'altitude sur le régime des pluies dans le sillon inter-andin. Plus l'altitude est basse plus le régime est sec. Région d'Alausi au sud de Riobamba.

A plus petite échelle un schéma général peut néanmoins être tracé : les páramos équatoriens sont humides avec une pluviométrie de l'ordre de 1000 à 1500 mm de pluie annuelle (Huttel, 1997). Ces précipitations se répartissent de manière assez homogène dans l'année avec cependant deux courtes saisons plus sèches, de juin à août et de décembre à janvier (Figure 4) plus marqué au nord qu'au sud du pays (effet des variations de la convergence inter-tropicale) (Pourrut, 1994, 1995). Le climat est humide, mais avec une pluviométrie modérée et des précipitations occultes comme les brouillards, bruines et averses de grêle mal appréciées par les dispositifs de mesure classique mais qui jouent pourtant un grand rôle dans le maintien quasi permanent de conditions humides ou peuvent influencer les processus d'érosion comme dans le cas de la grêle. Les intensités sont faibles ; elles n'excèdent pas 40 mm/jour. L'humidité résiduelle est

forte, elle oscille entre la saturation et 70%, descendant rarement à 50% (Cuatrecasas, 1968).

Figure 4 : Moyenne de la pluviométrie mensuelle à Puyo en Amazonie au pied de la cordillère orientale, à Quito dans la vallée inter andine (2800 m d'altitude) et à El Angel (3500 m d'altitude, site de référence GEL) au pied du páramo du même nom. (Données INAMHI - Quito).



La présence de nuages est constante et même durant les mois secs de juillet et d'août. De nombreuses plantes jouent le rôle de capteurs de rosée qui se transmet par stemflow directement à l'alimentation racinaire (XX). Ainsi, les páramos dans leur ensemble sont caractérisés par un climat humide avec un régime d'humidité des sols de type "udic" (Van Wambeke, 1981).

Les effets de versant peuvent être très importants à une échelle locale (Photo 7) ou régionale. Sous les vents dominants amazoniens, les aires sous le vent des cônes volcaniques isolés sont très sèches. Le páramo sableux du Chimborazo encore appelé *arenal* est caractérisé par une pluviométrie inférieure à 500mm avec des dunes actives et des tourbillons (Photo 8). Ce type de climat humide où les amplitudes de température diurnes nocturnes sont supérieures aux amplitudes inter saisonnières distinguent le climat des páramos de celui de la *Puna*, localisée au Pérou et en Bolivie avec une saison sèche marquée et des écarts de températures importants entre l'été et l'hiver.

133. Autres facteurs climatiques

En raison de la faible épaisseur de l'atmosphère, on peut noter une très grande amplitude dans les irradiances reçues au sol. Les rayons infrarouges et ultraviolets

lorsqu'ils ne sont pas stoppés par la couverture nuageuse sont très puissants. Les plantes se protègent en émettant des cuticules cireuses, ou des feuilles pelucheuses. Les sols noirs de type Andosols absorbent la chaleur accroissant les risques d'évapotranspiration en cas de mise à nu des sols (par la culture ou le surpâturage).



Photo 7 : Páramo pâturé du Pichincha près de Quito. Les effets du surpâturage sont plus visible côté ouest "sous le vent" (flèche jaune) que sur le côté est "au vent" (flèche bleue) provenant de l'Amazonie.



Photo 8 : Tornade dans l'*arenal* du Chimborazo.

14. La végétation

La végétation des páramos est une végétation non forestière, ouverte, souvent à tapis graminéen avec des arbustes et couramment parsemée de nombreux *Espeletia* sp (Asteraceae) aux rosettes de feuilles très caractéristiques. Malgré les conditions humides, les plantes sont xéromorphiques avec de nombreuses espèces à feuilles pelucheuses (*Espeletia* sp., *Senecio* sp., *Lupinus* sp. etc...), ou à feuilles cireuses et squameuses. Cette végétation présente une physionomie comparable à celle des hautes terres de

l'Afrique de l'Est (Mont Kenya, Kilimandjaro ; Hedberg, 1992).

La flore actuelle a évolué sur place lors de la surrection des Andes. Les strates écologiques d'altitude élevée étant discontinues, la végétation s'est spécialisée en autant d'îlots d'endémisme. L'écosystème des páramos est constitué de 3000 à 4000 espèces de plantes vasculaires ; environ 60% des espèces sont endémiques (Jørgensen and Ulloa Ulloa, 1994 ; Luteyn, 1999).

La végétation s'organise en fonction de l'altitude (Figure 5) et se subdivise en 3 groupes (Cuatrecasas, 1968):

- le *super-páramo* se développe à des altitudes élevées entre 4200 et 4800m, en Equateur et Colombie ils se localise en îlots discontinus autour des volcans émergeant de la cordillère, tandis qu'au Venezuela il constitue la crête de la cordillère. La végétation est clairsemée et les plantes sont adaptées aux gelées nocturnes, aux intenses radiations solaires. Les feuilles présentent une adaptation xéromorphique : elles sont souvent dentelées, pelucheuses, aux teintes blanchâtres et de surface réduite (Photo 9).



Photo 9 : Super-páramo à *Espeletia* sp. Páramo de Merida, Venezuela.

- le *proper-páramo*, est un écosystème dont l'extension s'échelonne entre 3500 et 4200 m. Il est dominé par une strate herbacée en touffes. Les Poacées comme *Calamagrostis* sp., *Agrostis* sp., *Festuca* sp., et *Stipa hichu* dans les zones plus sèches, et des bambous nains

constituent le *pajonal* et recouvrent 70% de la surface du sol. Les rosettes géantes sont les plantes les plus remarquables comme *Espeletia* sp. (Asteraceae) appelée localement *frailejon* et *Puya* sp. (Bromeliaceae). Les rosettes acaulescentes, les plantes en coussin (en particulier dans les zones marécageuses ou "*pantano*" et quelques buissons complètent la végétation ; Des bosquets dispersés de *Polylepis* sp. (Rosaceae) croissent jusqu'à 4200 m d'altitude.

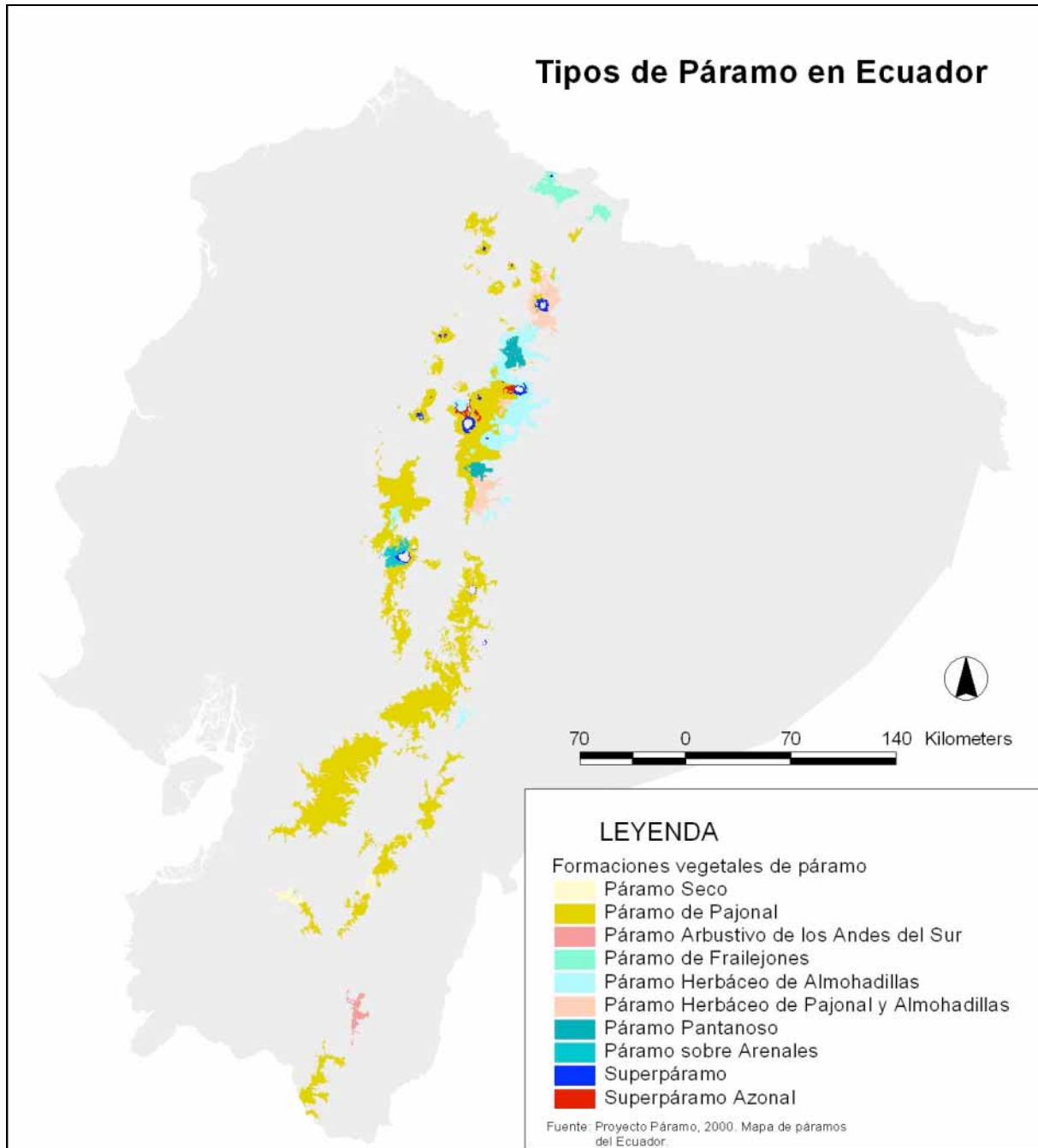
- le *sub-páramo*, niveau inférieur s'étage entre 3200 et 3500m. Il est encore riche en espèces ligneuses. Il forme la transition avec la forêt d'altitude. Cette frontière est mouvante au gré des variations climatiques, des feux pour développer l'élevage à partir des zones d'altitude ou des extensions de cultures à partir de zones plus basses (Photo 10).



Photo 10 : Subpáramo, Parc de los Nevados, Colombie.

Les principales familles rencontrées outre les Poaceae sont les Asteraceae (85 genres), Apiaceae (18), Ericaceae (15), Scrophulariaceae (15), Caryophyllaceae, Rosaceae, Gentianaceae. Il existe cinq grands types de morphologies de plantes composant les páramos (Troll, 1968).

Figure 5 : Différents types de formations végétales des páramos d'Equateur (Hofstede et al. 2003).



141. Les graminées en touffes

Les graminées en touffes ou "*Tussock grass layer*" couvrent plus de 70% de la surface du páramo Equatorien et forment le "*pajonal*" du mot "*paja*": la paille. Les plantes appartiennent principalement à la famille des Poaceae et sont représentées par *Festuca sp.*, *Stipa sp.*, *Calamagrostis sp.*, *Agrostis sp.* Ces graminées en touffes très ligneuses parfois de plus de 60-70cm de haut protègent les repousses qui se développent au centre de la touffe (Photo 11).



Photo 11 : Hautes herbes (Poaceae) représentées par *Calamagrostis sp.* et *Agrostis sp.* Páramo du Pichincha.

142. Les rosettes géantes et autres espèces herbacées érigées :



Photo 12 : Páramo à frailejon (*Espeletia sp.*, Asteraceae), El Angel, Carchi. Remarquer les effets du feu qui détruit les feuilles restant sur le stipe.

Ces plantes bien que n'étant pas caractéristiques des páramos en constituent les espèces les plus spectaculaires. Les rosettes géantes du genre *Espeletia sp.* (Asteraceae, appelées localement frailejon) à grandes feuilles duveteuses sont

remarquables par leur stipe qui peut atteindre 2 mètres de haut (Photo 12).

Ces plantes sont localisées dans la partie Nord de l'Equateur (Carchi, comme dans la réserve d'El Angel) ainsi que dans le páramo situé au nord du volcan Tungurahua. Plus on se déplace vers la cordillère vénézuélienne plus le nombre d'espèces augmente. Les plantes du genre *Puya sp.* (Bromeliaceae) montrent des inflorescences érigées (Photo 13).



Photo 13 : *Puya sp.* (Bromeliaceae), páramo de l'Antizana.

143. Les arbustes isolés



Photo 14 : *Chuquiragua jussieui* (Asteraceae), páramo du Pichincha

Aux touffes herbacées sont associés quelques arbustes isolés dont les plus connus sont *Chuquiragua jussieui* (Asteraceae) (Photo 14) associé à d'autres plantes semperviventes de la famille des Asteraceae, Rosaceae et Ericaceae et des

forêts monospécifiques de *Polylepis incana* (Rosaceae) dont la biomasse peut être considérable (§ 344).

144. Les rosettes acaulescentes



Photo 15 : *Hypochaeris* sp. (Asteraceae), rosette acaulescente typique du tapis herbeux entre les touffes.

Des plantes en rosettes acaulescentes couvrent le sol de leurs feuilles et fleurs comme *Hypochaeris* sp. et *Werneria* sp. (Asteraceae) ou *Valeriana rigida* (Valerianaceae). Ces plantes sont assez résistantes au piétinement du bétail (Photo 15 et 16).



Photo 16 : *Valeriana radiata* (Valerianaceae), autre plante en rosette acaulescente typique du tapis herbeux entre les touffes.

145. Les plantes en coussins

Les plantes en coussins (*cushion like* formation) forment une couverture rigide à la surface du sol où les espèces du type *Azorella pedunculata* (Apiaceae), *Plantago rigida* (Plantaginaceae), *Pidistichia muscoides* (Juncaceae) sont les plus abondantes (Photos 17 et 18). Cette forme peut être généralisée dans les zones de bas-

fond où elle forme la couverture végétale exclusive (*pantano*). Ces associations végétales recouvrent alors quasiment 100% de la surface du sol.



Photo 17 : *Plantago rigida* (Plantaginaceae) en coussin typique.



Photo 18 : Páramo hydromorphe à *pantano* du Chimborazo. Plantes en coussins.

15. Géologie-géomorphologie

151. Géomorphologie

En Equateur les Andes sont constituées de deux chaînes parallèles (la cordillère occidentale et la cordillère orientale aussi nommée cordillère royale) orientées Nord-Sud et qui ont une altitude constante entre 3800 et 4000m (Parsons, 1982). Les páramos occupent la partie sommitale des chaînes Andines. La géomorphologie des sommets andins a été façonnée par les glaciers durant les phases glaciaires à une altitude supérieure à 4000m formant des vallées en U, des verrous glaciaires, de nombreux lacs, des dépôts morainiques et des reliefs émoussés (Schubert et Clapperton, 1990).

La genèse de ce paysage est complexe et est liée à l'action glaciaire pour une part et

volcanique pour une autre (Winckell et Zebrowski, 1997). Mais c'est surtout la présence d'énormes dépôts de pyroclastes qui contribuent à l'aspect doux du relief, en atténuant les modelés préexistants et en donnant au paysage des hautes régions des Andes volcaniques son aspect particulier (Winckell et Zebrowski, 1997).



Photo 19 : Páramo à frailejón de El Angel (Carchi) sur glaciais à pentes très faibles typique des épaisses couches cendreuses.

Les páramos du Nord de l'Equateur

Toute la partie nord des cordillères est recouverte de cendres volcaniques qui ont gommé les aspérités du relief préexistant et ont façonné un relief uniforme et monotone, formé de collines convexo-concaves avec une déclivité n'excédant pas 200m (Photo 19). Les pentes convexo-concaves sont assez douces et peuvent se terminer par de vastes zones pseudo-planes provenant soit d'accumulations colluviales, soit de remplissages alluviaux. Les escarpements semblent limités aux coulées andésitiques à rhyodacitiques de faible extension. A partir de ces sommets émergent des cônes volcaniques sous forme de pointements isolés comme l'Antizana, le Cayambe, Le Cotopaxi dans la chaîne orientale et les Ilinizas ou le Chimborazo sur la cordillère orientale, sommets autour desquels se limite l'extension du super-páramo. A partir de Cuenca, les dépôts de cendres deviennent plus fins et le grand massif du Cajas (cordillère occidentale) développe un modelé glaciaire typique (Photo 20).



Photo 20 : Le páramo du Cajas à l'ouest de Cuenca (site de référence CUE) est caractérisé par une faible épaisseur de cendres et un relief glaciaire typique, roches moutonnées, verrous glaciaires, lacs glaciaires et moraines.

Les páramos du Sud de l'Equateur

Sur les roches mères non volcaniques, localisées dans le sud de l'Equateur, les sommets sont découpés, les pentes très escarpées. L'axe Nord-sud de la cordillère occidentale s'interrompt au sud du massif du Cajas avec le massif isolé du Fierro Urcu plutôt orienté est-ouest. Plus au Sud la chaîne occidentale disparaît au niveau du noeud de Loja et les páramos restent confinés sur la chaîne orientale.



Photo 21 : Páramo du Podocarpus vu depuis le site de Sabanilla (profil de référence SAB). Le páramo est restreint à une étroite bande sommitale. Les crêtes sont vives, les pentes sont fortes et parfois érodées par des glissements de terrain.

Le páramo apparaît à des altitudes bien plus basses vers 2900m et se limite aux arêtes sommitales du Fierro Urcu (cordillère

occidentale) du plateau d'Oña ou du Parc Podocarpus pour la cordillère Orientale (Photo 21). Il subsiste un modelé glaciaire comme l'attestent de nombreuses mares localisées sur les crêtes du páramo du Podocarpus.

152. Géologie

152-1 Le nord de l'Equateur

Depuis le Nord du pays jusqu'au sud de Cuenca, les páramos bordent l'allée des volcans définie par Humboldt en 1816 et qui comprend une soixantaine de volcans dont plus d'une dizaine de volcans actifs (Figure 6). Les matériaux pyroclastiques émis par ces volcans constituent les matériaux parentaux dont dérivent les sols.



Photo 22 : Slumps, coulées pyroclastiques et dépôts sur plusieurs centaines de mètres au pied du Mojanda, dans la vallée inter andine au Nord-est de Quito.

Ces niveaux peuvent atteindre plusieurs centaines de mètres d'épaisseur dans la plaine inter andine (Photo 22).



Photo 23 Cendres récentes sur un substrat remanié par la dernière glaciation. Páramo du Cajas (site de référence CUE).

Elles sont d'épaisseur beaucoup plus restreinte près des sommets recouverts par les glaciers durant les périodes glaciaires et

lorsque l'on s'éloigne des sources d'émission au sud de la ville de Cuenca (Photo 23). Deux générations de dépôts ont été mis en évidence par Winckell et al. (1991b). La première, qui prend le nom de cendres anciennes, est antérieure et contemporaine du dernier glaciaire soit d'un âge supérieur à 10 000 ans B.P. (+/-1000). On ne retrouve qu'exceptionnellement ces pyroclastes sur les páramos, hormis très localement en poches discordantes au relief actuel (profil AZO, §212).



Photo 24 : Discordance entre les cendres récentes épousant la morphologie du relief et les cendres anciennes horizontales. Páramo du Chimborazo.

La deuxième génération est postérieure à la dernière débâcle glaciaire et est âgée de moins de 10 000 ans B.P. Ce sont ces cendres qui recouvrent uniformément les zones de hautes altitudes et presque toujours de manière concordante au relief actuel, hérité des dernières glaciations (Photo 24).

L'origine et le chimisme des pyroclastes est difficile à préciser compte tenu de l'hétérogénéité des sources et des éruptions. Globalement cependant, le chimisme des pyroclastes de cette période semble de type andésitique à dacitique (Hall et Mothes, 1994). En conclusion des différentes études menées par Barberi (1992), Hall et Mothes, (1994), Hall et al., (1999), Monzier et al. (1999), les émissions les plus récentes sont plus basiques de type andésitique et le volcanisme tend à se développer dans la partie la plus orientale de la chaîne orientale comme l'attestent les activités très fortes du Reventador et du Sangay tous deux sur le versant amazonien. Le Pichincha, seul volcan en activité de la chaîne occidentale

est peu actif et ses cendres sont très acides de type rhyo- dacitique (Photo 25).



Photo 25 : Explosion pyroclastique du Pichincha depuis la ville du Quito le 7/10/1999.

La répartition des cendres dépend des vents dominants. L'essentiel des cendres est projeté généralement vers l'ouest emportés par les vents dominants provenant d'Amazonie mais les cendres les plus fines sont entraînées vers l'est par le jet-stream (Photo 26).



Photo 26 : Explosion pyroclastique du Pichincha le 7/10/1999. Le nuage s'orienté à basse altitude vers l'Ouest puis à haute altitude vers l'Est.

Dans le sud de l'Equateur

Les bassins de Cuenca et de Saraguro jouxtent deux cordillères sur lesquelles les retombées pyroclastiques deviennent plus diffuses. Les vents amazoniens ont répandu les cendres fines loin vers l'Ouest sur le massif du Cajas très marqué par les dernières glaciations.

Le soubassement géologique est constitué de roches de l'ère Tertiaire. Ce sont

principalement à la base des formations volcano sédimentaires dénommées "Pisambayo" par Litherland and Zamora, 1993) et recouvertes de coulées dacitiques avec des prismes réguliers de la formation de "Tarqui" (Baldock and Longo, 1982) avec des intrusions de grano-diorite faiblement métamorphisées (Fierro Urcu).

Au Sud de Loja, le páramo du Podocarpus dans sa partie Nord est composé de fins shales et schistes du Paléozoïque avec le développement du métamorphisme au sud du Parc et l'apparition de micaschistes et de granito-gneiss.

16. Sites d'étude

Pour comprendre les principaux facteurs de pédogenèse et l'évolution des sols andiques des páramos, nous nous sommes voulu une représentation large allant depuis sols jeunes sur cendres récentes aux sols les plus anciens et retrouver si possible la trace des cendres anciennes visibles sur la côte mais occultées dans la Sierra par les glaciations. Les cartes faites par l'équipe de Colmet-Daage comme la carte de la végétation (PRONAREG/ORSTOM 1978-1985) et la carte de reconnaissance des sols de l'Equateur (PRONAREG/ORSTOM, 1975-1982) toutes les deux à un échelle de 1:200 000 ont servi de guide à notre étude. Colmet-Daage et son équipe ont proposé comme critère de différenciation des sols andiques sur cendres la capacité de rétention en eau à 100 kPa (sols conservés humides) (PRONAREG/ORTSOM, 1978). C'est sur cette base que 5 sites, possédant des capacités de rétention maximum de rétention en eau variant de 500g kg^{-1} de sol séché à l'air à plus de 2500g kg^{-1} , sont choisis du Nord au Sud de la zone recouverte par des pyroclastes (Figure 6). Afin de limiter les facteurs de variation, les sites sont choisis dans des zones peu influencées par des conditions climatiques particulières et avec des pluviométries +/- comparables autour de 1200-1500 mm de pluie annuelle. Sont ainsi éliminés de notre étude les sites dont les conditions climatiques sont fortement influencés par la

présence d'un volcan (effet versant). De même, les sites sont choisis dans l'espace du páramo proprement dit en éliminant aussi bien les zones de très hautes altitudes (> 4500 m) que les zones basses à la transition avec les végétations ligneuses. Les sites choisis (Tableau 3) se répartissent ainsi du nord au sud de la zone recouvert par des pyroclastes depuis la frontière Colombienne (1° de latitude Nord) jusqu'au niveau de la ville de Cuenca (3° de latitude Sud). Pour la partie sud, la répartition a été plus empirique. Les páramos occupent également une superficie bien plus restreinte. On s'est attaché à des sites accessibles et présentant la plus grande diversité pédologique liée à de grandes unités géologiques. Ainsi les sols vont depuis le Fierro Urcu proche du massif du Cajas avec de grandes similarités de végétation, puis au plateau d'Oña et enfin au páramo du Podocarpus, le plus au sud, peu accessible avec deux grand types de roches: des pélites volcano-sédimentaires dans sa partie nord et des roche métamorphiques dans sa partie sud.

17. Méthodes d'études

Les sols des páramos présentent des caractéristiques physiques et chimiques spécifiques liées à leur nature minéralogique. Certaines mesures de ces caractéristiques demandent une préparation et un conditionnement particulier.

171. Les mesures physiques

La densité apparente a été mesurée par la méthode au cylindre et ramenée à la masse de sol séché à 105°C. La capacité de rétention en eau à 30 et 100 kPa est mesurée par la méthode de la presse de Richards sur des échantillons remaniés impérativement **conservés humides** en raison de la dessiccation irréversible des sols.

Les distributions granulométriques sont mesurées, après destruction de la matière organique par H₂O₂ et dispersion sous ultrasons à pH acide et après échange avec des résines Na (Bartoli et al., 1991), par passage sous granulomètre X. L'utilisation

classique de l'hexamétaphosphate n'est pas suffisante pour une bonne dispersion des particules.

La mesure de la densité réelle du sol a nécessité l'emploi d'un pycnomètre à hélium et *la porosité du sol* mesurée par l'intermédiaire d'un porosimètre à mercure en maintenant les sols à la capacité au champ (Poulenard et al. 2002).

Les mesures de l'hydrophobie ont été faites selon deux méthodes distinctes: deux méthodes de routine qui sont la WPT (water penetration time) et la MED (Molarity Ethanol Droplet) qui mesure le pourcentage de pénétration en moins de 10 secondes d'une goutte d'eau avec une concentration en éthanol croissante (King, 1981, Doerr, 1998, Roy et Mc Gill, 2002). Une méthode plus complexe en laboratoire a mesuré l'angle de contact (τ) que fait une goutte d'eau avec son substrat par remontée capillaire (Krüss Processor Tensiometer; Michel et al., 2001) sur échantillon humide puis séché pendant 48h à 30°C.

172. Les mesures chimiques

Les extractions spécifiques comme l'extraction à l'oxalate d'ammonium 0,2 M. (ox) est réalisée à pH 3 avec un rapport sol/solution de 1/40 (Schwertmann, 1964 ; Blakemore et al., 1981), l'extraction par le pyrophosphate de Na 0,1 M. (p) avec un rapport 1/100 (Wada and Higashi, 1976) et par le citrate-bicarbonate-dithionite (cbd) avec un rapport 1/50 (Mehra and Jackson, 1960).

La quantité d'allophanes est estimée sur la base du rapport atomique (Alox-Alp)/Siox (Parfitt et Wilson, 1985). L'indice mélanique est mesuré suivant la méthode de Honna et al., (1988) par le rapport de l'absorbance à 450 et 520 nm d'un extrait NaOH 0,1 M. *La capacité de rétention des phosphates* (Ret-P) a été déterminé par la méthode de Blakemore et al. (1981), le phosphate résiduel dosé par chromatographie ionique.

Figure 6 : Carte de localisation des páramos en Equateur et des sites d'étude.

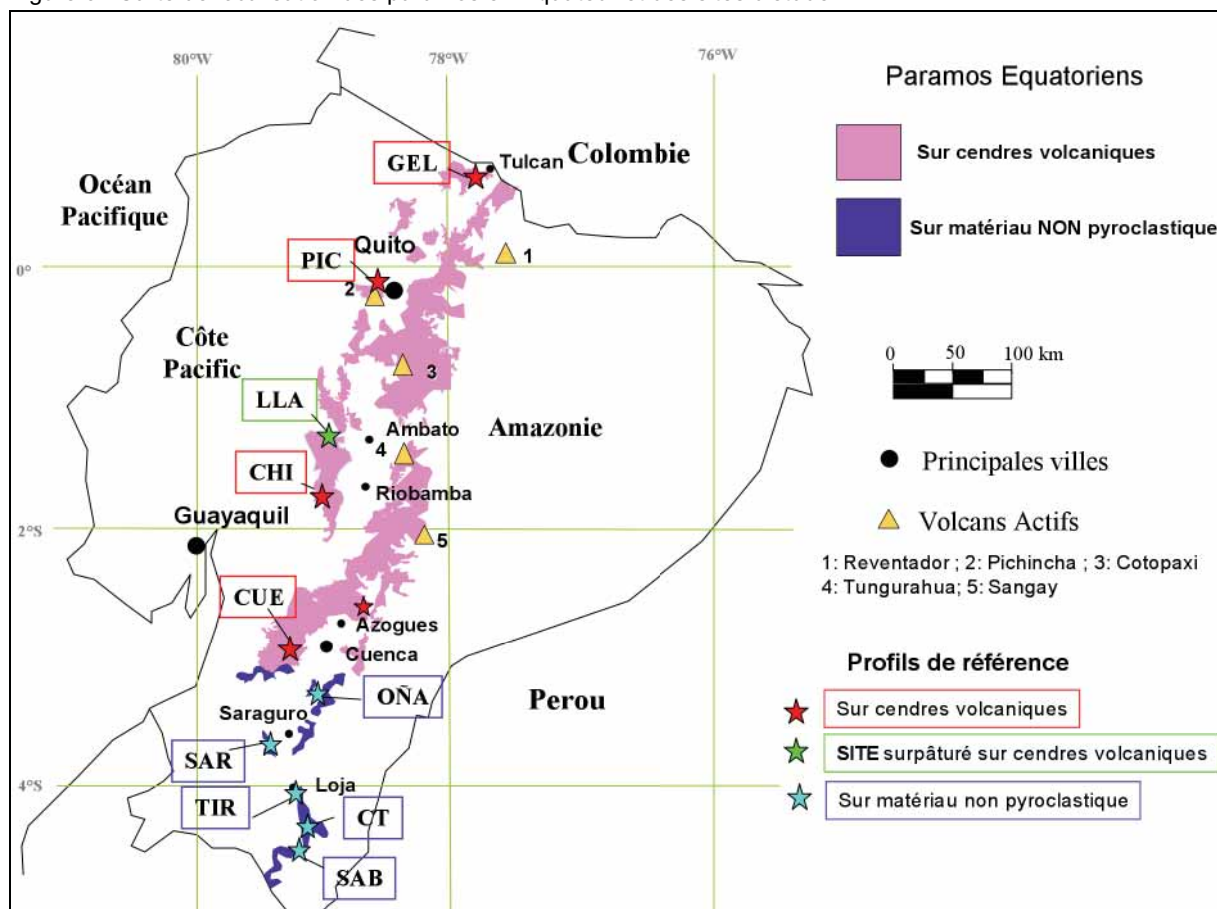


Tableau 3 : Localisation des sites des páramos du Nord au Sud.

