

# RÉGIONALISATION CLIMATIQUE (PLUIE ET ETP) DANS LES ANDES ÉQUATORIENNES MÉTHODOLOGIE, RÉSULTATS ET APPLICATION

P. LE GOULVEN<sup>1</sup>, M. ALEMAN<sup>1</sup>

---

## RÉSUMÉ

En Équateur, la majeure partie des projets hydro-agricoles pâtissent d'une mauvaise adéquation entre dotation en eau attribuée et besoins réels. Cela génère évidemment des problèmes de fonctionnement dans les systèmes irrigués mais aussi une concurrence très forte sur la ressource en eau. L'inadéquation s'est perpétuée par le poids de l'histoire mais surtout en raison d'une méconnaissance profonde des paramètres climatiques qui conditionnent l'estimation des ressources comme celle des besoins. Afin d'y remédier, le projet INERHI-Orstom s'est attelé à l'élaboration d'une régionalisation climatique préliminaire des bassins interandins, capable de générer des séries chronologiques mensuelles de pluie et d'ETP en tout point de l'espace étudié.

Pour ce faire, l'équipe utilise la méthode du vecteur régional à travers le logiciel Climan construit à partir de l'algorithme de calcul de Y. BRUNET-MORET. Les produits obtenus consistent en cartes contenant isolignes moyennes annuelles et régions climatiques homogènes avec leurs vecteurs associés. Les séries générées sont utilisées dans les calculs de besoins et de ressources en eau, pour diagnostiquer le réseau des stations et proposer une classification climatique à différents niveaux. La communication traite des résultats obtenus dans le bassin du Mira.

---

<sup>1</sup>Mission Orstom, BP 17-11, 06596 Quito, Équateur

## INTRODUCTION

L'histoire de l'eau dans les Andes équatoriennes est jalonnée d'une longue série de conflits, clairement identifiés grâce aux archives laissées par l'administration coloniale depuis le XVI<sup>e</sup> siècle, mais qui existaient probablement déjà du temps des Incas étant donné l'importance de la gestion de l'eau dans le vocabulaire Quechua.

Au cours des XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles, l'essor démographique ne fait qu'aggraver la situation : la parcellisation des terres entraîne une division des droits d'eau et donc une pression encore plus forte sur la ressource. L'émergence de concentrations urbaines et la construction des premiers ouvrages hydroélectriques viennent créer d'autres besoins qui entrent en concurrence directe avec une utilisation jusqu'alors agricole.

L'État est intervenu très tôt pour tenter d'harmoniser la gestion de la ressource hydrique. D'abord pour tenter d'imposer la législation espagnole (premiers décrets de Charles Quint en 1535), puis pour mettre en place une juridiction propre (lois de 1832, soit deux ans seulement après l'avènement de la République), et enfin pour nationaliser l'ensemble des ressources en eau en 1972 et créer l'Institut Équatorien des Ressources Hydriques (INERHI), seul gestionnaire habilité. Malgré ces multiples interventions, la répartition de l'eau reste un problème d'actualité. Bien que les affrontements violents aient diminué, les conflits persistent et il n'est pas rare de voir l'INERHI assailli par des communautés paysannes en colère. En agriculture irriguée, les inégalités n'ont pas disparu car les dotations vont du simple au triple pour des périmètres situés dans des zones climatiques identiques et occupés par des systèmes de culture similaires. Des grandes villes manquent d'eau et la production hydroélectrique n'arrive pas à faire face aux besoins dès qu'une petite sécheresse apparaît.

En fait, l'État n'a jamais réussi à appliquer une politique de gestion raisonnée de la ressource en eau et à s'affranchir peu à peu du poids des traditions en vigueur qu'il a en grande partie reconduites en les légalisant. Cela dénote, bien évidemment, d'un manque de volonté politique face à un thème aussi sensible, mais aussi et surtout d'un manque de données de base précises qui permettraient d'élaborer des propositions concrètes et indiscutables en vue d'un aménagement rationnel.

## RÉGIONALISATION CLIMATIQUE : OBJECTIFS ET MÉTHODE

C'est pour remédier à ces carences que, depuis 1987, l'Orstom et l'INERHI se sont associés pour lancer des études détaillées sur les caractéristiques et le fonctionnement des systèmes irrigués andins afin de fournir une base scientifique et technique qui justifie et oriente la mise en place d'un plan national d'irrigation à court, moyen et long terme.

## OBJECTIFS

Le volet purement hydrologique du projet est évidemment basé sur des comparaisons entre besoins et ressources, non seulement au niveau des prises actuelles mais tout au long du réseau hydrographique pour prévoir différents scénarios d'évolution.

Ces comparaisons sont structurées sur différents espaces emboîtés, définis pour satisfaire aussi bien les planificateurs que l'ensemble des thématiques abordées :

- bassins hydrographiques fermés par une station hydrométrique de contrôle et contenant tous les systèmes d'irrigation (niveau régional) ;
- ZARI (Zones d'Analyse et de Recommandations pour l'Irrigation) qui contiennent toute la chaîne de mobilisation, transport, distribution et utilisation de l'eau et qui sont délimitées en fonction des infrastructures existantes et des accidents de relief (étude des caractéristiques et de l'évolution des systèmes de production et de la demande en eau) ;
- bassins versants d'environ 50 km<sup>2</sup> dans lesquels les facteurs conditionnels de l'écoulement (pente, perméabilité, caractéristiques et occupation du sol) sont à peu près homogènes (DUBREUIL, 1972). Un modèle pluie-débit est calé sur chacun d'entre eux.

Étant donné la grande dispersion des périmètres irrigués, répartis dans trois étages altitudinaux soumis à des conditions climatiques différentes, il est évident que l'élaboration (selon les conditions précédentes) d'un schéma de gestion des ressources en eau requiert une connaissance précise de la répartition spatiale des caractéristiques hydrologiques. Cette connaissance doit être complétée par une bonne appréhension des variations chronologiques des paramètres étudiés si l'on considère la grande variabilité de la pluie (saisonnière et interannuelle) et l'existence de tendances à la sécheresse rencontrées dans les séries pluviométriques de certaines régions (POURRUT, 1986), phénomène qu'il est logique d'intégrer dans une planification à long terme.

On voit donc tout l'intérêt d'une étude climatique préliminaire au niveau régional. Du point de vue agronomique, la pentade ou la décade est un intervalle de temps adéquat pour une telle étude, mais, si l'on tient compte des données disponibles (et bien évidemment manuscrites), du volume d'information et du cadre de planification dans lequel se déroule le projet, le choix d'un pas de temps mensuel paraît raisonnable. La régionalisation climatique proposée a donc pour objectif de générer en tout point de l'espace étudié des séries chronologiques mensuelles homogènes de pluie et d'ETP.

## MÉTHODE UTILISÉE

Le réseau des stations pluviométriques et climatiques est récent dans son ensemble (de nombreuses stations ont été installées aux alentours de 1965). Il est géré par plus de trente organismes publics ou privés ayant chacun ses préoccupations ; ce qui explique en partie sa mauvaise répartition tant spatiale qu'altitudinale. La seule utilisation des données du réseau n'est pas suffisante pour apprécier correctement les variations spatiales des paramètres recherchés.

