

CLIMAT DE L'EQUATEUR

Genèse, distribution et aspects originaux

Pierre FOURRUT, Ingénieur de recherche
ORSTOM - Apartado 6596 CCI, Quito, EQUATEUR

1. Introduction

*"S'il est un élément du milieu géographique que l'homme ne peut guère maîtriser ou modifier volontairement, c'est le climat. S'il est un climat extrêmement difficile à comprendre et à prévoir, c'est celui qui résulte de la présence de facteurs aussi complexes que la position équinoxiale, la cordillère andine et la proximité de l'océan. C'est la situation du climat ou plutôt des climats de l'Equateur."*¹ Pour qui a parcouru le pays, il ne fait nul doute que Nelson GOMEZ exprime en quelques mots le trait le plus caractéristique de la réalité climatique équatorienne: le rôle subtil et très complexe joué par des facteurs particuliers dont la convergence crée une ample gamme de climats qui se traduisent par des paysages pouvant changer du tout au tout à de très courtes distances.

Répondant au jugement ainsi énoncé, le texte présenté ci-après se propose de clarifier certains aspects susceptibles d'améliorer la compréhension des lois et des mécanismes qui régissent les conditions climatiques, ne présentant que les valeurs numériques strictement nécessaires aux explications données. Il faut en effet préciser que son objectif n'est pas de décrire en détail les particularités des climats régionaux ou locaux observés en Equateur car plusieurs travaux ont déjà été publiés à cet effet. Citons ceux de Misael ACOSTA SOLIS^{2,3}, célèbre pionnier de l'écologie équatorienne, d'un spécialiste tel que Carlos BLANDIN L. LANDIVAR⁴, d'un encyclopédiste réputé comme Plutarco NARANJO⁵ ou, plus récemment, de Luis CAÑADAS CRUZ⁶, professionnel au mérite reconnu, sans compter les cinq rapports analytiques⁷ réalisés dans le cadre d'un accord de coopération souscrit entre le PRONAREG et l'ORSTOM; il va sans dire que chacun des auteurs propose aussi sa propre classification climatique, basée sur des critères physiques ou biologiques, le nombre des zones climatiques ainsi délimitées étant très variable puisqu'il fluctue d'un minimum de sept à un maximum de trente-deux (cas de l'interprétation bioclimatique de L. CAÑADAS); signalons que dans le cas présent, puisqu'il faut de toute façon se référer à une classification nationale des climats on a, dans un souci de cohérence, pensé qu'il était plus opportun de présenter celle déjà proposée par l'auteur^{1,8}.

Au-delà de la simple description des grands facteurs du climat équatorien, cette étude prétend aussi élucider au fur et à mesure le rôle respectif de chacun d'eux, expliquer les mécanismes qui régissent l'existence de zones climatiques possédant des caractéristiques aussi spécifiques et enfin établir des tendances régionales si elles existent.

2. Quelques concepts fondamentaux

Le "temps" est la notion qui fait le plus directement participer l'homme au contexte climatique qui l'environne. Selon A. BALDIT⁹, *"le temps désigne l'ensemble des valeurs (éléments climatiques) qui, à un moment et dans un endroit donnés, caractérisent l'état de l'atmosphère"*. Ainsi, le "temps" est un état particulier et instantané. Couramment, cette notion peut être élargie à de courtes périodes, un jour par exemple.

Le "climat", au contraire, apparaît comme une notion complexe de synthèse et a donné lieu à de nombreuses définitions. Si on utilise le terme "temps" dans le sens mentionné ci-dessus, on peut dire que le "climat" est l'ensemble de tous les "temps" successivement observés. R. ARLERY, H. GRISOLLET et B. GUILMET¹⁰ le définissent comme l'ensemble des éléments climatiques qui, dans leur succession habituelle sur une certaine période, caractérisent l'état de l'atmosphère (ou plutôt ses "états moyens" durant de longs intervalles, un an par exemple) et contribuent à donner un caractère propre à chaque endroit de la planète. La connaissance de ces états moyens impose de longues séries d'observations relatives à chaque élément du climat.

Les "éléments climatiques" mentionnés sont des variables physiques mesurables parmi lesquelles on peut citer: pression atmosphérique, vent, ensoleillement, température, nébulosité, humidité de l'air, précipitations (pluie, brouillard, rosée, neige, grêle) et évaporation, paramètres qui confèrent au milieu atmosphérique ses propriétés et caractéristiques particulières. Ils varient dans le temps et dans l'espace sous l'influence de nombreux agents responsables appelés "facteurs climatiques", dont il faut souligner les plus déterminants:

- facteurs astronomiques: rayonnement solaire et ses variations, rotation journalière de la Terre et orbite de celle-ci autour du Soleil, mouvement apparent du Soleil;
- facteurs météorologiques: circulation atmosphérique générale, masses d'air régional ou local;
- facteurs géographiques: latitude, longitude, altitude, relief, nature de la surface terrestre, répartition des mers et des terres, courants océaniques.

