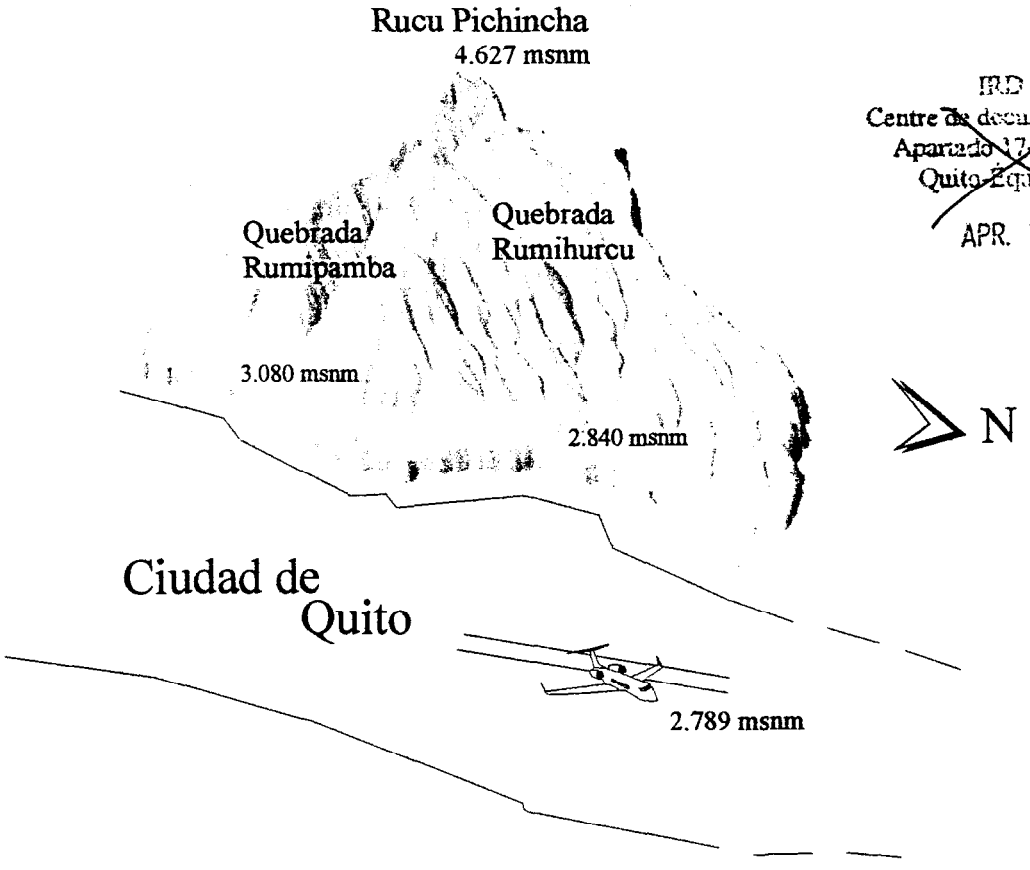
Rapport d'activités 1998
Jean-Louis Janeau

Contribution des études pédologiques
au programme SISHILAD
1995 - 1998

Système de Pronostic Hydrologique des Flancs Orientaux du Volcan Pichincha et de la Zone Métropolitaine de Quito



IRD
Centre de documentation
Apartado 17-12-857
Quito-Equateur
APR. 1 2 1999

EMAAP-Quito :
Eau Potable et Assainissement de la ville de Quito

IRD :
Institut de Recherche pour le Développement (Ex ORSTOM)

INAMHI :
Institut National de Météorologie et d'Hidrologie d'Equateur

Coopération Institutionnelle

Ministère de l'Agriculture et de l'Elevage (MAG)
Service Equatorien Sanitaire Agropastoral (SESA)
Défense Civile

Fonds Documentaire ORSTOM
Cote : A* 18134 Ex : unique

Décembre 1998

631.4
ORSTOM Documentation

Prologue

Ce document est à la fois un rapport d'activités et une synthèse des études pédologiques du programme Sishilad. Il est composé en majeure partie d'interprétations des résultats expérimentaux et de recommandations utiles au partenaire (pp 2-12) et d'autre part de courts chapitres concernant la formation et les missions d'expertise que j'ai pu menées en Equateur. Enfin, les six annexes résument des paramètres de mesures hydrodynamiques utiles à mes collègues hydrologues. Par ailleurs, un catalogue des simulations de pluies est en cours ainsi que la rédaction d'articles scientifiques permettant la valorisation de ma participation au programme Sishilad (1er semestre99).

1. La contribution pédologique au programme Sishilad

L'étude pédologique permet d'apporter au programme Sishilad des informations d'ordre quantitatif et qualitatif sur les sols des flancs orientaux du volcan Pichincha :

- La cartographie des sols et de leurs utilisations à partir de données de terrain et de données analytiques a permis d'obtenir différentes cartes utiles directement au programme Sishilad et qui ont également servi de canevas pour les cartes développées au sein du programme *"Laderas del Pichincha"*.

- Les études expérimentales de l'hydrodynamique, de l'érosion et de l'influence exercée par la végétation sur l'interception de l'eau de pluie, permettent d'apprécier l'interaction eau-sol-plante et d'aborder l'influence de l'homme sur l'écosystème du volcan Pichincha. Les résultats de cette recherche permettent de définir les risques (Figure 1) et d'en minimiser les conséquences par une prévention adéquate.

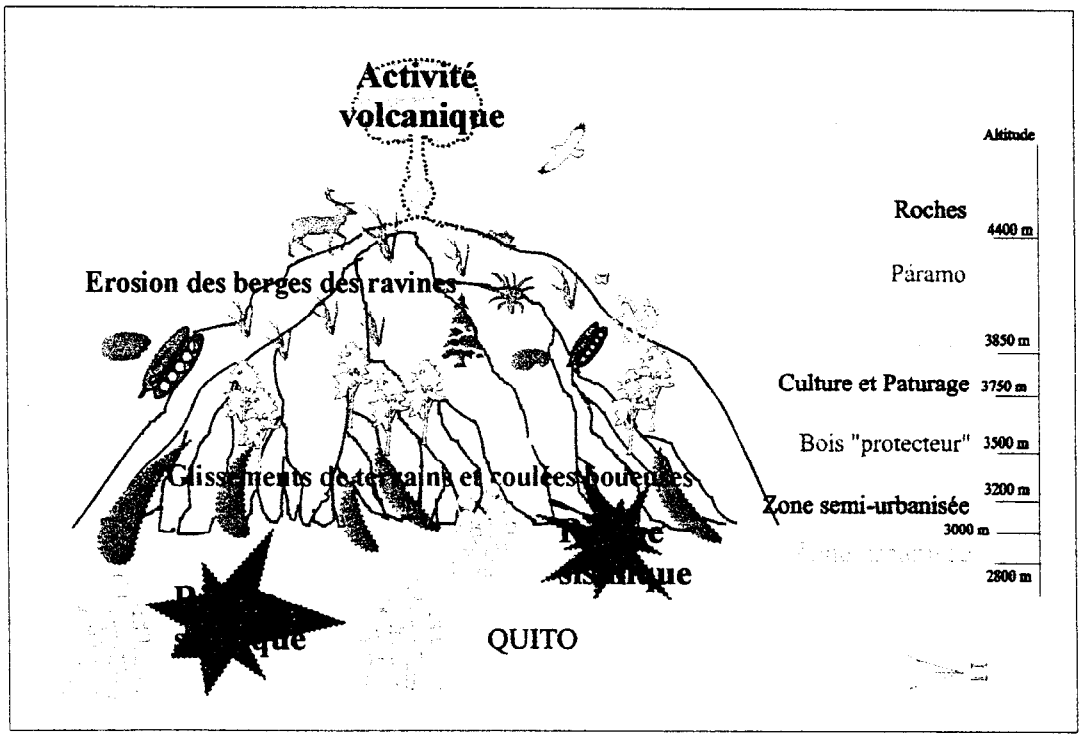


Figure 1 : le volcan Pichincha, schéma de son écosystème et des risques potentiels.