### ZONES PSEUDO-PROPORTIONNELLES ET VECTEURS

La méthodologie utilisée est basée sur la délimitation de zones homogènes à l'intérieur desquelles les valeurs des paramètres climatiques sont à peu près proportionnelles pour un intervalle de temps donné. À l'intérieur d'une zone pseudo-proportionnelle, chaque paramètre peut être caractérisé par une série unique représentative de son organisation chronologique interne. L'espace délimité se restreint si l'on diminue le pas de temps (de l'année au mois par exemple), ou si l'on exige une liaison pseudo-proportionnelle plus forte à l'intérieur de la zone.

Les définitions précédentes constituent la base théorique des « vecteurs régionaux » qui sont des séries chronologiques homogènes générées à partir des mesures observées aux stations appartenant à la zone climatique considérée, mesures qui peuvent être incomplètes ou erronées sans que cela influe beaucoup sur l'élaboration du vecteur. À l'heure actuelle, il existe deux algorithmes de calcul développés à l'Orstom : le vecteur régional de G. HIEZ (1977) et le vecteur des indices annuels de précipitation de Y. BRUNET-MORET (1979). Leurs fondements théoriques sont exposés dans les articles cités en bibliographie, on n'insistera donc pas sur ce point.

Le projet INERHI-Orstom utilise le logiciel Climant développé à partir de l'algorithme de calcul de BRUNET-MORET. Le programme fonctionne au pas de temps mensuel (analyse et corrections) et peut traiter tous les paramètres climatiques (pluie, température, insolation, humidité relative, vent et évaporation du bac) ainsi que les débits moyens. Il permet d'abord de détecter, corriger ou supprimer les erreurs systématiques des séries chronologiques étudiées (phase d'homogénéisation), puis de rechercher les limites des zones climatiques homogènes (phase de régionalisation) pour lesquelles il génère une série chronologique représentative d'indices mensuels et annuels.

La pseudo-proportionnalité d'une zone est mesurée par la valeur des coefficients de corrélation moyens (annuel et mensuel) entre les stations et leur vecteur. Après plusieurs essais, on considère une zone comme homogène si ces coefficients sont supérieurs ou égaux à 0,9 (ou lorsqu'ils sont proches de 0,9 quand la faible densité du réseau ne permet pas de réduire la zone).

En théorie, il est possible de regrouper l'homogénéisation et la régionalisation en un seul passage. La visualisation des courbes de doubles cumuls entre stations et vecteur, permet de déterminer si une mauvaise liaison entre les deux (coefficient de corrélation faible) provient d'erreurs systématiques ou de non appartenance de la station à la zone homogène considérée. Cependant, comme le programme est manipulé par de nombreuses personnes, nous préconisons les deux phases d'analyse pour éviter les erreurs de diagnostic. Dans la phase d'homogénéisation, on resserre le plus possible les espaces étudiés pour être certain de ne prendre en compte que des stations appartenant à la même zone homogène.

### **CLIMAT ET ALTITUDE**

Les calculs antérieurs permettent de délimiter des zones climatiques homogènes représentées par des vecteurs de valeurs mensuelles et annuelles relatives pour la pluie et l'ETP, calées arbitrairement sur une valeur moyenne annuelle de 1 000 mm. Il reste à déterminer les valeurs absolues, ce qui est réalisé par une étude fine des relations pluie-altitude et ETP-altitude.

Ces relations sont loin d'être uniformes dans un grand bassin hydrographique et dépendent également des mécanismes climatiques prépondérants. La connaissance du climat est indispensable pour repérer les zones de validité des relations rencontrées qui recouvrent en général plusieurs des zones pseudo-proportionnelles. Dans la pratique, il y a va-et-vient entre les deux analyses.

Le produit final est une carte d'isohyètes (ou d'isoplètes) moyennes annuelles sur laquelle viennent s'ajouter les zones pluviométriques (ou climatiques) homogènes délimitées, chacune d'entre elles étant représentée par un vecteur d'indices mensuels et annuels. À partir de là, il est possible de générer rapidement une série chronologique mensuelle en chaque point de l'espace étudié.

## **RÉGIONALISATION PLUVIOMÉTRIQUE DANS LE BASSIN DU MIRA**

### **PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU BASSIN (FIGURE 1)**

La partie supérieure du bassin est entièrement située dans le couloir interandin équatorial. Elle contient tous les systèmes d'irrigation et est fermée par une station hydrométrique de bonne facture (FF. CC. Carchi). L'altitude de ce bassin de 3 500 km<sup>2</sup> varie entre 1 500 et 4 500 m, selon trois grandes vallées principales bien dessinées (Chota, Ambi, Apaqui), auxquelles s'ajoutent un grand nombre de vallées secondaires plus ou moins perpendiculaires.

Il est évidemment soumis à l'influence de la Zone de Convergence Intertropicale, à celle (bien atténuée par la cordillère occidentale) des masses d'air en provenance du Pacifique vers lequel il est tourné, et à celle (en partie bloquée par la cordillère orientale) des alizés du sud-est pendant l'été (juillet-août). Il ne faut pas non plus oublier les mouvements de masses d'air locales dont l'amplitude varie selon la profondeur des vallées, leur largeur et leur exposition. La combinaison de ces différents phénomènes plus ou moins altérés par le relief, génère un régime pluviométrique bimodal, sur lequel sont calés les cycles culturaux. On y distingue trois étages bioclimatiques :

- l'étage froid au-dessus de 2 700 m (pluie/ETP de 970-1 025 mm par an) ;
- l'étage tempéré situé entre 2 300 et 2 700 m (pluie/ETP de 795-1 025 mm par an) ;