3. Description des principaux facteurs du climat de l'Equateur

Parmi les différents facteurs astronomiques, géographiques et météorologiques qui influent sur le climat de l'Equateur, ceux qui jouent le rôle le plus important sont :

- la latitude, qui définit les conditions générales de la circulation atmosphérique à l'échelle planétaire, entre la ligne équinoxiale et les pôles;
- la longitude, qui est responsable de l'existence d'un système de circulation atmosphérique est-ouest;
- le relief, l'altitude et le rôle d'écran joué par la cordillère des Andes, facteurs qui conditionnent l'existence de 3 grandes régions naturelles très autonomes (Côte, "Sierra", Amazonie);
- l'océan Pacifique, considéré comme le générateur de masses d'air, les caractéristiques de ce dernier pouvant être profondément perturbées par la présence de courants océaniques.

3.1. La latitude et la longitude

L'Equateur étant situé sur la ligne équinoxiale, les principes qui régissent les climats et les précipitations sont donc soumis aux règles de la circulation atmosphérique propre aux régions de basse latitude.

Etant donné que le rayonnement solaire reçu par la zone équatoriale est plus important que celui des latitudes supérieures (environ huit fois plus qu'aux pôles), le rétablissement de l'équilibre thermique s'effectue dans chaque hémisphère grâce à trois grands tourbillons d'air dont le sens de circulation est alterné: cellule équatoriale ou cellule d'Hadley, cellule intermédiaire ou tempérée et cellule polaire. Tout au long de l'Equateur, au contact des deux cellules équatoriales, il existe à basse altitude un système de vents convergents et ascendants. En effet, en se réchauffant l'air devient plus léger et a tendance à monter mais lorsqu'il atteint des altitudes plus élevées il se refroidit, devient plus dense et retombe vers le sol, approximativement au niveau des tropiques. Une partie retourne vers la ligne équinoxiale pour alimenter le mouvement ascendant continu, créant ainsi une zone de basses pressions atmosphériques appelée "zone de convergence intertropicale ZCIT" où se situe le front intertropical FIT. Par rapport à la cellule méridionale, la cellule septentrionale d'Hadley est légèrement décalée vers le Nord et il en est de même du FIT. Il faut signaler que ce schéma ne représente que la position habituelle de cette circulation qui, en réalité, subit d'importantes altérations et déviations, en particulier à cause de la répartition irrégulière des terres et des océans. C'est ainsi que la zone maritime de la ceinture équatoriale de basses pressions est la moins perturbée et qu'il y règne un régime de vents d'Est prédominants dû à l'effet de rotation de la terre; ces vents alizés, en provenance des deux hémisphères, alimentent la montée d'air permanente de la ZCIT. Les phénomènes observés sont beaucoup plus complexes dans la zone continentale.

Il faut signaler que l'ensemble du système décrit précédemment suit le mouvement apparent du Soleil et qu'il se déplace périodiquement, d'avril à juin vers l'hémisphère nord, d'octobre à décembre vers l'hémisphère sud, ce qui permet la pénétration de masses d'air présentant des caractéristiques différentes: tempéré et peu humide dans le premier cas, chaud et humide dans le second.

Pour être plus précis, l'atmosphère autour du globe terrestre est aussi soumise à un autre système de circulation perpendiculaire au précédent et les phénomènes observés sont la résultante de ces deux tendances. Ce système a été défini par G. WALKER qui a mis en évidence l'existence de plusieurs cellules transversales en se basant sur le principe suivant: sur les continents où le réchauffement est plus rapide que celui des masses océaniques, l'air monte pour redescendre ensuite sur les océans plus froids. La cellule la plus importante est celle constituée par l'océan Pacifique équatorial et on observe une importante différence de pression atmosphérique entre les zones de hautes pressions (anticyclone du Pacifique sud-est: île de Pâques, Tahiti) et la zone de basses pressions centrée approximativement sur le méridien 140° (Australie-Indonésie).

3.2. Le relief et les conditions géographiques

La topographie irrégulière et l'altitude élevée de la cordillère des Andes jouent un rôle de première importance dans la formation, le déplacement et l'isolement des masses d'air local ou régional, ce qui rend nécessaire une brève description des conditions géographiques générales ¹.