Cette étude a été réalisée en étroite collaboration avec Edgar Ayabaca et Jean-Louis Perrin, hydrologues modélisateurs du projet Sishilad. L'étude de l'érosion et de l'hydrodynamique a été menée par Carlos Gutiérrez, agent mis à disposition par l'Inamhi, et par trois étudiants équatoriens, sous ma responsabilité.

La synthèse ci-dessous présente la méthodologie employée, les résultats obtenus sans entrer dans le détail des données de terrain qui seront développées dans le catalogue des états de surface et les principales recommandations utiles à la gestion du milieu naturel des bassins versants orientaux nord du volcan Pichincha.

2. Méthodologie :

Notre recherche est de type expérimental et procède de l'obtention de mesures au champs afin d'apprécier l'hydrodynamique et l'érosion du milieu. Auparavant, nous avons identifié les sols (définition de la structure et de la tesphrostratification[1]) et obtenu une cartographie des sols et de leurs utilisations. De plus, nous avons mené une étude de la gestion spatiale du bassin versant expérimental.

2.1 Etude de l'hydrodynamique

Deux outils nous ont permis de caractériser les paramètres de l'hydrodynamique de ces sols volcaniques en fonction de leurs particularités écologiques (gradient altitudinal, pente, couverture végétale, utilisation, etc.).

2.1.1 Simulation de pluie

La simulation de pluie permet d'obtenir des pluies artificielles ayant des caractéristiques similaires à celles des pluies naturelles.
Trois campagnes de simulation de pluie[2] ont été menées sur les versants orientaux du Pichincha et une campagne sur sol volcanique induré. Les durées-intensités ont été définies à partir de données hydrologiques du programme Sishilad, pour quatre pluies (sur sol sec et, 3h, 12h et 24 heures après la première pluie) sur une même parcelle.

2.1.2 Points quadrats

L'appareil constitué d'aiguilles mobiles espacées de 5 cm sur un support, permet de quantifier les constituants des états de surface, de mesurer le micro-relief de chaque parcelle et de définir ainsi les éléments pouvant jouer un rôle sur un écoulement superficiel potentiel.

2.2 Etude de l'érosion

2.2.1 Parcelles de mesures au champ

Trois parcelles ont été installées le long de la toposéquence du bassin versant de Rumihurcu. Ces parcelles ont été choisies en fonction de leur utilisation intensive par l'homme afin d'estimer l'impact de celui-ci sur l'écoulement, principale préoccupation du programme Sishilad.
Leurs caractéristiques générales ont été exposées dans le rapport Janeau et al., 1996, 1997. Rappelons rapidement que leur taille a été définie en fonction du parcellaire moyen des

---

[1] tesphrostratification : agencement vertical des différents dépôts volcaniques.
[2] Appareil prêté par le Ministère de l'Agriculture (MAG) à la demande de Jean-Louis Janeau et d'Edgar Ayabaca.

habitants des zones semi-urbanisées et maintenue identique quelle que soit l'utilisation du sol, à des fins de comparaisons.
Ces parcelles ont généré un suivi sur 2 ans et malgré les vols et le vandalisme, les données obtenues sont fiables sur cette période. Ces parcelles sont toujours opérationnelles sous réserve d'une maintenance minimum et de la réinstallation de limnigraphes au sein des réservoirs collecteurs. Elles sont depuis juin 97 gérées par le personnel équatorien.

2.3 Mesures analytiques

Grâce à une convention signée entre l'Emaap-Q et le Service Equatorien du Service Sanitaire Agronomique (SESA) sur mon initiative, des analyses courantes de granulométrie, de mesures d'humidité et de certains paramètres physico-chimiques du sol ont été obtenues[3].
Les principaux paramètres étudiés sont la granulométrie qui permet de définir la texture du sol (ses principaux composants), le taux de matière organique, le rapport Carbone sur Azote, l'humidité relative et la densité apparente. Ces caractéristiques particulières à chaque type de sol et de couche de cendres volcaniques permettent d'apprécier la porosité et donc les coefficients d'écoulement interne (hydrodynamique) et dans une moindre mesure la stabilité des sols.

2.4 Cartographie.

2.4.1 Sols : coupes transversales et longitudinales

Deux campagnes d'observation cartographique (creusement de fosses, perforations à la tarière et prélèvements) en pédologie ont été menées afin d'élaborer une carte au format A2, Poulenard 1996, Janeau et al, 1997. Les coupes transversales et longitudinales ont permis de définir une topochronoséquence représentative sur laquelle ont été effectuées les mesures expérimentales.

2.4.2 Utilisation des sols

A partir de photos aériennes, de données du système de positionnement satellite (GPS), de résultats d'enquêtes auprès de la population des flancs du Pichincha et de nombreuses reconnaissances de terrain par transects représentatifs, deux cartes au format A0 (sous logiciel Autocad) ont été élaborées au sein du programme Sishilad. Il est important de considérer que ce document cartographique sert de base de travail à un moment donné puisque, notamment en partie basse des bassins versants du Pichincha, l'occupation des sols est sujette à une forte anthropisation.

3. Résultats :

Du point de vue scientifique, ces résultats ont permis d'obtenir une information réelle qualitative et quantitative. D'autre part du point de vue humain, grâce à la contribution financière de l'EMAAP-Q, il a pu être assuré :

- la formation de trois étudiants agronomes équatoriens;
- l'initiation-formation d'un ingénieur de l'INAMHI aux procédés de l'étude de l'érosion;
- l'initiation aux techniques de simulation de pluies du personnel de l'Emaap-Q.

[3] Les méthodes "classiques" de laboratoire ont été employées par les étudiants équatoriens sous la direction de chimistes confirmés.

De plus, la collaboration avec les différents chercheurs et ingénieurs du projet Sishilad a permis une exploitation des résultats expérimentaux plus ample qu'en les maintenant au seul niveau pédologique "stricto sensu".

3.1 Exploitation des données

3.1.1 La Cartographie

La carte des sols, de l'utilisation des sols et du secteur urbain du bassin versant Rumihurcu a permis d'obtenir un canevas de travail pour l'extension de la cartographie à l'ensemble du district métropolitain de Quito.