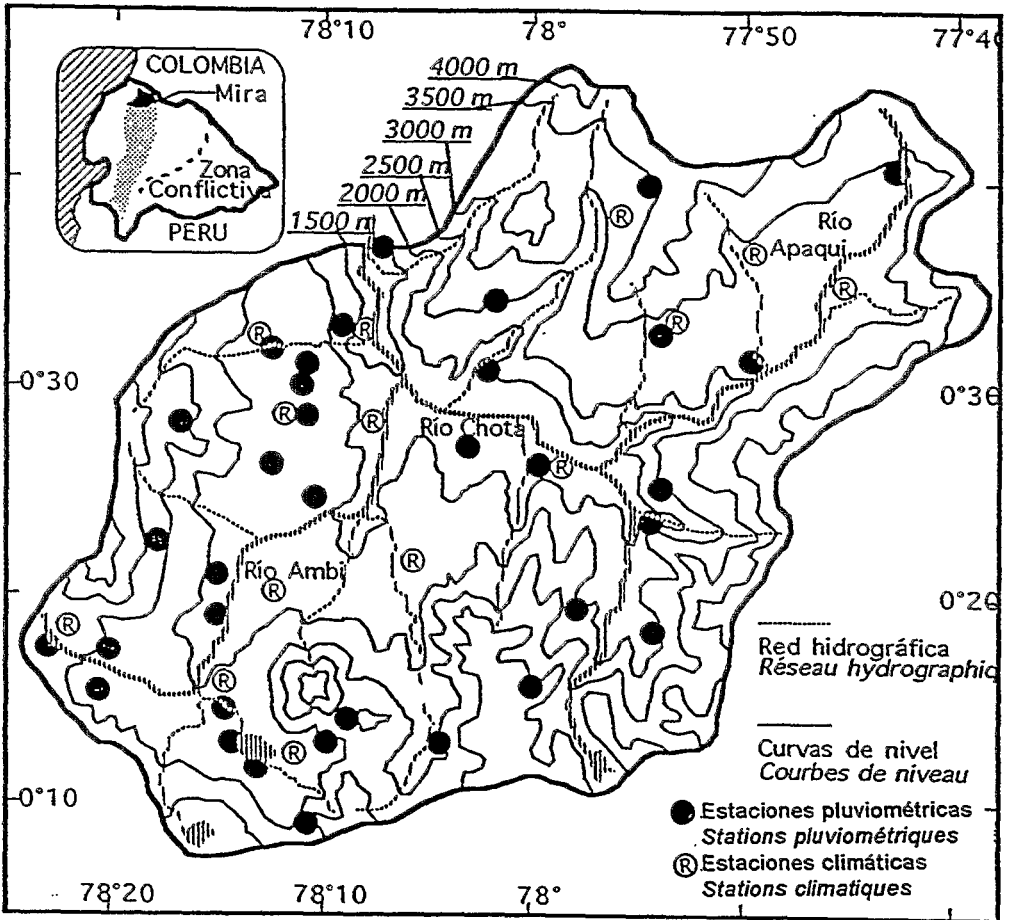


Figure 1

Bassin du Mira - Oro-hydrographie - Stations pluviométriques et météorologiques

— et l'étage subtropical en-dessous de 2 300 m (pluie/ETP de 540-1 405 mm par an).

L'irrigation est utilisée comme complément pour assurer la production d'une région à vocation agricole qui exporte une bonne partie de ses produits vers la Colombie. Les 50 000 ha de terres irriguées (293 périmètres) sont alimentés en eau par 270 systèmes, à travers 1 164 km de canaux (91 % en terre) qui dérivent un débit total de 26,2 m<sup>3</sup>/s. Les autres prélèvements (eau potable, abreuvoirs, ...) représentent seulement un débit de 1,3 m<sup>3</sup>/s. Sur les 295 000 habitants du bassin, 158 000 (51 %) sont concernés par l'irrigation. Les *haciendas* prédominent dans l'étage froid (prairies, orge et pomme de terre) et dans l'étage subtropical (canne à sucre, luzerne et maraîchage). L'étage tempéré est occupé en majorité par les *minifundios* (polyculture à base de maïs-haricot).

### HOMOGÉNÉISATION DES SÉRIES

Dans le cas du Mira, 76 stations présentent un intérêt pour l'analyse climatique : 65 sont situées sur le bassin et 11 sur des bassins voisins pour mieux appréhender les influences extérieures. En réalité, 54 stations seulement sont retenues, les autres présentant trop de lacunes dans les observations ; elles totalisent 1 059 années complètes, soit une moyenne de 20 ans par station (1966-1985). Elles sont regroupées en fonction de leurs périodes d'observation et de leur appartenance à une même zone homogène. Un groupe peut être modifié et resserré au cours de la phase d'homogénéisation si un doute se présente sur l'appartenance à cette zone.

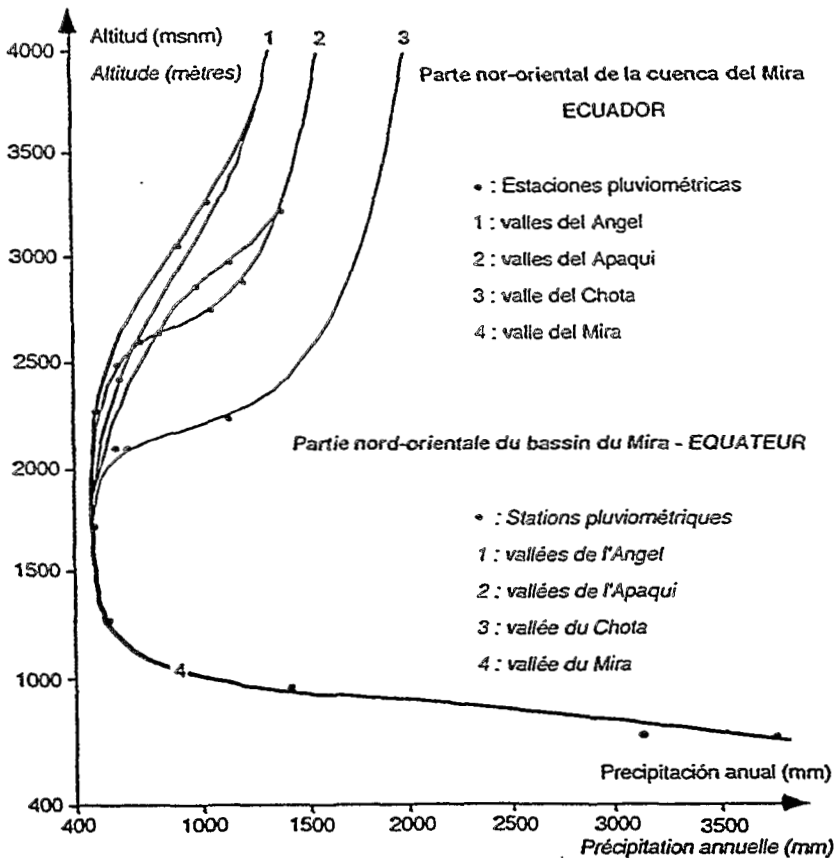
Les erreurs systématiques sont détectées au niveau de chaque groupe (d'abord sur les valeurs annuelles puis sur les mensuelles), par l'étude des doubles cumuls stations-vecteur et l'analyse des paramètres de détection fournis par Climán. Elles sont alors ou simplement annotées (valeurs douteuses), ou corrigées (substitutions ou déplacements d'appareils), ou encore supprimées (valeurs incohérentes). Le diagnostic est vérifié sur le terrain ou dans les fichiers historiques des stations. Une fois validé, Climán affiche l'allure des doubles cumuls station-vecteur avant et après correction et fournit une note de qualité d'observation échelonnée de 0 à 10.

Sur l'ensemble des stations, 11 599 valeurs mensuelles de pluie ont été examinées. 192 sont annotées comme douteuses, 1 443 sont corrigées et 666 éliminées pour incohérence. On obtient 50 % des stations avec une note supérieure à 9 et 20 % avec une note inférieure à 5. La correction de longues périodes (dues aux changements d'emplacements des stations) est responsable des notes les plus basses, à l'exception des deux plus mauvaises où les valeurs sont globalement incohérentes.