De 1 à 5 : profils de référence sur cendres volcaniques pour la thèse de J. Poulenard (2000). Les sites à astérisque ont été l'objet d'une simulation de pluie. Le site S a fait l'objet d'une étude consacrée au surpâturage avec une quinzaine de profils étudiés. De 6 à 10 : profils de référence non situés sur cendres volcanique

Profil nom		Altitude (m)	Localisation	Province	Classification
1- GEL*	Páramo d' El Angel	3500	0°41'12"N 77°54'55"W	Carchi	Hydric Pachic Melanudand
2- PIC*	Pichincha Quebrada de la Rumihurcu	3960	0°08'27"S 78°34'36"W	Pichincha	Thaptic Haplocryand
3- CHI	Chimborazo Route de Bucay	3800	1°45'14"S 78°51'36"W	Chimborazo	Typic Melanudand
4- AZO	Azogues - Route de Pindilig	3250	2°38'45"S 78°46'23"W	Cañar	Hydric Melanudand
5- CUE	Parc du Cajas Cuenca Route de Soldados	3700	2°57'49"S 79°13'05"W	Azuay	Hydric Pachic Melanudand
S- LLA	Rio Ambato Llangahua La Esperanza	3800-4200	1°30'S 78°55'W	Tugurahua-Bolivar	Thaptic Hapludand
6- OÑA	Páramo de Oña	3000	3°34'10" S 79°11'20"	Azuay	Hydric humox
7- SAR	Fierro Urco (sommets)	3700	3°42' S 79°19'W	Azuay	Melanudand
8- TIR	El Tiro (route de Zamora)	3100		Loja	Umbrisol
9- CT	Cerro Toledo (sommets)	3350		Loja	Umbrisol
10- SAB	Sabanilla (Valladolid) route de Chinchipe	3000		Loja	Spodosol

La capacité d'échange et les éléments échangeables ont été dosés par ICP-AES après échange au pH du sol dans une solution d'électrolytes neutres (NH_4Cl 0,5 M) avec un rapport sol/solution de 1/20. Dans le cas des sols très acides, la capacité d'échange effective a été mesurée avec la cobaltihexamine à pH du sol. Les éléments majeurs sont déterminés par ICP-AES. La *réserve totale en bases* (TRB ou *Total Base Reserve* en $\text{cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$; Herbillon, 1986) est la somme des cations (Ca, Mg, K, Na) résultant de l'analyse totale et Ki est le rapport moléculaire ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) de la terre fine.

Les datations de la matière organique au ^{14}C ont été déterminées par scintillographie après synthèse de C_6H_6 et mesure de l'activité de ^{14}C . Le calcul du temps moyen de résidence a été fait en utilisant le modèle de Balesdent et Guillet (1982).

173. Les simulations de pluie

Les simulations de pluies (Poulenard et al. 2001) ont été réalisées par un infiltromètre à aspersion sur des parcelles de 1m^2 avec 3 répétitions dans les sites de référence GEL et PIC (Tableau 3 et figure 6). Les temps d'attente entre 2 pluies successives est de 3, 12 et 24 heures respectivement pour les pluies 1, 2 et 3. Chaque simulation dure 90 minutes et comprend 6 pluies de 15 minutes chacune, d'intensité croissante de 20, 27, 50, 70, 90 and 110 mm h^{-1} , en conformité avec les intensités maximales observées dans la région des páramos du Pichincha (Perrin *et al.* 2001).

2. LES SOLS DES PARAMOS

Les sols des páramos ont été décrits dès 1948 par Jenny. Les sols évoluent en fonction de l'action convergente des basses températures, du degré d'humidité élevé et de la disponibilité en aluminium de la roche (Jenny, 1994 ; Aran et al. 2001).

Il convient de distinguer 2 grands types de sols: les sols sur cendres volcaniques localisés dans les 2/3 de la partie Nord de la Sierra et les sols sur socle sédimentaire, éruptif et/ou métamorphique localise dans

le ½ sud de la Sierra. En effet contrairement aux roches du socle les cendres sont meubles, les sols sont souvent épais, et du fait d'un matériau initial fortement divisée, la dissolution des verres volcaniques est rapide et libère de la silice et surtout de l'aluminium lesquels vont former des complexes organo-minéraux stables (Boudot et al., 1986 ; Aran et al., 1998 ; Allen and Burns, 2000).

Les sites de référence sont présentés dans la figure 6 et le tableau 3

Tableau 4 : Principales caractéristiques des 5 Andosols de référence dans les páramos.

Profil	Horizon	Profondeur (cm)	Couleur (humide)	Texture (In situ)	Eléments grossiers	Structure	Transition
1- GEL	A1	0-30	7.5 YR 2/0	L	A	GR-FI	G
	A2	30-85	7.5 YR 2/0	L	A	MA	N
	2 Ab1	85-140	7.5 YR 2/0	L	A	PS-FI	G
	2 Ab2	140-165	10 YR 2/1	L	P-FM	MA	B
	3 C	165-195	10 YR 5/4	S	A	MA	
2- PIC	A1	0-20	10 YR 2/1	SL	P-MG	PS-F	N
	A2	20-40	10 YR 2/1	SL	P-MG	MA	N
	2A3	40-55	10 YR 3/2	SL	C-MG	MA	A
	2C	55-80	10 YR 5/6	S	N-MG	P	B
	3Ab	80-115	10 YR 2/1	SL	A	MA	G
	3Bw	115-150	10 YR 3/2	SL	P-MG	MA	N
	3C	150-185	10 YR 4/3	SL		MA	
3- CHI	A1	0-30	10 YR 2/1	L	A	GR-FI	G
	A2	30-60	10 YR 2/1	L	A	MA	N
	2Ab1	60-130	10 YR 2/1	L	A	MA	G
	2Ab2	130-170	10 YR 2/1	AL	A	MA	N
	3Bwb	170-210	10 YR 4/4	SL	P-MG	MA	
4- AZO	A1	0-15	10 YR 2/1	L	A	PS-FI	G
	A2	15-50	10 YR 2/1	L	A	PA-MO	N
	2A3	50-65	10 YR 2/2	L	P-FM	PA-MO/GR	N
	2 Bw	65-80	10 YR 3/3	SL	P-FM	PA-MO	N
	2 Bw-C	80-105	10 YR 5/6	SL	P-FM	MA	B
	3 Ab1	105-170	10 YR 2/2	L	A	PA-MO/GR	G
	3 Ab2	170-195	10 YR 3/2	L	A	PA -FI+ PS GR	N
5- CUE	A1	0-30	7.5 YR 2/0	L	A	PS MO	N
	2 A2	30-45	7.5 YR 2/0	SL	P-FM	PS MO	N
	2 Bw-C	45-60	10 YR 3/4	SL	C-FM	MA	N
	2 C	60-70 +	10 YR 5/4	S	N-MG	-	

Texture : L, limoneux ; S, sableux ; A, argileux ;

Eléments grossiers : A, Aucun ; P, peu (2-5%) ; C, communs (5-15%) ; N, nombreux (15-40%) ; FM, fin et moyens (0,2-2cm) ; MG, moyens et grossiers (0,6-6 cm) ;

Structure: MA, massive; PS polyédrique subanguleuse ; PA polyédrique subanguleuse ; P: Particulaire ; GR, granulaire; PS, prismatique ; FI, fine ; MO, moyenne ; GR, grossière ;

Transition : B, brutale (0-2cm) ; N, nette (2-5 cm) ; G, graduelle (5-15 cm)

21. Les sols sur cendres volcaniques

211. Les sols du supra-páramo

L'altitude moyenne de la ligne de crête des cordillères équatoriennes est de 4000 m environ. Le supra-páramo affecté par les températures nocturnes négatives est à une altitude bien supérieure donc sur les pentes des cônes volcaniques actifs. Pour cette raison le couvert végétal est faible avec très peu de production de matière organique. Les sols sont très peu développés sur des cendres très récentes souvent assez grossières et remaniées par les vent et le gel.

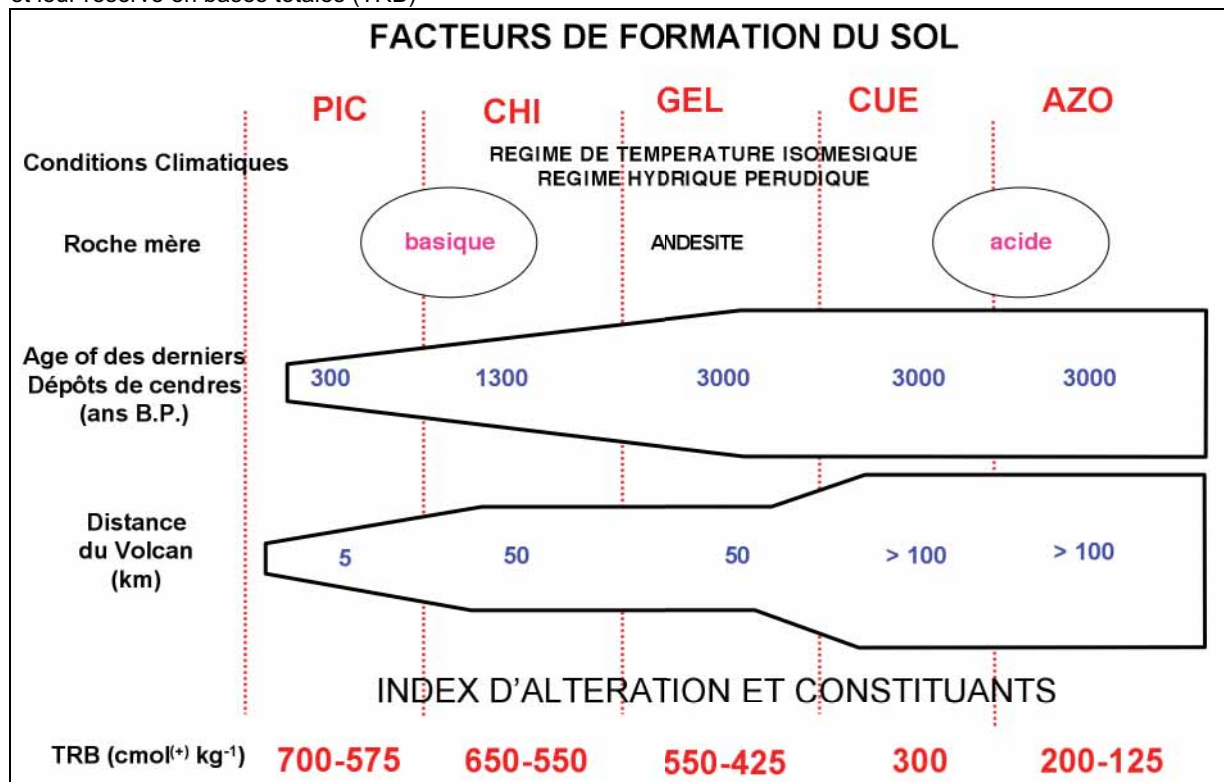
212. Morphologie et stratigraphie des sols du páramo

Les principaux traits morphologiques de nos profils d'étude sont présentés dans le Tableau 4 ou sont précisés également les grands ensembles morphologiquement distincts. Les sols des páramos du Nord de

l'Equateur constituent des empilements de cendres d'âge et de nature différentes. Ces sols sont donc polycycliques avec des pédogenèses actuelles mais aussi avec des pédogenèses anciennes plus ou moins masquées par les accumulations de Matières Organiques en profondeur. Ces recouvrements de cendres contribuent à maintenir un potentiel important d'éléments chimiques disponibles pour les plantes et régénère la fertilité des sols d'où l'extrême densité rurale de la population.

Les horizons supérieurs de ces sols sont en général très meubles, très légers, Densité apparente $< 0,9$, faciles à travailler, très poreux de texture limoneuse à toucher onctueux dans les horizons humifères. Tous ont en surface une structure granulaire à polyédrique fine avec des agrégats friables et une forte densité racinaire. Les couleurs des horizons organiques sont dans tout les cas très noirs (value et chroma de 2/0 à 2/1).

Figure 7 : Relation entre le degré d'évolution des sols, l'âge des dépôts, les distances aux sources d'émission et leur réserve en bases totales (TRB)



Les facteurs de formation des sols leur différenciation

Dans les cendres récentes, l'âge et les conditions de dépôt des pyroclastes sont les principaux facteurs de l'évolution des sols (Winckell et al. 1991a). Le premier contrôle le temps d'évolution des sols et le second la vitesse d'altération qui est plus rapide sur les matériaux finement divisés. Donc plus les cendres sont distantes de leur source d'émission plus elles seront fines et plus rapide sera leur altération (Figure 7). Les sols des páramos peuvent être inclus dans une chrono-lithoséquence.

L'évolution pédologique conduit à une baisse des teneurs en verres et un accroissement de la fraction argileuse. Les fractions grossières (pierres ponces) s'altèrent et disparaissent avec le développement d'un épipédon très noir mélanique pour les sols les plus évolués (Shoji *et al.*, 1990). Les sols les moins évolués sont également ceux pour lesquels la stratigraphie des différents dépôts apparaît de manière claire sans homogénéisation. Leur texture est également beaucoup plus sableuse au toucher. L'ensemble des profils est caractérisé par des structures massives à polyédriques peu nettes.



Photo 27 : Profil PIC caractérisé par une forte différenciation granulométrique des différents dépôts. Niveau de ponces très visible à 0,50m de profondeur.

Les profils PIC et AZO sont très clairement *multisequum* avec la présence de paléo-surfaces organiques sous des niveaux beaucoup plus clairs respectivement à 80 et 105 cm de la surface, mais pour le profil AZO il s'agit de cendres très anciennes avec un degré de maturité bien plus important que pour le profil PIC. Pour ce dernier les nombreux empilements de différents niveaux de cendres à texture différente entre 0 et 50 cm de profondeur laissent augurer d'une pédogenèse très récente (Photo 27).



Photo 28 : Profil CHI peu différencié. Le seul profil à montrer des allophanes.



Photo 29 : Profil GEL caractérisé par une homogénéisation de 3 niveaux organiques sur une épaisseur de plus de 1m d'épaisseur.

Par l'effet de la pédogenèse, les horizons de surface deviennent moins différenciés. Ainsi Les stratigraphies sont moins apparentes pour les profils CHI et GEL qui sont tous deux caractérisés par la présence d'horizons d'un noir marqué (10 YR 2/0 à 2/1) jusqu'à 150 cm de profondeur (Photos 28 et 29).



Photo 30 : profil CUE - La partie supérieure non-allophanique dérive de l'altération de cendres, la partie inférieure allophanique dérive de l'altération d'une roche volcano-sédimentaire en place.



Photo 31 : Profil AZO avec une partie supérieure formée sur cendres récentes, un niveau argileux non organique avec des traces de remaniement glaciaire et un niveau organique de cendres anciennes en poches.

Les profils du sud (CUE et AZO) reposent sur un substratum de roche indurée compacte (Photos 30 et 31). Le profil CUE

est constitué d'un fin dépôt de cendres (30-45 cm) reposant sur des horizons d'altération d'une lave ancienne en place. Le profil AZO est complexe (Photos 31 et 32) ; il montre un dépôt de cendres récentes comparables à celui de CUE sur un horizon minéral issu d'un remaniement glaciaire sous lequel on trouve un niveau de cendres anciennes préservées qui n'existe que par poches dans cette région lequel repose sur un substrat d'argillites avec des bancs de kaolinite hydrothermale. Le niveau argileux minéral issu du remaniement glaciaire est constitué d'une *stone-line* qui est visible dans toute la partie SUD de l'Equateur et sur tous les types de sols du páramo (photo 32).



Photo 32 : Profil AZO avec un niveau de *stone line* séparant les cendres récentes des cendres anciennes sous-jacentes.

213. Pédogenèse et classification

Les points de convergences de ces sols sont l'accumulation de matière organique et la présence de gels organo-métalliques. Les résultats des extractions sélectives (Tableau 5) et l'examen des autres critères diagnostiques (Tableau 7) : rétention des phosphates, densité apparente, montrent que l'ensemble des profils étudiés possède les propriétés andiques nécessaires à leur rattachement à l'ordre des Andisols (Tableau 6 ; SSS, 1999), à la classe des Andosols (WRB, 1998) ou au grand groupe de référence des andosols-vitrisols du

référentiel pédologique (Quantin, 1995). Il y a donc une homogénéité en terme de classification qui reflète une homogénéité du processus majeur de pédogenèse : l'andosolisation (Parfitt et Clayden, 1991; Shoji et al. 1996).

Les caractéristiques communes des andosols se retrouvent donc dans tout les sols étudiés de manière plus ou moins exprimés selon le degré d'évolution : faible densité apparente et forte capacité de rétention en eau, rétention élevée des phosphates. Les épipedons des profils PIC et CHI sont les moins évolués. La densité apparente des horizons de surface est assez élevée (entre 0,6 et 0,9) et leurs propriétés andiques se définissent à la fois par la forte présence de verre volcanique et par les extractions spécifiques de Fer et d'Aluminium par l'oxalate ($Al_{ox} + \frac{1}{2}Fe_{ox} > 0,7\%$). Les propriétés des sols plus évolués et plus anciens comme GEL, CUE et AZO

montrent une teneur en $Al_{ox} + \frac{1}{2}Fe_{ox} > 2\%$, Ret-P >85% et une densité apparente entre 0,3 et 0,6 (Tableau 7), due à la seule réactivité des constituants secondaires. Excepté pour le profil CHI qui contient suffisamment de silice extrait par l'oxalate pour constituer des allophanes, le processus pédologique majeur de ces sols est une **acido-complexolyse andique** avec un extrait $Al_{ox} + \frac{1}{2}Fe_{ox} > 2\%$ et $Al_p\% / Al_{ox}\% > 0,5$ (Tableau 5, Shoji et al., 1993). Les basses températures, les conditions humides et la disponibilité en aluminium sont les facteurs de formations des andosols non-allophaniques (Aran *et al.* 2001). Cette acido-complexolyse andique se forme à des altitudes supérieures à 3200m (Zehetner et al., 2002), qui inclut complètement les páramos tandis qu'à des altitudes inférieures à 2700m la pédogenèse est dominée par la néoformation d'halloysite.

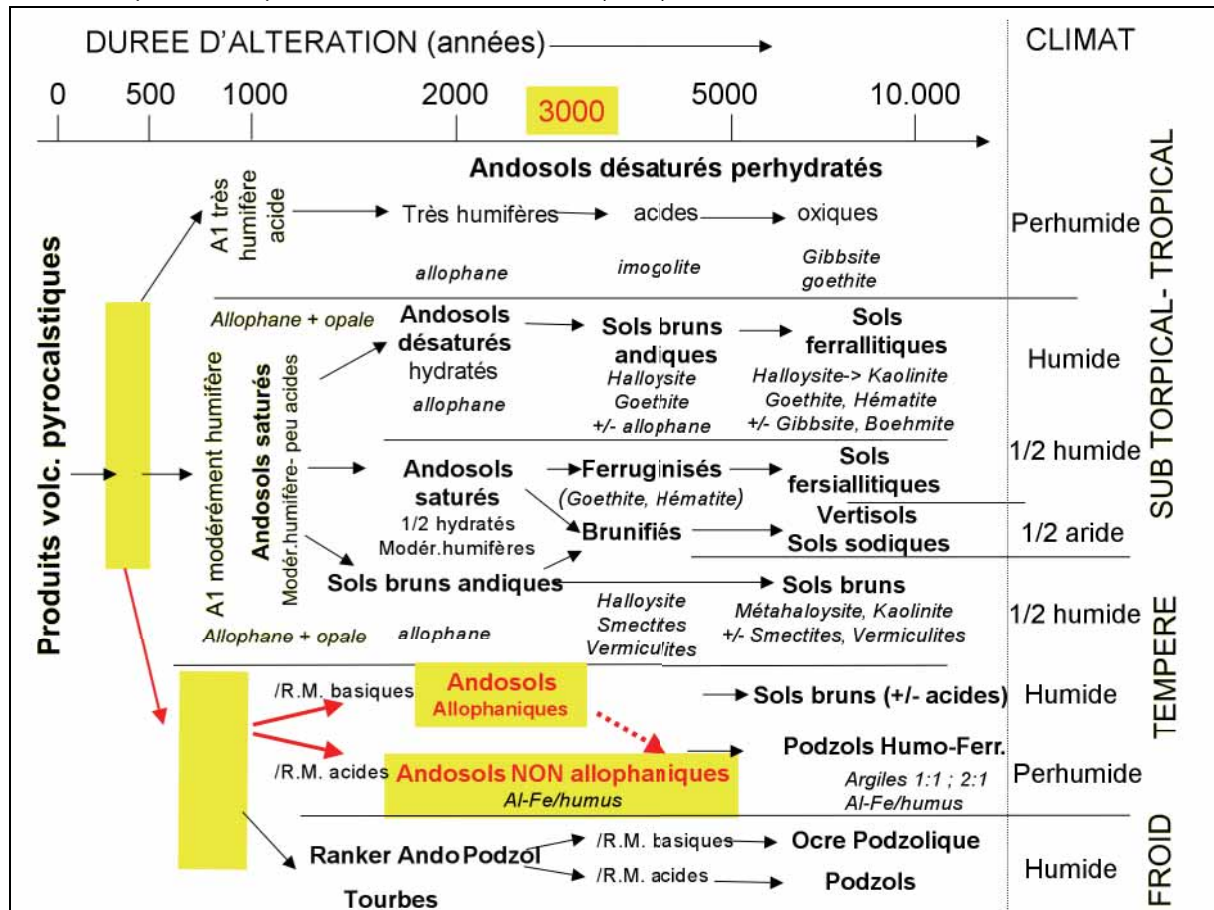
Tableau 5 : Résultats analytiques des extractions spécifiques des sols de référence en fonction de leur degré d'évolution.

Prof. cm	Oxalate (g kg ⁻¹)			Pyrophosphate (g kg ⁻¹)			C.B.D. (g kg ⁻¹)			(Al+½Fe) Oxalate %	Al _p /Al _{ox}	Alloph %	
	Al _{ox}	Fe _{ox}	Si _{ox}	Al _{py}	Fe _{py}	Si _{py}	Al _{cbd}	Fe _{cbd}	Si _{cbd}				
2- PIC	0-20	3,1	4,6	0,2	2,7	3,3	0,5	3,3	5,5	1,7	0,54	0,87	1
	20-40	6,9	7,7	1,5	4,9	3,3	0,8	4,6	8,9	0,9	1,08	0,72	9
	40-55	16,1	13,2	6,5	3,3	3,0	0,6	3,5	13,8	0,9	2,27	0,21	45
	55-80	1,3	2,2	0,4	0,6	0,2	0,2	0,7	2,4	0,4	0,24	0,46	3
	80-115	9,3	5,1	2,9	3,8	3,2	0,8	5,5	6,9	1,0	1,19	0,40	20
	115-150	12,9	8,0	5,5	3,8	2,9	0,9	6,9	14,1	1,3	1,69	0,30	38
	150-185	12,1	6,6	5,5	2,7	1,6	0,8	4,8	9,6	1,3	1,54	0,23	38
3- CHI	0-30	11,7	10,0	2,4	6,9	4,9	1,7	6,6	10,3	1,4	1,66	0,59	16
	30-60	17,4	11,7	6,1	6,5	5,5	1,5	8,0	12,2	1,5	2,33	0,38	41
	60-130	29,5	15,6	12,7	8,2	6,4	1,8	13,0	21,5	2,6	3,73	0,28	82
	130-170	47,2	17,7	20,3	10,5	7,8	2,5	18,2	23,2	2,6	5,60	0,22	130
	170-210 +	33,5	11,9	16,9	4,4	2,4	1,2	9,0	16,9	1,8	3,95	0,13	112
1- GEL	0-30	12,3	6,4	0,4	12,0	5,7	2,0	11,1	6,7	1,6	1,55	0,97	2
	30-85	27,9	10,9	8,3	11,6	6,9	1,4	13,1	12,0	1,2	3,34	0,41	53
	85-140	26,8	11,1	5,3	23,5	10,0	3,4	18,8	12,2	1,8	3,23	0,88	24
	140-165	34,8	14,2	11,7	9,9	7,0	0,6	14,8	14,2	1,2	4,19	0,28	78
	168-195	20,5	4,1	10,1	2,4	0,3	1,2	4,6	4,3	0,9	2,25	0,12	69
	205-225 +	56,4	7,3	33,8	3,3	0,5	0,8	8,8	10,7	1,0	6,00	0,06	198
5- CUE	0-30	32,7	15,0	0,7	34,1	14,6	1,1	33,0	16,6	1,7	4,02	1,04	0
	30-45	31,9	9,5	4,1	29,6	9,6	3,0	36,1	12,9	4,2	3,66	0,93	18
	45-60	51,8	3,0	14,9	12,6	1,9	0,9	19,6	5,0	2,5	5,33	0,24	140
	60-70 +	25,6	1,6	16,4	4,9	0,4	0,5	7,3	3,1	0,9	2,64	0,19	96
4. AZO	0-15	15,1	18,3	0,3	14,7	18,6	0,9	23,3	32,8	5,7	2,43	0,97	2
	15-50	20,6	23,0	0,6	19,4	23,1	1,7	32,4	41,6	7,9	3,21	0,94	4
	50-65	18,1	19,0	1,4	17,6	20,5	1,6	25,9	38,9	5,0	2,77	0,97	7
	65-80	6,0	6,8	1,6	9,4	11,3	1,1	15,4	31,3	2,4	0,94	1,56	0
	80-105	15,9	10,9	4,2	4,2	3,5	0,4	12,2	41,6	1,2	2,13	0,26	49
	105-170	85,5	28,0	29,3	8,3	13,3	0,4	18,6	29,3	0,9	9,95	0,10	220
	170-195	67,6	28,6	21,0	11,1	7,2	0,6	32,1	43,2	1,7	8,19	0,16	204
	195-210	21,3	17,5	4,8	6,2	10,4	0,3	12,5	44,8	1,0	3,00	0,29	55

Tableau 6 : Correspondance entre les différents systèmes de classification et nos profils de référence.

Sites	PIC	CHI	GEL	CUE	AZO
SSS 1999	Thaptic Vitricryand.	Typic Melanudand	Hydric Pachic Melanudand	Hydric Melanudand	Hydric Pachic Melanudand
WRB, 1998	Thaptic vitric Andosol	Melanic silic Andosol	Melani-Vitric pachic Andosol	Melani-Vitric Hydric Andosol	Melani-Vitric pachic Andosol
(RP, 1995)	Vitrosol	Silandosol humique	Aluandosol perhydrique et humique.		

Figure 8 : Schéma d'évolution de la pédogenèse des Andosols dans les páramos sur cendres volcaniques du Nord de l'Equateur. Adaptation du schéma de Quantin, (1988).



213-1-Evolution des Andosols

L'altération des verres colorés des cendres de type andésito-basaltique et basaltique libère de grandes quantités d'ions alcalins et alcalino-terreux ce qui permet au pH de demeurer suffisamment élevé pour permettre des synthèses d'allophanes (Parfitt et Kimble, 1989). A l'inverse, l'altération des verres non colorés (cendres andésitiques, dacitiques et rhyolitiques), pauvres en bases, favorise la formation de conditions acides ou se développe un effet anti-allophanique (pH < 4,9) tout comme les colloïdes organiques (Dahlgren et al, 1993). La désaturation progressive du complexe adsorbant par lixiviation de

cations basiques entraîne une acidification du milieu, et l'aluminium libéré se complexifie avec des produits organiques.

L'évolution des Andosols dépend donc de deux facteurs se relayant : en premier lieu la nature chimique des cendres puis le facteur temps. Le type d'andosolisation allophanique ou non-allophanique est à mettre en relation avec la nature chimique des cendres.