3.1.2 L'étude des sols

La caractérisation spatiale et physico-chimique des sols a permis de comprendre leur genèse et leur évolution et par là même d'élaborer des hypothèses de fonctionnement hydrodynamique de l'ensemble du bassin versant expérimental.

- La mise en évidence d'un horizon de pierre ponce et de paléosols dans le premier mètre du sol démontre la forte porosité du sol et son rôle de réservoir en partie haute du volcan Pichincha (> 3600m d'altitude).

3.1.3 L'étude de l'érosion

La parcelle située en zone de bois protecteur et sous cultures possède des Andisols aux caractéristiques similaires : se sont des Udolls, Hapludolls, Vitrandic Hapludoll. La parcelle au sein du *Páramo* sous brûlis est située sur Andisol, Aquand, Mélanocryand, Vitric, Humic y Thaptic.

Malgré une pente forte des trois sites de mesures, comprise entre 30 et 40 %, l'érosion laminaire en conditions naturelles est faible. Par contre, en conditions anthropisées, spécialement lors des brûlis, l'écoulement s'accroît fortement et son corollaire l'érosion, également.

- Le problème de l'érosion est donc, en conditions naturelles, celui des bords de berge et des zones à forte pente, dans le *matorral* qui possède une grande infiltration (surcharge hydrique et donc de poids).
- La deuxième préoccupation, prioritaire pour l'Emaap-Q, doit être la limitation de l'action anthropique sur l'ensemble du bassin versant.

3.1.4 Etude de l'hydrodynamique

Un catalogue des pluies simulées sera élaboré fin 1998, début 1999, décrivant avec précision les expérimentations au sein des différents milieux étudiés. Ci-dessous, nous résumons les principaux résultats obtenus dans le cadre de cette étude spécifique. Les annexes permettent une visualisation rapide des principaux paramètres de l'hydrodynamique de ce milieu où le gradient altitudinal joue un rôle remarquable.

3.1.4.1 La zone semi-urbanisée : 3000-3300 m.s.n.m.

4% de la surface du bassin versant est urbanisé et sujet à de forts ruissellements mais la partie limitrophe amont de cette zone est constituée approximativement de 10% de constructions, 30% de zones imperméabilisées (routes, cours d'habitations, briqueteries) et 60% de jardins, de jachères ou de petites cultures vivrières.

Cette zone est située en bordure aval du bois d'eucalyptus, fortement et périodiquement dégradé (brûlis et coupe à blanc) qui lui aussi peut développer lui aussi des ruissellements non négligeables.

L'emboîtement de ces différentes sous-unités en voie d'urbanisation rapide est génératrice de crues si l'on s'en réfère aux mesures sous simulations de pluies (annexe 1 à 4). La surface à fort ruissellement, contributive des crues est alors bien supérieure à la zone urbanisée «stricto sensu».

- Incidence des caractéristiques du sol et de son occupation à vocation urbaine :

- La surface du sol est encroûtée dans les cours des habitations ou imperméabilisée par des constructions.
- Le sol constitué de cendres volcaniques indurées anciennes (*cangahua*) et de colluvions à structure massive possède une faible porosité et donc une faible rétention en eau.

L'association de ces deux éléments génère des écoulements importants et rapides.

- Incidence des caractéristiques des pluies

- Sur parcelles dénudées, la faible infiltration permet un ressuyage rapide mais les ruissellements sont importants même sous faible intensité de pluie.
- Les pluies d'imbibition sont faibles et l'écoulement superficiel est rapidement observable.

Les crues sont générées au sein de cette zone de faible superficie mais en constante évolution quelle que soit la date dans la saison des pluies.

3.1.4.2 La zone de bois d'eucalyptus : altitudes variables

L'eucalyptus dominant et les conifères occupent environ 6% de la surface du bassin mais jouent un rôle prépondérant, régulateur de la migration en altitude de l'urbanisation.

- Incidence des caractéristiques du sol et de son occupation à vocation sylvicole :

- Les sols ont des caractéristiques variables puisque le gradient altitudinal des bois d'eucalyptus s'étage entre 3100 m et 3500 m mais ils ont tous tendance à avoir des structures massives, par contre si le développement de l'eucalyptus n'est pas perturbé par des coupes à blanc, l'impact neutralisé des gouttes de pluies et la faune microbienne de surface permettent une infiltration importante malgré des pluies d'intensité-durée forte (de 20 à 120 mm/h, total de 90mm). Cependant, si l'eucalyptus est détruit totalement (coupe intense et brûlis), il favorise des écoulements, un transport solide important et éventuellement un départ en bloc de monolithes de sols.
- L'autre problème lié à l'eucalyptus est qu'il développe en majorité des bois monospécifiques par la densité de son couvert et par la production d'une enzyme racinaire laissant à d'autres espèces peu de possibilités de croître. De plus, cette espèce est très prisée des habitants pour la construction.

Dans un cadre de protection des bassins versants, il est préférable de procéder à l'implantation d'espèces différentes afin de limiter l'intérêt de la coupe pour les habitants de ces zones, tout en jouant le même rôle protecteur.

3.1.4.3 La zone de cultures : 3500 - 3750 m.s.n.m.

Les cultures traditionnelles occupant 12% du bassin versant doivent être maintenues mais non accrues en superficie.

- La simulation de pluie a mis en évidence une forte infiltration et une faible érosion. Une surveillance doit cependant être maintenue pour interdire toute extension des cultures notamment en zones de *matorral* et donc de forte pente.

3.1.4.4 La zone de prairies : 3750 - 3850 m.s.n.m.

Les andisols de ces zones représentant 7% du bassin versant ont une tendance à la compactation sous le passage répété des bovins, élevage principal de cette zone. Une limitation du nombre d'animaux à l'hectare, la permanence de ces troupeaux sur la même

3.2.2 Bases de données bibliographiques

De nombreux travaux ont été menés sur les sols volcaniques dans de nombreux pays. De fortes analogies ont été constatées avec les andisols d'Equateur, ce qui nous a amené à constituer une base de données sous logiciel Access de Microsoft.
Cette base de données bibliographiques, en cours d'élaboration, permet de posséder des références scientifiques vis à vis du comportement physiographique de ces sols et des dangers potentiels associés à ceux-ci.

4. Recommandations

L'ensemble de ces mesures vise à protéger le milieu dont l'érosion naturelle est active à grande échelle, sur l'ensemble de ce massif volcanique jeune à l'échelle géologique. Si au sein des bassins versants compris entre la *quebrada Miraflores Sur* au sud et la *quebrada El Rancho* au nord, un seuil d'équilibre naturel de l'écosystème est maintenu, les zones périphériques en aval seront moins affectées par les conséquences des événements hydrométéorologiques majeurs.
Cependant, l'anthropisation forte des flancs du Pichincha associée à son érosion naturelle, génère la nécessité d'ouvrages de protection des zones urbanisées qui doivent pouvoir résister à des flux boueux, risque majeur hors risques volcanique et sismique.