### RELATIONS ENTRE PLUIE ET ALTITUDE (FIGURE 2A ET 2B)

L'altitude est considérée comme le facteur prépondérant des variations climatiques (LE GOULVEN, 1984). Les relations pluie-altitude sont étudiées en remontant les vallées principales depuis la partie basse des bassins. Puis, on s'intéresse aux vallées secondaires. Cette analyse s'accompagne d'une bonne connaissance du climat local et de la direction générale des masses d'air. On n'hésite pas à tenir compte des caractéristiques de la végétation naturelle lorsque la densité des stations n'est pas suffisante ou que leur répartition spatiale est inadéquate.

Dans le cas du Mira (figure 2a et 2b), on aboutit à des tendances principales correspondant aux trois grandes vallées signalées dans la description générale du bassin hydrographique, avec des variations de gradient selon les vallées secondaires transversales.

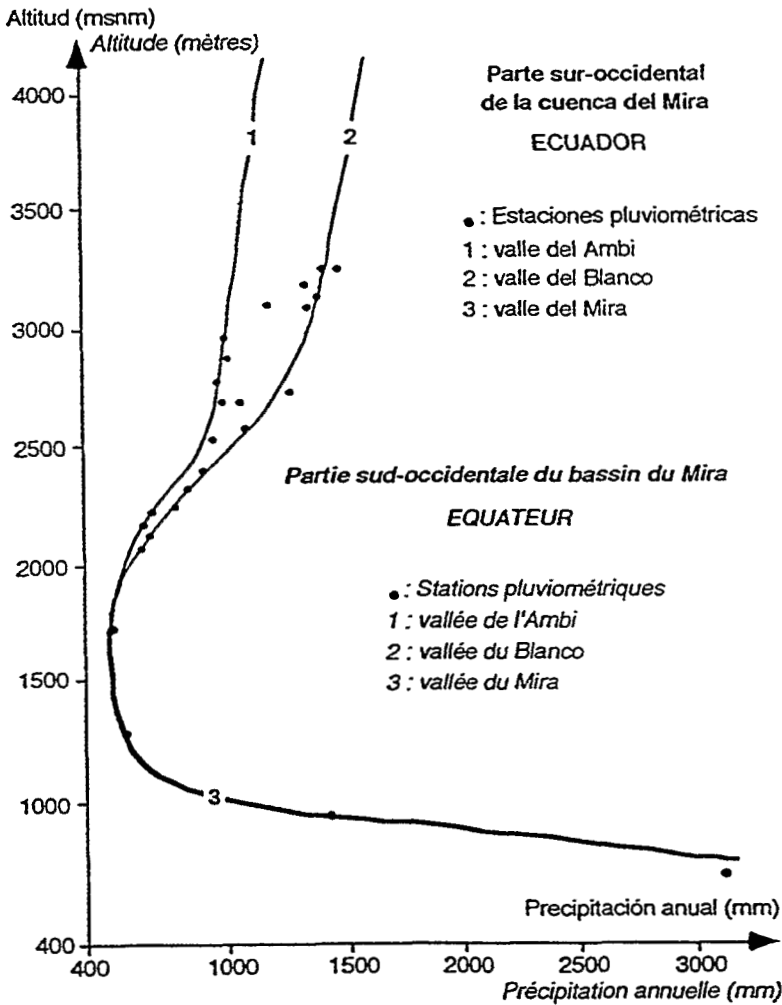


**Figure 2a**  
Bassin du Mira - Partie nord-est - Relations pluie-altitude



La partie basse du bassin (vallée du Chota) correspond au minimum pluviométrique (moins de 500 mm de pluie par an). La partie est et nord du bassin (vallée de l'Apaqui) contient quatre courbes de même tendance mais décalées selon les différentes vallées transversales (vallées del Angel dans le cas présent).

La partie ouest et sud-ouest (figure 2b), qui correspond à la vallée principale de l'Ambi et à une vallée secondaire assez importante (Blanco), est mieux abritée. Elle est donc soumise à des gradients plus faibles.



**Figure 2b**

*Bassin du Mira - Partie ouest et sud-ouest - Relations pluie-altitude*

Dans les deux cas, on notera qu'au-dessus de 3 000 m d'altitude, les courbes ne sont pas très précises en raison du manque de stations. Elles ont été tracées en tenant compte des courbes calculées sur des bassins voisins et de la végétation naturelle. La surface située au-dessus de 3 000 m occupe environ 30 % de la superficie totale du bassin et reçoit la plus grande partie de la pluie. Toute erreur sur les totaux pluviométriques de cette zone entraînera donc des imprécisions encore plus grandes dans le calcul des ressources hydriques.

La partie inférieure commune aux deux courbes correspond à la descente du Mira sur le flanc occidental de la cordillère. Elle est bien exposée aux masses d'air du Pacifique qui génèrent des gradients pluviométriques très importants. En poussant l'analyse jusqu'aux stations côtières, on rencontre un maximum pluviométrique de 4 000 mm de pluie annuelle aux environs de 700 m (alors que ce maximum se situait entre 1 200 m et 1 800 m d'altitude en Colombie). Ces courbes permettent de tracer avec assez de précision les isohyètes moyennes annuelles, vallée par vallée (figure 3).

### RÉGIONALISATION (FIGURE 3 ET 4)

Le module de régionalisation de Climan utilise les fichiers de données corrigées. Après la phase d'homogénéisation, il ne reste que 48 stations de qualité suffisante. Ces stations sont regroupées selon la proportionnalité de leurs valeurs (annuelles puis mensuelles) respectives, en essayant de constituer des régions climatiques dans lesquelles le coefficient de corrélation moyen entre stations et vecteurs soit proche ou supérieur à 0,9. Les courbes pluie-altitude sont utilisées pour dégrossir le problème.

Le traitement des stations restantes aboutit à la constitution de huit groupes homogènes et donc de huit vecteurs. On constate d'abord que l'objectif proposé est atteint, puisque le plus petit coefficient de corrélation moyen est de 0,87.

Le groupe 1 obtient les résultats les plus faibles. Deux stations seulement appartiennent au bassin proprement dit, les deux autres sont situées un peu plus haut, dans un bassin voisin partagé par la frontière avec la Colombie et sur un versant orienté vers le nord. Les quatre stations sont dispersées et insuffisantes pour définir un vecteur plus représentatif.

Le groupe 3 obtient des résultats moyens, mais le vecteur de cette région est calculé à partir de seulement trois stations (valeur limite) assez éloignées.