Tableau 7 : Données analytiques en fonction du degré d'évolution

	Prof. (cm)	Eau au champ à -33 kPa		DA	C	N	C/N	Indice melan	pH	pH	Ret P	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	S	Al ³⁺	ECEC	V(S/T)	Al/Al+S	TRB
		(g kg ⁻¹)	(g kg ⁻¹)																		
2- PIC	0-20	51	68	0,8	125	10,7	11,7	1,83	4,8	4,3	49	4,60	1,30	0,93	0,15	6,98	1,29	4,14	sat	16,5	667
	20-40	55	50	0,9	40	2,5	16,0	1,61	4,9	4,4	39	1,00	0,29	0,18	0,09	1,56	1,38	3,29	47,4	35,5	599
	40-55	55	55	0,7	27	2,0	13,5	1,7	5,3	4,4	66	0,70	0,27	0,14	0,11	1,22	0,86	0,98	sat	19,2	575
	55-80	nd	nd	nd	2	0,3	6,7	nd	5,4	4,7	0,3	0,20	0,06	0,04	0,03	0,33	0,29	2,99	11,0	67,6	709
	80-115	44	32	1	25	1,8	13,9	1,55	5,1	4,6	69	0,60	0,19	0,06	0,07	0,92	0,69	2,70	34,1	37,4	658
	115-150	41	36	1,1	24	2,0	12,0	1,64	5,1	4,7	30	0,60	0,15	0,07	0,06	0,88	0,55	1,98	44,4	42,9	nd
	150-185	42	35	1,1	17	1,4	12,1	nd	5,2	4,8	78	4,00	1,53	0,55	0,14	6,22	0,66	13,70	45,4	9,6	nd
3- CHI	0-30	98	90	0,65	86	4,0	21,5	1,6	5,1	4,5	62	3,10	1,34	0,17	0,14	4,75	0,52	10,15	46,8	9,9	632
	30-60	85	78	0,75	59	3,0	19,7	1,57	5,5	4,8	82	3,60	1,64	0,14	0,15	5,53	0,47	14,50	38,1	7,8	659
	60-130	98	101	0,6	72	3,3	21,8	1,54	5,5	4,8	84	4,60	1,97	0,23	0,15	6,95	0,39	16,52	42,1	5,3	590
	130-170	127	129	0,5	49	2,7	18,1	1,51	5,4	4,9	92	2,70	1,09	0,33	0,1	4,22	0,29	9,39	44,9	6,4	545
	170-210 +	54	58	nd	33	2,0	16,5	1,69	5,5	5,0	79	1,10	0,75	0,73	0,15	2,73	6,60	12,80	21,3	70,7	471
1- GEL	0-30	196	197	0,4	212	11,2	18,9	1,66	4,3	3,8	89	0,20	0,10	0,14	0,11	0,55	1,49	6,00	9,2	73,0	360
	30-85	115	124	0,6	92	4,7	19,6	1,56	4,7	4,4	89	0,60	0,07	0,11	0,12	0,90	4,20	6,45	14,0	82,4	541
	85-140	175	145	0,4	150	8,0	18,8	1,56	4,6	4,2	94	0,30	0,02	0,05	0,06	0,43	1,36	2,57	16,7	76,0	424
	140-165	100	95	0,6	73	4,0	18,3	1,61	4,8	4,6	91	0,20	0,01	0,03	0,02	0,26	0,26	0,63	41,3	50,0	567
	168-195	70	45	0,9	8	0,5	16,0	nd	5,1	5,2	51	4,60	1,30	0,93	0,15	6,98	1,29	4,14	sat	16,5	619
	205-225 +	81	72	0,7	23	1,3	17,7	nd	5,3	5,0	87	1,00	0,29	0,18	0,09	1,56	1,38	3,29	47,4	35,5	nd
5-CUE	0-30	210	192	0,35	233	8,7	26,8	1,52	4,5	4,0	98	0,20	0,25	0,31	0,11	0,87	7,24	7,86	11,1	89,3	306
	30-45	130	120	0,58	194	9,8	19,8	1,55	4,5	4,0	96	0,20	0,17	0,24	0,09	0,70	4,98	8,85	7,9	87,7	313
	45-60	56	48	nd	54	nd		2,01	4,8	4,7	92	0,20	0,02	0,06	0,03	0,31	1,09	1,55	20,0	77,9	358
	60-70 +	21	34	nd	16	nd		nd	5,0	4,8	65	nd	nd	nd	nd	nd	nd	1,08	nd	nd	
4-AZO	0-15	233	187	0,33	180	12,0	15,0	1,57	4,3	3,9	85	0,50	0,51	0,56	0,14	1,71	7,80	11,25	15,2	82,0	196
	15-50	197	211	0,4	136	10,0	13,6	1,53	4,4	4,0	94	0,20	0,17	0,18	0,07	0,62	6,09	6,90	9,0	90,8	134
	50-65	135	110	0,7	87	7,0	12,4	1,54	4,5	4,2	89	0,20	0,08	0,08	0,05	0,41	3,76	4,24	9,7	90,2	67
	65-80	50	49	1,0	43	4,0	10,8	1,59	4,7	4,4	36	0,20	0,02	0,04	0,02	0,28	1,33	1,75	16,0	82,6	nd
	80-105	53	41	0,95	21	1,7	12,4	1,6	4,8	4,7	79	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0,99	nd	nd	nd
	105-170	297	298	0,27	71	1,8	39,4	1,54	5,3	5,2	81	0,20	0,03	0,09	0,05	0,37	0,19	1,03	35,9	33,9	105
	170-195	170	235	0,45	67	1,8	37,2	1,59	5,2	4,9	87	0,20	0,02	0,06	0,03	0,31	0,37	1,24	25,0	54,4	79
	195-210	103	93	nd	29	1,6	18,1	nd	5,1	4,5	82	nd	nd	nd	nd	nd	nd	1,78	nd	nd	nd

Pour de nombreux auteurs (Dahlgren et al., 1993 ; Shoji et Fujiwara, 1984) cette diversité est essentiellement liée à la nature des verres contenues dans les cendres. Les horizons possédant une réserve en base autour de 800 cmol kg^{-1} sont très majoritairement de type allophanique alors que les horizons plus pauvres en ions alcalins et alcalino-terreux ($\text{TRB} < 500 \text{ cmol kg}^{-1}$) appartiennent au type non-allophanique. Dans le cas de sols récents, les premiers sont majoritairement issus de l'altération de cendres de type andésitique alors que les seconds de celle de cendres de type dacitique. Pour ces derniers, leur composition minéralogique établie après 3000 ans d'âge ne semble pas se différencier des paléosols âgés de plus de 40 000 ans (Zehetner et al., 2002).

On peut observer dans les sols les moins altérés un front d'allophanes se déplaçant vers la profondeur en fonction de l'évolution des sols : 40, 130 et 160 cm de profondeur pour PIC, CHI et GEL respectivement. Ce front consiste en un abaissement du rapport Alp/Alox vers la profondeur et migration du silicium et synthèse en profondeur d'aluminosilicate. Quant aux sols les plus évolués, seuls les altérations de cendres anciennes (AZO) ou du socle volcano-sédimentaire (CUE) libèrent des allophanes. Dans un milieu froid comme le páramo, un sol, à l'origine dominé par des allophanes, pourrait voir ses allophanes se décomposer sous l'effet de l'accumulation des acides organiques, le silicium ainsi libéré migrant et l'aluminium se recomplexant avec les matières organiques. Dans ce cas, un sol allophanique pourrait se transformer en non-allophanique au cours du temps (Poulenard, 2000).

213-2-Propriétés

Parmi nos sols étudiés nous avons ainsi une évolution allant des andosols vitriques vers les andosols silandiques puis les andosols aluandiques. Plus les profils sont vieux, (± 3000 ans), plus les réserves en bases ($\text{TBR en cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$) sont faibles

(Herbillon, 1986, 1989). La diversité dans le degré et le type d'andosolisation, se traduit par des changements des propriétés chimiques (tableau 7) : le pH des sols allophaniques est toujours supérieur à 5 alors qu'il est plus faible pour les niveaux dominés par des complexes organo-métalliques. La capacité d'échange est assez importante et dépend des teneurs en matière organique. De même, les sols et niveaux allophaniques présentent un complexe d'échange saturé par le calcium et dans une moindre mesure par le magnésium, alors que pour les non-allophaniques, l'aluminium échangeable domine un complexe d'échange largement désaturé. Plus les sols sont évolués, plus leur TRB est réduite, plus leur densité apparente est faible, plus leurs capacités de rétention en eau et en carbone sont élevés (Figure 9 ; Poulenard et al., 2003). Les densités apparentes $< 0,60$ dans les horizons de surface sont conformes à celles mesurées par Biolders et al. (1990) dans d'autres sols volcaniques.

Figure 9 : Relation entre la réserve totale en bases (TRB) et la capacité de rétention en eau à pF 4,2 des horizons humifères des 5 sites de référence des andosols du páramo équatorien.

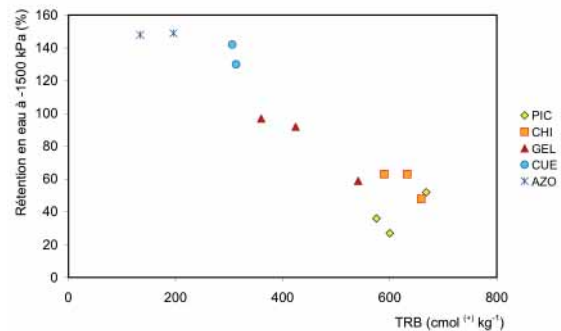
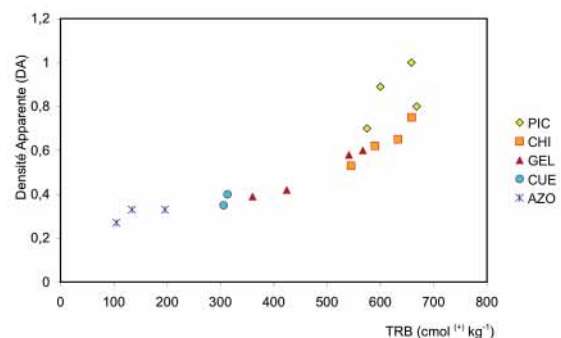


Figure 10 : Relation entre la réserve totale en bases (TRB) et la densité apparente des horizons humifères des 5 sites de référence des Andosols du páramo équatorien.



Cette densité apparente est relativement élevée pour les horizons vitriques (Figure 10). Elle est bien corrélée le long d'une régression linéaire avec la quantité d'aluminium oxalate pour les horizons allophaniques. Les très hautes porosités (faible densité apparente) et donc les fortes capacités de rétention en eau s'expliquent bien par la teneur en allophanes de ces sols. A l'inverse, il n'existe pas de relation définie entre les densités apparentes et la valeur Alox pour les niveaux non-allophaniques.

214. Les Andosols et la séquestration du carbone

Tous ces sols présentent de fortes accumulations de carbone. Les Andosols forment après les Histosols les plus grands stocks de carbone. Ces stocks de carbone augmentent avec le degré d'évolution des sols : de 36 kg m⁻² pour PIC à plus de 85 kg m⁻² pour le profil GEL (Tableau 8). Dans certains andosols d'Equateur, ces teneurs peuvent atteindre 160 kg m⁻² (Farley et al., 2004). Ces valeurs sont bien plus élevées que la valeur moyenne de 29 kg m⁻² des profils d'Andosols humiques pris en référence par Batjes (1996).

Tableau 8 : Stockage du carbone (t ha⁻¹) dans les sols andiques du páramo du moins évolué vers le plus évolué.

LIEU	PIC (2)	CHI (3)	GEL (1)	CUE (5)	AZO (4)
A	356	479	463	364	466
B	567	717	864	364	676

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

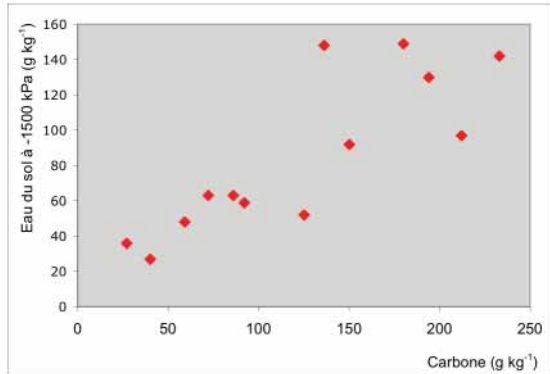
Le pourcentage pondéral de carbone augmente avec l'altitude tout comme la porosité des sols. C'est pourquoi la densité apparente baisse et l'accroissement du pourcentage de carbone pondéral est compensé par la baisse de la densité apparente. La séquestration de carbone maximale de 0,1g cm⁻³ a été enregistrée par Abcouwer (2001) dans le Cajas (Cuenca) entre 3800 et 3900m d'altitude. Mais au-dessus de 4800m d'altitude la production

végétale baisse et la séquestration du carbone décroît rapidement. Ces accumulations de carbone sont dus à plusieurs facteurs concordants :

- Les dépôts de cendres successifs ont fossilisé les niveaux plus anciens. Les horizons humifères enterrés sont privés d'un accès à l'air permettant la minéralisation plus rapide de la matière organique.
- Le régime de température *cryic* de notre milieu d'étude contribue également à la faible dégradation des matières organiques comme dans la plupart des milieux périglaciaires. C'est pour cela que la concentration en carbone augmente avec l'altitude avec un optimum de production de biomasse/minéralisation se situant en dessous de 4000m d'altitude (Ugolini and Edmonds, 1983).
- La toxicité des cations métalliques associés au carbone (Al³⁺ en particulier) limite l'activité bactérienne et le taux de minéralisation du carbone (Sollins et al., 1996 ; Van Noordwijk et al., 1997).
- Les complexes organo-métalliques sont très stables avec un taux de minéralisation très faible (Boudot et al., 1988). Le temps moyen de résidence est supérieur à 2000 ans à 40 cm de profondeur et à 4000 m d'altitude (Poulenard, 2000). La protection physique de la matière organique par des liaisons très stables entre le carbone et les alumino-silicates faiblement cristallisés est abondamment citée dans la littérature (Torn et al., 1997 ; Percival et al., 2000 ; Basile-Doelsch et al., 2005), mais reste peu documentée sur les liaisons entre les complexes organo-métalliques et le carbone.
- La micro-porosité importante des sols (pores avec un diamètre <0.1 μm ; Poulenard et al., 2002) empêcherait l'accès des agrégats aux bactéries dont la taille moyenne est de 3 μm (Sollins et al., 1996, Dahlgren et al., 2004). Cette microporosité dépend de l'état d'évolution des sols et il existe une forte relation entre les teneurs en eau retenue par cette

micro-porosité et les teneurs en carbone des sols (Figure 11; Poulenard, 2000 ; Buytaert et al., 2006.).

Figure 11 : Relation entre le Carbone organique et la teneur en eau du sol dans les horizons organiques des profils de référence.



L'indice mélanique

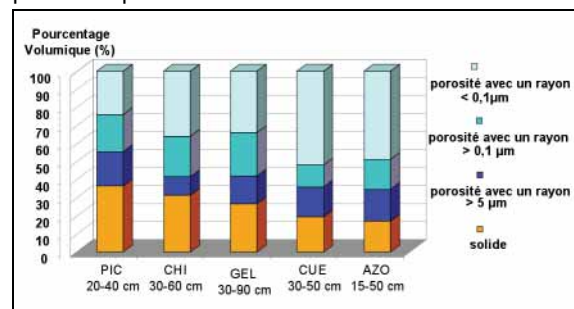
L'indice mélanique (Honna et al, 1988) est quasiment dans tous les cas inférieur à 1,7 ce qui atteste de la présence d'un épipedon mélanique pour tous les sols des páramos. Ce mélanisme qui reflète la capacité des produits humiques à colorer de noir les sols, apparaissait déjà sur la base des critères de couleurs des sols (Shoji, 1988). Cette propriété est liée à la prédominance d'acides humiques de type A aromatiques (Kumada, 1967) qui dériveraient de la dégradation de produits organiques issus des graminées. L'indice mélanique est alors utilisé comme un critère écologique de classification pour séparer les sols sous forêt (fulvique) des sols sous herbacées avec un épipedon mélanique (Shoji et al., 1990). Ce critère, dérivé des études japonaises semble moins applicable dans d'autres régions du monde (Tate, 1990) mais est pourtant utilisé au plus haut niveau des classifications des andosols dans les deux grands systèmes internationaux (SSS, 1999 et WRB, 1998). Les sols des páramos d'Equateur développés sous une végétation à graminées dominantes sont en bon accord avec le modèle japonais.

215. La rétention en eau

Deux facteurs principaux peuvent expliquer les propriétés hydrologiques des

páramos : i) le froid et la forte nébulosité de ce niveau altitudinal contribue à une faible évapo-transpiration et un excès d'eau entre l'évaporation et les précipitations ; ii) les propriétés physiques des Andosols avec une très forte microporosité. Contrairement à de nombreuses descriptions cette importante microporosité n'est pas liée aux teneurs en allophanes mais aux complexes organométalliques. Plus les sols sont évolués, plus ils sont riches en carbone, plus importante est leur porosité (Poulenard et al., 2003). Cette porosité est active quand la saturation en eau est importante.

Figure 12 : Distribution de la macro, meso et micro-porosité dans la subsurface de l'horizon A des 5 pédons des Andosols de référence étudiés dans le páramo équatorien.



Pour les andosols évolués, les micro-pores avec un rayon $< 0.1 \mu\text{m}$ peuvent former plus de 50% du volume du sol (Figure 12). La plus grande part de l'eau stockée dans ces sols est associée à l'eau stockée dans cette porosité fine que Maeda et al. (1977) ont nommé *porosité inter-domaine*. La teneur en eau à 1500 kPa est de plus de 100g kg^{-1} et peut atteindre 2000g kg^{-1} (Poulenard et al., 2003). Cette teneur en eau est stable tout au long de l'année. C'est pour cela que les teneurs en eau ne peuvent pas être considérés comme une réserve mais comme un régulateur des flux hydriques (Buytaert et al., 2004). Ces flux sont encore très mal connus du au manque de sites d'observation sur ces milieux. Seule l'équipe PROMAS associant l'Université de Cuenca et l'équipe Belge de l'Université de Leuven a étudié ces flux.

22. Les sols formés sur une roche non pyroclastique

221. Les sols du supra-páramo

Le supra-páramo sur socle n'existe qu'au Venezuela où des sols très peu développés apparaissent de manière discontinue avec des teneurs en carbone plus élevées autour des rosettes géantes (Pérez, 1995). En Equateur le supra-páramo n'apparaît que sur les flancs des volcans isolés le long des deux cordillères.

222. Morphologie des sols du páramo

Dans le páramo du sud de l'Equateur les sols dépendent étroitement de la nature du substrat géologique. Ces páramos sont peu étendus et occupent les lignes de crêtes des reliefs les plus importants (Figure 6). Les conditions climatiques humides et per-humides favorisent l'accumulation du carbone dans les sols (Ugolini and Edmonds, 1983). Quelque soit la nature du substrat géologique, les sols des páramos du Pérou sont tous riches en carbone (Escobedo-Urquiza, 1980). En raison des fortes pentes ces sols sont souvent rajeunis et peu épais (Tableau 9).

222-1-Les zones de Saraguro et d'Oña

Les massifs du Fierro Urcu sur la cordillère occidentale et d'Oña sur la cordillère orientale, à proximité de Saraguro sont les plus proches des zones de páramo du Cajas, recouvertes de cendres volcaniques et qui sont les plus éloignées des zones d'émission volcaniques du Sangay et du Tungurahua. Les sols se développent sur d'anciennes formations volcano-sédimentaires ; il sont très épais et dérivent donc d'une pédogenèse ancienne. Sur le plateau d'Oña, les sols sont épais de plusieurs mètres, rouges à la base (Photo 33), parfois devenant jaunes près de la surface avec un horizon humifère épais de 40 cm très léger pouvant penser à un sol formé sur cendres volcaniques mais qui contient des grains de quartz très grossiers rendant cette hypothèse très peu probable (Profil de référence 6-OÑA, Figure 6

tableaux 3 et 9, Photo 34). Ces sols se développent sur des coulées rhyo-dacitiques au-dessus de sédiments marins du Miocène (Baldock and Longo, 1982). Cette formation a été dénommée formation de "Pisambayo" (Litherland and Zamora, 1993).



Photo 33 : Sol très épais rouge caractéristique du plateau d'Oña.



Photo 34 : Détail du profil 6-OÑA : développement d'un horizon jaune entre l'horizon noir et rouge. L'horizon humifère aux caractères andiques a plus de 40 cm d'épaisseur.

- Sur le plateau de Fierro Urcu (Profil de référence 7-SAR, tableaux 3 et 9), les sols sont épais de plus d'un mètre avec un horizon aux caractères andiques très noir, humifère, peu dense reposant sur une "stone line" qui le sépare d'un infrasol de couleur très claire dérivant de l'altération du socle complexe parfois volcano-sédimentaire localement composé d'une grano-diorite métamorphisée à biotite du Miocène (Photo 35).



Photo 35 : Profil 7-SAR. Andosol sur oxisol sur le Fierro Urcu. Une stone line sépare un horizon humifère épais de 50 cm reposant sur une altération de roche volcano-sédimentaire.

222-2-Le páramo du Podocarpus

Le páramo du parc Podocarpus au sud de Loja est le plus méridional de l'Equateur. La pédogenèse évolue depuis les Umbrisols sur pélites argileuses au nord du páramo (Profils de référence 8-TIR et 9-CT, tableaux 3 et 9) aux sols podzoliques sur micaschistes et aux podzols humo-ferrugineux sur gneiss au sud du parc (Profils de référence 10-SAB) en allant depuis les sols les moins riches en silice en en quartz vers les plus quartzeux (Photos 37 à 39). Les sols sont toujours humifères mais plus le sol est siliceux plus on peut observer un lessivage des oxydes de fer et de la matière organique en profondeur avec formation d'horizons éluviés et blanchis en

surface et des horizons Bh et Bfe en profondeur. Tous les sols montrent une stone line à la base de l'horizon humifère.



Photo 36 : Podzol hydromorphe polygénique à niveau induré aliotique sous l'horizon humifère (Profil 10-SAB2)

L'hydromorphie est assez fréquente dans ces sols argileux et malgré la faible surface du páramo, les petites mares sont fréquentes avec des redistributions importantes d'oxydes de fer et la formation de niveau d'aliots à la base de l'horizon humifère (Photo 36).

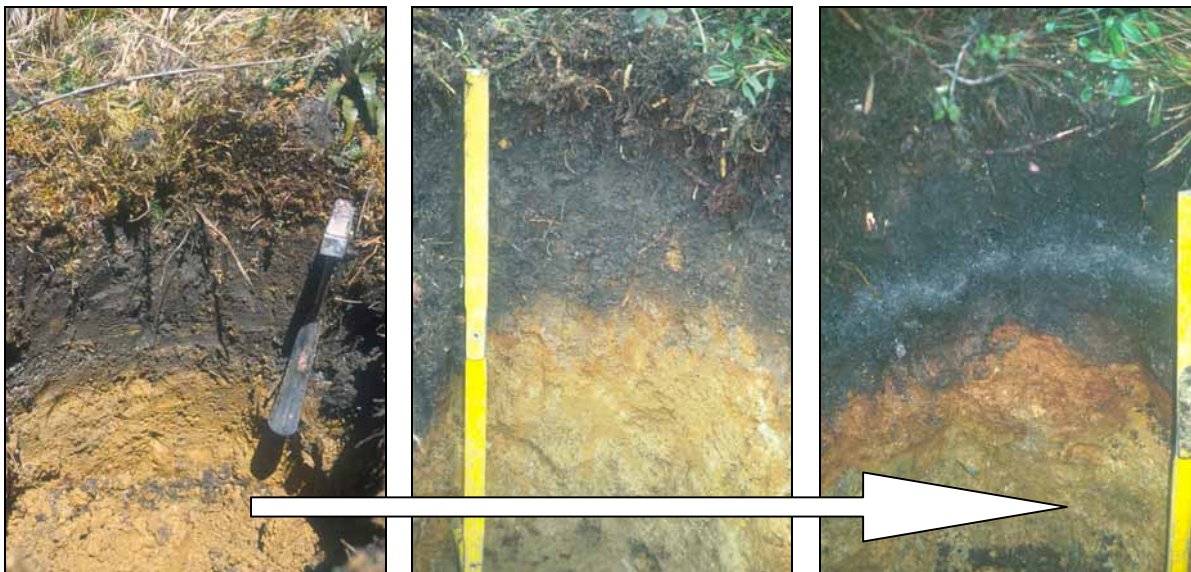


Photo 37 : Profil 9-CT. Umbrisol (sol Photo 38 : Profil 10-SAB1. Spodosol Photo 39 : Podzol humo-ferrugineux ocre podzolique) du Cerro Toledo sur (sol podzolique) à redistribution de (Spodosol) sur gneiss. pélites. fer sur micaschistes.

La flèche indique une augmentation de la teneur en quartz de la roche mère

Tableau 9 : Caractéristiques morphologiques des profils de référence non situés sur pyroclastes des páramos du sud de l'Equateur.

Profil	Horizon	Profondeur (cm)	Couleur (humide)	Texture (In situ)	Eléments grossiers	Structure	Transition	
6- OÑA.1	A1	0-15	7.5 YR 2/0	A	A	PA-FI	N	
	2	AB	15-35	5 YR 2.5/1	A	PS-GR	N	
	3	BA	35-50	10 YR 3/3	A	PS-GR	N	
	4	B1	50-80	10 YR 6/6	A	PS-GR	G	
	5	B2	80-120	10 YR 6/6	Als	P-MG	PS-GR	G
	6	B3	120-170	taches 2.5 YR 5/6 2.5 YR 5/6	Als	P-MG	MA	G
	7	B4	170-250	taches 7.5 YR 5/8 2.5 YR 5/6	ALS	P-MG	MA	
7- SAR1	A1	0-15	7.5 YR 3/1	SLA	A	PA-FI	N	
	2	A2	15-35	7.5 YR 2/0	ALS	A	PA-MO	N
	3	BA	35-47	10 YR 5/4	ALS	C-FM	MA	G
	4	B1	50-65	taches 2.5 Y 6/4 2.5 Y 7/4	SLA	P-MG	MA	G
	5	Bw-C	65-100+	taches 2.5 Y 5/4 5Y 8/2 to 8/4	S	F-MG	MA	
8- TIR11.1	A1	0-20	7.5YR3/2	AI	A	PA-FI	B	
	2	B	20-40	2.5Y6/6	AL	C-FM	MA	N
	3	Bg	40-50+	2.5Y6.0	LSA	A	MA	
8- TIR14.1	A1	0-18	7.5YR3/2	Sa	A	PA-FI	B	
	3	Bg	20-30	5Y6/1	SL	F-FM	MA	N
	4	Bs	30-50+	5YR5/8	LSA	A	MA	
9- CT1.1	A1	0-7	10YR2/1	SA	A	PA-FI	N	
	2	A2	7-20	5Y6/1	SA	F-FM	PA-MO/GR	N
	3	Bw1	20-25	5YR5/8	SAL	P-FM/MG	MA	N
	4	Bw2	25-37	10YR5/8	Sla	F-FM/MG	MA	G
	5	BC	37-45	10YR6/6	Sla	A	MA	
10-SAB1.1	A1	0-10	10YR3/1	Sal	P-FM	PA-FI	N	
	2	A2	10-20	5YR2.5/2	Sal	C-MG	PS-MO	B
	3	Bs	20-23	5YR5/6	SI	N-MG	MA	N
	4	B	23-45	10YR6/8	SI	C-MG	MA	N
	5	B	45-60	10YR7/4	Sla	C-MG	MA	
10-SAB2.1	A	0-10	10YR3/1	SI	N-FM	PA-FI	B	
	2	Bhm	10-18	5YR2.5/2	Sa	P-FM	MA	B
	3	E	18-21	10YR8/2	S	P-FM	P	N
	4	Bh	21-40	10YR5/3	Sa	P-FM	MA	B
	5	A2g	40-60	10YR7/2	Sal	P-FM	MA	B
	6	Bs	60-80	5YR6/8	Sa	C-MG	MA	N
	7	B	80-90+	5YR 5/6	Sla	C-MG	MA	

Texture : L, limoneux ; S, sableux ; A, argileux ;

Eléments grossiers : A, Aucun ; P, peu (2-5%) ; C, communs (5-15%) ; N, nombreux (15-40%) ; FM, fin et moyens (0,2-2cm) ; MG, moyens et grossiers (0,6-6 cm) ;

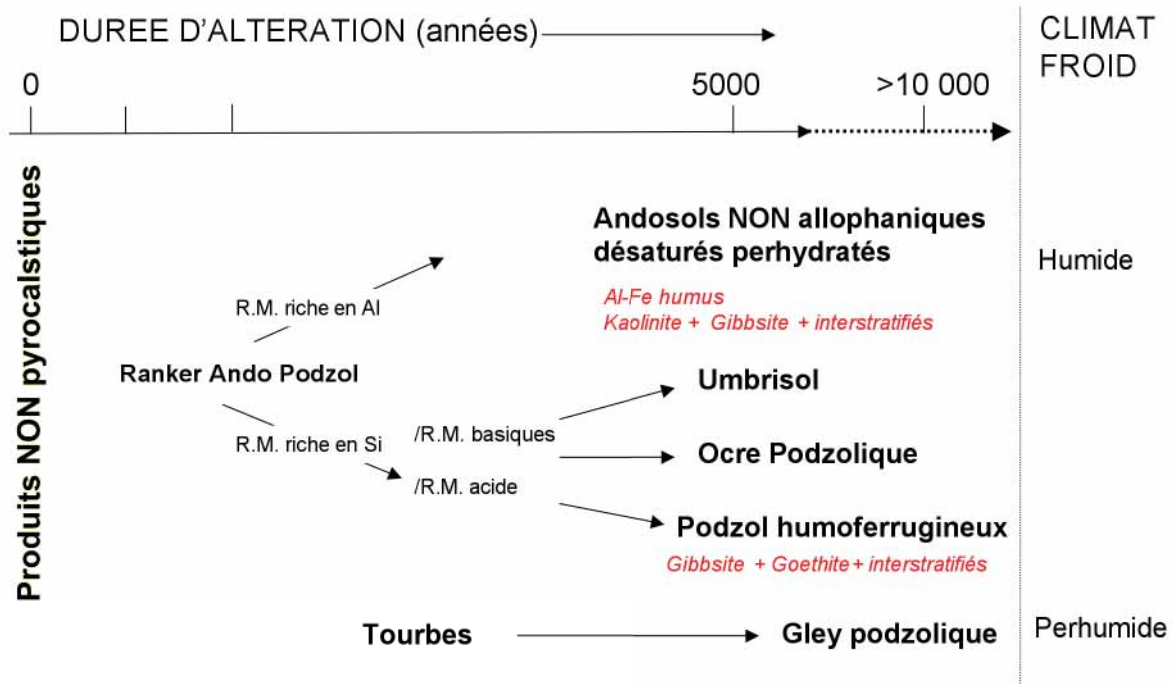
Structure: MA, massive ; PS polyédrique subanguleuse ; PA polyédrique subanguleuse ; P: Particulaire ; GR, granulaire ; PS, prismatique ; FI, fine ; MO, moyenne ; GR, grossière ;

Transition : B, brutale (0-2cm) ; N, nette (2-5 cm) ; G, graduelle (5-15 cm)

Tableau 10 : Extractions spécifiques pour les profils de référence des páramos du Sud de l'Equateur. Les horizons à accumulations de fer amorphe ou cristallisé sont surmarqués.