4.1 Au niveau gouvernemental

Il est nécessaire de déclarer le volcan Pichincha comme parc naturel. Cette aire doit permettre des activités anthropiques traditionnelles (cultures, élevage, sylviculture) sous contrôle des gardiens du parc. Les objectifs sont :

- Création du parc naturel à partir de la côte 3600m d'altitude et d'une zone d'amortissement jusqu'à la côte 3300m minimum incluant le bois protecteur.
- Au sein de ce parc, l'élevage d'alpagas ou autres camélidés à forte plus-value peut être exploité afin de limiter l'élevage bovin voire le remplacer à moyen terme.
- Un secteur éducatif, touristique et hôtelier doit se développer sous contrôle d'Organisation Non Gouvernementale (O.N.G.) en contact étroit avec les services de l'Emaap-Q. Ces activités doivent prendre soin d'inclure la population locale.

4.2 Au niveau municipal

- La collecte, le transport et le tri des déchets et décombres divers doivent être quotidiens. Ces actions éviteront le bouchage des écoulements au sein des *quebradas*. Elles permettront une diminution des vecteurs de maladies et de parasites et donneront un aspect plus agréable sur le plan psychologique à ces zones délaissées.
- Des brigades de surveillance impliquant les responsables de quartiers doivent être mises en place afin d'éviter toute construction dangereuse et afin de faire respecter les règlements municipaux concernant les *quebradas*.

4.3 Au niveau communautaire

Il s'agit par des actions à moyen et long terme de promouvoir la participation de la communauté au sein d'activités protectrices de l'écosystème. La conscientisation des communautés vivant sur les flancs du Pichincha est fondamentale pour sa conservation.

- Des campagnes de connaissance du milieu doivent être développées au sein des écoles primaires des quartiers périphériques de la ville.
- De même, des cours d'écologie doivent être donnés aux instituteurs de ces quartiers.

L'ensemble de ces mesures peuvent conduire à des sorties et campements à vocation écologique, à des concours inter-écoles et à des festivals en faveur de l'Ecologie.

4.4 Au niveau de l'EMAAP-Q

- La construction d'ouvrages recommandés par le consortium EGESCO et en cours de réalisation par le programme "Laderas del Pichincha", devrait permettre la contention et le transport de la majorité des flux hydriques. En saison des pluies, selon l'état actuel de nos connaissances, ceux-ci ont un taux de sédimentation faible en période de retour inférieure à 10 ans.

Deux phénomènes doivent cependant être surveillés rigoureusement :

- la canalisation de ces flux jusqu'au réseau d'assainissement de la ville de Quito. Le lit des *quebradas* doit être dépourvu de perturbations majeures (poubelles, décombres, arbres, éboulement de berge) afin d'éviter tous risques de formation de barrages artificiels.
- les coulées boueuses générées lors d'événements hydrométéorologiques majeurs (la Gasca 1976, La comunidad, 97, 98) sont dangereuses. Au vu des conditions géomorphologiques et de milieu en général, il semble difficile de construire des ouvrages capables de résister aux puissants impacts de ces flux à forte charge solide et à vitesse élevée.

Il est donc nécessaire d'être vigilant vis à vis des rapides changements urbanistiques de la zone basse des bassins versants et de protéger les zones à forte pente des *quebradas*.

- La caractérisation des sites d'érosion des berges, des talus et des mouvements de masse des versants est fondamentale pour limiter l'apparition de coulées boueuses. Une étude géotechnique et un suivi cartographique au moyen de prises de vues par vidéo-aérienne, à pas de temps variable permettrait d'apprécier l'évolution de ces phénomènes et de les minimiser.

- La mise en place d'un réseau de mesures automatisé et à long terme pluviographique et liminigraphique, permettra de spatialiser les événements et leur impact sur les zones sensibles définies par une étude géotechnique du milieu (cf. paragraphe ci-dessus).

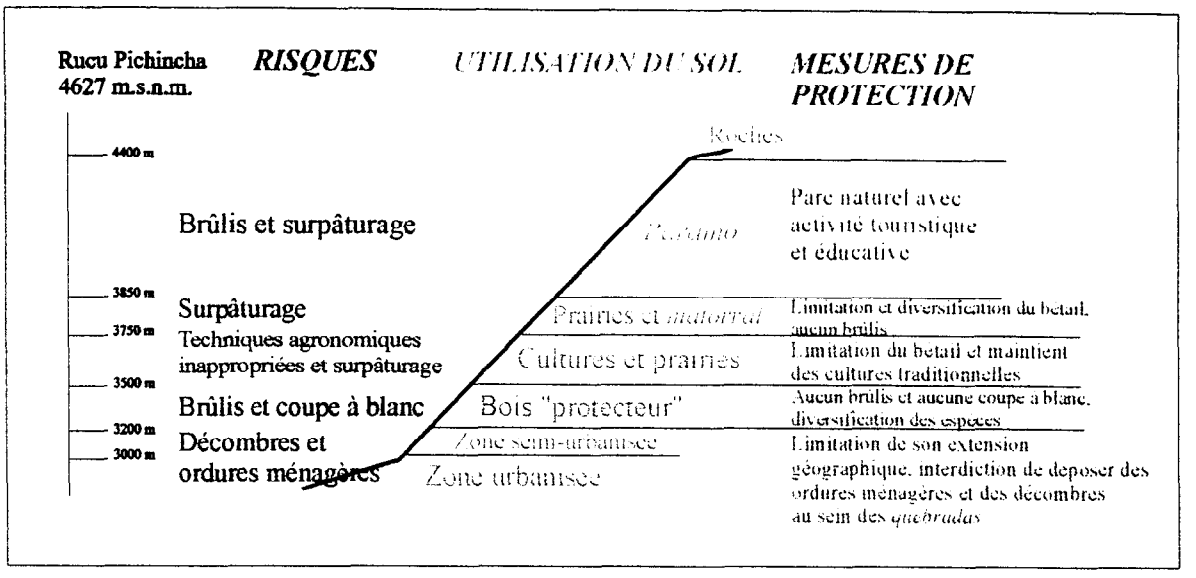


Figure 2 : risques et mesures de protection sur les flancs orientaux du Pichincha.

5. Perspectives pour une recherche future sur les flancs orientaux du volcan Pichincha

C'est l'échelle spatiale d'étude (court et moyen terme) qui détermine dans un premier temps le choix des orientations de recherche du programme.

5.1 A moyen terme.

Il serait souhaitable d'étudier l'érosion des berges, l'érosion liée au surpâturage et au brûlis (deux pratiques souvent associées) et de maintenir un suivi des parcelles existantes.

- Une étude fine de l'érosion des berges de chaque *quebrada* doit être menée afin de limiter les éboulements et les glissements de terrain qui pourraient créer des zones d'accumulation d'eau de ruissellement ou de boue en amont des zones urbaines voire générer des coulées boueuses. Cette étude est à la fois cartographique (localisation des zones potentielles instables) et analytique (connaissances des caractéristiques de glissements).
- Affiner les mesures d'érosion sur du moyen terme et compléter une étude sur le surpâturage.

Les mesures d'érosion obtenues doivent être validées sur du long terme (idéal = 10 ans). Elles permettraient des mesures comparatives avec d'autres secteurs au niveau régional, national voir andin.