Par contre, on notera la très bonne homogénéité du groupe 7, dont la plupart des stations font partie d'une vallée secondaire (rio Blanco) dans laquelle l'Institut Météorologique National gère un grand bassin versant expérimental. Les stations sont plus nombreuses qu'ailleurs, assez regroupées et mieux observées puisque huit d'entre elles ont une note de qualité égale à 10. Dans ce

Tableau 1

Coefficients de corrélations moyens entre stations et vecteurs de chaque zone

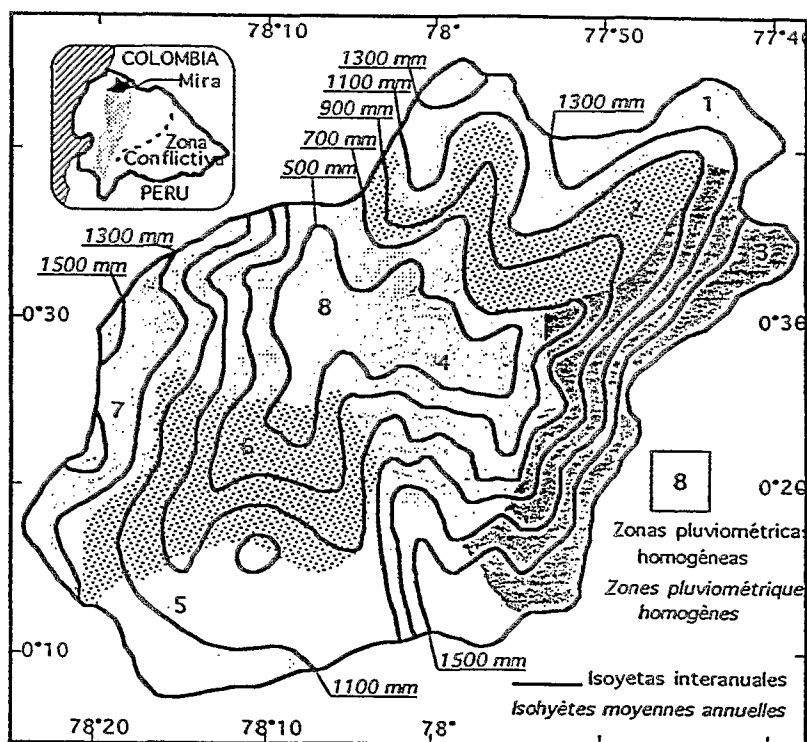
	Número de estaciones	Coef. mensual	Coef. anual
Régión 1	4	0,87	0,88
Régión 2	4	0,91	0,91
Régión 3	3	0,88	0,93
Régión 4	4	0,89	0,91
Régión 5	8	0,91	0,90
Régión 6	5	0,90	0,91
Régión 7	10	0,97	0,95
Régión 8	10	0,89	0,93

groupe, seules deux stations présentent des coefficients inférieurs à 0,9 : la station 323 en corrélation annuelle et la station 875 en corrélation annuelle. Dans la première, 76 mois sont corrigés et 12 mois éliminés, ce qui laisse planer un certain doute sur la qualité de ces données. La deuxième possède la plus petite période d'observation (6 ans), ce qui donne peu de signification à la valeur de son coefficient de corrélation.

De manière générale, on s'aperçoit que les résultats d'un groupe sont d'autant plus inégaux que le nombre de stations est faible. Les zones dans lesquelles les phénomènes climatiques sont les plus complexes sont également et malheureusement les moins couvertes par le réseau.

Les limites des régions pluviométriques pseudo-proportionnelles (figure 3) sont tracées en fonction des groupes constitués et en tenant compte des limites altitudinales et des accidents de relief qui séparent les différentes vallées.

Les régions 8, 4 et 6 correspondent à la partie basse des trois vallées principales (Chota, Apaqui et Ambi) séparées par des rétrécissements bien marqués (entre 8/4 et entre 8/6) ou par des lignes de crêtes importantes (entre 4/6). La région 5 correspond à la partie supérieure de la vallée de l'Ambi séparée du bassin inférieur par le volcan Imbabura. Ces accidents de relief modifient la circulation des masses d'air locales et l'impact des phénomènes climatiques continentaux.



**Figure 3**

*Bassin du Mira - Isohyètes moyennes annuelles -  
Zones pluviométriques pseudo-proportionnelles*

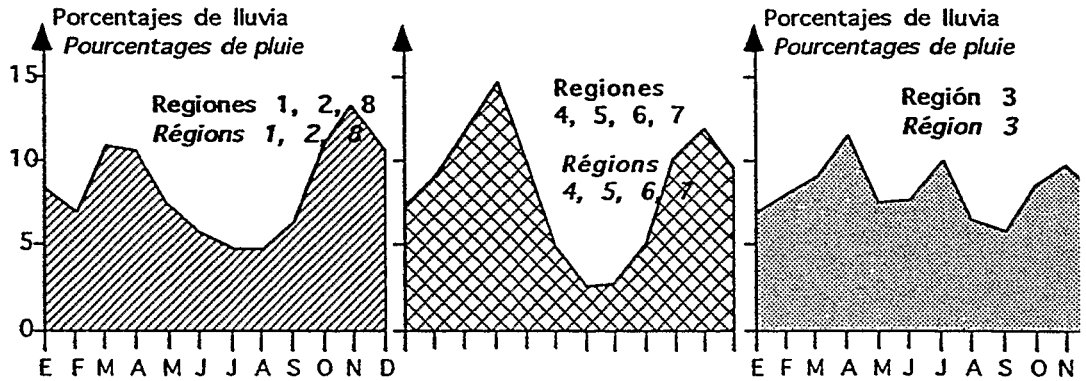
Les régions 1, 2, 3 et 7 sont séparées de leurs régions voisines par une limite altitudinale. Elles sont bien exposées aux précipitations provoquées par l'ascension des masses d'air locales et peuvent être soumises également à l'influence des bassins voisins (influence amazonienne dans la région 3 par exemple).

D'après l'analyse des séries mensuelles représentatives de chaque région (vecteurs générés sur la période 1965-1985), on constate d'abord que l'organisation chronologique des pluies annuelles n'est pas foncièrement différente d'une région à l'autre. On y retrouve certaines constances :

- années (très) fortes : 69, 70, 71, 74, 75, 82, 84 ;
- années (très) faibles : 67, 73, 77, 78, 79, 85.

On remarquera la faible influence du Niño sur le bassin du Mira : l'année 1983, qui correspond à un Niño exceptionnel, n'est supérieure à la moyenne que dans quelques stations seulement. Une certaine différence existe dans les coefficients de variation ( $CV = \text{écart-type}/\text{moyenne}$ ), en fonction de l'altitude. Les CV sont plus faibles (de 0,15 à 0,17) dans les régions hautes (n° 1, 2, 5 et 7)

alors qu'ils s'élèvent à 0,22-0,23 pour les fonds de vallées (n° 4, 6 et 8). On a une valeur moyenne (0,20) dans la région intermédiaire n° 2. Par contre, cette différence est plus marquée au niveau de la répartition saisonnière des précipitations (régimes pluviométriques).



**Figure 4**

*Bassin du Mira*

*Répartition mensuelle des précipitations dans les 8 régions pseudo-proportionnelles*

Les versants exposés au sud-sud-est (1, 2, 8) ont une pluviométrie plus forte lors de la deuxième saison des pluies (octobre-novembre-décembre) quand la Zone de Convergence Intertropicale remonte vers le nord. C'est exactement le contraire pour les versants exposés au nord (4, 5, 6 et 7). La région 3 montre bien l'influence des alizés du sud-est qui arrivent à passer la barrière que constitue la cordillère. Elle n'a pratiquement pas de saison sèche et reçoit plus de pluie au mois de juillet qu'au mois de novembre.

## RÉGIONALISATION DE L'ETP DANS LE BASSIN DU MIRA

### HOMOGÉNÉISATION DES SÉRIES

Le module d'homogénéisation de Climant est également utilisé pour l'analyse des paramètres climatiques nécessaires au calcul de l'ETP (température, vent, insolation, humidité relative, évaporation du bac). Dans la plupart des cas, on se contentera des tests de simples masses qui se révèlent suffisants en raison du peu d'amplitude de l'organisation interne des séries chronologiques étudiées.