Mis à part l'archipel des Galapagos qui est formé d'une trentaine d'îles d'extension et d'altitude variables, réparties de part et d'autre de la ligne équinoxiale, à 1.000 km à l'Ouest de la côte équatorienne, l'Equateur continental peut, d'Ouest en Est, être divisé en trois grandes régions naturelles:

a. **la région côtière** : elle est constituée par une frange littorale d'environ 100 km de large, dont les valeurs extrêmes sont de l'ordre de 180 et 40 km, et qui peut être séparée en deux unités:

- dans la partie occidentale et nord-occidentale s'étend une cordillère côtière dont la hauteur maximale ne dépasse pas 800 m et qui, au niveau de Puerto Cayo, s'incurve vers l'Est en direction de Guayaquil où elle disparaît. Plus au Sud, des collines isolées et des plaines basses forment la Péninsule de Santa Elena;
- au pied des Andes se situe le fossé d'effondrement du Guayas dont la largeur est d'environ 80 km; il est limité au Nord par des reliefs soulevés et prolongé jusqu'au Pérou par une étroite frange littorale..

b. **la région andine** : elle est caractérisée par la formidable barrière montagneuse de la cordillère des Andes, dont la largeur est comprise entre 100 et 140 km; du Nord au Sud, elle présente trois unités:

- de la frontière colombienne jusqu'à environ 2° 30'S, il existe deux cordillères bien individualisées, de direction générale NNE-SSO: la cordillère Real et la cordillère Occidentale, toutes deux couronnées de volcans dont les altitudes varient entre 4.300 et 6.300 m. Encadré par ces deux cordillères, le couloir interandin, dont la largeur est inférieure à 40 km, est constitué d'une succession de bassins séparés par des seuils transversaux;
- de 2° 30'S à 3° 40'S, les volcans sont progressivement substitués par des reliefs tabulaires étendus, entre 3.000 et 4.300 m;
- au Sud de 3° 40'S, les deux cordillères perdent définitivement leur individualité et les altitudes ne dépassent pas 3.500 m.

c. **la région amazonienne**: elle est formée de deux parties:

- parallèlement aux Andes, la zone subandine comprend une cordillère d'environ 50 km de large, avec des reliefs notables compris entre 500 m et 3.900 m (Sumaco, Cutucu et Condor) qui, dans la zone centrale, sont séparés par le relief tabulaire disséqué de l'important cône de déjection du Pastaza;
- vers l'Est, à une altitude inférieure à 350 m, s'étend l'ample plaine amazonienne, avec ses collines basses, ses larges étendues et ses grandes vallées alluviales.

3.3. L'Océan Pacifique et les courants océaniques

L'océan Pacifique représente à lui seul près de la moitié de la surface totale des mers puisqu'il s'étend sur 14.000 km dans le sens nord-sud et près de 18.000 km dans le sens est-ouest. Si l'on admet une profondeur moyenne un peu inférieure à 4.000 m, son volume serait voisin de 700 millions de km³, soit la moitié des eaux océaniques totales. Cependant, il est intéressant d'observer que seulement 40% des pluies qui tombent sur le globe arrivent à l'océan Pacifique, compte tenu du fait que les fleuves et les rivières qui s'y jettent n'y drainent que le quart des terres émergées. Intervenant malgré tout pour moitié dans l'évaporation du globe, son bilan serait déséquilibré sans les apports d'autres océans qui proviennent essentiellement du Sud et de l'Ouest (océans Antarctique et Indien). Ces apports en eaux profondes ainsi que ceux provenant des grands fleuves sont riches en sels nutritifs, ce qui permet le développement d'une vie végétale intense jusqu'à des profondeurs (sur-

tout aux basses latitudes) d'une centaine de mètres, là où l'ensoleillement permet encore la photosynthèse.

Ces eaux, particulièrement riches et naturellement froides vu leur provenance, remontent à la surface non seulement dans les zones de moyennes et hautes latitudes mais parfois dans les zones intertropicales, à la faveur de vents qui déplacent les eaux chaudes de surface. Ce phénomène d' "upwelling" se rencontre le long des côtes péruviennes et sud-équatoriennes lorsque les forts alizés de Sud-est repoussent les eaux de surface vers le Nord-Ouest et l'Ouest.

Les eaux océaniques situées juste sous l'équateur géographique sont un peu plus denses que les eaux voisines situées vers 5° ou 10° de latitude. Il se forme donc une ride qui fait que les eaux plus légères tendent à se déplacer vers l'Equateur mais que, déviées par la force de Coriolis due à la rotation de la terre, elles forment un véritable courant appelé courant équatorial-sud qui se déplace vers l'Ouest, renforcé par les vents de la convergence intertropicale (fig. 1). Il s'ensuit, d'après WYRTKI, que la différence de niveau entre le Pacifique occidental et le Pacifique oriental serait d'environ 40 cm. De plus, les eaux réchauffées en provenance de l'Ouest provoqueraient un approfondissement de la thermocline qui se situerait à - 200 m à proximité de la Mélanésie et seulement à - 50 m à hauteur des côtes sud-américaines (fig. 2).