Le surpâturage est un problème aigu tant par la destruction de la végétation native qu'il engendre que par sa contribution à l'augmentation du ruissellement en zone haute du volcan Pichincha par compactation du sol et réduction du couvert végétal. Une étude écopastoraliste par mise en défend, mesure de la biomasse en fonction du type d'élevage, mesure de perméabilité du sol et obtention de paramètres socio-économiques devrait être menée.

- Une étude fine des zones de saturation localisées au sein du *Páramo* permettrait de connaître la taille et le rôle de ces réservoirs tout au long de l'année. Des mesures hydrodynamiques et tensiométriques en continu sont nécessaires à ce type d'étude.

- Cartographie extensive au moyen de prises de vues par vidéo-aérienne sur l'ensemble de la zone métropolitaine de Quito.

Cette technique permettrait un gain de temps et d'argent vis à vis des techniques classiques telles la photo-aérienne par avion ou l'imagerie sattelitale. De plus, l'utilisateur, s'il possède la chaîne complète de traitement[5], est totalement indépendant de toute structure logistique lourde et complexe à mettre en oeuvre. La flexibilité du système permet, si l'on a des points géoréférencés au sol, d'obtenir des statistiques d'occupation au sol à pas de temps choisis et variables ainsi qu'une cartographie rapide de zones spécifiques.

5.2 A court terme.

- Edition d'un CD-Rom sur lequel l'ensemble des données pédologiques sera accessible. Ce moyen informatique permet un accès rapide à l'information. C'est une banque de données facile d'utilisation qui peut être inclue au sein du système information géographique (S.I.G.) de l'Emaap-Q.

6. Documents, participation à des manifestations scientifiques et techniques, Formation

6.1 Documents techniques et scientifiques

Les rapports d'étape ont permis de connaître l'état d'avancement du programme. De plus, ces documents définissent les orientations nécessaires en fonction des résultats obtenus pour le projet et pour la gestion et la préservation du milieu étudié.

- Janeau, JL, Gutiérrez C., 04/1996. *Proyecto SISHILAD, área de edafologia. Informe de actividades del 1 de octubre de 1995 al 15 de marzo de 1996. 40p., 7 tab., 7 fig., 2 mapas, 2 plan.fotos.*
- Janeau, JL, Gutiérrez C., 05/1997. *Proyecto SISHILAD, área de edafologia. Primeros resultados y Informe de actividades del 15 de marzo de 1996 al 15 de mayo de 1997. 22p., 1 mapa A0, 1 plan.fotos.*
- Leroux Y., Janeau J.L. 1997. *Influencia de las costras de superficie sobre la hidrodinámica.* III séminaire international des sols indurés : Quito, Equateur, décembre 96. Publication dans *"Suelos Volcanicos Endurecidos"*, Collection Orstom Quito.

Plusieurs articles scientifiques sont à paraître courant 99 afin de valoriser le travail important des différents chercheurs du programme Sishilad et permettre une diffusion régionale ou internationale à des fins de comparaisons et de diffusion de la connaissance.

[5] A titre d'information la chaîne de traitement de la vidéo aérienne se compose d'une caméra analogique type Sony DV 1000, d'une carte d'acquisition d'image fixe DVBK 2000 E, d'un micro-ordinateur doté de microprocesseur rapide (333 mhz) et de mémoire importante tant en Ram qu'en disque dur, et du logiciel Savane.

6.2 Vulgarisation

- Un triptyque de présentation du projet Sishilad regroupant les thèmes des différentes recherches et méthodologies, a été diffusé début 96 à de nombreux visiteurs et institutions nationales et internationales.
- Un article paru dans la revue *Desastres* de l'Office Panaméricaine de la Santé (O.P.S.) a permis de faire connaître le programme de recherche et d'obtenir des informations bibliographiques sur des études aux préoccupations similaires.
- Deux articles dans le périodique *Hoy* ont diffusé une information hélas parfois déformée à des fins journalistiques sur les risques potentiels de l'écosystème "Pichincha".
- Les visites de nombreux agents de l'Emmap-Q et d'autres organismes nationaux et internationaux (80 environ) ont contribué à la dynamique du programme Sishilad.
- L'éxposition de posters de vulgarisation permet de présenter les techniques et les résultats de Sishilad à un large public au sein de différentes manifestations.
- Une conférence au *Café Libro* de la Ville de Quito a démontré l'intérêt que portent les Quiténiens aux problèmes environnementaux liés à la présence du volcan Pichincha.

6.3 Participation à des événement techniques et scientifiques

- La participation d'Edgar Ayabaca et de Jean-Louis Janeau à un exercice de simulacre de catastrophe lié à un événement hydrométéorologique exceptionnel a permis d'évaluer les possibilités et les défaillances potentielles de la municipalité de Quito et de l'un de ses organismes, l'Emaap-Q.
- La participation de Jean-Louis Janeau et de Carlos Gutiérrez au Congrès national des sciences du sol du Venezuela, a permis un échange d'informations sur la recherche en pédologie dans les domaines de l'hydrodynamique et de l'érosion en milieu andin.
- La présentation d'un poster au III séminaire international 1996, "Sols Volcaniques indurés" à Quito, a été l'occasion d'exposer le résultat des études menées sur sols indurés type "*cangahua*" rencontrés en partie basse du versant expérimental du bassin versant Rumihurcu.
- Le séminaire-atelier, INIAP 98, a donné l'occasion de mettre en avant la préoccupation de l'Emaap-Q vis à vis des perturbations d'ordre naturel et anthropique que subit le volcan Pichincha.
- Une conférence au sein de la Défense Civile d'Equateur a donné aux différents participants une idée précise de la préoccupation de l'Emaap-Q vis à vis des risques potentiels hydro-pédologiques des flancs orientaux de la ville de Quito.

6.4 Formation

L'Orstom est conscient que la formation de personnel spécialement au niveau universitaire n'est pas une priorité en soit pour l'Emaap-Q. Cependant en fin de programme :

- Trois étudiants équatoriens de niveau ingénieur agronome (Université Central d'Equateur) ont pu, grâce aux ressources budgétaires de l'Emaap-Q, être initiés aux méthodologies du domaine de la pédologie et ont obtenu des données de terrain nécessaires au programme Sishilad.

- Viveros P., 1997. *Estudio de la hidrodinámica en suelos representativos de una toposecuencia de la cuenca de Rumihurcu (volcán Pichincha) bajo simulación de lluvia.*

- Cisneros F., 1997. *Influencia de la vegetación sobre la hidrodinámica de los suelos en una toposecuencia representativa de la cuenca Rumihurcu.*
- Cueva C., 1998. *Estudios de la erosión de algunos suelos representativos en una toposecuencia de la cuenca de Rumihurcu (volcán Pichincha).*

- L'ingénieur Pablo Viveros à la suite de cette formation a été recruté au sein de l'aire de pédologie et a ainsi contribué à l'obtention de données hydriques et cartographiques de Sishilad, cf. son mémoire d'ingénieur ci-dessus cité et le travail associé de :

- Viveros P. et Gallegos D., 1998 intitulé "Cartographie des sols et de leurs utilisations du bassin versant *La Comunidad*".