## **CALCUL DE L'ETP**

Avant de passer à la phase de calcul de l'ETP, il est nécessaire de déterminer la ou les formules adaptées à la position géographique et altitudinale du bassin, car les études antérieures menées en Colombie montrent une dérive de certaines formules en fonction de l'altitude.

En l'absence de lysimètres, la comparaison s'effectue par rapport à l'évaporation mesurée dans les quelques stations qui possèdent un bac de classe A. L'ETP est calculée selon sept formules (Blaney-Criddle avec la correction de Phelan, Thornthwaite, Christiansen-Yepez, Hargreaves, Penman, Turc et Penman modifiée). La comparaison s'effectue au niveau des valeurs absolues et des variations saisonnières et permet de dégager les formules les mieux adaptées selon la région concernée.

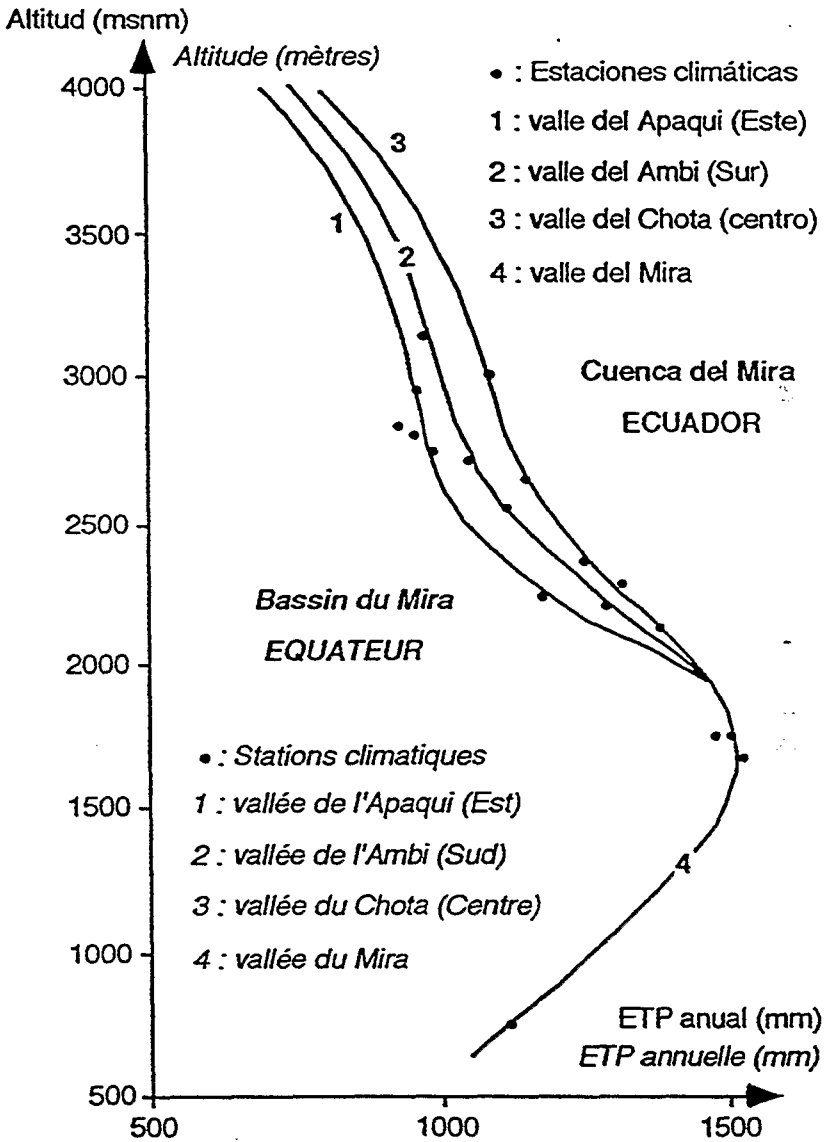
Dans le bassin du Mira, la formule de Penman modifiée obtient les meilleurs résultats avec les sept stations qui possèdent un bac. Cette formule est donc appliquée dans les dix-huit stations climatiques appartenant au bassin.

## **RELATIONS ENTRE ETP ET ALTITUDE (FIGURE 5)**

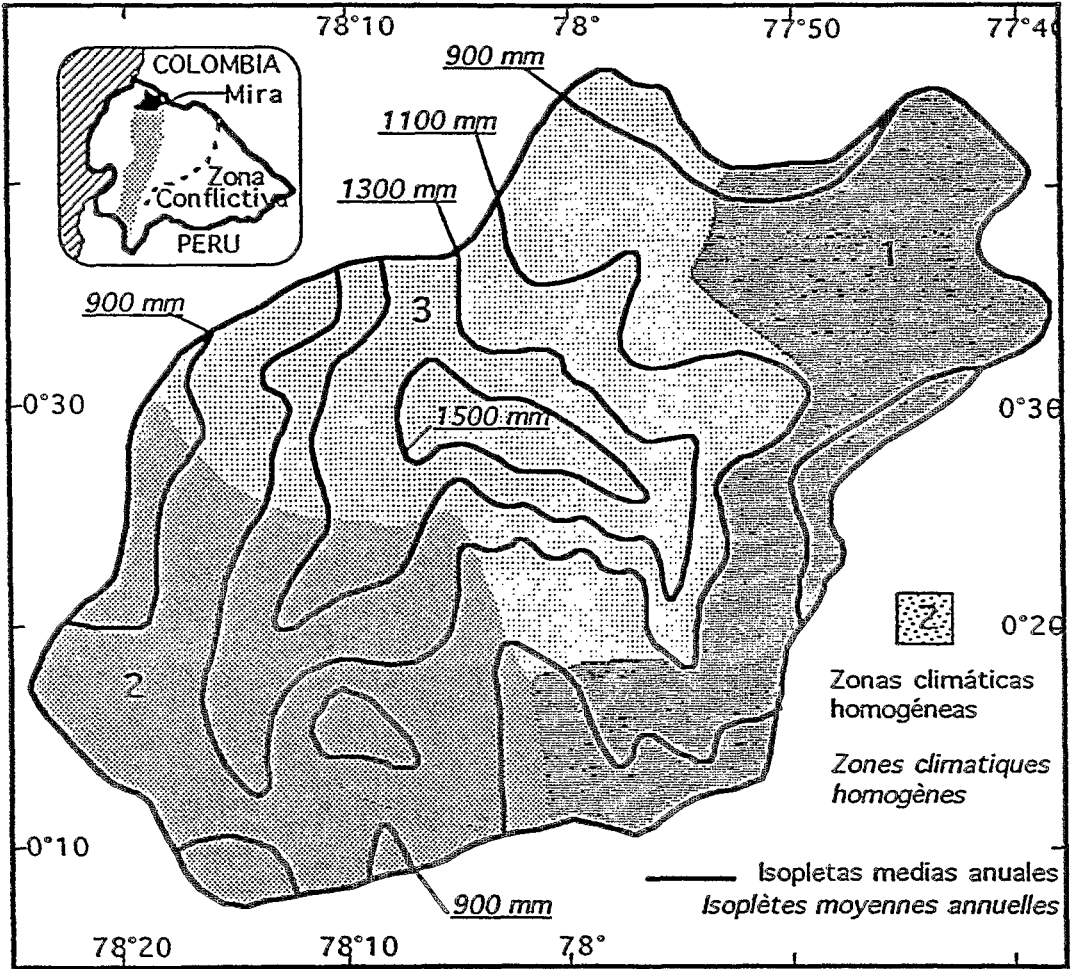
Comme dans l'analyse pluviométrique, on note trois tendances principales correspondant aux trois vallées principales. Dans ce cas, les courbes sont moins dispersées, ce qui est normal étant donné les meilleures corrélations entre paramètres climatiques et altitude, et le nombre réduit de stations qui ne permet pas d'apprécier les variations particulières de chaque vallée transversale. La valeur maximale de l'ETP se situe vers 1 700 m, altitude similaire au minimum pluviométrique rencontré dans les figures 2. Ces deux extrêmes correspondent au fond de la vallée principale du Chota. Seules deux stations dépassent les 3 000 mètres. Les courbes ont été prolongées jusqu'à 4 000 mètres après avoir étudié attentivement les relations entre chaque paramètre climatique et l'altitude.