Après avoir buté contre les îles mélanésiennes, ce courant équatorial-sud donne naissance à deux contre-courants équatoriaux vers l'Est qui viennent équilibrer le déficit en eau laissé dans le Pacifique oriental. Le contre-courant équatorial nord est relativement bien marqué, alors que le contre-courant sud ne se manifeste que sporadiquement. Il semble que la disposition des îles mélanésiennes oblige ce dernier à passer sous le courant sud-équatorial. Il n'est pas impossible qu'il marque le début du courant de Cromwell qui apparaît généralement à l'Ouest des îles Galapagos à une profondeur d'une centaine de mètres mais qui, lors de certains "Niños" importants, a pu être observé à 120 km des côtes sud-américaines. Certains auteurs pensent que le phénomène du "Niño" correspond à un renforcement, certaines années, du contre-courant équatorial nord. Au-delà des contre-courants équatoriaux, la circulation s'organise de part et d'autre de chacun des tropiques en tourbillons de très grande extension. Dans le Pacifique nord, le tourbillon tropical boréal est dextrogyre: entre 12° et 20° nord s'observe ainsi un courant de direction ouest, appelé courant équatorial nord, favorisé par les alizés. Il va buter contre les Philippines pour dévier ensuite en direction du Japon. Dans le Pacifique sud, le tourbillon subtropical est sénestrogyre. Sa branche méridionale est parallèle au grand courant d'ouest circumantarctique. Il s'observe ainsi des échanges d'eau qui font qu'à proximité des côtes sud-américaines ce courant, dit de Humboldt, apparaît comme franchement froid. A hauteur du golfe de Guayaquil, il prend une direction nord-ouest avant de venir progressivement se confondre, une fois réchauffé, avec le courant équatorial sud (fig. 1).

Si par un effet de zoom nous observons plus en détail ce qui se passe au large des côtes du Pérou et de l'Equateur, nous voyons que le courant froid de Humboldt venant du sud, dont la température varie entre 15 et 19° C et dont la salinité est voisine de 35 ‰, rencontre des eaux tropicales superficielles plus chaudes et moins salées (température supérieure à 25° C et salinité inférieure à 35 ‰). La zone de transition, appelée Front équatorial FE, est l'une des caractéristiques importantes des conditions océanographiques de la région côtière de l'Equateur. En général, ce front va des îles Galapagos à la côte nord du Pérou (fig. 3). Durant l'hiver boréal il descend vers le Sud alors qu'en été il remonte vers le Nord. L'apparition du "Niño" correspond à un fort déplacement méridional. Ce mélange d'eaux chaudes peu salées, riches en oxygène, avec des eaux froides chargées en éléments nutritifs

(phosphates, nitrates) joue un rôle très important dans la fertilité des eaux côtières péruviennes et équatoriennes.

4. Mode d'action des facteurs climatiques et description des mécanismes régissant les conditions générales du climat équatorien

Très succinctement, on peut dire que le climat d'une région définie dépend en grande partie des caractéristiques des masses d'air qui influent sur cette région. Ces masses d'air sont directement conditionnées ou produites par les grands facteurs décrits au chapitre précédent.

4.1. Rôles joués par la latitude et la longitude

Les deux grands systèmes de circulation atmosphérique mettent en jeu d'importantes masses d'air régional, soit en suivant des processus habituels, soit par le jeu moins fréquent de certaines anomalies. Le déplacement périodique du FIT vers l'hémisphère nord ou sud entraîne la pénétration d'air ayant différentes caractéristiques de température et d'humidité, qui conditionnent les températures et les pluies. Lorsque le FIT traverse l'équateur géographique, poursuit son cheminement vers le Sud et ensuite commence à revenir vers l'équateur géographique, le pays se trouve sous l'influence de masses d'air chaud et humide à caractère océanique, qui provoquent des pluies notables et l'augmentation de la température de l'air. Au contraire, le déplacement septentrional du FIT entraîne la pénétration de masses d'air continental peu chaud et peu humide, en provenance du Sud-Est, ce qui provoque un abaissement des températures et peu de pluies. En outre, lorsque le FIT passe ou s'établit en un lieu, l'activité convective augmente et il se produit des pluies orageuses, généralement courtes mais intenses.