Sample	Prof. (cm)	Oxalate (g kg ⁻¹)			Pyrophosphate (g kg ⁻¹)			C.B.D. (g kg ⁻¹)			(Al+1/2Fe) Oxalate %	Al _{py} /Al _{ox}
		Al _{ox}	Fe _{ox}	Si _{ox}	Al _{py}	Fe _{py}	Si _{py}	Al _{cbd}	Fe _{cbd}	Si _{cbd}		
6- OÑA.1	0-15	7,32	7,92	0,33	7,60	9,25	0,86	11,75	12,40	4,49	1,13	1,04
	2 15-35	8,90	10,72	0,33	9,25	11,95	1,47	12,00	13,10	3,47	1,43	1,04
	3 35-50	4,32	4,78	0,12	3,61	7,25	0,29	6,00	17,45	0,13	0,67	0,84
	4 50-80	2,38	1,41	0,11	1,29	1,73	0,04	3,90	13,80	0,06	0,31	0,54
	5 80-120							2,88	11,35	0,08		
	6 120-170							2,31	10,45	0,14		
	7 170-250							1,79	9,15	0,18		
7- SAR1	0-15	8,52	10,28	0,24	7,95	7,63	-	3,88	5,87	0,50	1,37	0,93
	2 15-35	13,48	10,68	0,07	14,00	9,87	-	6,39	5,47	0,21	1,88	1,04
	3 35-47	8,68	23,88	0,13	8,05	22,10	-	4,83	15,80	0,13	2,06	0,93
	4 50-65	4,80	11,00	0,09	3,84	9,68	-	2,74	9,38	0,00	1,03	0,80
5 65-100+	3,92	1,16	0,78	1,57	0,72	-	1,70	2,60	0,03	0,45	0,40	
8- TIR11.1	0-20	4,20	8,36	0,07	3,74	6,50		3,20	11,10	0,36	0,84	0,89
	2 20-40	3,00	4,80	0,10	2,15	4,65		4,72	21,60	0,00	0,54	0,72
	3 40-50+	2,91	3,46	0,15	1,36	1,52		3,56	16,80	0,20	0,46	0,47
8- TIR14.1	0-18	0,60	2,46	0,01	0,40	1,18		0,33	1,49	0,12	0,18	0,66
	3 20-30	0,39	1,00	0,01	0,31	0,72		0,66	1,72	0,27	0,09	0,78
	4 30-50+	0,90	3,80	0,04	0,67	2,20		2,07	18,10	0,06	0,28	0,75
9- CT1.1	0-7	1,46	3,93	0,02	1,13	2,60		0,79	2,54	0,67	0,34	0,77
	2 7-20	1,88	2,91	0,01	1,52	1,42		1,15	3,57	0,19	0,33	0,81
	3 20-25	1,84	4,04	0,02	1,39	1,67		1,14	5,84	0,13	0,39	0,75
	4 25-37	1,38	3,71	0,02	0,96	2,25		2,31	24,50	0,39	0,32	0,70
	5 37-45	1,40	4,40	0,02	1,15	3,15		2,28	29,90	0,15	0,36	0,82
10-SAB1.1	0-10	1,07	6,32	0,02	0,74	3,16		0,68	5,19	0,14	0,42	0,69
	2 10-20	1,00	7,28	0,02	0,77	3,22		0,72	7,76	0,02	0,46	0,77
	3 20-23	1,50	5,92	0,03	1,41	4,87		1,33	6,43	0,00	0,45	0,94
	4 23-45	1,41	3,60	0,03	1,18	3,00		1,12	3,77	0,00	0,32	0,84
	5 45-60	0,71	1,49	0,02	0,85	1,29		1,24	1,90	0,00	0,15	1,20
10-SAB2.1	0-10	0,60	0,39	0,04				0,09	0,09	0,13	0,08	
	2 10-18	0,95	11,47	0,12				0,22	5,78	0,00	0,67	
	3 18-21	0,14	0,22	0,03				0,07	0,17	0,02	0,02	
	4 21-40	1,67	0,13	0,06				0,20	0,05	0,00	0,17	
	5 40-60	1,30	0,35	0,24							0,15	
	6 60-80	3,17	26,19	0,15							1,63	
	7 80-90+	1,83	3,59	0,11							0,36	

Figure 13 : Schéma évolutif des pédogénèses dans les páramos du sud de l'Equateur



223. Péogenèse et classification

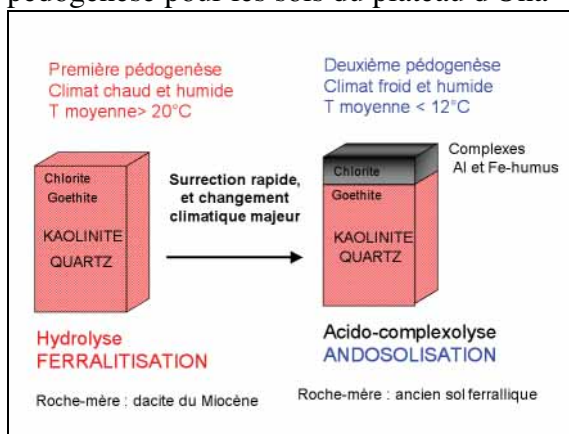
223-1- Processus d'Andosolisation dans les sols non volcaniques : les zones de Saraguro et d'Oña

Les sols des zones du Fierro Urcu et d'Oña sont clairement polygéniques. La partie inférieure de ces sols est épaisse, avec une densité apparente >1, pauvre en bases, très désaturée avec une TRB plus faible que les sols les plus anciens dérivant de cendres volcaniques (CUE et AZO, Fig 7 ; § 213-2-). Les pH sont très acides inférieurs à 4,5 pouvant même descendre à 3,5. La minéralogie est constituée presque exclusivement de kaolinite pour le site d'Oña et de gibbsite et kaolinite pour le site de Fierro Urcu (7-SAR).

Le développement de la partie humifère du sol noire, épaisse de parfois plus de 40cm très ressemblante à celle des Andosols développés sur cendres pouvait laisser croire à un saupoudrage de cendres volcaniques (Leamy et al., 1980). Cependant, la présence de grains de quartz grossiers dans les horizons de surface, la minéralogie des minéraux lourds (présence de minéraux du métamorphisme) ainsi que

des terres rares de l'ensemble du profil par rapport au profil référence de Cuenca (CUE) tend à confirmer l'absence de cendres pour le Fierro Urcu et une très légère influence pour le site d'Oña (Poulenard et al. 1999). Pourtant ces sols montrent des analogies très fortes avec les Andosols décrits précédemment : ils ont une faible densité apparente (<0,5), sont riches en carbone (Tableaux 11 et 12) et ont une teneur en eau très comparable à celle des Andosols. Les extraits spécifiques des minéraux amorphes (Tableau 10) montrent des teneurs pour les minéraux amorphes en particulier (Alox+1/2 Feox) inférieures à celles des Andosols évolués pour le site d'Oña mais tout à fait comparables à d'autres sols andiques (PIC), voire semblable à celle des autres Andosols pour le site du Fierro Urcu situé à plus haute altitude dans un environnement vraisemblablement plus froid et humide (Tableau 3). Les teneurs en fer amorphe sont supérieures à celles de l'aluminium montrant un début de podzolisation dans le site SAR à la base des horizons humifères. Le processus d'andosolisation dépend de la disponibilité en cations métalliques. Il semblerait que

dans le site du Fierro Urcu la disponibilité des cations métallique dérive de l'altération de la biotite visible dans les minéraux lourds, comme le soulignent l'abondance de fer et la présence d'interstratifiés Illite-Vermiculite/Smectite comme dans les Andosols non volcaniques décrits au Népal par Baumler et Zech (1994). Les ions Aluminium pourraient provenir en partie de l'instabilité de la gibbsite à des pH < 4,0 (Fritz et Tardy, 1973) tandis que dans le site d'Oña ce serait l'instabilité de la kaolinite qui tend à se réduire en taille près de la surface qui fournirait les ions aluminium complexés par la matière organique comme l'ont étudié Caner *et al.* (2000) dans les Andosols non dérivés de cendres volcaniques des sites des Ghats en Inde. Figure 14 : Changement du type de pédogenèse pour les sols du plateau d'Oña



Cette discontinuité des processus de pédogenèse entre la base et la partie supérieure montre clairement deux épisodes distincts : une pédogenèse longue ancienne de type "ferrallitique" classique dans des conditions vraisemblablement plus chaudes que l'actuel (Tardy, 1993) et une pédogenèse récente de type andique avec dissolution de la kaolinite et de la gibbsite, avec des pH très bas et une complexation entre l'Al³⁺ libéré et une matière organique minéralisée semblable aux Andosols non-allophaniques décrits précédemment (Figure 14). Avec une décroissance de 0,6 degrés par 100 m d'altitude, un processus de tectonique rapide peut être évoqué pour expliquer ce phénomène. Le taux de surrection dans la

région est > 0,6mm/an dans le bassin de Cuenca , l'un des plus rapides au monde (Hungerbühler *et al.*, 1996 ; Steinman, 1999). Cette surrection implique une élévation de surface >3000m sur une période de 9 millions d'années (Steinmann, 1999).

223-2-Le páramo du Podocarpus

Dans le páramo du podocarpus, les sols sont peu épais, rajeunis par une érosion naturelle très propice aux glissements de terrain. L'évolution des sols est fonction d'une part i) de la teneur en quartz et ii) du drainage favorisant l'hydromorphie (Figure 13).

Du nord vers le sud du páramo, les roches deviennent plus riches en quartz. Les pélites finement stratifiées et les argillites donnent naissance à des sols de type ocre-podzolique ou Umbrisols mais sans réelle redistribution du fer avec des argiles de type illite héritées de la roche mère (muscovite) avec un mélange de kaolinite et de gibbsite (profils TIR 11 et CT). Lorsque les roches deviennent plus quartzueuses, on observe en premier lieu une concentration plus importante des oxydes de fer en surface dans les horizons profonds au contact avec la roche mère puis (TIR 14 et CT) puis dans les zones métamorphiques du s de fer amorphes dans les horizons de surface (SAR 1) puis développement d'un horizon éluvié avec une redistribution en profondeur du fer (SAB 1) de la matière organique et des oxydes de fer caractéristiques des horizons spodiques des podzols.

La présence de petites mares laisse entrevoir des phénomènes d'hydromorphie avec une redistribution encore plus nette des oxydes de fer mais aussi des argiles avec des horizons réduits très éluviés et des horizons très colorés. Le processus de podzolisation est renforcé avec formation d'Alios à la base de l'horizon humifère montrant une dynamique de drainage latéral et la superposition de plusieurs niveau d'éluviation et d'illuviation des

oxydes de fer. Les teneurs en Aluminium sont faibles dans tous les profils.

224. Propriétés

Dans tous les cas, tous les sols des páramos du sud sont très désaturés de part une pédogenèse très longue pour les sols des massifs du Fierro-Urcu et d'Oña et pour les sols du Parc Podocarpus en raison de la richesse en silice et en quartz des sols. Le pH est toujours <5,0 et très souvent <4,0. La faible fertilité est concentrée dans les horizons de surface avec un recyclage de la matière organique. Les fortes teneurs en silice extraits au cbd sont dues aux phytolites caractéristiques des graminées. Les teneurs en aluminium échangeable occupent entre 80 et 90 % du complexe d'échange. Les teneurs les plus élevées proviennent des horizons organiques du profil SAR vraisemblablement à cause de l'instabilité de la gibbsite : ces horizons ont également le pH le plus bas ; les teneurs les plus faibles sont relevés dans les podzols hydromorphes vraisemblablement en raison de la faible teneur en aluminium de la roche mère (Tableaux 10 et 12).

224-1- Stockage du carbone :

Les teneurs en matière organique sont élevées dans tous les horizons humifères comme l'a souligné Escobedo-Urquizo, (1980) pour les páramos du Nord Pérou très semblables à ceux du sud de l'Equateur et quelque soit le substrat géologique. On observe cependant une baisse des teneurs en carbone en fonction du degré de podzolisation et de la teneur en Quartz (Tableau 11). Dans ces sols l'humus de surface est peu minéralisé de type "Mor" dans un environnement très acide or la protection biologique de la matière organique est moins efficace que la protection chimique comme pour les Andosols non allophaniques du site de Fierro Urcu (SAR) ou d'Oña. Pour ces derniers, le vieillissement des sols comme l'atteste les faibles teneurs en bases (TRB) n'a pas d'influence majeure sur la stabilité de ces sols. Il n'a pas été observé

d'évolution de ces sols vers les podzols comme le suggérait Quantin (1988) dans son schéma évolutif des sols des páramos (Figure 8 et 13).

Tableau 11 : Stockage du carbone (t ha⁻¹) dans les sols dérivant d'un substrat non pyroclastique des páramos du Sud de l'Equateur.

OÑA (6)	SAR (7)	TIR 11 (8)	CT (9)	SAB 1 (10)
239	341	176	158	112

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

224-2-Stockage de l'eau

Tout comme les Andosols, les horizons organiques humifères montrent des teneurs en eau très élevées avec une teneur de plus de 1500 g kg⁻¹ à l'état naturel et des teneurs de plus de 1000 g kg⁻¹. Cependant les horizons ce stockage d'eau reste confiné aux seuls horizons humifères et les horizons minéraux ont une capacité de stockage bien plus réduite. Comme les sols sont souvent peu épais, les páramos du sud jouent un moindre rôle dans le stockage de l'eau et de grandes sécheresses associées à une pauvreté chimique des sols ont conduit une partie de la population rurale à quitter le Sud pour s'installer dans d'autres sites comme en Amazonie avec l'établissement de nouveaux sites comme "Nueva Loja".

Tableau 12 : Résultats analytiques des profils des sites de référence non situés sur pyroclast

Profil	Prof (cm)	pH H ₂ O	pH KCl	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	S	Al ³⁺	ECEC	V(S/T) %	Al/Al+S %	C (g kg ⁻¹)	N (g kg ⁻¹)	C/N	Granulométrie (g kg ⁻¹)					Eau (g kg ⁻¹)		DA
																SG	SF	LG	LF	A	au champ	à -33 kPa	
6- OÑA.1	0-15	3,9	3,6	1,00	0,33	0,12	0,21	1,66	8,14	10,05	16,5	83,1	120	6,7	17,9	59	24	27	133	757	729	609	0,59
	2 15-35	4,2	3,9	0,68	0,14	0,06	0,11	0,99	6,13	7,28	13,6	86,1	82	4,2	19,7	63	20	18	128	771	863	697	0,65
	3 35-50	4,5	4,4	0,44	0,07	0,03	0,09	0,63	4,13	4,86	12,9	86,8	23	1,1	19,2	79	17	18	208	678		588	
	4 50-80	4,6	4,1	0,46	0,05	0,03	0,14	0,68	4,27	5,03	13,5	86,3	7	0,5	15,7	62	44	54	250	590	472	428	1,14
	5 80-120	4,5	4,1	0,37	0,05	0,04	0,20	0,66	4,24	4,98	13,2	86,5	3	0,2	21,0	111	134	38	317	400		328	
	6 120-170	4,6	4,1	0,32	0,05	0,02	0,08	0,47	4,22	4,77	9,8	90,0				136	159	42	275	388		325	
	7 170-250	4,7	4,1	0,32	0,06	0,02	0,09	0,49	4,46	5,00	9,8	90,1				140	149	43	299	370	388	363	1,29
7- SAR1	0-15	3,6	3,4	0,27	0,91	0,48	0,04	1,70	13,30	15,00	11,3	88,7	173	5,2	33,5	221	188	101	254	236	1772	1809	0,43
	2 15-35	3,5	3,2	0,05	0,23	0,19	0,03	0,50	27,84	28,50	1,8	98,2	195	8,6	22,6	143	264	42	196	356	2232	1416	0,35
	3 35-47	3,8	3,6	0,02	0,15	0,15	0,01	0,32	13,68	14,00	2,3	97,7	86	4,3	19,8	147	264	18	242	330	1212	1221	0,60
	4 50-65	4,2	3,7	0,05	0,12	0,17	0,01	0,34	8,74	9,10	3,7	96,2	23	1,5	15,8	181	329	44	206	240	667	560	0,91
	5 65-100+	4,6	4,0	0,05	0,06	0,11	0,07	0,29	3,42	3,70	7,8	92,1				235	426	34	193	112	424	332	1,11
8- TIR11.1	0-20	4,0	3,5	0,27	0,46	0,38	0,07	1,19	8,74	11,07	10,7	88,0	142	8,3	17,2	19	37	45	287	611		160	
	2 20-40	4,9	4,2	0,02	0,04	0,05	0,02	0,13	2,47	2,98	4,4	94,9	10	0,7	14,0	52	60	62	373	453			
	3 40-50+	4,9	4,2	0,04	0,03	0,03	0,03	0,13	2,66	3,17	4,0	95,5	4	0,3	13,0	130	93	101	489	186			
8- TIR14.1	0-18	4,0	3,4	0,17	0,12	0,10	0,01	0,40	4,18	5,34	7,4	91,3	30	2,3	12,8	147	399	36	204	213			
	3 20-30	4,3	3,3	0,04	0,03	0,05	0,02	0,14	1,90	2,80	4,9	93,2	7	0,5	12,5	161	367	24	199	251			
	4 30-50+	4,9	3,9	0,05	0,03	0,09	0,02	0,18	2,19	2,65	6,8	92,4	3	0,4	9,1	83	226	42	263	386			
9- CT1.1	0-7	3,6	3,0	0,24	0,55	0,62	0,10	1,51	6,46	9,87	15,3	81,1	127	14,8	8,6	142	274	23	187	374	1225	1664	0,55
	2 7-20	3,8	3,3	0,08	0,13	0,15	0,02	0,38	8,55	9,88	3,8	95,7	52	4,5	11,4	194	264	38	152	352		773	
	3 20-25	4,0	3,4	0,08	0,09	0,11	0,03	0,32	7,60	8,68	3,6	96,0	39	3,8	10,4	343	217	22	110	308		295	
	4 25-37	4,2	3,5	0,10	0,05	0,09	0,01	0,25	6,84	7,85	3,2	96,4	9	1,2	7,9	331	234	46	218	172	474		1,14
	5 37-45	4,2	3,6	0,07	0,04	0,09	0,01	0,21	6,08	7,05	3,0	96,7	0	0,0		360	255	21	196	167			
10-SAB1.1	0-10	3,8	3,2	0,09	0,29	0,34	0,04	0,75	3,61	5,69	13,2	82,8	86	4,9	17,5	247	323	47	146	237	1703	852	0,39
	2 10-20	3,9	3,4	0,07	0,16	0,16	0,03	0,41	3,04	4,40	9,3	88,2	55	2,0	28,1	336	282	50	119	214		158	
	3 20-23	4,7	3,9	0,02	0,03	0,03	0,01	0,10	3,04	3,71	2,6	96,9	8	0,4	20,8	253	411	71	168	97			
	4 23-45	4,8	4,1	0,02	0,02	0,02	0,01	0,08	2,47	2,93	2,7	96,9	4	0,2	16,3	251	414	67	188	80			
	5 45-60	4,8	4,0	0,05	0,03	0,02	0,02	0,11	1,33	1,82	6,1	92,2	0	0,0		307	424	59	110	100			
10-SAB2.1	0-10	3,8	2,8	0,20	0,30	0,27	0,04	0,80	1,90	5,17	15,5	70,3	100	9,1	11,0	277	516	04	116	87	1211	693	0,54
	2 10-18	4,4	3,5	0,05	0,13	0,11	0,02	0,31	1,90	2,78	11,0	86,1	38	3,0	12,6	402	323	08	88	179		436	
	3 18-21	4,4	3,3	0,03	0,04	0,03	0,02	0,12	0,40	0,90	13,2	77,2	16	1,3	12,5	417	491	08	33	51		149	
	4 21-40	4,1	3,6	0,01	0,01	0,02	0,01	0,05	3,99	4,80	1,1	98,7	20	0,9	22,5	336	434	09	71	150		154	
	5 40-60	4,5	3,9	0,01	0,02	0,05	0,02	0,10	3,04	3,42	2,8	96,9	3	0,3	12,4	279	424	27	110	160			
	6 60-80	4,7	4,1	0,02	0,02	0,04	0,00	0,08	3,23	3,50	2,3	97,5				270	372	18	61	279			
	7 80-90+	4,6	4,0	0,05	0,03	0,04	0,05	0,17	4,18	4,73	3,6	96,1				202	393	36	186	182			

3. LES USAGES DU PARAMO ET LEUR DEGRADATION

USAGES DU PARAMO

Au cours des 50 dernières années, les páramos ont été le théâtre d'importants changements d'usage. En 1964 et 1974, deux réformes foncières successives ont été promulguées pour obliger les grands propriétaires terriens à concéder une partie de leurs terres à leurs employés. Cette redistribution des terres a concerné principalement les fortes pentes et les hautes terres, les aires planes et basses étant consacrées à l'élevage alors que les pentes sont occupées par des champs très morcelés avec des cultures vivrières. La pression démographique est également importante. Dans les zones rurales de la vallée inter-andine, aux basses altitudes comprises entre 2500 et 3000m, la densité de population en zone rurale varie entre 100 et 150 hab km⁻² et la population s'accroît à un rythme d'environ 2 % an⁻¹ (Delaunay *et al.* 1990). Les petits propriétaires (*latifundio*) ont étendu leurs terres cultivables vers des terres marginales qui étaient jusqu'à lors délaissées et ont ainsi défriché des terres sur des pentes de 70% pouvant atteindre voire dépasser les 100% (Huttel *et al.* 1999) et occuper les terres froides de parcours au-dessus de 4000m (De Noni and Viennot 1993). Comme les rendements décroissent en fonction de l'altitude et des baisses de température, le taux d'accroissement des terres cultivées dépasse largement les 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 ; Photo 40) ; 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 (Photo 41). Cet élevage extensif s'opérant sur des surfaces de plus en plus restreintes, le surpâturage devient fréquent.



Photo 40 : Culture de pommes de terre dans un páramo à frailejon. Paramo de El Angel, Carchi.



Photo 41 : Vache broutant une repousse de *Calamagrostis*, páramo du Pichincha.

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 utilisés pour des activités agricoles (Hofstede et al., 2003).

32. La fertilité des sols des páramos

La mise en culture des terres de parcours affecte essentiellement *les páramos sur cendres volcaniques*. Les sols dérivés de cendres volcaniques sont parmi les plus fertiles du monde (Shoji et al., 1993). Ils sont profonds, meubles, sont très poreux et très drainants et malgré cela ont une très bonne capacité de rétention en eau. Le travail du sol est aisé et les risques d'érosion sont globalement faibles. Lors du premier cycle de culture, les récoltes sont satisfaisantes, aucun problème phytosanitaire n'est à craindre mais dès le second cycle, les rendements chutent rapidement. La capacité de rétention anionique des Andosols (Parfitt, 1980 ; Okamura et Wada, 1983) est bien connue, en particulier pour le phosphore (Fox, 1980). Elle sert même de critère de classification pour les Andosols (SSS, 1999) ; La capacité de rétention anionique des andosols non allophaniques provoquée par les gels organo-métalliques est supérieure à celle des allophanes (Shoji et al., 1985 ; Dahlgren et al., 2004). Mais cette capacité de rétention anionique s'applique également au soufre (Gustafsson, 2001). Des carences en soufre dans les sols de la Sierra équatorienne sont signalés, même si chaque éruption volcanique libère des quantités importantes de cet élément. Cette carence affecte même les sols qui n'ont pas de capacité de rétention anionique comme les Arenosols sableux des sols volcaniques à horizon induré (*cangahua*) et réhabilités (Germain et al., 2000). Pour ces raisons après un cycle de culture, sans protection spécifique de la couverture du sol après la récolte, le sol est laissé en jachère pendant plus de 5 années laissant sa place à un pâturage de faible qualité fait de repousses de plantes pionnières (Photo 42).

Sur les sols ne dérivant pas de cendres volcaniques, comme les roches litées

(pélites, schistes volcano-sédimentaire), mais aussi gneiss et autres micaschistes de la partie méridionale soumise au métamorphisme, les sols sont beaucoup moins fertiles. Hormis le fait qu'ils sont souvent très peu épais, sans cesse rajeunis (Cf § 224), de par leur abondance en silice, ils contiennent très peu de cations échangeables qui sont très vite lixiviés du fait des fortes précipitations. Le pH devient très acide (< 4,0) et l'aluminium échangeable très abondant est un frein à toute mise en culture. Seuls quelques maigres pâturages marginaux peuvent être observés. Au Venezuela les páramos sont cultivés après de longues périodes de jachère ; ils voient leur pH baisser mais du fait des fortes teneurs en Al³⁺, la minéralisation de la matière organique est ralentie (Abadin et al., 2002).



Photo 42 : jachère après un cycle de culture de pommes de terre dans un páramo à frailejon. Paramo de El Angel, Carchi.

33. Les formes d'érosion des páramos

331. Les mouvements de masse

Les mouvements de masse sont tous localisés sur des pentes fortes supérieures à 60% ou à la rupture de pente. Ils résultent d'un déséquilibre entre la masse de la couverture du sol, de l'eau stockée dans le sol et des plantes qui la recouvrent d'une part, et d'autre part entre les forces de frottement de ces matériaux avec le socle de roche altérée sur laquelle ces ensembles reposent. Ces mouvements de masse sont souvent liés à des phénomènes pluvieux exceptionnels et d'une tectonique très

active associée à de nombreuses failles et à des secousses sismiques assez nombreuses dans cette région (Parsons, 1982 ; Previtali, 1992).

Malgré les infiltrations très importantes dans les sols, les mouvements de masse sont extrêmement rares dans la partie nord de l'Equateur du à l'épaisseur des sols et à la capacité de rétention en eau des sols avant de passer à la limite de liquidité. Cependant on peut noter que certaines formations de cendres anciennes plus indurées souvent situées à une altitude basse peuvent servir de frein à l'infiltration de l'eau, créent une surface de discontinuité qui peut servir de substrat lequel la partie supérieure du sol peut glisser. Ces glissements de terrain peuvent être occasionnés par une rupture de canal d'irrigation suite à un manque d'entretien (Vanacker et al., 2003 ; Photo 43). A ce jour, près de 10 000 km de canaux d'irrigation sont utilisés en Equateur (Huttel et al., 1999).

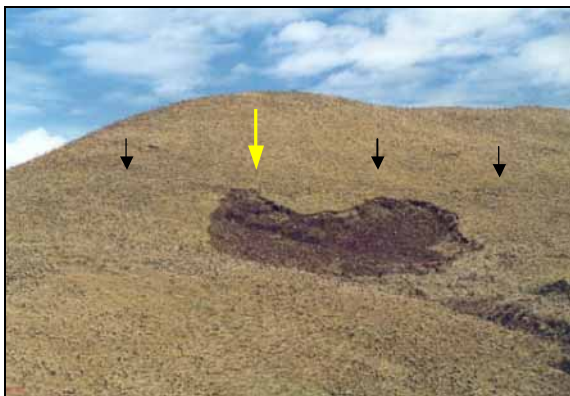


Photo 43 : Glissement de terrain provoqué par la rupture d'un canal d'irrigation. Emplacement du canal et de la rupture.

Les zones de départ sont souvent envahies par une végétation plus buissonnante (matorral) alors que les zones d'arrivée sont souvent remises en culture dissimulant rapidement toute trace de glissement. En revanche dans la partie sud de l'Equateur, à cause de l'absence de la couverture de cendres qui adoucit les reliefs, les pentes sont plus longues et plus accentuées, les sols moins épais avec des capacités de rétention en eau beaucoup plus faibles générant une susceptibilité

plus grande à une érosion en masse qui rajeunit les profils pédologiques de manière constante. Les mouvements de masse sont fréquents et affectent surtout le subpáramo car ils sont souvent associés à un changement d'usage (mise en culture ou défrichage du couvert forestier au profit du pâturage (Vanacker et al., 2003 ; Photos 44 et 45). La recolonisation des loupes de glissement par la végétation est très lente même après 20 années de jachère (Wilcke et al., 2003).



Photo 44 : Glissements de terrain localisés après défrichage de la forêt au profit de pâturages dans la partie amont.



Photo 45 : Glissement de terrain sur des massifs métamorphiques au sud de Loja.

332. L'érosion linéaire

L'érosion linéaire est très rare dans les andosols des páramos en raison de la forte infiltrabilité des sols. Elle peut apparaître lorsqu'une forte averse suit immédiatement

le travail du sol dans le sens de la pente par des moyens mécaniques (Photo 46).



Photo 46 : Fines rigoles parallèles après la préparation d'un champ dans le páramo du Chimborazo. Ces rigoles vont s'estomper après le buttage perpendiculaire à la pente.

Les cendres récentes ou les Entisols vitriques peu consolidés sont en revanche bien plus susceptibles à l'érosion ravinaire naturelle occasionnée par des flux concentrés d'eau ou des averses de grêle. (Photo 47).



Photo 47 : Erosion ravinaire naturelle dans les cendres peu consolidées du super-páramo de l'Antizana.

Elle apparaît également dès que le ruissellement affecte les sols généralement lors de la formation d'une croûte lors d'une mise en culture (Poulenard et al., 2001 § 423), d'un tassement ou d'une concentration de flux provoquée par un niveau imperméable (route, chemin). Une ségrégation des particules granulométriques est peut-être à l'origine d'une végétation en forme de bandes dans les super-páramos du Venezuela comme le suggère Pérez (1984).

Une averse de grêle peut provoquer une imperméabilisation momentanée de la surface du sol et ainsi peut concentrer le

ruissellement et ainsi provoquer des soudaines coulées boueuses ou laves torrentielles (Perrin et al, 2000).

En revanche tout comme les glissements de terrain et l'érosion en masse, l'érosion linéaire est beaucoup plus fréquente dans les paysages du sud de l'Equateur sur des sols plus argileux, plus imperméables et beaucoup moins épais (Photo 48).



Photo 48 : Ravines profondes et érosion en nappe sur les flancs de roches volcano-sédimentaires du Sud de l'Equateur, région de Loja.

333. L'érosion éolienne

L'érosion éolienne est limitée aux seuls páramos secs (appelé localement *arenal*) situés sous le vent dominant, généralement situé à l'ouest des principaux cônes volcaniques (Photo 8 §132, Photo 49).



Photo 49 : Végétation en bandes sableuses dans l'arenal du Chimborazo.

C'est sous le vent du Chimborazo que cet écosystème est le plus développé. Dans ce paysage avec une pluviométrie inférieure à 400mm an^{-1} les sols sont peu développés du type Arenosols ou Entisols. L'érosion éolienne a généré des dunes actives et des yardangs (Photo 50) avec une ségrégation des cendres fines et grossières qui sont généralement plus anciennes (Winckell et

al, 1991b). Les particules sableuses les plus fines s'accumulent autour de la végétation graminéenne en touffes en bandes herbacées. Malgré la faible densité de couvert végétal, ce páramo est constitué d'espèces à fort pouvoir nutritif et se trouve régulièrement parcouru par des troupeaux d'ovins. Etant donné la faible densité du couvert végétal ce páramo est très sensible au surpâturage.



Photo 50 : Yardang avec ségrégation éolienne de particules fines et de particules grossières dans l'arenal du Chimborazo.

34. Impact des activités humaines sur la couverture végétale et les propriétés des sols.

La fonction agricole altère les propriétés de stockage d'eau et de carbone des páramos ; nombreux auteurs ont fait état des risques de modification du cycle global 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 hydrique des páramos est largement conditionné par la nature, la diversité et les propriétés des sols de ce milieu (White and Maldonado, 1991).