## **RÉGIONALISATION (FIGURE 6)**

À partir du module de régionalisation de Climap appliqué aux valeurs d'ETP calculées par la formule de Penman modifiée, on obtient trois groupes de stations qui concordent avec les trois tendances de la figure. Les coefficients de corrélation entre stations et vecteurs correspondants ont des valeurs similaires quand on passe du niveau mensuel au niveau annuel. Par contre, leurs valeurs sont inférieures à celles calculées dans l'analyse pluviométrique.



**Figure 5**  
Bassin du Mira - Relations entre ETP et altitude



**Figure 6**  
*Bassin du Mira - Isoplètes moyennes annuelles - Zones homogènes d'ETP*



**Tableau 2**  
Coefficients de corrélation moyens entre stations  
et vecteurs de chaque zone

	Nombre de stations	Coef. de corrélation
Région 1	4	0,88
Région 2	6	0,88
Région 3	8	0,84

Si l'on divise la région 3, les corrélations s'améliorent significativement mais la période de calcul des vecteurs se réduit étant donné le peu d'observations de certaines stations. Bien que les corrélations moyennes soient assez basses dans ce groupe, les différences observées entre stations et vecteurs ne sont pas trop fortes.

Il est possible que ce résultat mitigé provienne d'un manque de rigueur dans la phase d'homogénéisation des paramètres climatiques et en particulier de la vitesse du vent. Cette donnée est enregistrée selon diverses unités de mesure et à différentes hauteurs, sans que cela soit toujours noté dans les annuaires.

La région 1 correspond à la partie orientale du bassin qui est soumise à une certaine influence amazonienne, alors que la région 3 est sous influence des masses d'air en provenance du Pacifique.

## UTILISATION DES VECTEURS

### CALCUL DES BESOINS ACTUELS

Les produits obtenus par la régionalisation climatique sont des cartes au 1/200 000 similaires aux figures 3 et 6. À chaque zone homogène est associé un vecteur d'indices mensuels et annuels calés sur une valeur moyenne annuelle de 1 000 mm.

Si, d'après la carte des isohyètes, un point reçoit 570 mm de pluie annuelle et appartient à la région climatique n° 3, il suffit de multiplier le vecteur pluviométrique de la région 3 par 0,570 pour obtenir une série chronologique mensuelle probable du point considéré. On procède de la même façon pour l'ETP. En superposant les cartes de régionalisation et celles des périmètres, on génère ainsi les séries climatiques associées à chaque périmètre.

Ces données sont reportées dans la banque générale de l'irrigation où figure une description précise de l'infrastructure de transport et de distribution (longueur, pentes, efficacités, etc.), et des périmètres (systèmes de production, caractéristiques hydrodynamiques des sols, surfaces équipées et irriguées, etc.) déterminés à partir des autres opérations du projet.

A partir de là, on peut évaluer les dotations nécessaires à chaque périmètre en fonction des risques que l'on est prêt à encourir : satisfaction des besoins 1 année sur 2, 3 années sur 4, etc. Les résultats sont comparés aux concessions légales et aux débits réellement dérivés (qui peuvent être différents) pour établir un premier diagnostic sur la mobilisation de l'eau à usage agricole.

### **CALCUL DES BESOINS ÉVENTUELS**

Dans de nombreux cas, les systèmes de production se sont adaptés à la ressource en eau disponible. Leur évolution vers des systèmes plus intensifs dépend donc en partie d'une meilleure distribution de la ressource.

Le projet a procédé à la modélisation de l'économie agricole dans les espaces irrigués sur la base du programme GAMS de la Banque Mondiale, afin de simuler divers scénarios plausibles d'évolution des systèmes de production et des surfaces irriguées suivant les types d'intervention proposés.

Les résultats de la régionalisation climatique sont donc utilisés comme paramètres d'entrée du modèle GAMS pour évaluer les besoins en eau futurs selon les divers schémas retenus.

### **MODÈLE PLUIE-DÉBIT**

Les vecteurs et leurs régions sont également utilisés pour caler un modèle de transformation pluie-débit sur des bassins hydrologiquement homogènes. La délimitation de zones climatiques homogènes permet de mieux appréhender l'impact des différents régimes climatiques sur la ressource en eau, afin de calculer un vecteur moyen par bassin qui tienne compte exactement des différents impacts (pourcentages de surface occupés par les différents vecteurs, pluie moyenne correspondant aux régions climatiques concernées).

Des essais sont en cours sur trois bassins versants contrôlés par des stations hydrométriques et sur lesquels viennent interférer plusieurs zones climatiques. Les meilleures corrélations entre climats (pluie, ETP) et débits mensuels sont obtenues avec les vecteurs, mais elles ne sont pas encore satisfaisantes (aux alentours de 0,6) en raison du manque de fiabilité des données hydrométriques qui ont besoin d'une bonne vérification.

## CALCUL DES RESSOURCES DISPONIBLES AUX PRISES

À chaque prise d'eau correspond un bassin versant. Chacune des prises est repérée par son appartenance à un bassin hydrologiquement homogène et par sa position sur le réseau hydrographique, grâce à une codification linéaire qui permet de déterminer les débits dérivés en amont et l'impact qu'a cette prise en aval. Son bassin versant est caractérisé par sa surface, ses valeurs moyennes annuelles de pluie et d'ETP, et les vecteurs moyens correspondants.

Une fois terminé le calage définitif du modèle de transformation pluie-débit, il est possible d'estimer les débits disponibles (mois par mois et année par année) au niveau de chaque prise et de simuler les changements proposés par la simulation agro-économique pour en voir la faisabilité.

## DIAGNOSTIC DU RÉSEAU

La méthodologie suivie permet d'analyser les stations du réseau selon trois critères :

- la qualité d'observation ;
- la répartition altitudinale ;
- la distribution spatiale.