Il est ainsi possible de déduire schématiquement l'action du facteur latitude:

- de décembre à avril: températures élevées et saison pluvieuse, avec des orages violents accompagnés de décharges électriques au cours des périodes extrêmes;
- de juin à octobre, températures basses et saison sèche.

Le rôle essentiel joué par le facteur latitude est parfois sensiblement modifié par l'action du facteur longitude, en particulier lorsque la circulation zonale de Walker subit des changements anomaux qui provoquent l'apparition du phénomène du Niño. Dans ce cas, le FIT occupe pendant une période plus longue une position plus méridionale que d'habitude, ce qui se traduit par un accroissement des précipitations. A l'inverse, toute situation septentrionale anormale se traduit généralement par des sécheresses.

4.2. Rôle du relief

Le relief a une influence permanente sur les éléments climatiques. Lorsque l'altitude augmente, la pression atmosphérique baisse, l'intensité du rayonnement solaire s'accroît, la température de l'air diminue, la trajectoire des vents change et les hauteurs pluviométriques se modifient. L'air, forcé à s'élever, subit une expansion à caractère adiabatique qui provoque son refroidissement, la condensation de la vapeur d'eau, la formation de gouttes et la précipitation de ces dernières. Par ailleurs, l'orographie très particulière de l'Equateur définit des régions naturelles très individualisées (cf. paragraphe 3.2.) qui donnent origine à des masses d'air ayant des caractéristiques très différentes. On peut citer:

- des masses d'air tropical continental, sur la plaine amazonienne et la dépression littorale du Guayas, ayant une température élevée et une humidité importante due à l'évaporation des marécages et à l'évapotranspiration de la forêt. Ces masses d'air peuvent être soumises au processus de refroidissement adiabatique et produire d'importantes précipitations le long des contreforts externes des deux cordillères;
- des masses d'air froid continental, autour du sommet des principaux volcans, ayant une humidité relative importante, même si cette dernière ne se traduit pas par de fortes précipitations à cause du froid qui règne;
- des masses d'air tempéré continental, dans les régions situées entre 2.000 et 3.000 m environ, ayant une teneur en eau variable, généralement assez faible lorsqu'elles se situent dans les bassins interandins.

En termes généraux, le rôle joué par le facteur relief peut être résumé comme suit:

- augmentation des précipitations sur les versants externes des cordillères. Lorsque le régime des vents est favorable, une partie des précipitations peut pénétrer dans le couloir interandin, en octobre et novembre dans le cas des pluies provoquées par les masses d'air amazonien, et entre février et mai quand il s'agit des masses d'air provenant de la plaine littorale. Lorsque la décharge sur les versants externes est complète, l'air devenu sec descend le long du versant opposé, se réchauffe par compression adiabatique et il se forme un vent du type "foehn" qui envahit une partie du couloir interandin;
- en altitude, au dessus de 3.200 m, précipitations moins abondantes et d'intensités faibles, neige ou grêle lorsque la température est proche de 0°C;
- accumulation d'air dense, assez froid et sec dans les vallées interandines, ce qui contribue à y maintenir un climat stable et peu pluvieux.

4.3. Rôle de l'océan Pacifique et des courants océaniques

Au-dessus de l'océan Pacifique se forment, en règle générale, des masses d'air tropical océanique ayant une température élevée et un important taux d'humidité, conditions propices pour provoquer des précipitations lorsque le vent souffle vers le continent, où elles peuvent se mélanger avec l'air tropical continental de la plaine littorale et faire l'objet du processus déjà décrit de montée et de refroidissement adiabatique, provoquant ainsi d'importantes précipitations sur les contreforts externes et jusqu'à l'intérieur du couloir interandin.

Cependant, comme il a été signalé, l'Equateur en général et tout particulièrement la zone littorale centro-méridionale sont soumis à l'influence permanente du courant froid de Humboldt ou courant équatorial sud et exposés à l'action sporadique d'un flux d'eaux chaudes en provenance du golfe de Panama, connu habituellement sous le nom de courant du Niño qui, dans des conditions particulières, peut être extraordinairement amplifié (phénomène du Niño). Ces conditions donnent origine à:

- des masses d'air maritime relativement froid, sur toute l'aire d'influence du courant de Humboldt dont la température, en face des côtes équatoriennes, varie entre 14 et 18° C. L'évaporation est très inférieure à celle des autres régions de l'océan, ce qui donne lieu à des masses d'air humide mais de basse température qui, lorsqu'elles pénètrent sur le continent (péninsule de Santa Elena et côte sud de Manabí), ne peuvent pas précipiter car le refroidissement est insuffisant. Elles ne peuvent que provoquer des brouillards ou des pluies très faibles appe-

liées localement "terúa". Elles ont une importance toute particulière aux îles Galapagos;

- des masses d'air maritime chaud se déplacent le long des côtes avec le phénomène du Niño. Elles sont caractérisées par des températures et un taux d'humidité très élevés, ce qui provoque des pluies très fortes dans les régions soumises habituellement à l'influence du courant de Humboldt, donc arides ou semi-arides.