341. Les effets des sentiers, routes et passage d'engins mécaniques

Dans les páramos non andiques, le passage de véhicules a pour effet de générer une ségrégation particulière et de limiter la croissance de certaines espèces et de créer une orientation en bandes de la végétation (Perez, 1991). De nombreuses références attestent de la dégradation par compaction des andosols durant la récolte ou le plus

souvent pour des travaux forestiers (Dahlgren et al., 2004). De par leur abondance dans les zones les plus hautes et les plus escarpées peu accessibles aux engins mécaniques lourds, et de par les faibles revenus des paysans occupant ces terres, les páramos sont relativement préservés de la compaction des sols par différents engins mécaniques. Cependant nous avons pu observer dans la province du Carchi (frontière Colombienne) où certains paysans disposent de moyens mécaniques, des accumulations d'eau dans des surfaces compactées lors d'un travail du sol effectué de manière inappropriée et durant un épisode pluvieux. Il s'en suit une stagnation des eaux ainsi qu'un ruissellement préférentiel et certaines ravines longitudinales ont pu être observées après le passage de tracteurs qui ne peuvent tracer des sillons que dans le sens de la pente. Ces traces engendrent des chemins de l'eau préférentiels et sont à l'origine d'une érosion parfois intense en ravines à évolution extrêmement rapide (Harden, 1991 ; 1992).

Dans les zones d'élevage ovin, ce sont les passages répétés de camions qui compactent et réduisent l'enherbement. Les paysans tirent une partie de leur maigres ressources par la vente et l'exportation du fumier de mouton aux maraîchers situés dans les terres sableuses de la vallée inter-andine. Cette exportation de matière organique ne fait que renforcer le caractère dégradant de l'élevage ovin (Photo 51).



Photo 51 : Passage de camions pour l'exportation de fientes de mouton dans le páramo de Llangahua, Ambato.



Photo 52 : Touffe de *Calamagrostis* sp. coupée. La repousse est homogène et concerne toute la touffe.



Photo 53 : Touffe de *Calamagrostis* brûlée. La repousse ne concerne que la périphérie de la touffe.

342. Les effets des feux

Dans les páramos pâturés, les feux sont généralisés. Ils ont pour objectif de limiter l'extension des plantes ligneuses en particulier dans le sub-páramo et de rendre plus appétentes les repousses des hautes graminées ligneuses (*Calamagrostis* sp., *Stipa* sp., *Agrostis* sp.).

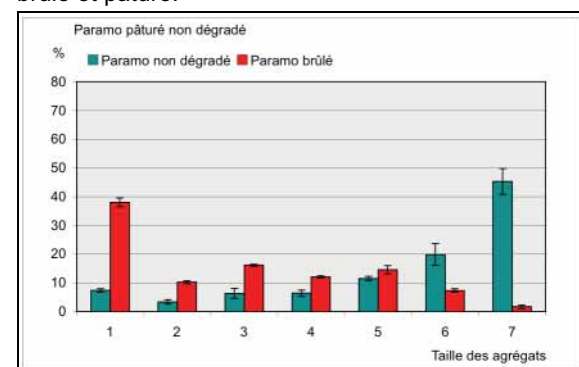
Si les effets des feux sur la végétation sont bien connus, les effets sur les propriétés des sols sont moins bien définis (Laegaard 1992 ; Ramsay and Oxley 1996 ; Hofstede 1995 ; Verweij 1995). Il semblerait qu'une plus forte disponibilité du phosphore engendrerait une meilleure croissance des repousses (Suarez et Medina, 2001). En général lors des feux successifs, les repousses n'apparaissent souvent qu'en périphérie des touffes contrairement aux touffes coupées (Photos 52 et 53). Puis les touffes se divisent et finissent par disparaître au profit d'une végétation rasante pionnière.

Le principal effet des feux est de réduire la couverture végétale du sol qui est à nu. Ce sol à nu est alors exposé à l'énergie cinétique des gouttes de pluie. On note après le passage des feux une réduction sensible de la taille des agrégats et il se développe une légère hydrophobie conforme aux observations faites par Savage et al. (1972), et cantonnée à une partie seulement des agrégats les plus fins (Figure 15 et 19 § 345-2). Mais cet effet n'est pas durable.

La recrudescence de l'érosion après les feux due au développement de

l'hydrophobie a été mise en relief par Imeson et al., (1992) mais pour une végétation méditerranéenne adaptée à un climat sec. Il semblerait que dans le cas des páramos ce phénomène soit moins intense mais non négligeable. Notre simulation de pluie faite après brûlis sur un Andosol vitrique (Pichincha) montre une augmentation du ruissellement qui de $15 \pm 10\%$ pour les parcelles sous végétation naturelle augmente jusqu'à $45 \pm 20\%$ pour les parcelles brûlées (Figure 21). On note également un accroissement des valeurs du détachement de 50 to 200 g m^{-2} en particulier durant les premières pluies où ce sont les agrégats hydrophobes qui sont les premiers détachés (Tableau 14 ; Poulenard et al., 2001).

Figure 15 : Comparaison de la taille des agrégats entre un páramo pâturé non dégradé et un páramo brûlé et pâturé.



Taille des agrégats : 1 : <0,25mm ; 2 : 0,25-0,42 ; 3 : 0,42-1 ; 4 : 1-2 ; 5 : 2-4,75 ; 6 : 4,75-9,52 ; 7 > 9,52

343. Les effets du surpâturage

Un pâturage raisonné stimule la croissance végétale et renforce le développement des racines qui en se minéralisant participent à l'augmentation du stock de carbone dans

les sols (Podwojewski et al., 2002), cependant le stock global de carbone décroît par diminution du stock de biomasse et de nécromasse (Hofstede and Rossenaar, 1995). Si le pâturage bovin n'engendre qu'une augmentation régulière des feux et la fragmentation progressive des touffes herbacées (Verweij and Buddes, 1992), le surpâturage ovin engendre des dommages bien plus conséquents à la fois sur la végétation et sur le comportement des sols (Podwojewski *et al.* 2002). En premier lieu, les touffes (*Calamagrostis sp.*, *Stipa hichu*) sont fragmentées puis leur taille se réduit (Photo 54).



Photo 54 : premier stade de dégradation d'un pâturage : apparition d'une végétation rase. Paramo du Chimbarazo.



Photo 55 : Mouton creusant le sol avec son sabot pour dégager le collet des plantes. Paramo de Llangahua, Ambato.

Une végétation rase entre les touffes devient de plus en plus disséminée laissant la place à des plages de sol à nu. Une nouvelle végétation se forme, plus résistante au piétinement dominée par *Agrostis breviculmis* et *Lachemilla orbiculata* (Luteyn, 1999). Les effets de la

compaction ne sont pas les plus importants. Nous n'avons pas relevé une augmentation notable de la densité apparente dans les zones les plus dégradées. Lorsque le surpâturage ovin se développe, les moutons déterrent par leurs sabots pointus le collet des plantes qui peinent à repousser dans cet environnement froid (Photo 55).



Photo 56 : Touffe isolée de Calamagrostis dans le paramo surpâturé de Llangahua (Ambato)

Les hautes touffes disparaissent complètement, des surfaces mises à nu se développent en particulier sur fortes pentes (Photo 56).



Photo 57 : Formation de ravines sur pente dans un paramo surpâturé très dégradé.

Après une longue période sans couvert végétal, les andosols généralement de couleur noire absorbent les radiations solaires ce qui favorise un assèchement irréversible des sols.

Figure 16 : Relations entre l'eau du sol, les teneurs en C et en Al (extrait pyrophosphate) dans le páramo surpâturé et dégradé de Llangahua (province de Tungurahua).

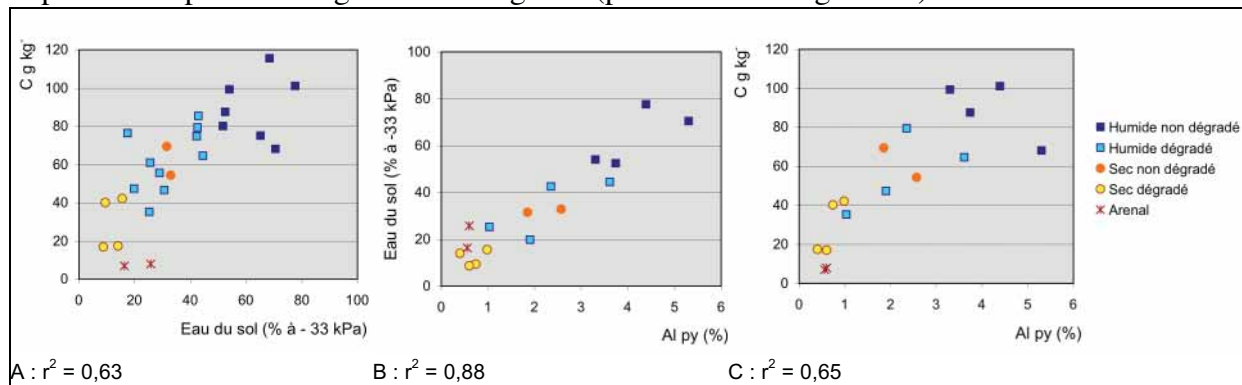
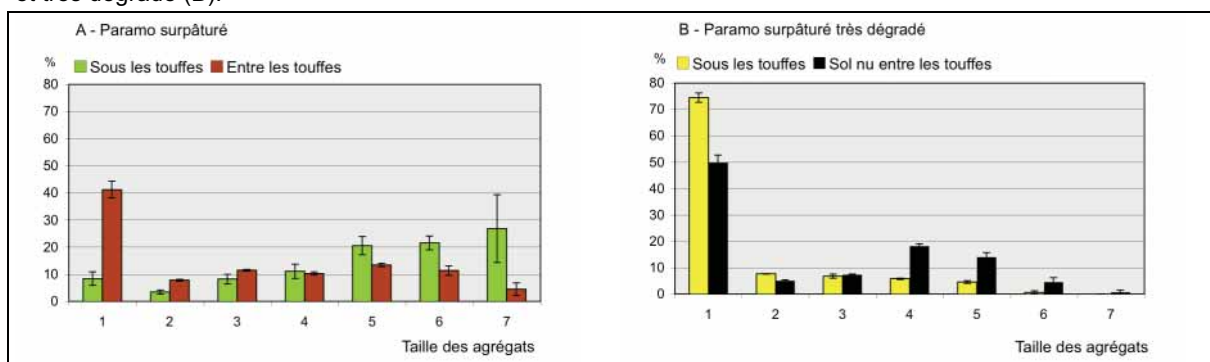


Figure 17 : Taille des agrégats situés entre et sous les touffes d'un páramo surpâturé (A) et un páramo surpâturé et très dégradé (B).



Sur le site de Llangahua dans la province de Tungurahua, les 20cm supérieurs du sol sont affectés par une décroissance des teneurs en carbone de 100g kg^{-1} à moins de 50g kg^{-1} , concomitante à une baisse des teneurs en Al extraits par pyrophosphate, qui est le composant principal du complexe organométallique. Ces modifications altèrent les propriétés physiques comme la rétention en eau. La capacité de rétention en eau à -33 kPa de potentiel matriciel décroît de 780g kg^{-1} à 200g kg^{-1} (Figure 16). Une microstructure très hydrophobe remplace une macrostructure stable, générant une réduction de la capacité d'infiltration des sols accroissant le risque de ruissellement et d'érosion (Photo 57). Dans les premières phases de la dégradation, cette hydrophobie affecte en premier lieu les seules parties à nu entre les touffes, les touffes restant hydrophiles et n'affecte principalement que les micro-agrégats alors que les macro-agrégats restent hydrophiles (Figures 17-A et 19§ 345-2). En revanche, lorsque le surpâturage provoque une mise à nu complète du sol, l'hydrophobie reste

moyenne entre les touffes mais devient extrême sous les touffes. La structure est exclusivement composée de micro-agrégats très hydrophobes sans doute à cause du stress hydrique ne permettant plus le contact entre l'eau des pores du sol et celle provenant de l'eau de surface (Figures 17-B et 19§ 345-2).



Photo 58 : Sol complètement mis à nu avec érosion de l'horizon humifère par surpâturage ovin dans le páramo de l'Antisana. Ce site incluait le plus grand élevage de moutons d'Equateur avec plusieurs milliers de têtes.

Cette mise à nu du sol s'effectue préférentiellement dans les páramos les plus secs situés immédiatement à l'ouest des

principaux volcans isolés. Ce sont également dans ces zones où l'élevage ovin est le plus développé (Photo 58).

344. Les plantations forestières (*pinus*)

Les hautes terres de parcours ont par endroits été utilisées dans un souci de productivité pour des plantations de pins (*Pinus radiata* dans la plupart des cas). Outre leur croissance très lente et un effet certain sur les limitations des flux hydriques, les plantations de pins ont pour premier effet une limitation considérable de la biodiversité de la flore locale. Les effets sur les composants du sol portent essentiellement au long terme (plantations de plus de 20 ans) sur une décroissance des stocks d'azote (Farley and Kelly, 2004) et d'autre part des stocks de carbone (Hofstede et al., 2002 ; Farley et al., 2004). Alors que certaines plantations avaient pour but de séquestrer du carbone dans le cadre du protocole de Kyoto (programme FACE Forest Absorbing Carbon Dioxide Emissions ; Hofstede, 1997), l'effet inverse sur la séquestration du carbone dans les sols pourrait enlever du sens à cette démarche. En effet les aiguilles de pins de part leur faible taux de minéralisation s'accumulent à la surface du sol. Cette séquestration de manière brute est cependant moins efficace que la séquestration du carbone sous forme de complexe organo-métallique. Dans un Andosol vitrique du Cotopaxi, le stock de carbone sous une forêt de *Pinus radiata* d'une trentaine d'années est de 30% inférieur à celui du páramo herbacé. Il varie respectivement entre 3 et 5 kg m⁻² dans la fraction 0-10 cm et de 1,2 à près de 3kg m⁻² dans l'horizon A sous-jacent). En même temps les teneurs en eau baissaient d'autant plus que la pression de rétention était forte de 40, 55 et 63% en moins à 10, 33 et 1500 kPa. Ceci démontre l'importance du degré de minéralisation du carbone sur la nature de la porosité et la teneur en eau des páramos (Farley et al., 2004).

En revanche, les forêts naturelles de *Polylepis incana* (Rosaceae) qui sont les arbres qui poussent aux altitudes les plus

extrêmes associées à d'autres espèces endémiques sont à l'origine d'une séquestration de carbone bien plus importante (Abcouwer, 2001). Dans certains cas elle peut dépasser 160 t C ha⁻¹ (Fehse et al., 1999 ; Hofstede et Aguirre, 1999) ; contre à peine 40 à 50 t C ha⁻¹ dans les meilleurs cas pour les forêts de *Pinus* tandis que la productivité annuelle en carbone d'environ 3 t C ha⁻¹ an⁻¹ d'espèces à l'état adulte comme l'aulne (*Alnus Acuminata*) est bien supérieure à celle des pins (en moyenne 2 t C ha⁻¹).



Photo 59 : Páramo à *Polylepis incana*. Route de Pifo, Col de la Virgen, Prov. de Pichincha.

345. Effets de la mise en culture

La mise en culture a deux effets immédiats : d'une part elle met à nu la surface du sol qui est sans protection sous l'impact des gouttes de pluie et d'autre part elle permet une plus grande évaporation du sol.



Photo 60 : Evaporation après labour d'un andosol non allophanique. province du Carchi, El Angel.

Aux altitudes élevées, le rayonnement solaire est très intense et la couleur noire des andosols absorbe le rayonnement solaire d'où une plus grande évapo-

transpiration à la surface du sol qui est renforcée lors du travail du sol par la formation d'une macro-porosité renforçant l'évaporation potentielle (Photo 60).

345-1- Effet sur la surface du sol

Cet effet sur la surface du sol est différent selon le degré d'évolution des Andosols. Les andosols vitriques ont une grande partie de leur matériel, en particulier une fraction grossière importante qui est libre et des agrégats aux liens plus fragiles. Ils s'encroûtent ainsi plus facilement (Poulenard *et al.* 2001). Des croûtes macrobiotiques ont été observées par Perez (1997) dans les super-páramos du Venezuela sur des lithosols peu développés mais ce sont des formations naturelles à l'origine d'une végétation striée et non pas la conséquence d'un usage du sol (Perez, 1984). La dispersion des agrégats est un des principaux facteurs d'érosion des andosols selon Egashira et al, 1983. Sous pluie simulées, l'instauration d'une croûte augmentent le ruissellement d'un facteur 3 (de $20 \pm 15\%$ pour les parcelles à couverture herbacée à $65 \pm 20\%$ pour les parcelles cultivées; Poulenard *et al.* 2001). Les pertes en terres s'accroissent lorsque les croûtes se forment mais décroissent une fois les croûtes formées. Sur les sols andiques plus évolués, l'encroûtement est un phénomène plus marginal. Les agrégats sont très stables et cimentés par des composés organiques.

345-2- Effets de la dessiccation sur les sols des páramos

① La perte du volume total et la modification de la porosité. Conformément à ce qui est cité dans la littérature pour les Andosols par Werkentin et Maeda, (1974) ou McNabb et Boersma (1993), dans nos profils de référence, la rétraction entre l'état sec et à saturation en eau varie de 40% pour les sols les plus récents à près de 80% pour les sols les plus matures et les plus riches en eau (Poulenard, 2000, Poulenard et al., 2002). Pour ces derniers, la rétraction est bien plus rapide en fonction de la perte en eau mais elle n'agit que sur la macroporosité. Pour conséquence, il

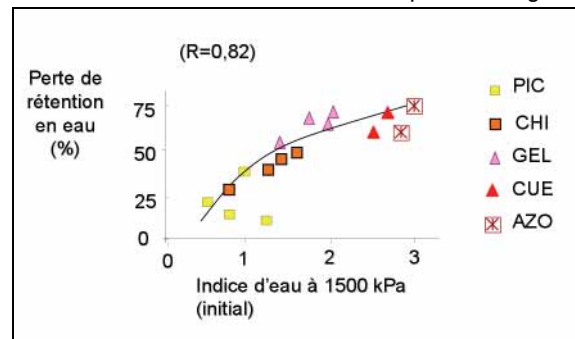
apparaît fréquemment dans la partie supérieure du sol une sur-structure prismatique à larges fentes de retrait qui s'exacerbe lors de la mise à l'air de certains profils (Photo 61).



Photo 61 : Fentes de retrait donnant une structure prismatique très grossière dans un andosol asséché par la construction d'une route.

② Une diminution irréversible des capacités de rétention en eau des sols andiques. Celle-ci est abondamment développée dans la littérature et ce dans toutes les régions du monde (Maeda et Soma, 1985).

Figure 18 : Relation entre la perte irréversible de la rétention en eau et de l'indice d'eau après séchage.



Cet assèchement est toutefois moins prononcé sur le terrain que dans les expériences en laboratoire du fait de l'humidité ambiante et aussi des périodes sèches limitées et de l'exposition temporaire des sols aux radiations solaires (Buytaert et al, 2002). Nous avons pu relever des pertes en eau de l'ordre de 30% deux ans après l'abandon d'un seul cycle de culture de pommes de terre dans les andisols développés du Carchi (profil GEL ; Tableau 15). Cependant les pertes de la capacité de rétention en eau affectent de manière beaucoup plus intense et durable les andosols les plus évolués qui sont eux-

même les plus riches en eau (Poulenard, 2000). Cette perte de la capacité de rétention en eau est également relevée dans les páramos du sud de l'Equateur (Buytaert et al., 2002). En accroissant la macroporosité par le travail du sol, l'eau libre disponible devient plus importante pour les sols, entre 5 et 30% et influe également sur la conductivité hydraulique qui augmente (Buytaert et al., 2005)

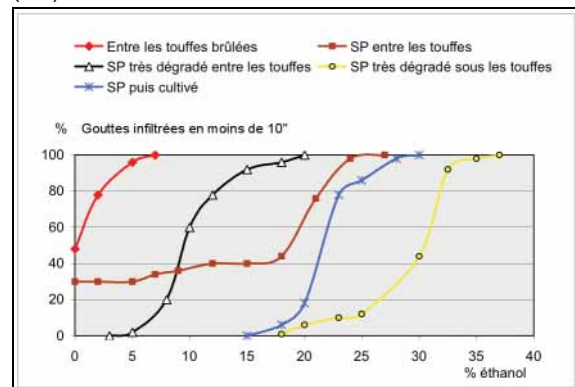
③ Une perte en carbone associée à la perte en eau. Comme les teneurs en eau sont étroitement reliées aux teneurs en carbone dans tous les andosols naturels d'Equateur en fonction de leur évolution pédogénétique (Poulenard et al., 2003, Buytaert et al., 2005), en cas de perte en eau par séchage, la relation entre carbone et teneur en eau du sol reste inchangée comme pour les sols non dégradés (Podwojewski et al., 2002). On observe donc une minéralisation très rapide de la matière organique (Figure 16A § 343).

④ La formation d'agrégats stables (Kubota, 1972, Poulenard, 2000). Comme dans les zones surpâturées, les macro-agrégats des zones mises en culture se fragmentent en micro-agrégats stables et hydrophobes de même répartition granulométrique que sous les touffes des páramos très dégradés, (Figures 17B et 19).

⑤ Les agrégats développent des caractères hydrophobes. L'hydrophobie a été décrite dans de très nombreux sols comme il en est mentionné dans les études synthétiques de DeBano (1981, 2000) et Doerr et al. (2001), mais apparaît comme étant plus développé dans les sols sableux, les sols organiques (Histosols et tourbes) et que majoritairement l'hydrophobie s'accroît lorsque les teneurs en eau du sol décroissent sans pour autant qu'il ait un lien direct entre la teneur en eau du sol et l'hydrophobie. Dans notre étude spécifique des páramos, l'hydrophobie a été démontrée à la fois sur les páramos brûlés (Poulenard et al. 2001 ; Podwojewski et al. 2002) mais aussi sur les páramos surpâturés (Figure 19), d'où la nécessité d'une étude spécifique sur les

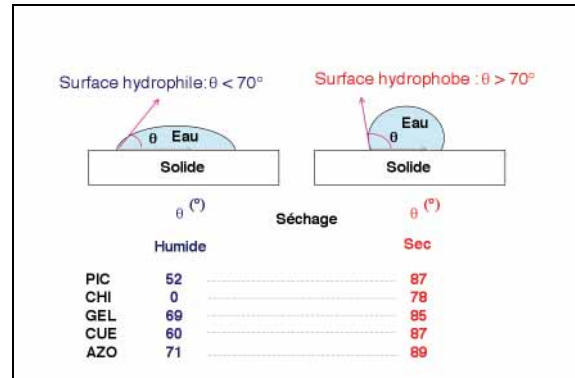
composants liés au développements de cette hydrophobie (Poulenard et al., 2005).

Figure 19 : Mesure de l'hydrophobie par la courbe de MED (Doerr, 1998) pour un páramo brûlé, surpâturé (SP) et cultivé.



Dans notre étude de référence, la simple mesure de l'angle de contact montre que les sols les moins hydrophobes sont les sols à allophanes présentant moins de liaisons organo-métalliques que les autres andosols mais que l'hydrophobie se déclare au simple séchage (Figure 20).

Figure 20 : Variation de l'angle de contact au cours du séchage pour les cinq sites de référence étudiés (Poulenard et al., 2004).



Les extraits organiques de nos andosols rendent des particules de quartz hydrophobes. Les analyses infrarouge des composés organiques des sites référencés des páramos d'Equateur montrent qu'ils sont riches en lipides preuve de leur rôle fondamental dans ce processus. L'explication la plus probable de la genèse de l'hydrophobie serait la suivante : Généralement les plantes alpines se protègent des rayonnements solaires en formant des cuticules riches en cires et en lipides (Beck, 1994, Smith, 1994 ; Lüttge, 1997 ; Körner, 1999). Or lors d'un

changement d'usage l'accès des bactéries minéralisatrices à la macroporosité est favorisée par la rétraction massive provoqué par l'effondrement de la structure lors du séchage du sol. Les pertes en eau sont intimement liées aux pertes en carbone or durant cette phase de minéralisation du carbone, les composés lipidiques et autres composés organiques à longues chaînes sont moins enclins à une minéralisation rapide que les sucres (cellulose) (Boudot et al., 1988) et se concentrent à la surface des micro-agrégats formant autant de particules hydrophobes. De plus lorsque un stress hydrique s'opère comme sous les touffes isolées, il n'y a plus d'eau libre inter-particulaire rendant impossible toute attraction d'eau venue de l'extérieur d'où la genèse d'une hydrophobie extrême (Figure 19, Photo 62).



Photo 62 : Hydrophobie sous une touffe dans le páramo du Chimborazo après une forte averse.

345-3- La mise en culture et l'érosion aratoire

L'érosion aratoire est observée sur les espaces les plus récemment défrichés aux pentes très fortes souvent sur les flancs des cours d'eaux s'encaissant profondément dans les dépôts pyroclastiques (Photo 63).

En effet les flux érodés sont une fonction exponentielle de la pente (Turkelboom et al., 1997). L'érosion est très active pour des longueurs de pente faibles et à partir d'une valeur de pente supérieure à 65%. Sur ces pentes fortes, les paysans équatoriens utilisent beaucoup la houe (*asadon*) perpendiculairement à la pente pour créer des mini-terrassettes pour la culture des pommes de terre.



Photo 63 : Effet de l'érosion aratoire sur une pente très forte dans la province du Carchi. Les cendres anciennes mises à nu sont très peu productives.

345-4- Effets de la mise en culture sur l'érosion hydrique

Contrairement à l'avis souvent émis qui décrit les sols andiques comme stables et fertiles, les mesures en parcelles d'érosion faites par De Noni et al (2002) démontrent que les andosols possèdent une importante susceptibilité à l'érosion une fois cultivés. Cette susceptibilité est nettement plus importante pour les sols aux propriétés andiques que pour d'autres sols de type mollique ou vertique (Tableau 13). Les valeurs de pertes en terres relevées sur les sols de type Inceptisols non dérivant de pyroclastes dans les páramos du Venezuela montrent des valeurs très faibles de pertes en terres ($<58 \text{ g m}^{-2}$; Sarmiento, 2000). Dans les sols formés sur pyroclastes peu évolués, la stabilité structurale des agrégats de surface n'est pas élevée et conduit à une détachabilité importante surtout pour les premières pluies lors du processus de formation de croûtes. Une fois les croûtes formées, le ruissellement plus devient important mais la détachabilité reste faible tant que les flux n'auront pas pris une vitesse suffisante pour créer des ravines.

Tableau 13 : Perte en terre cumulée (g m^{-2}) lors de 4 pluies simulées successives. (De Noni et al., 2002). Seuls les 3 premiers sites sont des sols sur pyroclastes.

	1	2	3	4	5	6
Altitude (m)	3300	3250	2600	2700	1500	220
Pluie 1	39	150	32	0	0	0
Pluie 2	38	648	138	33	45	1
Pluie 3+4	125	892	225	94	95	10

1 : Mojanda, Andosol ; Riobamba, Andosol vitrique ; 3 : Tumbaco, Brunisol andique ; 4 : Jadan, Inceptisol 5 : Vega Grande : Inceptisol vertique ; 6 : Ventanas, Vertisol

En revanche, pour les sols les plus évolués les agrégats demeurent extrêmement stables, l'érosion a lieu par déplacement d'agrégats indurés sous forme de pseudo-sables hydrophobes. Du fait de cette hydrophobie, le ruissellement est tout aussi important sur les sols après une jachère de 3 ans que sur les sols récemment labourés (Figure 21).

Figure 21 Effet du feu, d'une jachère et de la mise en culture sur le ruissellement mesuré par simulation de pluie (Poulenard et al., 2001)

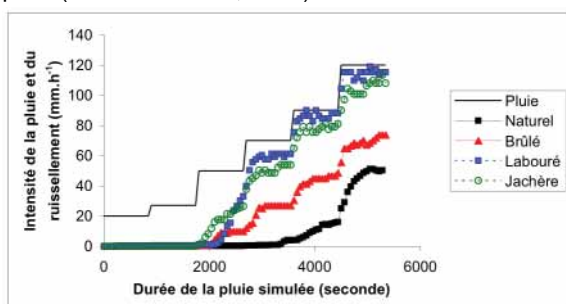


Photo 64 : Agrégats noirs déplacés dans un interbillon durant une culture de pomme de terre dans le páramo d'El Angel (Carchi).

Ces pseudo-sables et agrégats hydrophobes très stables flottent sur la lame d'eau du fait de leur très faible densité (photo 64). Les déplacements d'agrégats peuvent être considérables (jusqu'à plus de 1500 g m^{-2} , 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 14). Ce fait a déjà été mesuré sur les Andosols du Costa Rica par Collinet et

al., (1998). En Equateur, comme au Venezuela (Sarmiento, 2000), les principales manifestations de cette érosion sont visibles après la récolte (en particulier de pommes de terre, photo 64 et 65).

Tableau 14 Perte en terre cumulée (g m^{-2}) et en carbone (en gras) lors de 4 pluies simulées successives.

Site	Pichincha (1) Vitric Andosol		Carchi (2) Melano-Aluandosol	
	terre	carbone	terre	carbone
Naturel	49	6.2	37	7.9
Brûlé	279	33.5		
Labouré	661	82	284	60
Jachère			1465	310

(1) Site proche du profil de référence PIC ; (2) site proche du profil de référence GEL



Photo 65 : Glissement des agrégats en petites loupes de glissement après la récolte des pommes de terre sur une jachère laissée à nu.



Photo 66 : Zones claires, infertiles correspondant aux cendres anciennes affleurant à la suite de l'érosion de l'horizon organique épais de plus de 50 à 70cm. Région de La Libertad, Carchi.

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.

L'ensemble du sol glisse vers l'aval (Photo 65). 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 (Photo 66). Dans ces cas précis, l'érosion aratoire est également très importante.