- Deux étudiants français de niveau 3ème cycle (1 DESS, 1 DEA plus Doctorat) ont profité du champ d'expérimentation et/ou des compétences en pédologie du programme Sishilad. Les rapports de ces jeunes chercheurs ont contribué à l'accroissement des connaissances hydro-pédologiques des sols volcaniques propres à la périphérie de la ville de Quito.
  - Poulenard, J. 1996. Caractérisation et classification de sols dérivés de cendres volcaniques récentes, volcan Pichincha en Equateur.
  - Leroux Y., 1996. Caractérisation hydrodynamique de sols volcaniques indurés (*cangahuas*), cultivés en Equateur

Enfin, S. Rosero et Ivan Reyes, deux agents de l'Emaap-Q ont été initiés aux techniques de simulation de pluie lors des campagnes de mesures de terrain. Si l'Emaap-Q devient détenteur ce matériel, ils pourront assurer l'obtention de données hydrodynamiques de terrain, fiables et répétitives.

7. Travaux d'expertises et divers

7.1 Glissements de terrain, province d'Esmeraldas

A la demande des autorités de la province d'Esmeraldas, l'Ambassadeur de France en Equateur a demandé la venue de 3 spécialistes de l'IRD-Orstom afin d'étudier les glissements de terrain liés aux conditions morphologiques du milieu et aux pluies diluviennes, conséquences du phénomène El Niño (ENSO).
Accompagnés de mes collègues J-L Perrin et P. Podwojewski, nous avons durant 10 jours, observé et quantifié les problèmes.
Un document de synthèse contenant des recommandations de protection du milieu, des infrastructures urbaines et pétrolières a été remis aux autorités

7.2 Risque volcanologique, province du Pichincha.

Une cellule de crise gouvernementale a été formée suite à la récente activité extrêmement forte du volcan Pichincha dominant la ville de Quito et au déclenchement de l'alerte jaune début octobre pour le district de Quito.

Trois rencontres avec les autorités supérieures du pays :
1 - Ministre de l'environnement, ministre du tourisme, ministre de l'agriculture, ministre du commerce extérieur – J-P Metaxian et J-L Janeau.
Réunion d'information et définition de mesures d'urgence.

2 - Ministre du tourisme - J-P Metaxian et J-L Janeau
Réunion d'information et rédaction d'un document de prévention pour le tourisme en situation de risque volcanologique (éruption et lahars).

3 - Conseiller de la présidence de la République (bras droit du président de la République) – J-L Perrin, J-P Metaxian, J-L Janeau, M. l'Ambassadeur de France.
Réunion d'information et rédaction d'un document de prévention pour le président de la république.

7.3 Glissements de terrain, province de Azuay

Une réunion d'information a été générée par M. l'Ambassadeur de France, avec la ministre de l'environnement au sein des locaux de l'IRD-Orstom de Quito. Au cours de celle-ci, il a été mis en exergue la forte préoccupation des autorités vis à vis des glissements de terrain et de l'érosion dans la partie sud du pays.
Une mission a été organisée par la ministre de l'environnement qui a convié J-L Perrin et J-L Janeau en tant qu'experts pour un diagnostic de mesures de protection du milieu.

7.4 Construction d'une station limnigraphique et installation de 3 sites de mesures tensiométriques

Afin de compléter le dispositif expérimentaux en zone de *páramo* et à la demande de Jean-Louis Perrin, j'ai installé une station de mesures limnimétriques avec déversoir en V (photo 1) et 4 sites de mesures tensiométriques (2 Páramo, 1 Matorral, 1 Zone semi-urbanisée).