Le rôle joué par l'océan Pacifique et les courants océaniques peut être résumé de la manière suivante:

- pénétration sur le continent de masses d'air chaud et humide, liées au déplacement du FIT vers le Sud et renforcement des masses d'air continental littoral, ce qui se traduit par des totaux pluviométriques appréciables;
- installation d'un climat très sec dans les régions littorales centrale et méridionale;
- malgré une grande variabilité, existence sur les îles Galapagos d'un climat de type équatorial présentant deux maximums pluviométriques par an;
- production de pluies exceptionnelles liées à l'apparition du phénomène du Niño.

4.4. Action d'ensemble des différents facteurs

Les trois facteurs décrits précédemment se conjuguent pour former un scénario extrêmement complexe mais lorsque toutes les conditions sont normales, c'est-à-dire quand ni l'un ni l'autre n'a fait l'objet d'un changement anormal important (tel le phénomène du Niño), leur action simultanée explique assez bien les grandes classes de climats et, en particulier, les différents régimes pluviométriques habituellement observés dans le pays et présentés ci-après:

- sur le littoral, un régime de type tropical, avec une seule saison pluvieuse entre décembre et avril (déplacement du FIT) et des totaux pluviométriques faibles sur la frange côtière centro-méridionale (rôle du courant de Humboldt) qui augmentent vers l'intérieur (rôle de la cordillère Occidentale);
- sur les contreforts orientaux de la cordillère Real et en Amazonie, un régime persistant avec des pluies abondantes bien distribuées tout au long de l'année (situation du FIT, permanence des masses d'air tropical humide amazonien);
- dans le couloir interandin, un régime de type équatorial avec deux saisons pluvieuses qui correspondent respectivement à la pénétration majoritaire de masses d'air amazonien en octobre et novembre, ou pacifique de janvier à mai (déplacement du FIT, régime des vents), les totaux pluviométriques étant très variables selon l'altitude, l'exposition des versants ou la présence de reliefs transversaux qui définissent des bassins plus abrités et donc plus secs (altitude et relief des deux cordillères);
- dans la région insulaire, un régime de type équatorial avec deux saisons pluvieuses (déplacements du FIT et du FE), les précipitations augmentant sensiblement avec l'altitude (rôle du relief) et étant privilégiées sur les versants méridionaux (rôle du courant de Humboldt).

5. Valeurs de certains éléments climatiques

Bien que ce ne soit pas le but de cette étude, il a semblé nécessaire de présenter ci-après un bref résumé des valeurs enregistrées pour les principaux éléments: ensoleillement, températures et précipitations, à quelques-unes des stations les plus représentatives des grandes régions naturelles de l'Equateur: Côte, Sierra, Amazonie et îles Galapagos¹¹.

Afin de pouvoir les comparer, les moyennes présentées ont été calculées pour une période homogène de 15 ans (1964-1978), représentative des valeurs enregistrées pour des séries d'observation plus longues.

5.1. Durée annuelle de l'ensoleillement

Sur toute la plaine littorale, jusqu'à 500 m d'altitude sur le flanc de la cordillère Occidentale, le nombre annuel d'heures d'ensoleillement varie généralement de 500 à 1.300, les zones les plus sèches étant les plus favorisées.

Dans la "Sierra" et la zone interandine, l'ensoleillement annuel est presque toujours supérieur à 1.000 heures, sauf aux endroits les plus pluvieux. On peut estimer qu'il varie de 600 à 1.400 h entre 500 et 1.500 m, qu'il est compris entre 1.000 et 2.000 h dans l'intervalle 1.500-3.000 m et qu'il peut atteindre des valeurs plus importantes dans les endroits plus élevés.

Il existe peu de données sur la région amazonienne, mais il est probable que, sauf en de rares exceptions, la durée annuelle de l'ensoleillement n'y dépasse guère 1.200 heures.

Dans l'archipel des Galapagos, le nombre annuel d'heures d'ensoleillement doit être toujours égal ou supérieur à 2.000 heures sur les franges littorales.

5.2. Les températures

La gamme de températures est très étendue puisque les moyennes s'étalent d'environ 0° C au sommet des volcans à plus de 26° C sur le littoral et dans la plaine amazonienne.

Dans la région andine, la température est généralement étroitement liée à l'altitude. Entre 1.500 et 3.000 m, les valeurs moyennes varient entre 20 et 8° C, ce qui correspond à des valeurs maximales absolues de 30 et 22° C et des valeurs minimales absolues de 5 à -4° C.