35. Effets de la mise en usage sur les ressources en eau

L'effet du changement d'usage sur les ressources en eau reste très mal connu. Dans les systèmes à longues périodes de jachère des páramos vénézuéliens cultivés, l'impact d'une culture sur les ressources en eau demeure faible (Sarmiento, 2000, Abadin et al., 2002). Dans un páramo non perturbé sur pyroclastes, le pouvoir régulateur des sols aux événements exceptionnels est important (Buytaert et al., 2004). Dans nos sites étudiés les plus dégradés, les paysans se plaignent d'une recrudescence de l'irrégularité de l'approvisionnement en eau pour l'irrigation sans mesures réelles pour prouver cette variation. Le seul site étudié de manière permanent pour raisons stratégiques est la barrage de Paute dans le sud (province de Cajas et Azuay) qui fournit la majeure partie de l'électricité de l'Equateur (Harden, 1991). La plupart de ces études sont conduites par l'équipe Belge de l'Université de Leuven basée à l'Université de Cuenca. De fréquentes baisses du niveau associé à une sédimentation récente et forte dans le lac peuvent démontrer l'impact du changement d'usage sur la ressource énergétique (Buytaert et al., 2005).

Lors d'une mise en usage, dans les zones les plus dégradées, on peut assister suite à l'encroûtement de surface qui affecte principalement les sols les plus jeunes, ou suite à l'hydrophobie) à de fortes réductions des conductivités hydraulique dans les zones surpâturées très dégradées des páramos secs (Barret et Slaymaker, 1989). Dans ces sols le ruissellement va se développer et les augmentations de débit rapides après les événements pluvieux sera attendue (Basile et De Mascellis, 1999).

Selon les mesures faites par Buytaert et al. (2004) à l'échelle du bassin versant dans le sud de l'Equateur, les mises en usage ont pour effet d'augmenter la conductivité hydraulique d'environ 30% du fait de l'ouverture de la macroporosité. Ainsi les réponses aux crues sont plus rapides avec une restitution de l'eau plus rapide d'environ 40%. Cependant l'amont du bassin est constitué de cendres très évoluées avec une forte teneur en eau et avec une pluviométrie plus forte que dans les zones situées à l'ouest des volcans Chimbarazo, Antizana, Cayambe, ou Cotopaxi toutes soumises à une activité d'élevage plus importante. Dans ces zones l'effet de la mise en usage est tout à fait inconnu.

Dans tous les cas de figure, les páramos mis en usage perdent leur effet régulateur de l'approvisionnement en eau des populations situées plus en aval (Buytaert et al., 2005). Face à cette menace, un projet de loi a été élaboré pour limiter toute intervention humaine à une altitude supérieure à 4000m. Cependant du fait de l'instabilité politique chronique en l'Equateur, aucun gouvernement n'a encore légiféré pour une protection à long terme des zones d'approvisionnement en eau.

Tableau 15 : Perte des teneurs en eau et en carbone dans un páramo humide cultivé (GEL) à Andosol perhydrique et dans deux páramos pâturés à andosols vitriques.

H : Humidité au champ (en g kg⁻¹ sol séché à l'air)

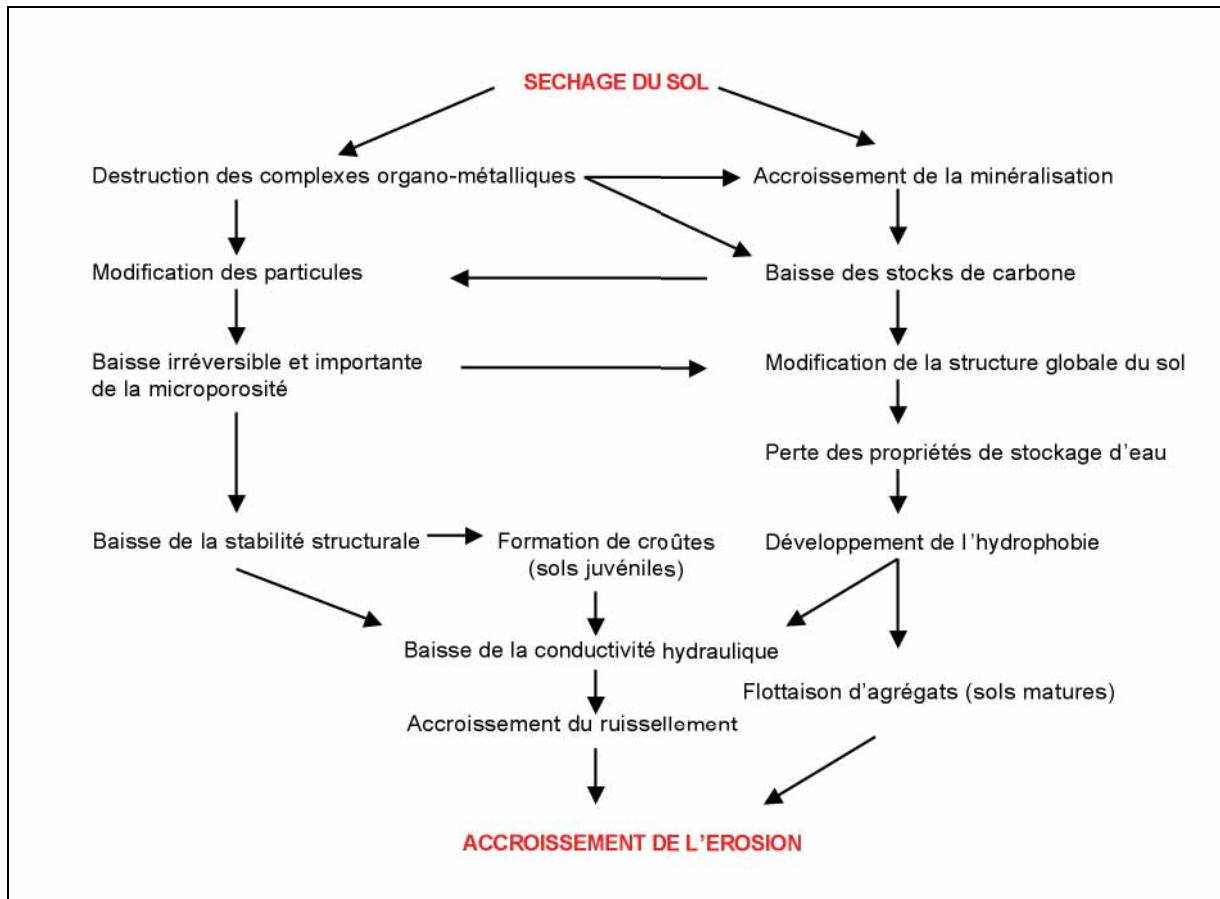
pF 2,5 : Teneur en eau à 33 kPa (en g kg⁻¹ de sol séché à l'air)

C: Contenu de carbone (en g kg⁻¹ de sol séché à l'air)

V%: pourcentage de variation entre les horizons non dégradés et les horizons dégradés

Echantillons	H	V%	pF2.5	V%	C	V%
CARCHI (GEL)						
Naturel	1750		1400		169	
Fin de culture	660	-62				
récolte + 6 mois	950	-46	1050	-25		
récolte + 12 mois			950	-32	124	-27
LLANGAHUA (LLA)						
Non dégradé	900		780		101	
Pâturé	530	-41	680	-12	115	+14
Surpâturé	310	-65	430	-45	79	-21
Très dégradé et érodé	110	-88	200	-74	47	-53
ANTIZANA						
Pâturé	920		910		111	
Très dégradé et érodé	520	-43	480	-47	45	-59
Surface mise à nu	470	-49	390	-57	11	-90

Figure 22 : Tableau récapitulatif des effets de la mise en usage des sols et du séchage sur les phénomènes érosifs dans les páramos.



36. Alternatives à la mise en usage des paramos : Les raisons de réhabiliter la cangahua

Les alternatives à la mise en culture des paramos sont:

- l'augmentation de la productivité des parcelles situées à une altitude inférieure à l'écosystème des paramos et leur protection contre l'érosion (Photo 67).



Photo 67 : Cultures intensives sur fortes pentes et système de terrasses protégeant les cultures de l'érosion. Ambato, Prov. de Tungurahua.

- La mise en valeur des terres érodées situées à basse altitude dans le sillon inter-andin laissant apparaître à la surface du sol les cendres anciennes qui sont indurées (Photo 68). Cette induration se nomme localement la *cangahua* (équivalent mexicain des *tepetates* ou *talpetates* du Nicaragua).



Photo 68 : Sols volcaniques indurés (*cangahua*) en contrebas des sols cultivés montant vers les paramos (flèche jaune) affleurant suite à l'érosion des cendres récentes meubles. Noter l'usage de ces surfaces imperméables comme impluvium pour alimenter les canaux d'irrigation (flèche bleue).

La mise en valeur de la *cangahua* nécessite des investissements financiers généralement importants qui ne se

justifient que dans une approche globale régionale obéissant à une double logique 1.) d'augmentation des surfaces cultivées d'une part, 2.) de protection des paramos, d'autre part. Cette réhabilitation se justifie d'autant plus que la frange altitudinale à laquelle correspond la *cangahua* est située à basse altitude, donc plus chaude, avec un potentiel de productivité plus important et favorable à une très grande diversité de cultures, contrairement aux paramos où les risques de gels sont importants et les cultures peu diversifiées (pomme de terre, fève). La mise en valeur doit être très contrôlée pour éviter une érosion massive et la perte des investissements consentis.

361. Caractérisation de la *cangahua*

La *cangahua* est une formation de cendres volcaniques anciennes indurées qui affleure dans les régions les plus sèches du bassin inter-andin de la moitié nord de l'Equateur, à une altitude généralement comprise entre 2000 et 3200 m. Au-delà de cette altitude, le climat devient plus humide et les niveaux ne sont plus indurés. L'affleurement de la *cangahua* résulte du décapage, à la suite de l'érosion, des cendres volcaniques meubles récentes peu évoluées situées au-dessus de cette formation (De Noni et al., 2001).

La structure est d'origine géologique formée de lapillis accrétionnés durant des explosions massives suivis de dépôts importants occasionnant des perturbations climatiques dans un paléoclimat globalement sec. L'induration se produit à partir d'un matériau saturé d'eau séchant rapidement d'où une prise en masse du matériau. La texture biphasée est constituée de limons fins et sables fins d'où une grande sensibilité à l'érosion. Les argiles sont très mal cristallisées et aucun ciment n'a été clairement identifié

362. Conclusion de l'étude pédologique de la *cangahua* réhabilitée

La *cangahua* est un matériau quasi-stérile. Il ne contient ni carbone, ni azote, ni phosphore. Le matériau une fois fragmenté, n'a pas de structure propre. Il

est alors très sensible à l'érosion. Il faut donc redonner de la vie à ce matériau quasi-stérile car le simple ajout d'engrais chimique ne semble pas suffisant, d'où la mise en place d'un essai de réhabilitation (Quantin et Zebrowski, 1997).

Une fois mis en valeur par rotation mécanique, leur structure étant géologique et non pédologique, leur amélioration à court terme ne passe pas par les classiques amendements organiques. La sensibilité à l'érosion et à la défragmentation ne dépend ni des amendements organiques, ni de la présence de racines de graminées mais à l'état initial du sol et la présence d'argiles gonflantes accentuant le processus de dégradation. La simulation de pluie confirme les études de stabilité structurale de laboratoire. Un travail du sol minimum et le maintien d'une couverture végétale constante au sol évitent la destruction mécanique des fragments. La productivité agronomique, peut être très élevée ($25 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) en cas de fertilisation adaptée et d'une alimentation hydrique satisfaisante (Germain et al., 2000).

37. Bilan de la mise en usage des páramos - perspectives

L'usage des páramos pour l'élevage peut être envisagée avec des charges à l'hectare raisonnables (projets CAMAREN, 2000). Des projets existent pour l'introduction de camélidés (alpacas) qui protègent les plants du piétinement contrairement à l'élevage ovin qui reste très dégradant (White and Maldonado 1991).

La mise en usage des sols conduit à une transformation rapide des propriétés du sol qui conduisent à une baisse rapide des propriétés de stockage d'eau et aussi du carbone (Tableau 15). Le séchage irréversible et le développement de l'hydrophobie conduisent à un accroissement du risque érosif et à une baisse de la fonction régulatrice du páramo (Figure 22).

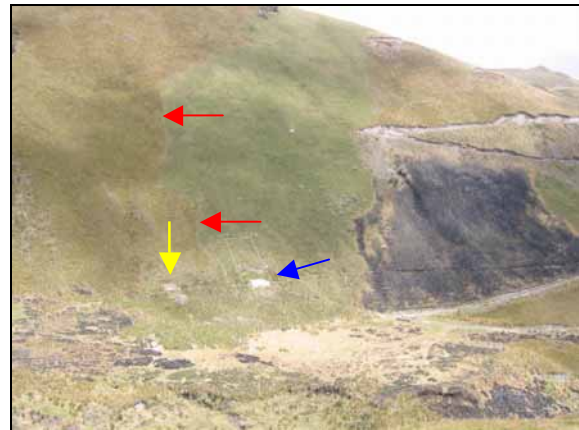


Photo 69 : Site d'étude PIC avec parcelles de simulation de pluie et parcelle de ruissellement et collecteur d'eau (flèche bleue). Vue 6 ans APRES la simulation de pluie. La limite du feu est toujours visible (flèches rouges) et les parcelles mises à nu pour mesurer l'érosion sont toujours sans couvert végétal continu (flèche jaune).

En revanche il n'existe aucune étude à l'échelle du bassin versant basée sur le long terme. Si les effets du séchage sont très rapide, en revanche les effets sur les débits de rivière semblent assez peu documentés. L'équipe Belge de l'Université de Leuven insiste sur les mesures à long terme pour valider les effets des mises en usage. Aucune étude au long terme n'existe pour valider certaines pratiques culturales au long terme (couper le páramo au lieu de brûler par exemple). Les effets du brûlis ou d'un labour sont toujours visibles plus de six années après une intervention humaine (Photo 69).

Dans le cadre purement érosif, aucune mesure n'a permis de donner des valeurs fiables sur les pertes solides dans les cours d'eau drainant les bassins versants en végétation naturelle ou cultivés. Le devenir des agrégats riches reste mal connu. Dans les zones plus en aval, plus sèches et plus chaudes, la minéralisation de la matière organique est beaucoup plus rapide. Une partie de ce carbone sous forme soluble ou particulaire 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 ?

III - EFFETS DU CHANGEMENT D'USAGE SUR LES FLUX ÉROSIFS

Le programme MSEC au Vietnam

Les limites de notre étude en Equateur portaient sur la mesure de la modification des flux hydriques ou particuliers après la mise en usage. Ces mesures nécessitent l'équipement de petits bassins versants représentatifs sur forte pente et des mesures sur le long terme dans une région soumise aux changements d'usage rapides des sols.

L'UR ECU (Erosion et changements d'usage, Valentin 1999) qui est devenue l'UR Solutions (Sols Usage, Dégradation et réhabilitation) au sein du programme MSEC (Management of Soil and Erosion Consortium, IWMI 2003) au sein de l'International Water Management Institute (IWMI) permettait une étude intégrée au sein d'une équipe multidisciplinaire (hydrologues, géochimistes, pédologues agronome, socio-économistes) d'une trentaine de personnes dont une dizaine de permanents IRD, à l'échelle du bassin versant dans trois pays différents: La Thaïlande, le Laos et le Vietnam (Craswell et al., 1998, 2001).

Activités de l'Unité de Recherche liés à l'érosion et à la dégradation des terres

Les activités se structurent selon trois axes :

- 1 - Analyser les systèmes de culture sous fortes contraintes biophysiques ;
- 2 - Comprendre et modéliser des processus de dégradation des terres (érosion hydrique érosion aratoire à différentes échelles) et leurs conséquences hors sites (qualité des eaux et sédimentation) ;
- 3 - Définir, tester et proposer de nouvelles pratiques de réhabilitation des terres (cultures sans travail du sol, jachères améliorées, cultures pérennes et pâturages).

Le questionnement scientifique

Les questionnement scientifique proprement pédologique s'inscrit dans la seconde étape dégradation des sols et des effets de cette dégradation sur le sol.

Sur les processus

- **Quelle est la part liée aux propriétés intrinsèques du sol (chimiques, physiques et biologiques) sur les processus de dégradation lors du changement d'usages des terres ?**
- **Quel est l'effet du changement d'usage sur ces mêmes terres les propriétés des sols et la qualité des eaux *in situ* et hors site ?**

Sur la quantification des flux

- **Quel est l'effet du changement d'usage sur la nature et les constituants des flux érosifs ?**
- **Quels aménagements des terres à l'échelle locale peuvent promouvoir une limitation des flux érosifs et une meilleure gestion de l'eau *in situ* et hors site ?**

La quantification de l'érosion s'effectue non seulement au niveau du seul détachement à l'échelle de la parcelle mais sur les flux érosifs d'eau et de terres au sein d'un bassin versant, de l'amont vers l'aval et des mécanismes de transfert. Ainsi on pourra effectuer un bilan comparatif de l'érosion entre les différents bassins MSEC en Asie mais aussi dans d'autres régions du monde comme le programme SSI-Potchini en Afrique du Sud.

Méthodologie :

Le programme MSEC a été mis en place en 1996 pour 12 années dans 6 pays d'Asie du Sud-Est (Népal, Indonésie, Laos, Philippines, Thaïlande, Vietnam ; Magliano et al. 2002). Actuellement nous sommes dans la phase IWMI 2 pour 3 équipes de l'UR 176 de l'IRD au Laos en Thaïlande et au Vietnam (Magliano et al., 2003 ; Magliano et Valentin , 2003). L'échelle de mesure du programme MSEC est un petit bassin versant entre 50 et 100ha sur forte pente (parfois plus de 100%) dans des zones rurales à forte extension des zones cultivées. Les bassins versant sont tous équipés d'une station météorologique automatique et la mesure de la quantité de sol érodée est effectuée dans des séries de seuils hydrologiques Parshall équipés (limnigraphe, préleveurs automatiques, pièges à sédiments) délimitant des sous bassins avec un usage du sol différent (tests culturaux). Dans ces trois sites, le climat est de type mousson avec une saison des pluies avec des averses de forte intensité concentrée entre avril et octobre allant de 1100 mm en Thaïlande à 1700 mm/an au Vietnam.

Au Vietnam, la mesure de l'érosion et des flux hydriques s'effectue dans un bassin versant de 50 ha à 50 km à l'est de Hanoi (site de Dong Cao) sur des pentes dépassant 100%. Les activités de recherche de l'équipe UR176 au Vietnam s'articulent autour de deux pôles complémentaires de la recherche sur l'érosion, à savoir : *gestion de l'eau et gestion de la fertilité des sols*, en associant conjointement les sciences hydrologique, pédologique, géochimique, agronomique et socio-économique.

Une campagne de trois années de collecte de données s'est focalisée sur la mesure du ruissellement et du détachement sur des parcelles de ruissellement de 1m². Parallèlement nous avons suivi la caractérisation des sols (propriétés physiques, chimiques et biologiques) sous différents usages puis après changements d'usage et leur influence sur les processus hydrodynamiques et l'érodibilité des sols.

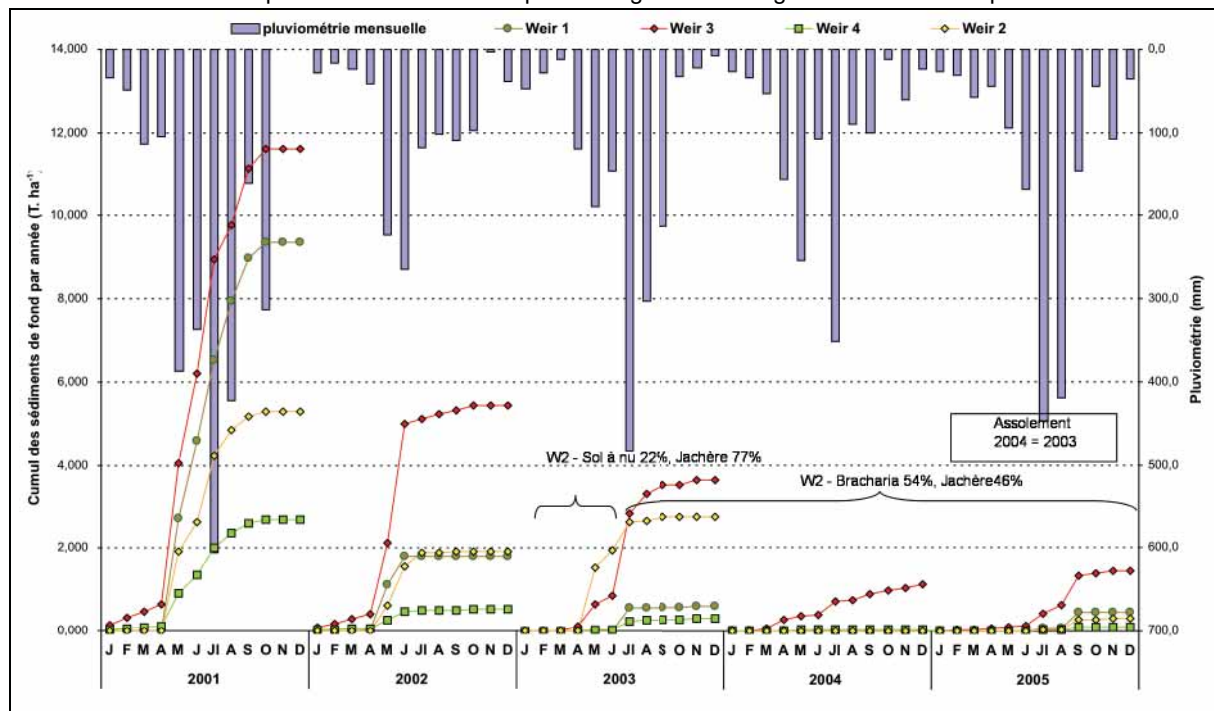
Impact des turricules de vers sur l'infiltration et sur les transferts de fertilité. (1) de s'intéresser aux transferts de fertilité du m² au versant, et du versant aux zones basses rizicoles, par des études couplées de la structure des sols, de l'écologie des sols et de la géochimie des flux d'eau et de perte en sol (2) d'utiliser la modélisation distribuée pour simuler l'impact des techniques culturales à partir de scénario d'usage.

Premiers résultats au Vietnam

Au Vietnam les sols sont profonds, très poreux avec un très bon drainage, mais ils sont très acides et désaturés. L'argile exclusive est la Kaolinite sauf dans les sols les moins profonds où les interstratifiés illite-smectite apparaissent. Cette érosion n'est pas dépendante des pentes et semblerait plus importante dans les piémonts à faible pente mais cultivés de manière plus intense. L'érosion affecte en premier lieu les sols avec des cultures intensives comme le manioc. pour des raisons économiques, le manioc a cessé d'être cultivé à partir de l'année 2002 où il occupait 40% du bassin versant au profit d'une jachère ou d'une plantation d'arbres de type Acacia (Orange et al. 2003). On note une baisse concomitante de l'érosion de 10t/ha à moins d'une t/ha (Figure 23). *Cette érosion est donc beaucoup plus faible que celle décrite dans la littérature ou présentée dans des modèles régionaux.* Cette érosion est surtout importante lors des crues exceptionnelles (passages de typhons).

Au niveau des parcelles d'érosion on peut observer un ruissellement assez important sous culture de manioc (30%), un peu moindre sous *Bracharia* (15%), très faible sous forêt ou jachère (<5%). L'érosion en nappe sous manioc est sélective (affectant la surface du sol plus fertile) alors que sous *Bracharia* elle est non sélective mais ravinaire et affecte donc l'ensemble du sol dans les chemins de l'eau. Elle est donc plus limitée.

Figure 23 : Evolution des exportations annuelles des sédiments de fond durant 5 années consécutives dans un bassin versant sur forte pente au nord vietnam après changement d'usage en fonction de la pluviométrie.



Weir 1 = manioc puis plantation d'arbres (principalement *Acacia mangium*) à partir de 2000 ; Weir 2 = manioc puis sol à nu entre 2002 et 2003 puis plantation de *Bracharia ruziziensis* ; Weir 3 = culture annuelle de manioc, plantation d'*Acacia mangium* à partir de 2003 ; Weir 4 = forêt secondaire et jachère.

On observe par endroits une activité biologique (lombrics et termites) parfois extraordinaire (50 turricules de plus de 80 g m^{-2}). Les vers de terre effectuent une ségrégation physico-chimiques concentrant les éléments nutritifs dans les turricules. Dans ces turricules le pH, les teneurs en carbone, en polysaccharides sont plus importantes que dans le sol encaissant accroissant la stabilité structurale et l'hydrophobie des fragments de turricules (études en cours). Ces turricules se fragmentent et sont emportés dans les processus d'érosion. L'érosion affecte principalement non pas des agrégats dispersés mais des agrégats très stables dérivant de la fragmentation des turricules et enrichis en éléments nutritifs. L'importance de cette ségrégation biologique a eu pour effet d'initier et de soutenir un programme de recherche spécifique sur l'activité biologique avec Pascal Jouquet de l'UMR 137 Biosol du Laboratoire d'Ecologie des Sols Tropicaux (LEST) de Patrick Lavelle.

Premiers résultats en Asie

Les sites de Thaïlande, de Laos et du Vietnam sont presque situés sur le même parallèle. Les sols sont tous à dominante de kaolinite sur schistes. Cependant le site de Thaïlande possède le plus d'argile gonflantes dans ces sols qui ont une susceptibilité plus importante à l'érosion. Cette érosion est plus importante sur les zones planes des sommets de collines au Vietnam et au Laos par où le défrichement a commencé, au Vietnam ce sont les zones de piémont elles aussi sous faible pente qui sont les plus érodées. Plus les sols sont érodés, plus leur susceptibilité à l'érosion est grande. Les cultures annuelles répétées provoquent une érosion en nappe massive tandis que les plantations d'arbres et de pâturage réduisent fortement l'érosion. Ce cas est observé au Vietnam où l'érosion a été fortement réduite depuis 3 années. En revanche en Thaïlande, les sols sont plus fertiles et sont donc plus intensivement exploités. L'érosion y est donc plus intense aux environs de $3 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$.

Projet SSI en Afrique du sud

Cette étude débutera en octobre 2006. Elle permettra d'évaluer l'état de dégradation des sols et de quantifier l'évolution de cette dégradation en utilisant des indicateurs physiques, chimiques et biologiques. On étudiera particulièrement les différentes options de gestion des sols par le suivi des productions agronomiques et éco pastorales, et leurs effets sur la protection des sols et la disponibilité des eaux à différentes échelles, de la parcelle paysanne au bassin versant. Cette recherche sera menée en collaboration avec l'université du KwaZulu-Natal de Pietermaritzburg, le Farmer Support Group, l'IRD France et l'IWMI South Africa.

Contexte

Quels sont les travaux réalisés antérieurement à ce sujet ? Un projet SSI (*Small holder system innovations in integrated watershed management*) mené par nos partenaires de l'Université de KwaZulu natal auquel est associé l'IWMI SA est en cours. Ce projet porte sur l'étude intégrée du petit bassin versant de Potshini (2 km²) situé dans les "midlands" au pied de la chaîne du Drakensberg. Dans sa partie amont, fortement dégradée par surpâturage, le site est occupé par une communauté Zulu développant des cultures vivrières tandis qu'à l'aval du bassin versant se situe une retenue d'eau servant à l'irrigation d'un système de culture intensive et mécanisée. Notre recherche s'intégrera dans ce projet et développera complétera des thématiques complémentaires.

Une collaboration entre l'université du KwaZulu Natal et l'IWMI au sein des midlands du KwazuluNatal a permis de développer une cartographie de différents paramètres du milieu. Ainsi, il a été défini ce qui s'est passé pour les petits propriétaires terriens au niveau impact environnemental et hydrologiques. De nouvelles technologies ont été introduites (semis direct, cultures associées) Cependant il n'a pas été répondu aux questions suivantes :

Quel est l'impact environnemental du surpâturage sur l'hydrodynamique dans les sols et sur l'érosion conduisant à la genèse et au développement des ravines à l'augmentation de l'eau ruisselée dans les lacs et à leur comblement par les sédiments.

Objectifs et démarche scientifique

Quel est l'objectif principal de ce projet ? Il contribuera à l'amélioration des revenus des fermiers et à la qualité de vie des communautés rurales du Kwazulu Natal à travers la réhabilitation et la pérennité de l'usage des ressources en eaux et en terres. L'objectif principal et final étant de réduire la pauvreté, d'améliorer la production alimentaire au niveau des familles et de générer une stabilité accrue de l'écosystème par le développement, la promotion et l'adoption de stratégies permettant de remédier à la dégradation des terres et de préserver les paysages du KwaZulu Natal.

Les objectifs spécifiques de ce projet sont :

- **La mesure de la dégradation et de ses conséquences** sur les effets hors site par la détermination des processus et des mécanismes qui accélèrent les pertes en terre et leur quantification sous élevage extensif et sous cultures traditionnelles et leurs impacts sur la qualité des eaux à différentes échelles au sein des midlands de la province du KwaZulu Natal ; Par le développement d'outils appropriés pour évaluer et limiter la dégradation des terres ainsi que de techniques permettant leur réhabilitation par les fermiers et les autres usagers de ces terres ;
- Les propriétés chimiques incluront la minéralogie des sols, le carbone, l'azote et les éléments chimiques majeurs. Les propriétés physiques des sols étudiés seront la

porosité, la compaction des sols, la stabilité structurale des agrégats, la mouillabilité, l'encroûtement et l'hydrophobie.

- Le ruissellement et l'érosion seront mesurés au sein de bassins versants déjà équipés de seuils jaugeurs et de pièges à sédiments durant les saisons des pluies. Les seuils jaugeurs et les pièges à sédiments permettront le suivi des changements d'usages des terres ainsi que le suivi des essais d'amélioration de l'écosystème menés durant cette étude. Des parcelles de mesures de l'érosion seront installées pour chaque type d'usages des terres. Sept sites potentiels ont d'ores et déjà été recensés par nos partenaires
- Une carte de dégradation des sols sera établie basée sur l'occupation et les propriétés des sols. Après chaque forte pluie, on comparera la densité apparente des sols et la composition du matériel érodé pour quantifier la part de l'érosion à la dégradation générale des terres. Des indicateurs biologiques pourront contribuer à caractériser les sols dégradés incluant la vitesse de minéralisation du carbone (respirométrie).

➤ **La réhabilitation des terres :**

- Par le développement d'outils appropriés pour évaluer et limiter la dégradation des terres ainsi que de techniques permettant leur réhabilitation par les fermiers et les autres usagers de ces terres ;
- Par l'introduction de systèmes agro-pastoraux permettant de contrôler l'érosion et de stopper le déclin de productivité de ces systèmes à travers le développement de bassins versants pilotes gérés par les utilisateurs de ces terres.