Les courbes entre pluie et altitude montrent bien le manque de stations au-dessus de 3 000 mètres. Les groupes 1, 2 et 3 ont trop peu de consistance faute de stations ; dans certains cas, il a fallu introduire des postes pluviométriques appartenant à des bassins voisins pour construire le vecteur. Dans le groupe 7, les stations sont trop localisées sur le bassin versant expérimental, ce qui entraîne un manque de précision dans le tracé des limites de région.

Par contre, dans le fond de vallée (région 8 principalement), d'autres organismes (publics ou privés) ont installé des stations climatiques pour améliorer la gestion des grands périmètres de canne à sucre. Celles-ci font parfois double emploi avec les stations de l'Institut Météorologique INAMHI. Ce dernier pourrait donc désengager certains postes pluviométriques récents (107 et 902) ou très mal observés (603) pour rééquilibrer le réseau vers les régions signalées.

Ces recommandations pratiques et précises pourront être complétées par des critères plus élaborés de gestion du réseau (densité minimale selon le type de région), lorsque l'on disposera de données plus complètes sur les autres bassins du couloir interandin, pour proposer un réseau optimal.

## CLASSIFICATION ET CARACTÉRISATION CLIMATIQUE

La plupart du temps, la classification climatique au niveau d'un pays est basée sur l'analyse de stations dites représentatives : malheureusement, la représentativité spatiale des stations choisies est très peu souvent démontrée.

La régionalisation climatique a l'avantage de délimiter des espaces à l'intérieur desquels le vecteur généré offre une représentativité chiffrée : c'est donc un outil intéressant pour élaborer une classification climatique précise. On peut également utiliser les vecteurs comme données d'entrée d'une nouvelle phase de régionalisation pour obtenir des vecteurs de second ordre : on aboutit alors à une classification plus grossière, mais souvent suffisante. On peut aussi répéter l'opération plusieurs fois pour arriver aux grands types de climat.

L'essai réalisé dans le Mira permet de regrouper les huit régions originales en trois catégories :

- la première regroupe les régions 1, 2 et 8 avec des coefficients de corrélations moyens de 0,94 en mensuel et 0,93 en annuel ;
- la deuxième rassemble les régions 4, 5, 6 et 7 avec des coefficients de 0,93 et 0,90 ;
- la région 3 reste isolée.

On retrouve donc par le calcul les regroupements faits au niveau des régimes pluviométriques (figure 4).

## CONCLUSION

Dans le cadre du projet INERHI-Orstom (irrigation traditionnelle dans les Andes équatoriennes), on a vu l'importance d'une bonne connaissance préliminaire des principales caractéristiques du climat (pluie et ETP) pour établir des diagnostics au niveau de périmètres et de systèmes très dispersés dans l'espace. La méthode du vecteur régional permet de répondre à ce besoin.

L'algorithme utilisé (vecteur de Y. BRUNET-MORET) et le logiciel qui lui est associé (Climan), sont des outils pratiques et efficaces pour homogénéiser les séries chronologiques mensuelles (presque toutes les erreurs détectées ont été confirmées par les visites de terrain). Ils permettent également de délimiter des zones pseudo-proportionnelles représentées par des vecteurs qui sont ensuite utilisés pour calculer besoins et ressources en tout point de l'espace, ce qui correspond aux objectifs fixés par le projet.

Bien sûr, il reste encore des améliorations à faire, notamment au niveau des liens qui caractérisent une zone homogène. En effet, le coefficient de corrélation n'est peut-être pas le meilleur indicateur de la pseudo-proportionnalité des séries chronologiques au sein d'une même région. L'indice utilisé par le programme MVR (vecteur de G. HIEZ) a été testé sur quatorze stations des Galapagos et là non plus les résultats ne sont pas convaincants.

Pour le moment, la distinction entre régions pseudo-proportionnelles nécessite encore une certaine connaissance du milieu. Mais la méthodologie proposée recèle d'autres possibilités rapidement exposées qui devraient généraliser son emploi, surtout dans les milieux andins où les variations climatiques sont particulièrement importantes en raison d'un relief très contrasté.

## BIBLIOGRAPHIE

- ALEMAN M., 1992 - Utilización de vectores climáticos para generación de caudales. Montpellier, INERHI-Orstom, 10 p.
- BOULET J., LE GOULVEN P., POUPON H., 1984 - Metodologías aplicadas. *In* Estudio integrado del Altiplano Cundiboyacense, Bogota, éditions de l'IGAC, 437 p., 17 figures, 20 tableaux, 9 annexes.
- BRUNET-MORET Y., 1979 - Homogénéisation des précipitations. *Cah. Orstom, série Hydrologie*, vol. XVI, n° 3 et 4, 147-170.
- CADIER E., POURRUT P., CRUZ R., et al., 1978 - Estudio hidro-meteorológico y hidrogeológico de la cuenca del río Esmeraldas y del norte ecuatoriano. Quito, MAG-Orstom, 2 vol.
- CADIER E., POURRUT P., 1979 - Inventaire et détermination des données nécessaires à l'utilisation rationnelle des ressources en eau dans le cadre d'une planification globale des ressources naturelles renouvelables. L'expérience de l'Équateur. *Cah. Orstom, série Hydrologie*, vol. XVI, n° 3 et 4, 171-207.
- HIEZ (G.), 1977 - L'homogénéité des données pluviométriques. *Cah. Orstom, série Hydrologie*, vol. XIV, n° 2, 129-172.
- LE GOULVEN P., GARCIA R., 1980 - Proposición metodológica de un estudio climatológico para el desarrollo, ejemplo del Altiplano Cundiboyacense. Bogota, IGAC, multigr, 15 p.
- LE GOULVEN P., RUF T., RIVADENEIRA H., 1987 - Metodologie générale et détails des opérations du projet INERHI-Orstom. Quito, INERHI-Orstom, 06/87, 91 p + ann. (Français, Espagnol).
- LE GOULVEN P., 1987 - Caracterización climática, metodología de la operación D3. Quito, INERHI-Orstom, multigr, 20 p.
- LE GOULVEN P., 1988 - El vector YBM, resumen metodológico, programas V1, V2, V3, manual del usuario. Quito, INERHI-Orstom, 10/88, 14 p.

- LE GOULVEN P., 1988 - Homogeneización de los datos pluviométricos. Conferencia al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI). Quito, INERHI-Orstom, 17/03/88, 23 p.
- LE GOULVEN P., SEGOVIA A., ALEMAN M., 1988 - Banque des données climatiques mensuelles (pluie, évaporation, température, insolation, humidité relative, vent) pour l'ensemble du réseau (un peu plus de 900 stations).
- LE GOULVEN P., ALEMAN M., OSORNO I., 1988 - Homogeneización y regionalización pluviométrica por el método del vector regional. Com. Ve Congrès équatorien d'Hydraulique, Quito, 23-26/11/88, 59-83, (Espagnol, Français).
- LE GOULVEN P., ALEMAN M., 1990 - Logiciel Climant (Climantic Monthly Analysis) de traitement des données climatiques mensuelles, écrit en langage Fortran.