Sur les flancs externes des deux cordillères, on a pu établir le gradient altitudinal de la température moyenne. Bien que le versant oriental présente des valeurs un peu plus élevées dans la zone de piémont et très légèrement inférieures en haute altitude⁶, les équations suivantes, valables entre 500 et 3.000 m et entre 3.000 et 4.200m, donnent une bonne image du gradient thermique observé sur les deux versants.

$$500 < A < 3.000 \quad T = 25,7 - 0,0047 A$$

$$3.000 < A < 4.200 \quad T = 30,5 - 0,0065 A$$

ce qui correspond à une baisse de
près de 5° C tous les 1.000 m
d'altitude

soit une baisse de 6,5° C tous les
1.000 m d'altitude

Dans la région orientale, la zone littorale et les îles Galapagos, la moyenne annuelle s'établit aux alentours de 24 à 25° C, avec des extrêmes qui ne dépassent guère 38°C ou descendent très rarement à moins de 13°C; les valeurs minimales observées à Zamora (6° C en décembre 1973) et à Puyo (8,3° C en mai 1966) sont véritablement exceptionnelles.

TABLEAU 1

Région	Station	Ensoleillement en heures
Littorale	Guayaquil	1580
	Portoviejo	1310
	San Lorenzo	1080
	Isabel María	960
	Pichilingue	930
	Pasaje	790
	Santo Domingo	770
	Ing. San Carlos	760
	Puerto Ila	670
	Bucay	470
Andine	Quito	2040
	Ambato	1780
	Loja	1650
	Riobamba	1600
	Cuenca	1560
	Baños	1400
	Tulcán	1350
	Pisayambo	1170
Amazonienne	Tiputini	1420
	Puyo	970
Insulaire	San Cristobal (port)	2350

TABLEAU 2

Région	Station	Moyenne annuelle en °C	Minimum absolu en °C	Maximum absolu en °C
Littorale	San Lorenzo	25.4	12.4	39.9
	Esmeraldas	25.7	18.3	35.0
	Milagro	24.6	14.5	35.2
	Guayaquil	25.2	14.0	36.6
	Portoviejo	26.5	11.7	37.8
Andine	Otavalo	14.4	- 0.5	28.2
	Quito	13.4	1.5	29.9
	Cotopaxi	8.1	- 1.5	18.7
	Ambato	12.8	- 0.6	25.6
	Riobamba	13.5	- 3.6	28.3
	Cuenca	14.8	- 0.2	28.0
Amazonienne	Tiputini	25.4	14.0	38.0
	Pastaza	20.1	10.6	30.4
	Puyo	20.3	8.6	31.0
	Zamora	21.2	6.0	35.0
Insulaire	Charles Darwin	23.7	13.8	35.3
	San Cristobal	23.7	13.2	33.6

5.3. Les précipitations

Comme dans le cas des températures, la gamme des hauteurs annuelles de pluie est très étendue puisqu'elle varie de moins de 100 à plus de 5.000 mm.

La région amazonienne et le Nord-Ouest de la province d'Esmeraldas sont les zones les plus pluvieuses, avec des totaux annuels supérieurs à 3.000 mm. Les valeurs mensuelles peuvent atteindre plus de 500 mm et dépassent généralement 200mm. Les pluies sont réparties de façon uniforme au long de l'année, avec une légère diminution entre décembre et février.

Sur la plaine littorale et jusqu'à environ 1.000-1.200 m d'altitude dans la cordillère Occidentale, les précipitations annuelles augmentent d'Ouest en Est, avec une certaine irrégularité due aux reliefs locaux. Les valeurs les plus faibles sont enregistrées à la pointe de la péninsule de Santa Elena et des deux côtés du cap San Lorenzo (inférieures à 200 mm), tandis que des précipitations annuelles supérieures à 3.000 mm sont observées sur les versants de la cordillère Occidentale, à une altitude d'environ 1.000 m. La distribution des pluies est partout identique: période pluvieuse unique entre décembre et avril et saison sèche très marquée tout le reste de l'année.

Comme on l'a expliqué précédemment, la région andine reçoit l'influence alternée de masses d'air océanique et amazonien, de là un régime pluviométrique avec deux saisons pluvieuses, de février à mai et en octobre-novembre, avec une première saison sèche très marquée entre juin et septembre, la seconde, généralement située fin décembre, étant moins accentuée. Etant donné que les pluies sont provoquées par des nuages ayant déjà en partie déchargé leur humidité sur les versants extérieurs des cordillères, les totaux pluviométriques observés ne sont pas très élevés, généralement compris entre 800 et 1.500 mm. Cependant, dans les bassins inter-andins très abrités, les valeurs annuelles peuvent être bien inférieures: 300 mm dans la vallée du Chota (Salinas) et 400 mm dans la vallée du Jubones (Santa Isabel) par exemple. Par ailleurs, dans les régions situées au-dessus de 3.500 m d'altitude, de fréquents brouillards sont observés et les pluies sont généralement de longue durée et de faible intensité.