➤ **La formation** par l'amélioration de la capacité nationale de recherche en terme d'étudiants, d'agents de la recherche spécialisés dans l'évaluation et le contrôle des terres dégradées.

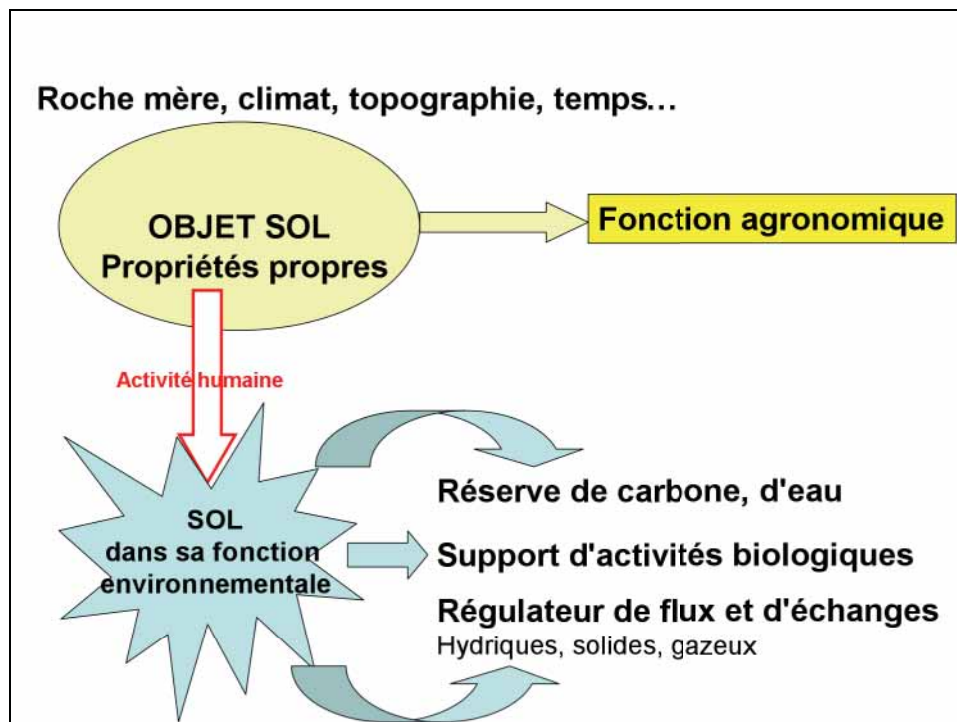
Le but principal de ce programme de recherche est de fournir de solides connaissances pour l'utilisation optimale des ressources en sols et eaux par les petits propriétaires des bassins versants amont dégradés et sur pâturés de la province de KwaZulu Natal.

IV. CONCLUSION

Si la première fonction des sols est une fonction agronomique au travers de ses propriétés chimiques, le sol doit être envisagé dans sa fonction environnementale à travers ses composantes minéralogiques, chimiques, physiques et biologiques.

Les sols présentent des propriétés les rendant plus ou moins sensibles à l'érosion ou à leur dégradation. La susceptibilité à l'érosion est un compromis entre les facteurs intrinsèques du sol favorisant leur dégradation et leur érosion par des processus mettant en jeu *la chimie des sols* comme la dispersion par les sels, l'hydrophobie, *la texture et la minéralogie et la physique des sols* comme la dispersion mécanique par le gonflement retrait des argiles, l'encroûtement, ou *la biologie des sols* comme la formation de turricules et leur délitement et les facteurs stabilisant les sols comme la matière organique et les hydroxydes stabilisant les agrégats ou la formation de micro-agrégats stables et l'établissement d'une rugosité de surface. L'activité humaine modifie les propriétés intrinsèques des sols qui non contrôlées accroissent souvent la sensibilité à la dégradation. Cette dégradation affecte non seulement des fonctions agronomiques des sols mais aussi de la fonction environnementale de la couverture pédologique (schéma 24).

Figure 24 : Schéma de l'évolution de la pédologie : le sol était d'abord considéré comme un support à la fonction agronomique mais il faut reconsidérer le sol dans sa fonction environnementale et sous influence anthropique



L'exemple de la Nouvelle Calédonie montre en premier lieu que la répartition des sols dans le paysage n'est pas le fruit du hasard. L'usage agronomique du sol nécessite de prendre en compte la nature des sols, leur disposition dans le paysage et leur fonctionnement.

L'exemple de l'Equateur et des sols des páramos montre que les sols évoluent en fonction de facteurs environnementaux (roche-mère, climat, temps). Plus les sols sont évolués plus ils participent au stockage d'eau et de carbone, plus ils sont efficaces dans leur activité régulatrice des flux hydriques. Cependant après mise en usage, les constituants mêmes du sol seront modifiés. Cette modification sera d'autant plus forte que les sols seront évolués et les propriétés de stockage ou de régulation des flux seront altérés.

L'exemple de Thaïlande montre d'une part que l'usage du sol dépend de ses propriétés chimiques favorables et présente donc un facteur de risque de dégradation plus grande qu'un sol avec des propriétés chimiques a priori plus défavorables mais que l'érodibilité propre au sol du au gonflement-retrait des agrégats est d'autant plus important que le sol est érodé.

L'exemple vietnamien montre d'une part une ségrégation chimique effectuée par l'activité biologique d'autre part que les flux hydriques diminuent lorsque l'on remplace une culture annuelle par une plantation d'arbres et d'autre part que les flux de particules érodées diminuent régulièrement durant 4 années après la fin des cultures annuelles avant atteindre un état d'équilibre mais la prévision des flux est loin d'être la règle générale.

Lorsque ce transfert de fertilité ou de flux s'effectue au sein d'une même communauté agricole, la gestion de l'érosion peut être canalisée. En revanche, elle est beaucoup plus problématique lorsqu'elle se fait entre 2 communautés distinctes aux intérêts économiques contradictoires...

Dans le futur programme en Afrique du sud nous serons face à plusieurs défis :

- L'érosion et les pertes en terres qui appauvrissent les sols ;
- La diminution par ruissellement de la quantité d'eau stockée dans le sol et qui pourraient bénéficier à un système de cultures plus productif ;
- Le ruissellement et l'érosion qui diminuent la qualité des eaux pour l'usage domestique ou l'irrigation ;
- La présence de deux communautés distinctes entre la partie amont et la partie aval du bassin versant, aux intérêts parfois divergents quant à l'usage de l'eau.

Par la méthode des mesures de flux dans un bassin versant nous espérons réhabiliter les sols dégradés et mettre en évidence à la fois une amélioration de la fonction agronomique du sol mais aussi de sa fonction environnementale.

Nous espérons que les programmes futurs intégreront d'une part les propriétés des sols puis leur évolution après changement d'usage et ainsi de pouvoir mieux anticiper les modifications des flux et des transferts entre l'amont et l'aval.

V. BIBLIOGRAPHIE.

Chapitre I. Des constituants du sol à la mise en usage

Exemple des vertisols à gypse de Nouvelle Calédonie

- J. G. Bockheim, 2005. Soil endemism and its relation to soil formation theory. *Geoderma*, 129, 109-124.
- Podwojewski P. et Beaudou, A.G., 1987. Carte morpho-pédologique de la Nouvelle Calédonie au 1/200 000. Conventions sciences de la Terre pédologie n°1, convention n°585, Nouméa : ORSTOM. Tome 1: Avant-propos et présentation générale, 15p. Tome 2: Légende de la carte, 17 planches. Tome 3 : possibilités d'utilisation du milieu, 5 planches. 4 cartes au 1/200 000.
- Podwojewski, P., 1988 - Les vertisols de Nouvelle Calédonie, Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XXIV, n°4, 279-301.
- Podwojewski, P. 1989 a. Les sols et paysages morpho-pédologiques de Nouvelle Calédonie, réédition Encyclopédie de Nouvelle Calédonie., Tome 1, Géographie physique, Nouméa, Nefo Diffusion., p. 141-163.
- Podwojewski, P., 1989b La pédologie ou la Science du sol. In Atlas de Nouvelle Calédonie, réédité en 1992. Coordination éditoriale J. Mathieu-Daudé, Nouméa, édition du Cagou, Hachette Calédonie., p 26-27.
- Podwojewski, P. and Beaudou, A., 1991. Vertisols of New Caledonia ; morphological, chemical and physical properties ; and classification. In : Proceedings of the sixth international soil correlation (VI ISCOM) : Characterization, classification, and utilization of cold aridisols and vertisols, J.M. Kimble ed., Soil conservation service, Soil management support services, USDA., 151-158.
- Podwojewski, P., 1992. Les vertisols à gypse de Nouvelle Calédonie dans leur environnement pédologique. Thèse de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg. Tome 1: 261p., Tome 2: Annexes 247p. Edition ORSTOM, T.D.M., N°105, F5, 1993, 261p.
- Référentiel pédologique, 1995. Baize, D. et Girard, M.C. (Coordination scientifique) Techniques et pratiques, AFES-INRA éditions. Baize, D., Boulaine, J., Kaloga, B., Podwojewski, P. et Rossignol, J.P. (Groupe de travail vertisols), Leptosmectisols, p. 191-192 ; Vertisols, p. 263-272.
- Podwojewski, P. et Delaune, M., 1993. Mise en évidence d'une source détritique ultrabasique dès l'Eocène moyen dans les flyschs du bassin de Nouméa (Nouvelle Calédonie). C.R. Acad. Sci. Paris, t. 316, Série II, 1423-1430.
- Podwojewski, P., 1994. Signification pédologique et paléoclimatique de la présence de gypse dans des vertisols de la côte ouest de l'île de Malekula (Vanuatu). C.R. Acad. Sci. Paris, t. 319, série II, 111-117.
- Podwojewski, P. and Arnold, M., 1994. The origin of gypsum in Vertisols in New Caledonia determined by isotopic composition of sulphur. *Geoderma*, 63: 179-195.
- Podwojewski, P., 1995. The occurrence and interpretation of carbonate and sulfate minerals in a sequence of vertisols in New Caledonia. *Geoderma*, 65: 223-248.
- Toulkeridis, T., Podwojewski, P., and Clauer, N., 1998. Tracing the source of gypsum in New Caledonian soils by REE contents and S-Sr isotopic composition. *Chemical Geology*, Vol. 145, 1-2: 61-71.

Chapitre II. De l'usage des sols à leurs constituants

Etude d'un écosystème d'altitude : LES PÁRAMOS en Equateur

En gris les publications ayant un impact régional

- Abadín J., González-Prieto S.J., Sarmiento L., Villar M.C., Carballas T., 2002. Successional dynamics of soil characteristics in a long fallow agricultural system of the high tropical Andes. *Soil Biology and Biochemistry* 34, 1739-1748.
- 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
- Allen, C. E.; Burns, S. F., 2000. Characterization of Alpine Soils, Eagle Cap, Wallowa Mountains, Oregon. *Phys. Geogr.* 20 (3), 212-222.
- Aran D., Gury M., Zida M., Jeanroy E. et Herbillon A J, 1998. Influence de la roche-mère et du climat sur les propriétés andiques en régions montagnarde tempérée (Vosges, France). *European Journal of Soil Science*. 49, 269-281.
- 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 E.J. 1984. La escurrentia del Teritorio ecuatoriano. *Thesis pHD*. University of Lomonosov. Faculty of geography, Moscow, 174 p.
- Balesdent, J. and Guillet, B., 1982. Les datations par le ^{14}C des matières organiques des sols. Contribution à l'étude de l'humification et du renouvellement des substances humiques. *Science du Sol*. 2: 93-112
- Baldock J, Longo R. 1982. Geological map of Ecuador. Map at 1/1000 000. *Institute of Geological Science (NERC) London, U.K.*; Ministerio de Recursos Naturales y Energéticos, Quito, Ecuador.
- Barberi F., Ghigliotti M., Macedonio G., Orellana H., Pareschi M T. et Rosi M., 1992. Volcanic hazard assessment of Guagua Pichincha (Ecuador) based on past behaviour and numerical models. *Journal of Volcanology and geothermal research*. 49, 53-68.
- Barret, G., Slaymaker, O., 1989. Identification, characterization and hydrological implications of water repellency in mountain soils, Southern British Columbia. *Catena*, 16 477-489.
- Bartoli F., Burtin, G. and Herbillion, A.J., 1991. Disaggregation and clay dispersion of Oxisols : Na resin, a recommended methodology. *Geoderma*. 49: 301-317.
- Basile A., De Mascellis R., 1999. Change of hydraulic properties and solute transport parameters in volcanic soils after drying. In: Modelling of transport processes in soils, J. Feyen and K. Wiyono eds, International workshop of EurAgEng's field of interest on soil and water, 24-26/11/99, Leuven Belgium. CIP Wageningen 267-275.
- Basile-Doelsch I., Amundson R., Stone W.E.E., Masiello C.A., Bottero J.Y., Colin F., Masin F., Borschneck D. and Meunier J.D., 2005. Mineralogical control of organic carbon dynamics in a volcanic ash on La Reunion. *European Journal of Soil Science*, 53, 563-574.
- Batjes N.H. 1996. Total carbon and nitrogen of the soils in the world. *Eur. J. Soil Sci.* 47: 151-163.
- Baumler R and Zech W. 1994. Characterization of andisols developed from nonvolcanic material in eastern Nepal. *Soil science* Vol. 158 no.3, 211-217.
- Beck E., 1994. Cold tolerance in tropical alpine plants. In: Rundel, P.W., Smith, A.P. and Meinzer, F.C. (eds.) *Tropical alpine environments. Plant form and function*. Cambridge University Press, Cambridge, pp 77-110.
- Bielders C.L., De Baker L.W. and Delvaux B., 1990. Particle density of volcanic soils as measured with a gas pycnometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 822-826
- Blakemore L C., Searle P L. et Daly B K., 1981. Methods for chemical analysis of soils. New Zealand Bureau Scientific Report 80.
- 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.
- Boudot, J.P., Hadj, A.B., and Chone, T., 1988. Dependence of Carbon and Nitrogen mineralization rates upon amorphous metallic constituents and allophanes in highland soils. *Geoderma*. 42: 245-260
- Buytaert, W., Deckers, J., Dercon, G., De Bièvre, B., Poesen, J. and Govers, G., 2002. Impact of land use change on the hydrological properties of volcanic ash-soils in South Ecuador. *Soil use and management*, 18: 94-100.
- Buytaert, W., De Bièvre, B., Wyseure, G., and Deckers, J., 2004. The use of the linear reservoir concept to quantify the impact of changes in land-use on the hydrology of catchment in the Andes. *Hydrology and Earth System Sciences* 8(1), 108-114.
- Buytaert, W., Wyseure, G., De Bièvre, B. and Deckers, J., 2005. The effects of land-use changes on the hydrological behaviour of Histic Andosols in South Ecuador. *Hydrological process*, 19: 3985-3997.
- Buytaert W, Deckers, J and Wyseure, G., 2006. Description and classification of nonallophanic Andosols in south Ecuadorian alpine grasslands (páramo). *Geomorphology*, 73, 207-221.
- CAMAREN, 2000. Manejo de Páramos y zonas de Altura. Sistemas de producción: manejo de pastos de altura. Coordination IEDECA. CAMAREN, Quito. pp 133.
- Caner L, Bourgeon G, Toutain F, Herbillion AJ. 2000. Characteristics of non-allophanic Andisols derived from low activity clay regolith in Nilgiri Hills (Southern India). *Eur. J. of Soil Sci.*, 51: 553-563.
- Collinet J Asseline J Jimenez F Bermudez AT & Dromard S 1998. Comportements hydrodynamiques et érosifs de sols volcaniques au Costa Rica. Rapport CATIE. Turrialba. pp 18.
- Colmet-Daage F., Cucalon F., Delaune M., Gautheyrou J., Gautheyrou M. et Moreau B., 1967. Caractéristiques de quelques sols d'Equateur dérivés de cendres volcaniques. 2^o partie : Conditions de formation et d'évolution. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* V, 353-392.
- Colmet-Daage F., De Kimpe C., Delaune M., Sieffermann G., Gautheyrou J., Gautheyrou M., Fusil G. et Koukoui M., 1969. Caractéristiques de quelques sols d'Equateur dérivés de cendres volcaniques (3^{ème} partie). *Cahiers ORSTOM, série pédologie*, Vol. VII, n^o4, 495-560.
- Cuatrecasas, J., 1968. Páramo vegetation and its life form. *Colloquium geographicum*. 9: 163-186.
- Dahlgren R., Shoji S. et Nanzyo M., 1993. Mineralogical characteristics of volcanic ash soils. In *Volcanic ash soils. Genesis, properties and utilization*. S. Shoji (Ed), Elsevier science, Development in soil science 21, pp. 101-142.
- Dahlgren, R.A., Saigusa, M. and Ugolini, F.C., 2004. The nature, properties and Management of Volcanic soils. *Advances in Agronomy*, 82: 113-182.

- De Noni G., Viennot M. et Trujillo G., 1990. Mesure de l'érosion dans les Andes de l'Equateur. Cahier ORSTOM sér. Pedo. 25, 1-2, 183-196.
- 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.
- De Noni G., Asseline, J. et Viennot M., 2000. Erosion des sols volcaniques de la cordillère des Andes en Equateur, Revue de Géogr. Alpine, 2, 13-26.
- De Noni, G., Viennot, M. Asseline, J. & Trujillo, G. 2001. Terres d'altitude, terres de risque. La lutte contre l'érosion dans les Andes équatoriennes. *Latitudes*, **23**, IRD Paris.
- DeBano, L.F., 1981. *Water repellent soils: a state of the art*. Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, USDA Forest Service General Technical Report PSW-46, Berkley, CA.
- DeBano, L.F. 2000. Water repellency in soils: a historical overview. *Journal of Hydrology*, **231-232**, 4-32.
- 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.
- Doerr SH 1998. On standardizing the "water drop penetration time" and the "molarity of an ethanol droplet" techniques to classify soil hydrophobicity : a case study using medium textured soils. *Earth Surface Processes and Landforms* 23, 663-668.
- Doerr, S.H., Shakesby, R.A. & Walsh, R.P.D. 2000. Soil water repellency: its causes, characteristics and hydrogeomorphological significance. *Earth Science Reviews*, **51**, 33-65.
- Egashira K Kaetsu Y & Takuma K 1983. Aggregate stability as an index of erodibility of Ando soils. *Soil Science and Plant Nutrition* 29 (4), 473-481.
- Escobedo-Urquizo J. 1980. Les sols des páramos. Etude pédogénétique dans les hautes andes du Pérou septentrional. *Thèse de sciences agronomiques*. Faculté des sciences de Gembloux. 410 pp.
- Faivre P., 1988. Lessivage et planosolisation dans les séquences de sols caractéristiques des milieux intrandins de Colombie (Amérique du sud). Thèse de l'Université de Nancy I, 563 pp.
- FAO, 1998. World Reference Base for soil resources. Dekkers, J.A., Spaargaren, O.C., Nachtergaele, F.O., Oldeman, L.R. et Brinkman, R. (Editors) World Soil Resources Reports 84. FAO, ISRIC, ISSS Rome.
- Farley, K.A. and Kelly 2004. Effects of afforestation of a páramo grassland on soil nutrient status. *Forest Ecology and Management*, 195 : 281-290.
- Farley, K.A., Kelly, E.F. and Hofstede, R., 2004. Soil organic carbon and water retention after conversion of grasslands to pine plantations in the Ecuadorian Andes. *Ecosystems*, 7: 729-739.
- Fehse, J., Aguirre, N., Paladines, C., Hofstede, R. and Sevink, Y., 1999. La productividad de cuatro bosques secundarios en la Sierra del Ecuador. *Ecopar*, Quito, 41p.
- Fox, R.L. 1980. Soils with variable charge : agronomic and fertility aspects. In : Soils with variable charge. Theng, B.K.G. ed. Soil Bureau, Department of Scientific and Industrial Research. Lower Hutt. New Zealand Society of Soil Science. p. 195-224.
- Fritz B, Tardy Y. 1973. Etude thermodynamique du système gibbsite, quartz, kaolinite, gaz carbonique. Application à la genèse des podzols et des bauxites. *Sci. Geol. Bull.* 26, (4): 339-367.
- Germain N., Duran M. et Podwojewski P., 2000. Fertilité d'un sol volcanique induré récupéré et fertilisation raisonnée d'un ray grass. Fertility of reclaimed volcanic ashsoil and comprehensive fertilizer management of ryegrass. Résumé étendu et présentation orale. Symposium " Soil functioning under pastures in intertropical areas ". Brasilia, 16-20 octobre 2000.
- Guhl E., 1968. Los páramos circundantes de la Sabana de Bogota : Su ecología y su importancia para el régimen hidrológico de la misma. In *Geo-ecology of the mountainous regions of the tropical Americas*. C. Troll (Ed.) Coll. Geography. 9, pp. 195-212
- Gustafsson, J.P., 2001. Modelling competitive anion adsorption on oxide minerals and on allophane-containing soil. *European J. of Soil Sci.*, 52: 639-653.
- Hall M. et Mothes P., 1994. Tefrostratigrafía holocénica de los volcanes principales del valle interandino, Ecuador. *Estudios de geografía*. 6, 47-67.
- Hall ML, Robin C, Mothes P, Monzier M. 1999. Tungurahua volcano, Ecuador: structure, eruptive history and hazards. *J. of Volc. And Geoth. Res.*, 91: 1-21.
- Harden, C., 1991. Land use, soil erosion, and reservoir sedimentation in an Andean drainage basin in Ecuador. *Mountain Research and Development*. 13 (2) 177-184.
- Harden, C., 1992. A new look at soil erosion processes on hillslopes in highland Ecuador. In : *Erosion, Debris and Environment in Mountain Regions (Proceedings of the Chengdu Symposium, July 1992)*, IAHS publ. n° 209, 77-85.
- Harden, C.P. 1996 - Interrelationships between land abandonment and land degradation: a case from the Ecuadorian Andes. *Mountain Research and Development* 16(3): 274-280.
- Hedberg, O. 1964. Features of afroalpine plant ecology. *Acta Phytogeographica Suecica* 49:1-144
- Hedberg, O. 1992. Afroalpine vegetation compared to páramo: Convergent adaptations and divergent differentiation. En: *Páramo. An Andean ecosystem under human influence*. (H. Balslev y J.L. Luteyn, eds.)

- London: Academic Press. p.15-29.
- Herbillon, A.J., 1986. Chemical estimation of weatherable minerals present in the diagnostic horizons of low activity clay soil. In: F.H. Beinroth, M.N. Camargo and H. Eswaran (Editors), Proceedings of the 8th International Soil Classification Workshop : Classification, Characterization and Utilization of Oxisol, Part 1 pp. 39-48. EMBRAPA. Rio de Janeiro.
- Herbillon AJ. 1989. Estimation of weatherable minerals present in the diagnostic horizon of low activity clay soils. *Proc. 4th Int. Clay Classification Workshop*, Rio de Janeiro, 38-39.
- Hofstede R G M., 1995. Effects of burning and grazing on a Colombian páramo ecosystem. Thèse de l'Université d'Amsterdam, Amsterdam, 198 pp.
- Hofstede RGM and 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.
- Hofstede, R. 1997. El impacto ambiental de plantaciones de Pinus en la Sierra del Ecuador. resultados de una investigación comparativa. Proyecto ECOPAR. Programa FACE de forestación (PROFAFOR). ICG, Universidad de Amsterdam, 54 p.
- Hofstede, R., Lips, J. and Jongsma, W., 1998. Geografía, ecología y forestación de la sierra alta del Ecuador. Revisión de literatura. Ediciones Abya-Yala. Quito
- Hofstede, R. y Aguirre, N., 1999. Biomasa y dinámica del carbono en relación con las actividades forestales en la Sierra del Ecuador.; In: Medina, G. y Mena P. eds. El páramo como espacio para la fijación de carbono atmosférico. grupo de Trabajo en páramos, Vol1, 29-52.
- Hofstede, R., Groenendijk, JP, Coppus, R., Fehse, JC and Sevink, J., 2002. Impact of pine plantations on soils and vegetation in the Ecuadorian high Andes. *Mountain Res. and Develop* 22 (2) : 159-167.
- Hofstede, RGM, Segarra, P. y Mena, P., 2003. Los páramos del mundo. Proyecto Atlas Mundial de los páramos. Global peatland initiative/NC-IUCN/EcoCiencia. Quito.
- Humboldt, A. 1816. Voyage aux régions équinoxiales du nouveau continent, fait en 1799, 1800, 1801, 1802, 1803 et 1804 par A. De Humboldt et A. Bonpland...avec un atlas géographique et physique. Paris: A la Librairie Grecque. Translation (?) by Helen Williams, 1814-29. Personal Narrative of Travels to the Equinoctial Regions of the new Continent During the Years 1799-1804. London
- Honna T., Yamamoto S. et Matsui K., 1988. A simple procedure to determine melanoid index that is useful for differentiating melanoid from fulvic Andisols. *Pedologist*. 32, 69-78.
- Hungerbühler D, Steinmann M, Winkler W, Seward D, Egüez A, Heller F, Ford M. 1999. An integrated study of fill and deformation in the Andean intermontane basin of Nabón (Late Miocene), southern Ecuador. *Sedimentary Geology*, 96: 257-279.
- Huttel C 1997. Las grandes regiones climáticas y sus formaciones vegetales naturales. In Los paisajes naturales del Ecuador. Winckell A (Ed). Geografía básica del Ecuador. Tomo IV, volumen 2. CEDIG Quito 53-86.
- 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.
- Imeson, A. C., Verstraten, J. M., Mulligen, E. J., Sevink, J., 1992. The effects of fire and water repellency on infiltration and runoff under Mediterranean Type Forest. *Catena*. 19, 345-361.
- INEFAN, 1996. Guía para los páramos del sistema nacional de áreas protegidas del Ecuador. INEFAN Quito. 169 pp.
- Jenny H. 1948. Great soil groups in the equatorial regions of Colombia, South America. *Soil Sci.* 66 5-28.
- Jenny H. 1994. *Factors of soil formation. A system of quantitative pedology*. Dover publication, Inc. New York, 281p.
- Jørgensen PM & Ulloa Ulloa C 1994. Seed plants of the high Andes of Ecuador. A checklist. Department of Systematic Botany, University of Aarhus. AAU reports 34. Aarhus, Denmark, pp 445.
- King PM 1981. Comparison of methods for measuring severity of water repellence of sandy soils and assessment of some factors that affects its measurements. *Australian Journal of Soil Research* 19, 275-285.
- Körner, C., 1999. *Alpine plant life : functional plant ecology of high mountain ecosystems*; Springer-Verlag: Berlin Heidelberg.
- Kumada, K., Sato, O., Ohsumi, Y and Ohta, 1967. Humus composition of mountain soils in central Japan with reference to the distribution of P-type humic acid. *Soil Plant Nutr.* 33: 151-158.
- La Condamine C M., 1751. Journal du voyage fait par ordre du roi à L'Equateur, servant d'introduction historique à la mesure des trois premiers degrés du méridien. Imprimerie Royale. Paris. 266 pp.
- 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.
- Leamy ML Smith GD Colmet-Daage F & Otowa M 1980. The morphological characteristics of andosols. In : Soils with variable charge. Theng, B.K.G. ed. Soil Bureau, Department of Scientific and Industrial Research. Lower Hutt. New Zealand Society of Soil Science. pp. 17-34.
- Legros, J. P., 1992. Soils of Alpine Mountains. In *Weathering, Soils and Paleosols*; Martini, I. P., Chesworth, W. Eds ; Elsevier:Amsterdam, Netherlands, 155-181.

- Litherland M, Zamora A. 1993. Geological map of Ecuador. Map at 1/1000 000. Revision of the map of 1982. *British Geological Survey*, Keyworth, U.K.; Corporación de Desarrollo e Investigación Geológico-Minero Metalúrgica, Quito, Ecuador.
- Luteyn J L., 1992. Páramos : why study them?. In Páramo : An andean ecosystem under human influence. H. Balslev et J.L Luteyen (Eds). London. Academic Press. pp. 1-14
- Luteyn J L., Cleef A M, et Rangel C., 1992. Plant diversity in páramo : towards a checklist of páramo plants and a generic flora. In Páramo : an andean ecosystem under human influence H. Balslev et J.L. Luteyen (Eds). London. Academic Press. pp. 71-84
- Luteyn JL 1999. Páramos. A checklist of plant diversity, geographical distribution and botanical literature. *Memoirs of the New York Botanical Gardens* Vol. 84. New York pp 278.
- Lüttge, U., 1997. *Physiological Ecology of tropical plants*. Springer Verlag, XII, 384p.
- Maeda, T. and Soma, K., 1985. Classification of Andisols in Japan based on physical properties. In L. G. Schultz, H. van Olphen, and F. A. Mumpton, (Editors), *International Clay conference*. The Clay Minerals Society. Denver.
- McNabb, D.H. and Boersma, L., 1993. Evaluation of relationship between compressibility and shear strength of Andisols. *Soil Science Society of American Journal*, 57: 923-929.
- Mehra, O.P., and Jackson, M.L., 1960. Iron oxide removal from soils and clays by dithionite-citrate systems buffered with sodium bicarbonate. *Clays and clay miner.*, 7: 317-327.
- Michel, J.C, Rivièrè, L.M., Bellon-Fontaine, M.N., 2001. Measurements of the wettability of organic materials in relation to water content by the capillary rise method. *European Journal of Soil Science*, 52, 459-468.
- Monzier M, Robin C, Samaniego P, Hall M L, Cotten J, Mothes P, Arnaud N, 1999. Sangay volcano, Ecuador: structural development, present activity and petrology. *J Volc Geotherm Res*, 90: 49-79
- Okamura, Y. and Wada, K. 1983. Electrical charge characteristics of Ando(B) and red-Yellow(B) soils and weathered pumices. *J. Soil Sci.*, 34:287-295.
- Parfitt, R.L., 1980. Chemical properties of variable charge soils. In : *Soils with variable charge*. Theng, B.K.G. ed. Soil Bureau, Department of Scientific and Industrial Research. Lower Hutt. New Zealand Society of Soil Science. p. 167-194.
- Parfitt, R.L. and Clayden, B., 1991. Andisols – the development of a new order in Soil Taxonomy. *Geoderma*. 49: 181-198
- Parfitt R.L. and Kimble J.M., 1989. Conditions for formation of Allophane in Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53, 971-977
- Parfitt RL and Wilson AD. 1985. Estimation of allophane and halloysite in three sequences of volcanic soils, New Zealand. In *Volcanic soils, Weathering and Landscape relationships of soils on Tephra and Basalt*. Caldas EF, Yaalon DH (Eds). *Catena Suppl.* 7 Catena Verlag. 1-8.
- Parsons, J.J., 1982. The Northern andean environment. *Mountain Research and Development*, Vol 2, N°3, 253-262.
- Percival HJ Parfitt R and Scott N, 2000. Factors controlling soil carbon levels in New Zealand Grasslands. Is clay content important ? *Soil Science Society American Journal* 64, 1623-1630.
- Pérez, F.L., 1984. Striated soil in an andean paramo of Venezuela: its origin and orientation. *Arctic and Alpine Research*, 16, 3, 277-289.
- Pérez FL 1991. Particle sorting due to the off-road vehicle traffic in a high Andean paramo. *Catena* 18, 239-254.
- Pérez, F., 1995. Plant-induced spatial patterns of surface soil properties near caulescent Andean rosettes. *Geoderma* 68: 101-121.
- Pérez, F.L., 1997. Microbiotic crusts in the high equatorial Andes, and their influence on paramo soils. *Catena* 31, 173-198.
- Perrin, J.L., Bouvier, C., Janeau, J.L., Ménez, G. & Cruz, F., 2001. Rainfall/runoff processes in a small peri-urban catchment in the Andes mountains. *The Rumiurcu Quebrada, Quito, Ecuador*. *Hydrological processes*, 15, 843-854.
- Perrin, JL, Fourcade, B., Poulénard, J., Richard, D. and Sierra, A. 2000. Quito face à un risque d'origine naturelle : les laves torrentielles. *Revue de Géographie alpine* n°2, 43-57.
- Podwojewski, P., Poulénard, 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.
- Podwojewski, P. and Germain, N., 2005. Evolution of the soil structure in a deep tilled hardened volcanic ash soil (Cangahua) in Ecuador. *European Journal of Soil Science*, 39: 39-51.
- Poulénard 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.
- Poulénard J Podwojewski P Janeau JL and Collinet J 2001. Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian Páramo: effect of tillage and burning. *Catena*, Catena 45, 185-207.