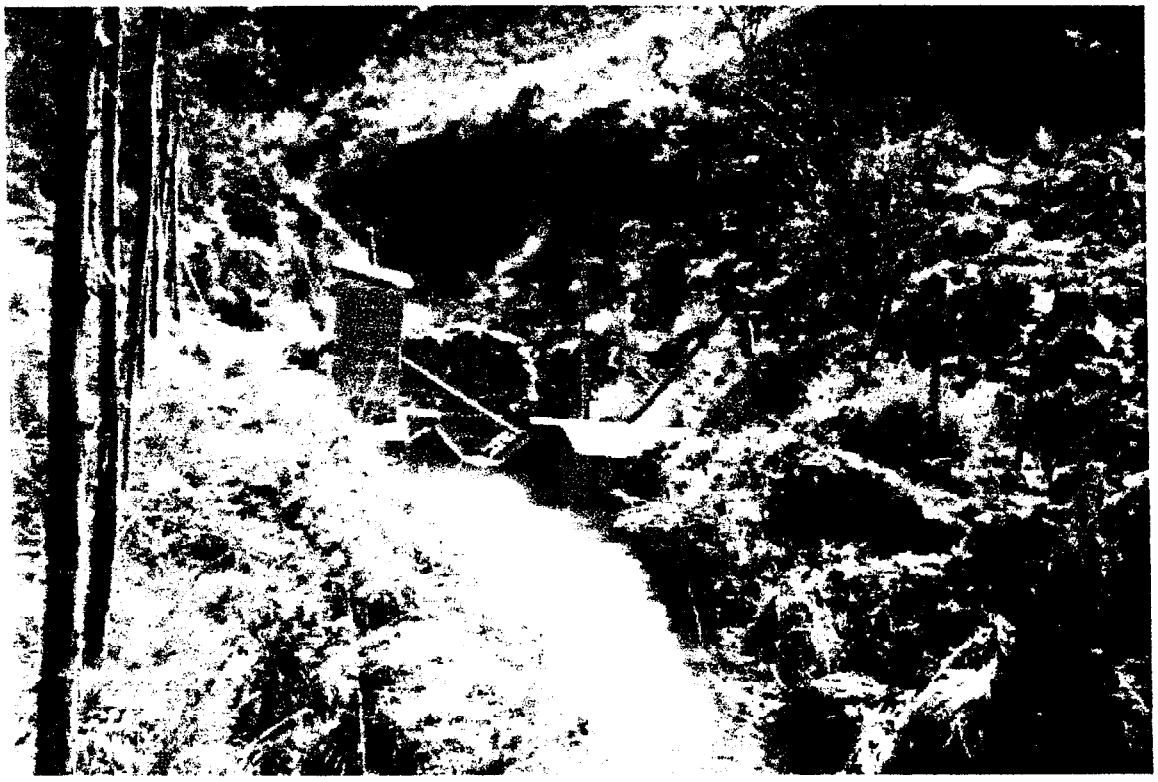


Photo 1 : station limnigraphique de la zone du *Páramo*

REMERCIEMENTS

Je remercie ici toute l'équipe travaillant en pédologie au sein de Sishilad, Carlos Gutiérrez, Fanny Cisneros, Carlos Cueva et spécialement Pablo Viveros qui fut une pièce maîtresse de l'acquisition de données de terrain.
La collaboration entre disciplines étant un point fort de cette recherche, qu'Edgar Ayabaca soit ici spécialement remercié pour son apport significatif au traitement et à l'utilisation des données de simulation de pluies qui ont abouti à l'élaboration d'un modèle mathématique basé sur des données réelles du milieu.
Je n'oublie pas non plus la cordialité des différents personnels du programme Sishilad, Alfredo de la Cruz, Francisco Cruz, Shubert Rosero, Luis Carrera, Ivan Reyes, notre secrétaire-traductrice, Laurena Cardenas et notre vaguemestre Francisco Olmedo.
J'adresse un remerciement spécial en cette fin de programme à Christophe Bouvier et Jean Collinet qui par leur expérience et leurs conseils ont apporté un soutien primordial à l'équipe pédologique du programme SISHILAD.
Enfin, que soient chaudement remerciés et félicités Jean-Louis Perrin dans sa tache de coordinateur pour l'Orstom Quito du programme Sishilad et mes collègues français, Jérôme Poulenard, Yann Leroux, Benoît Fourcade, Gwénaëlle Menez dont la coopération ponctuelle fut fort appréciable.
La coopération des différentes disciplines, l'hydrologie, la pédologie et la géotechnie et de trois institutions partenaires, l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) ex Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM), l'*Empresa Municipal de Alcantarillado y Agua Potable de Quito* (EMAAP-Q) et l'*Instituto National de Meteorología y Hidrología* (INAMHI) a permis de développer un programme de recherche à finalité appliquée, pragmatique et de définir ainsi les perspectives de recherche et les recommandations nécessaires à la protection du volcan Pichincha.
Nous n'oublierons pas ici l'appui logistique du Ministère de l'Agriculture Equatorien (MAG), du Service Equatorien Sanitaire Agropastoral (SESA) et de la Défense Civile Equatorienne.

Annexe 1 : tableau récapitulatif des résultats de simulation de pluie concernant le ruissellement en zones naturelles.

Unité Cartogra.	Altitude Parcelle	Pente (%)	Pluie totale (mm)	KRx en Sec (%)	KRx en Humide (%)	KRx (%)	Ksat (mm/h Sec - Humide		Rx max (mm/h) Sec - Humide	
Páramo	**3960 m**									
Versant	P1	38,3	114,7			75,7	20		23,7	
"	P2	38,1	297,5			27,4	20		27,2	
"	p3	42,3	95,2	18,5	24		31	28,7	25,5	40,3
"	p4	30,2	94,2	27,5	49,2		32,8	27,5	58	78,6
"	p5	28,3	94,1	68,7	87,1		27,5	18,4	113,2	121,2
Zone plane	P1	7,7	114,7			5,4	18,4		6,6	
"	P2	4,4	299,6			6,3	18,4		6,6	
"	p3	9,3	94,7	67,8	83,8				106,2	115,2
"	p4	9,2	94,4	26,7	39,2				51,1	65,5
"	p5	13,6	94,1	73,6	84,8				110,1	129,6
Pâturage	**3850 m**									
	P1	27,7	112,6			0,8	23		7,9	
	P2	27,7	299,6			3,3	23		42	
	p3	30,6	94,6	43,7	74,3		30,5	20,3	82,4	107,1
	p4	29,8	94,7	2,74	14,1		42	30,9	11,5	31,4
	p5	30,7	94,9	16,8	29,2		33,1	26,7	34,7	8,9
Matorral	**3800 m**									
	Mata 11	43	94,2	4,6	31,8		29	22	23,7	75,6
	Mata 21	40	94,2	15,8	57,9		24	18	43,2	111,6
	Mata 31	37	94,2	3,1	27,4		35	23	6,8	72
Bois	**3250 m**									
Dénudé	P1	58,6	17,5			58,4	5		19	
"	P2	55,3	30,5			66,6	5		49,8	
"	p3	36,9	94,4	77	79,5		16,5	4,4	103,2	94,2
"	p4	40,6	93,7	77	84,9		11,8	9,9	97,1	107,7
"	p5	39,7	93,5	70,2	88,8		25,1	10,7	112,9	118,3
Végétalisé	P1	57,7	114,7			7,27	27		1,9	
"	P2	47,6	64,6			24,9	27		38,8	
"	p3	56,2	93,7	73,7	88,1		16,2	9,6	97,2	112,5
"	p4	45,9	94,1	61	76,8		23,6	18,1	94,9	109,8
"	p5	50,6	93,7	73,1	93,4		19,7	9,5	107,4	119,7
Cultures	**3395 m**									
	P1	39,2	114,7			5,9	70,3		1,64	
	P2	39,2	299,6			2,8	70,3		1,99	
	p3	39,9	94,3	10,4	46,6		35,7	23,5	23,8	69,4
	p4	33,7	94,3	23,8	43,9		30,2	27,4	46,2	75,1
	p5	40,8	94,3	12	38,5		38	26,3	33,2	69,5

Annexe 2 : tableau récapitulatif des résultats de simulation de pluie concernant le ruissellement en zones péri-urbaines.

Unité Cartogra.	Altitude Parcelle	Pente (%)	Pluie totale (mm)	KRx en Sec (%)	KRx en Humide (%)	KRx (%)	Ksat (mm/h Sec - Humide		Rx max (mm/h) Sec - Humide	
Zone semi-urbanisée 3960 m										
Dénudée	Des227	22.5	40.5			11.9			7.9	
"	Des270	22.5	105			39.54			46.8	
"	Desn1	27.8	94.3	81.2	93.5		16	2	102.9	117
"	Desn3	20.2	94.3	61.4	89.9		17	7	82.8	111.6
"	Desn4	22.5	94.3	62.2	82.6		20	14	94	110.5
Végétalisée Basse ***	Smd127	20.5	40.5			12.1			4.3	
"	Smd170	20.5	105			81.3			58.3	
"	Smd2	23.5	96.3	73.5	92.4		13	5	113.6	124.6
"	Smd3	27.7	100	95	-		3	2	129.6	129.6
"	Smd4	20.5	94.3	55.2	75.8		15	4	92.5	109.1
Végétalisée haute	Zsuvegt 27	26.6	40.5			1.2			0.3	
"	Zsuvegt 70	26.6	105			24.9			21.2	
"	Zsuvegt 1	30	94.3	11.8	15.5		27	20	17.1	27.9
"	Zsuvegt 2	30	94.3	50.1	55.7		27	19	70.5	90
"	Zsuvegt 3	23.1	94.3	26.4	63.3		31	19	62.3	101.9

*** sous réserve de vérifications

Annexe 3 : tableau récapitulatif des résultats de simulation de pluie concernant l'infiltration en zones naturelles.