- Poulenard, J., Bartoli, F., Burtin, G. 2002. Shrinkage and drainage in volcanic soil aggregates : a structural approach using air under vacuum drying kinetics and mercury porosimetry.- *European Journal of Soil Science*, 53, 563-574.
- Poulenard J., Podwojewski P., Herbillon A.J. 2003. Characteristics of non-allophanic Andisols with hydric properties in Ecuadorian Páramo. *Geoderma* 117 (3-4) 267-281.
- Poulenard J., Michel J.C., Bartoli F., Portal J.M. and Podwojewski P. 2004. Water repellency of volcanic ash topsoils from Ecuadorian páramo related to hydrophobic organic materials and material contents. *European Journal of Soil Science*, 55, 487-496.
- Pourrut P. 1994. L'eau en Equateur, principaux acquis en hydroclimatologie. *Collection Etude et Thèses*. ORSTOM Paris. 147pp.
- Pourrut P (Ed.) 1995. El agua en el Ecuador. Clima, precipitaciones, escorrentia. Quito. Estudios de geografía 7. pp 118.
- Previtali, F., 1992. Seismipedoturbations in volcanic soils in north-eastern Ecuador. *Catena*, 19: 441-450.
- PRONAREG/ORSTOM 1978. Cartografía de los suelos de la República de Ecuador. 1/200.000. Colmet-Daage Ed., Quito.
- Quantin P., 1988. Les Andosols. Etats des connaissances. Problématiques. In: Les Andosols de la Réunion. CIRAD (Eds). Fonf documentaire ORSTOM n° 27.967, Paris, 53-75.
- Quantin, P., 1995. Andosols et Vitrosols. In: *Reférentiel pédologique*. D. Baize et M.C. Girard (Eds). INRA editions, 85-93.
- Quantin P. et Zebrowski C., 1997. Analyse préliminaire (chimie, minéralogie, pétrographie de quelques types de *cangahua*). Los suelos con *cangahua* en el Ecuador. In: *Memoria del III Simposio Internacional sobre Suelos Endurecidos* (Quito, diciembre de 1996), (eds C. Zebrowski, P. Quantin et G. Trujillo), pp. 29-47. IRD, PUCE, UCE, Quito.
- Ramsay P.M. and Oxley, E.R.B., 1996. Fire temperatures and postfire plant community dynamics in Ecuadorian grass páramo. *Vegetatio* 124, 129-144.
- RP, 1995 - *Reférentiel pédologique 1995*. D. Baize et M.C. Girard (Eds). INRA editions, 332 pp.
- Roy, J.L. and Mc Gill, W.B., 2002. Assessing soil water repellency using the molarity of ethanol droplet (MED) test. *Soil Science*, 167, 2, 83-97.
- Sarmiento, L., 2000. Water balance and soil loss under long fallow agriculture in the Venezuelan Andes. *Mountain research and development*, 20.3: 246-253.
- Schubert C, Clapperton CM. 1990. Quaternary glaciations in the northern Andes (Venezuela, Colombia and Ecuador). *Quaternary Science Review*, 9: 123-135.
- Schwertmann, U, 1964. Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit saurer Ammoniumoxalat-Lösung. *Z. Pflanzenernähr. Düng . Bodenkd.*, 105:194-202.
- Savage, S.M., Osborn, J., Letey, J., Heaton, C., 1972. Substances contributing to fire-induced water repellency in soils. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.* 36, 674-678.
- Shoji, S., Ito T., Saigusa, M. and Yamada, I., 1985. Properties of nonallophanic Andosols from Japan. *Soil Sci.* 133, 69-86.
- Shoji S, Dahlgren R, Nanzyo M. 1993. Genesis of volcanic ash soils. In: *Volcanic ash soils. Genesis, Properties and Utilization*. Shoji S, Nanzyo M, Dahlgren R (Eds),. Development in Soil Science 17. Elsevier. Amsterdam. 37-70.
- Shoji S. and Fujiwara T., 1984. Active aluminium and iron in the humus horizons of Andosols from northeastern Japan : Their forms, properties and significance in clay weathering. *Soil Science*. 137, 216-226.
- Shoji S., Kurebayashi T. et Yamada I., 1990. Growth and chemical composition of Japanese pampas grass (*Miscanthus sinensis*) with special reference to the formation of dark-colored Andisols in northeastern Japan. *Soil Sci. Plant Nutr.* 36, 105-120.
- Shoji S., 1988. Separation of melanic and fulvic andisols. *Soil Sci. Plant Nutr.* 34. 2. 303-306.
- Shoji, S., Nanzyo, M., Dahlgren, R. and Quantin, P., 1996. Evaluation and proposed revisions of criteria for Andosols in the World Reference Base for Soil Resources. *Soil Science*. 161: 604-615
- Smith A.P., 1994). Introduction to tropical alpine vegetation. En: *Tropical alpine environments: plant form and function*. (P.W. Rundel; A.P. Smith y F.C. Meinzer, ed.) Cambridge: Cambridge University Press. p.1-21.
- 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
- SSS: Soil Survey Staff. 1999. *Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. 2ª Ed. USDA, NRCS. 869 pp.
- Steinmann M, Hungerbühler D, Seward D, Winkler W. 1999. Neogene tectonic evolution and exhumation of the southern Ecuadorian Andes: a combined stratigraphy and fission-track approach. *Tectonophysics*, 307: 255-276.
- Suarez E. and Medina G., 2001. Vegetation structure and soil properties in Ecuadorian páramo grasslands with different histories of burning and grazing. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 33, 2, 158-164.

- Tardy Y. 1993. *Pétrologie des latérites et des sols tropicaux*. Masson, 459 p.
- Tate K R., Yamamoto K., Churchman G J., Meinhold R. et Newman R. H., 1990. Relationship between the type and carbon chemistry of humic acids from some New Zealand and Japanese soils. *Soil Sci. Plant Nutr.* 36, 4, 611-621.
- Torn, M.S., Trumbore, S.E., Chadwick, O.A. Vitousek, P.M., and Hendricks, D.M., 1997. Mineral control of soil organic carbon storage and turnover. *Nature*. 389: 170-173
- Troll C. 1968. The cordilleras of the tropical Americas. Aspects of climatic, phytogeographical and agrarian ecology. in Troll C. (ed.) *Geo-ecology of the mountainous regions of the tropical Americas*. Collection Geography 9. Bonn, pp 15-56.
- Turkelboom F., Poesen J., Ohler I., Van Kerr K., Ongprasert S., Vlassak K., 1997. Assessment of tillage erosion rates on steep slopes in northern Thailand. *catena* 29, 29-44.
- Ugolini, F.C., and Edmonds, R.L., 1983. *Soil Biology In: L.P., Wildings, N.E. Smeck and G.F. Hall (Editors), Pedogenesis and Soil Taxonomy. I Concepts and Interactions. Development in Soil Science. 11A Elsevier. Amsterdam.* pp 193-231
- 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.
- Van Wambeke, A., 1981. Calculated Soil Moisture and Temperature regimes of South America, SMSS Technical Monograph 2, Soil Conservation Service. USDA. Washington D.C.
- Vanacker, V., Vanderschaeghe, M., Govers, G., Willems, E., Poesen, J., Deckers, J., De Bievre, B., 2003. Linking hydrological, infinite slope stability and land-use change models through GIS for assessing impacts of deforestation on slope stability in high Andean watersheds. *Geomorphology*, 52, 299-315.
- Verweij PA & Budde PE 1992. Burning and grazing gradients in páramo vegetation: Initial ordination analyses. In: H Balslev & JL Luteyn eds. *Páramo. An andean ecosystem under human influence*. Academic Press, 177-195.
- Verweij PA 1995. Spatial and temporal modelling of vegetation patterns. Burning and grazing in the páramo of Los Nevados National Park, Colombia. *ITC, Enschede*, n°30, pp 233.
- Wada, K., and Higashi, T., 1976. The categories of aluminium- and iron- humus complexes in ando soils determined by selective dissolution. *Journal of Soil Science*. 27: 357-368.
- Werkentin , B.P. and Maeda, 1974. Physical properties of allophanic soils from West Indies and Japan. *Soil Science Society of America Proceedings*, 38: 372-377.
- Wilcke, W., Valladarez, H., Stoyan; R., Yasin, S, Valarezo, Zech, W., 2003. Soils properties on a chronosequence of landslides in Ecuador. *Catena* 735, 1-17.
- W.R.B, 1998. World Reference Base for soil resources. World soil resources reports, n°84. FAO, Rome, 88 p.
- 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 et Zebrowski 1997. Los paisajes andinos de la sierra del Ecuador. In *Los paisajes naturales del Ecuador*. Winckell A, Zebrowski C et Sourdat M. (Eds). *Geografía básica del Ecuador*. Tomo IV, volumen 2, geografía física. CEDIG Quito 3-207.
- Winckell A., Zebrowski C. et Delaune M., 1991a. Evolution du modèle quaternaire et des formations superficielles dans les Andes de l'Equateur. Première partie : le volcanisme pyroclastique récent. *Geodynamique*. 6, 2, 97-117.
- Winckell A., Zebrowski C. et Delaune M., 1991b. Evolution du modèle quaternaire et des formations superficielles dans les Andes de l'Equateur. Deuxième partie : quelques aspects de l'histoire paléogéographique quaternaire. *Geodynamique*. 6, 2, 119-139.
- Zehetner, F., Miller, W.P. and West, L.T., 2003. Pedogenesis of volcanic ash soils in Andean Ecuador. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67: 1797-1809.

Chapitre III - Effets du changement d'usage sur les flux érosifs

Le programme MSEC au Vietnam

- Craswell E.T., Niamskul C. et Penning de Vries, 1998. *Catchment approach to combating soil erosion in Asia – the Managing soils Erosion Consortium*. F.W.T Penning de Vries, F.Agus and J.Kerr (eds) *Soil Erosion at Multiple Scales – Principles and Methods for Assessing the Causes and Impacts*. CABI Wallingford.. p 161-174.
- Craswell, E.T. and A.R. Maglinao, 2001. A catchment approach to research on soil erosion in the marginal uplands of Asia. In: Suthipradit, S., C. Kuntha, S. Lorlowhakarn, and J. Rakngan (eds.). *Sustainable Agriculture: Possibility and Direction. Proceedings of the 2nd Asia-Pacific Conference on Sustainable Agriculture*. 18-20 October 1999, Phitsanulok, Thailand. pp. 151-162.

- International Water Management Institute (IWMI). 2003. Catchment approach to managing soil erosion in Asia. *ADB-RETA N°5803. Project Completion Report*. Submitted to ADB in April 2003.
- Maglinao, A.R and R. Leslie (eds.). 2002. Soil erosion management research in Asian catchments: methodological approaches and initial results. *Proceedings of the 5th Management of Soil Erosion Consortium (MSEC) Assembly. Thailand: IWMI*. Southeast Asia Regional Office. 275 p.
- Maglinao, A.R., R.B. Cagmat, and Sukirsitiyonubowo. 2003. Impact assessment: methodology and its application to the Management of Soil Erosion (MSEC) project. In: Maglinao, A.R., C. Valentin, and F. Penning de Vries. (eds.). 2003. From soil research to land and water management: Harmonizing people and nature. *Proceedings of the IWMI-ADB Project Annual Meeting and 7th Management of Soil Erosion Consortium (MSEC) Assembly*. pp. 209-220.
- Maglinao, A.R.. and C. Valentin, 2003. Community-Based Land and Water Management Systems for Sustainable Upland Development in Asia: MSEC Phase 2. *Project annual report submitted to IWMI*, February 2004.
- Orange, D., P. Podwojewski, T.D. Toan, D.D. Phai, A. Bayer, N.D. Phuong, N.V. Thiet, P.V. Rinh, and J. Koikas. 2003. Soil erosion management at the watershed level for sustainable agriculture and forestry in Vietnam. *Project annual report submitted to IWMI*, February 2004.
- Valentin, C. 1999. Projet d'Unité de Recherche (U.R.), *Erosion et Changement d'Usage des terres (ECU)*. Paris : IRD, 1999. 39 p.

Liste des photos

Photo 1 : Páramo herbacé de l'Antizana (cordillère orientale) avec quelques arbustes (Photo J. Poulenard).....	35
Photo 2 : Prélèvement d'eau canalisée issu du páramo. Páramo du Pichincha (Photo J. Poulenard).....	35
Photo 3 : Mise en usage du páramo : traces de feux, pâturage, mise en culture discontinue, jachères. Páramo du Cayambe, Imbaburra.	35
Photo 4 : Colonisation des páramos à partir de la plaine inter-andine	36
Photo 5 : Effet du climat constant sur les cultures d'orge près du páramo d'El Angel (Carchi). Champ labouré, semé, culture jeune, culture mature et récoltée dans un même terroir.	38
Photo 6 : Influence de l'altitude sur le régime des pluies dans le sillon inter-andin. Plus l'altitude est basse plus le régime est sec. Région d'Alausi au sud de Riobamba.	38
Photo 7 : Páramo pâturé du Pichincha près de Quito. Les effets du surpâturage sont plus visible côté ouest "sous le vent" (flèche jaune) que sur le côté est "au vent" (flèche bleue) provenant de l'Amazonie	39
Photo 8 Tornado dans l'arenal du Chimborazo	39
Photo 9 : Super-páramo à Espeletia sp. Páramo de Merida, Venezuela (Photo R. Hofstede).....	40
Photo 10 : Subpáramo, Parc de los Nevados, Colombie. (Photo R. Hofstede)	40
Photo 11 : Hautes herbes (Poaceae) représentées par <i>Calamagrostis sp</i> et <i>Agrostis sp</i> . Páramo du Pichincha (Photo J. Poulenard).....	42
Photo 12 : Páramo à frailejon (<i>Espeletia sp</i> , Asteraceae), El Angel, Carchi. Remarquer les effets du feu qui détruit les feuilles restant sur le stipe	42
Photo 13 : <i>Puya sp.</i> (Bromeliaceae), páramo de l'Antizana	42
Photo 14 : <i>Chuquiragua jussieui</i> (Asteraceae), páramo du Pichincha (Photo J. Poulenard)	42
Photo 15 : <i>Hypochaeris sp.</i> (Asteraceae), rosette acaulescente typique du tapis herbeux entre les touffes	43
Photo 16 : <i>Valeriana radiata</i> (Valerianaceae), autre plante en rosette acaulescente typique du tapis herbeux entre les touffes.....	43
Photo 17 : <i>Plantago rigida</i> (Plantaginaceae) en coussin typique (Photo J. Poulenard)	43
Photo 18 : Páramo hydromorphe à <i>pantano</i> du Chimborazo. Plantes en coussins.	43
Photo 19 : Páramo à frailejon de El Angel (Carchi) sur glaciais à pentes très faibles typique des épais couches cendreuses.....	44
Photo 20 : Le páramo du Cajas à l'ouest de Cuenca (site de référence CUE) est caractérisé par une faible épaisseur de cendres et un relief glaciaire typique, roches moutonnées, verrous glaciaires, lacs glaciaires et moraines.	44
Photo 21 : Páramo du Podocarpus vu depuis le site de Sabanilla (profil de référence SAB). Le páramo est restreint à une étroite bande sommitale. Les crêtes sont vives, les pentes sont fortes et parfois érodées par des glissements de terrain.	44
Photo 22 : Slumps, coulées pyroclastiques et dépôts sur plusieurs centaines de mètres au pied du Mojanda, dans la vallée inter andine au Nord-est de Quito.	45
Photo 23 Cendres récentes sur un substrat remanié par la dernière glaciation. Páramo du Cajas (site de référence CUE).....	45
Photo 24 : Discordance entre les cendres récentes épousant la morphologie du relief et les cendres anciennes horizontales. Páramo du Chimborazo.....	45
Photo 25 : Explosion pyroclastique du Pichincha depuis la ville du Quito le 7/10/1999.	46
Photo 26 : Explosion pyroclastique du Pichincha le 7/10/1999. Le nuage s'orientea basse altitude vers l'Ouest puis à haute altitude vers l'Est.	46
Photo 27 : Profil PIC caractérisé par une forte différenciation granulométrique des différents dépôts. Niveau de ponces très visible à 0,50m de profondeur	52
Photo 28 : Profil CHI peu différencié. Le seul profil à montrer des allophanes	52
Photo 29 : Profil GEL caractérisé par une homogénéisation de 3 niveaux organiques sur une épaisseur de plus de 1m d'épaisseur.	52
Photo 30 : profil CUE - La partie supérieure non-allophanique dérive de l'altération de cendres, la partie inférieure allophanique dérive de l'altération d'une roche volcano-sédimentaire en place.	53
Photo 31 : Profil AZO avec une partie supérieure formée sur cendres récentes, un niveau argileux non organique avec des traces de remaniement glaciaire et un niveau organique de cendres anciennes en poches.....	53
Photo 32 : Profil AZO avec un niveau de <i>stone line</i> séparant les cendres récentes des cendres anciennes sous-jacentes.	53
Photo 33 : Sol très épais rouge caractéristique du plateau d'Oña.....	60
Photo 34 : Détail du profil 6-OÑA : développement d'un horizon jaune entre l'horizon noir et rouge. L'horizon humifère aux caractères andiques a plus de 40 cm d'épaisseur.	60

Photo 35 : Profil 7-SAR. Andosol sur oxisol sur le Fierro Urcu. Une stone line sépare un horizon humifère épais de 50 cm reposant sur une altération de roche volcano-sédimentaire.	61
Photo 36 : Podzol hydromorphe polygénique à niveau induré aliotique sous l'horizon humifère (Profil 10-SAB2)	61
Photo 37 : Profil 9-CT. Umbrisol (sol ocre podzolique) du Cerro Toledo sur pélites.	61
Photo 38 : Profil 10-SAB1. Spodosol (sol podzolique) à redistribution de fer sur micaschistes.	61
Photo 39 : Podzol humo-ferrugineux (Spodosol) sur gneiss.	61
Photo 40 : Culture de pommes de terre dans un páramo à <i>frailejon</i> . Paramo de El Angel, Carchi	68
Photo 41 : Vache broutant une repousse de <i>Calamagrostis</i> , páramo du Pichincha. (Photo J. Poulenard)	68
Photo 42 : jachère après un cycle de culture de pommes de terre dans un páramo à <i>frailejon</i> . Paramo de El Angel, Carchi.	69
Photo 43 : Glissement de terrain provoqué par la rupture d'un canal d'irrigation. Emplacement du canal et de la rupture.	70
Photo 44 : Glissements de terrain localisés après défrichage de la forêt au profit de pâturages dans la partie amont.	70
Photo 45 : Glissement de terrain sur des massifs métamorphiques au sud de Loja.	70
Photo 46 : Fines rigoles parallèles après la préparation d'un champ dans le páramo du Chimborazo. Ces rigoles vont s'estomper après le buttage perpendiculaire à la pente.	71
Photo 47 : Erosion ravinaire naturelle dans les cendres peu consolidées du super-páramo de l'Antizana.	71
Photo 48 : Ravines profondes et érosion en nappe sur les flancs de roches volcano-sédimentaires du Sud de l'Equateur, région de Loja.	71
Photo 49 : Végétation en bandes sableuses dans l'arenal du Chimborazo	71
Photo 50 : Yardang avec ségrégation éolienne de particules fines et de particules grassières dans l'arenal du Chimborazo.	72
Photo 51 : Passage de camions pour l'exportation de fientes de mouton dans le páramo de Llangahua, Ambato.	72
Photo 52 : Touffe de <i>Calamagrostis</i> sp. coupée. La repousse est homogène et concerne toute la touffe.	73
Photo 53 : Touffe de <i>Calamagrostis</i> brûlée. La repousse ne concerne que la périphérie de la touffe.	73
Photo 54 : premier stade de dégradation d'un pâturage : apparition d'une végétation rase. Paramo du Chimborazo.	74
Photo 55 : Mouton creusant le sol avec son sabot pour dégager le collet des plantes. Paramo de Llangahua, Ambato.	74
Photo 56 : Touffe isolée de <i>Calamagrostis</i> dans le páramo surpâturé de Llangahua (Ambato)	74
Photo 57 : Formation de ravines sur pente dans un páramo surpâturé très dégradé	74
Photo 58 : Sol complètement mis à nu avec érosion de l'horizon humifère par surpâturage ovin dans le páramo de l'Antisana. Ce site incluait le plus grand élevage de moutons d'Equateur avec plusieurs milliers de têtes.	75
Photo 59 : Páramo à <i>Polylepis incana</i> . Route de Pifo, Col de la Virgen, Prov. de Pichincha (Photo R. Hofstede)	76
Photo 60: Evaporation après labour d'un andosol non allophanique. province du Carchi, El Angel.	76
Photo 61 : Fentes de retrait donnant une structure prismatique très grossière dans un andosol asséché par la construction d'une route.	77
Photo 62 : Hydrophobie sous une touffe dans le páramo du Chimborazo après une forte averse.	79
Photo 63 : Effet de l'érosion aratoire sur une pente très forte dans la province du Carchi. Les cendres anciennes mises à nu sont très peu productives.	79
Photo 64 : Agrégats noirs déplacés dans un inter-billon durant une culture de pomme de terre dans le páramo d'El Angel (Carchi)	80
Photo 65 : Glissement des agrégats en petites loupes de glissement après la récolte des pommes de terre sur une jachère laissé à nu.	80
Photo 66 : Zones claires, infertiles correspondant aux cendres anciennes affleurant à la suite de l'érosion de l'horizon organique épais de plus de 50 à 70cm. Région de La Libertad, Carchi	80
Photo 67 : Cultures intensives sur fortes pentes et système de terrasses protégeant les cultures de l'érosion. Ambato, Prov. de Tungurahua.	83
Photo 68 : Sols volcaniques indurés (cangahua) en contrebas des sols cultivés montant vers les páramos (flèche jaune) affleurant suite à l'érosion des cendres récentes meubles. Noter l'usage de ces surfaces imperméables comme impluvium pour alimenter les canaux d'irrigation (flèche bleue).	83
Photo 69 : Site d'étude PIC avec parcelles de simulation de pluie et parcelle de ruissellement et collecteur d'eau (flèche bleue). Vue 6 ans APRES la simulation de pluie. La limite du feu est toujours visible (flèches rouges) et les parcelles mises à nu pour mesurer l'érosion sont toujours sans couvert végétal continu (flèche jaune). (Photo J. Poulenard)	84

Liste des figures

Figure 1 : Evolution de mon activité scientifique. Etapes 1 et 2 du Tableau 1. caractérisation des constituants du sol à des fins de mise en usage. Etapes 3, 4 et 5 : effets de la mise en usage sur les propriétés et cosnttituants du sol.	29
Figure 2 : Répartition des páramos dans le monde	37
Figure 3 : Moyenne des températures minimales et maximales enregistrées à El-Angel (Carchi, site GEL) à 3500m d'altitude au pied du páramo du même nom. (INAMHI-Quito).....	38
Figure 4 : Moyenne de la pluviométrie mensuelle à Puyo en Amazonie au pied de la cordillère orientale, à Quito dans la vallée inter andine (2800 m d'altitude) et à El Angel (3500 m d'altitude, site de référence GEL) au pied du páramo du même nom. (Données INAMHI - Quito).	39
Figure 5 : Différents types de formations végétales des páramos d'Equateur (Hofstede et al. 2003).....	41
Figure 6 : Carte de localisation des páramos en Equateur et des sites d'étude.	48
Figure 7 : Relation entre le degré d'évolution des sols, l'âge des dépôts, les distances aux sources d'émission et et leur réserve en bases totales (TRB)	51
Figure 8 : Schéma d'évolution de la pédogenèse des Andosols dans les páramos sur cendres volcaniques du Nord de l'Equateur. Adaptation du schéma de Quantin, (1988).	55
Figure 9 : Relation entre la réserve totale en bases (TRB) et la capacité de rétention en eau à pF 4,2 des horizons humifères des 5 sites de référence des andosols du páramo équatorien.....	57
Figure 10 : Relation entre la réserve totale en bases (TRB) et la densité apparente des horizons humifères des 5 sites de référence des Andosols du páramo équatorien.	57
Figure 11 : Relation entre le Carbone organique et la teneur en eau du sol dans les horizons organiques des profils de référence.	59
Figure 12 : Distribution de la macro, meso et micro-porosité dans la subsurface de l'horizon A des 5 pédons des Andosols de référence étudiés dans le páramo équatorien.	59
Figure 13 : Schéma évolutif des pédogenèses dans les páramos du sud de l'Equateur.....	64
Figure 14 : Changement du type de pédogenèse pour les sols du plateau d'Oña.....	65
Figure 15 : Comparaison de la taille des agrégats entre un páramo pâturé non dégradé et un páramo brûlé et pâturé.	73
Figure 16 : Relations entre l'eau du sol, les teneurs en C et en Al (extrait pyrophosphate) dans le páramo surpâturé et dégradé de Llangahua (province de Tungurahua).	75
Figure 17 : Taille des agrégats situés entre et sous les touffes d'un páramo surpâturé (A) et un páramo surpâturé et très dégradé (B).	75
Figure 18 : Relation entre la perte irréversible de la rétention en eau et de l'indice d'eau après séchage.....	77
Figure 19 : Mesure de l'hydrophobie par la courbe de MED (Doerr, 1998) pour un páramo brûlé, surpâturé (SP) et cultivé.	78
Figure 20 : Variation de l'angle de contact au cours du séchage pour les cinq sites de référence étudiés (Poulenard et al., 2004).	78
Figure 21 Effet du feu, d'une jachère et de la mise en culture sur le ruissellement mesuré par simulation de pluie (Poulenard et al., 2001)	80
Figure 22 : Tableau récapitulatif des effets de la mise en usage des sols et du séchage sur les phénomènes érosifs dans les páramos.....	82
Figure 23 : Evolution des exportations annuelles des sédiments de fond durant 5 années consécutives dans un bassin versant sur forte pente au nord vietnam après changement d'usage en fonction de la pluviométrie. 87	
Figure 24 : Schéma de l'évolution de la pédologie : le sol était d'abord considéré comme un support à la fonction agronomique mais il faut reconsidérer le sol dans sa fonction environnementale et sous influence anthropique	91

Liste des tableaux

Tableau 1 : Evolution de mon travail de recherche au cours du temps.....	29
Tableau 2 : Extension des páramos dans différents pays (Hofstede et al. 2003).....	37
Tableau 3 : Localisation des sites des páramos du Nord au Sud.	48
Tableau 4 : Principales caractéristiques des 5 Andosols de référence dans les páramos.....	50
Tableau 5 : Résultats analytiques des extractions spécifiques des sols de référence en fonction de leur degré d'évolution.	54
Tableau 6 : Correspondance entre les différents systèmes de classification et nos profils de référence.	55
Tableau 7 : Données analytiques en fonction du degré d'évolution.....	56
Tableau 8 : Stockage du carbone ($t\ ha^{-1}$) dans les sols andiques du páramo du moins évolué vers le plus évolué.	58
Tableau 9 : Caractéristiques morphologiques des profils de référence non situés sur pyroclastes des páramos du sud de l'Equateur.....	62
Tableau 10 : Extractions spécifiques pour les profils de référence des páramos du Sud de l'Equateur. Les horizons à accumulations de fer amorphe ou cristallisé sont surmarqués.	63
Tableau 11 : Stockage du carbone ($t\ ha^{-1}$) dans les sols dérivant d'un substrat non pyroclastique des páramos du Sud de l'Equateur.	66
Tableau 12 : Résultats analytiques des profils des sites de référence non situés sur pyroclastes.	67
Tableau 13 : Perte en terre cumulée ($g\ m^{-2}$) lors de 4 pluies simulées successives. (De Noni et al., 2002). Seuls les 3 premiers sites sont des sols sur pyroclastes.	79
Tableau 14 Perte en terre cumulée ($g\ m^{-2}$) et en carbone (en gras) lors de 4 pluies simulées successives.	80
Tableau 15 : Perte des teneurs en eau et en carbone dans un páramo humide cultivé (GEL) à Andosol perhydrique et dans deux páramos pâturés à andosols vitriques.	82