Unité Cartographique	Altitude Parcelle	Temps maximum d'imbibition (mm) Sec	- Humide	Pluie maximum d'imbibition (mm) Sec	- Humide	Lame infiltrée (%) Sec	-Humide	Lame infiltrée (mm) Sec	-humide
Páramo	**3960 m**								
Versant	P1	27		12.1		26.4		30.2	
"	P2	31		36.1		73		217.1	
"	p3	44	39	24.8	20.6	81.4	75.9	76.1	72.3
"	p4	46	36	26.2	17.2	72.4	50.7	68.2	47.8
"	p5	37	23	17.9	8.5	31.2	12.8	29.4	12.3
Zone plane	P1	191		85.9		94.5		108.4	
"	P2	69		81		93.6		280.6	
"	p3	22	42	20.1	8.6	32.1	16.1	30.5	15.3
"	p4	32	37	18.1	13.9	73.2	60.6	69.1	67.6
"	p5	23	31	10	8.6	26.3	15.1	24.7	14.6
Pâturage	**3850 m**								
	P1	13		5.7		99.1		112.1	
	P2	5		5.8		96.6		289.6	
	p3	30	44	12.6	9	56.2	25.6	53.2	24.2
	p4	76	45	68.3	25.4	97.1	85.8	92.1	81.3
	p5	45	29	25.7	12	83.1	70.72	78.9	67.2
Matorral	**3800 m**								
	Mata 11	7	6	2.6	2.3	91.8	51.9	86.6	48.9
	Mata 21	8	3	3	1.3	76.6	14	72.1	13.2
	Mata 31	9	3	3	1.3	95.4	59.4	89.9	56
Bois	**3250 m**								
Dénudé	P1	4		1.8		41.5		7.2	
"	P2	1		1.1		33.3		10.1	
"	p3	14	1	4.8	0.3	22.9	20.4	21.6	19.2
"	p4	14	3	4.2	0.9	22.9	15	21.5	14
"	p5	22	8	7.5	2.2	29.7	11.2	27.8	10.4
Végetalisé	P1	2		0.9		75		106.4	
"	P2	20		2.3		92.7		48.5	
"	p3	18	5	5.9	1.4	26.3	11.8	24.6	11.1
"	p4	17	14	5.8	4.5	38.9	23.1	36.6	21.7
"	p5	15	7	4.8	2.1	26.8	6.5	25.1	6.1
Cultures	**3395 m**								
	P1	4		1.8		94		107.8	
	P2	1		1.8		97.2		291.2	
	p3	55	29	36.9	11.3	89.5	53.3	84.5	50.2
	p4	32	29	14.5	11.5	76.1	56	71.8	52.8
	p5	59	1	41.4	5.5	88	61.4	83	57.9

Annexe 4 : tableau récapitulatif des résultats de simulation de pluie concernant l'infiltration en zones péri-urbaines.

Unité Cartographique	Altitude Parcelle	Temps maximum d'imbibition (mm) Sec -Humide		Pluie maximum D'imbibition (mm) Sec -Humide		Lame infiltrée (%) Sec -Humide		Lame infiltrée (mm) Sec -humide	
Zone Semi-urbanisée	**3135 m**								
Desnudée	Des227	21		9.4		88.1		35.7	
"	Des270	4		4.6		60.5		63.4	
"	Desn1	4	1	1.33	0.33	18.8	6.5	17.8	6.1
"	Desn3	9	1	3	1.33	38.6	10.1	36.4	9.6
"	Desn4	7	4	2.33	1.33	37.8	17.4	35.6	16.4
Végétalisée Bas***	Smd127	7		3.1		87.9		35.6	
	Smd170	1		0.4		18.7		19.7	
"	Smd2	5	5	1.67	1.67	26.5	7.7	25	7.4
"	Smd3	2	2	0.67	0.67	6.6	5	6.6	5
"	Smd4	5	5	1.67	1.67	73.6	48.3	42.2	26.4
Végétalisée haute	Zsuvegt27	2		0.9		98.8		40	
	Zsuvegt70	1		1.2		76.1		78.9	
"	Zsuvegt1	4	3	1.33	1	84.6	91.1	79.7	85.9
"	Zsuvegt2	13	2	4.3	0.67	49.9	44.3	47	41.8
"	Zsuvegt3	13	5	4.3	1.67	69.4	34.6	26.4	63.3

*** sous réserve de vérifications

Annexe 5 : caractéristiques pédologiques et hydrodynamiques des parcelles de simulation de pluie en milieu naturel.

Parcelles	Types de sol	Végétation et utilisations du sol	Caractéristiques de l'hydrodynamique
Páramo Versant 3960 m P1-P2 P3-P4-P5 Forte pente > 40%	Andisol. Aquand. Melanocryand	Graminée haute. végétation inter-touffe basse. Pâturage intense	Hydrodynamique sub-superficielle liée à la présence d'une couche de pierre ponce (10-15 cm d'épaisseur) située à 40-60cm de la surface
Páramo Zone saturée 3960 m P1-P2 P3-P4-P5 15% de pente maximum	Colluvions ayant pour origine un Andisol. Aquand. Melanocryand	Graminée basse. Pâturage intense	Hydrodynamique profonde liée à la présence d'un sol profond d'origine colluvial. Horizons sableux en alternance avec des horizons limono-argileux.
Pâturages 3850 m P1-P2 P3-P4-P5	Andisol. Cryand. Vitricryand	Graminée basse. Pâturage intense	Hydrodynamique sub-superficielle liée à la présence d'une couche de pierre ponce (5-10 cm d'épaisseur) située à 40-60cm de la surface
Matorral 3300-3800 m Mata 11 Mata 21 Mata 31	Andisol. vitrandic	Végétation native. Pâturage et brûlis pour augmentation des surfaces enherbées	Hydrodynamique interne liée à l'épaisseur variable des horizons du sol vis à vis de la roche mère. Surcharge hydrique forte liée à une profondeur réduite par la forte pente et la proximité des canyons.
Bois 3250 m P1-P2 P3-P4-P5	Mollisol. Udoll. Hapludoll	Eucalyptus brûlé et coupé à blanc. Surface dénudée. Sylviculture incontrôlée.	Hydrodynamique superficielle liée à la présence de croûte de surface
Bois 3250 m P1-P2 P3-P4-P5	Mollisol. Udoll. Hapludoll	Eucalyptus brûlé et coupé à blanc. Surface enherbée. Sylviculture incontrôlée.	Hydrodynamique interne liée à la présence d'une végétation graminéenne basse et à une structure sablo-limoneuse du sol
Cultures 3395 m	Mollisol. Udoll. Hapludoll	Labour récent. Pomme de terre, mais, haricot et fève.	Hydrodynamique interne liée à la présence d'une structure de surface granuleuse et à un sol profond à texture sablo-limoneuse dominante.

Annexe 6 : caractéristiques pédologiques et hydrodynamiques des parcelles de simulation de pluie en milieu péri-urbain.

Parcelles	Types de sol	Végétation et utilisations du sol	Caractéristiques de l'hydrodynamique
Dénudée 3135 m Desn 2 27 Desn 2 70 Desn1 Desn3 Desn4	Mollisol. Ustoll. Durustoll. Sous-sol = cendres volcaniques indurées (*Cangahua*)	Cour à surface compactée.	Hydrodynamique superficielle liée à la présence de croûte de surface
Dénudée 3135 m SMD 2 27 SMD 2 70 SMD2, SMD 3 SMD4	Mollisol. Udoll. Hapludoll	Jardin. Surface enherbée rase.	Hydrodynamique interne liée à la présence de d'une végétation graminéenne basse. Une sensibilité au ruissellement sous forte intensité, le mulch racinaire étant très compact.
Végétalisée 3135 m ZSUvegt27 ZSUvegt 70 ZSUvegt1 ZSUvegt2 ZSUvegt3	Mollisol. Udoll. Hapludoll	Jachère.	Hydrodynamique interne liée à la présence d'une végétation graminéenne hétérogène. Structure du sol à forte porosité liée aux pratiques culturales antécédentes.