Dans la province insulaire, l'insuffisance du réseau d'observation ne permet pas d'avancer des conclusions définitives. Cependant, il semble nécessaire de différencier le régime pluviométrique des zones de basse altitude de celui des zones hautes. Dans le premier cas, on observe deux saisons relativement plus humides, d'environ trois mois chacune, centrées sur les mois de février et de juin-septembre; dans le deuxième cas, un facteur supplémentaire intervient car, aux alentours des sommets élevés, le refroidissement adiabatique provoque une condensation de l'humidité de l'air et forme des brouillards et des "garúas", la période plus humide se situant entre novembre et février.

La distribution des pluies mensuelles et les régimes pluviométriques sont matérialisés par les histogrammes qui accompagnent la carte d'isohyètes interannuelles (voir fig. 4).

Un aspect très particulier des précipitations est la très forte irrégularité interannuelle observée dans la zone côtière, phénomène qui sera analysé au chapitre 7. On peut en avoir une idée sommaire en examinant les valeurs annuelles correspondant à différentes fréquences présentées ci-après, calculées à partir du meilleur ajustement entre diverses lois de distribution.

<i>Quito-Observatoire:</i> moyenne (valeur annuelle) = 1.204 mm		
100 années sèches =	570 mm	100 années humides = 1.780 mm
10 années sèches =	947 mm	10 années humides = 1.504 mm
<i>Guayaquil:</i> moyenne = 1.015 mm		
100 années sèches =	390 mm	100 années humides = 2.600 mm
10 années sèches =	600 mm	10 années humides = 1.710 mm
<i>Ibarra:</i> moyenne = 616 mm		
100 années sèches =	380 mm	100 années humides = 1.050 mm
10 années sèches =	466 mm	10 années humides = 825 mm
<i>Loja:</i> moyenne = 815 mm		
100 années sèches =	530 mm	100 années humides = 1.170 mm
10 années sèches =	645 mm	10 années humides = 1.000 mm
<i>Machala:</i> moyenne = 465 mm		
100 années sèches =	145 mm	100 années humides = 2.000 mm
10 années sèches =	225 mm	10 années humides = 1.050 mm
<i>Santo Domingo:</i> moyenne = 3.135 mm		
100 années sèches =	1.970 mm	100 années humides = 5.400 mm
10 années sèches =	2.370 mm	10 années humides = 4.230 mm
<i>Puyo:</i> moyenne = 4.540 mm		
10 années sèches =	4.010 mm	10 années humides = 5.210 mm
<i>Limoncocha:</i> moyenne = 3.240 mm		
10 années sèches =	2.830 mm	10 années humides = 3.660 mm
<i>Esmeraldas:</i> moyenne = 730 mm		
100 années sèches =	365 mm	100 années humides = 1.490 mm
10 années sèches =	500 mm	10 années humides = 1.083 mm
<i>Portoviejo:</i> moyenne = 477 mm		
100 années sèches =	185 mm	100 années humides = 1.180 mm
10 années sèches =	285 mm	10 années humides = 790 mm
<i>Tulcan:</i> moyenne = 865 mm		
100 années sèches =	500 mm	100 années humides = 1.450 mm
10 années sèches =	646 mm	10 années humides = 1.140 mm
<i>Ambato:</i> moyenne = 475 mm		
100 années sèches =	260 mm	100 années humides = 800 mm
10 années sèches =	341 mm	10 années humides = 650 mm

Quant aux pluies journalières¹², les valeurs enregistrées dans la zone côtière et dans la zone amazonienne sont nettement plus élevées que celles observées dans la "Sierra".

SIERRA:	Quito-Observatoire	moyenne (valeur annuelle) =	39 mm
	100 années =	68 mm	10 années = 52 mm
	Ibarrá:	moyenne =	34 mm
	100 années =	63 mm	10 années = 47 mm
COTE:	Loja:	moyenne =	35 mm
	100 années =	64 mm	10 années = 51 mm
	Cotopaxi:	moyenne =	30 mm
	100 années =	55 mm	10 années = 44 mm
COTE:	Machala:	moyenne =	43 mm
		10 années =	84 mm
	Guayaquil:	moyenne =	83 mm
	100 années =	220 mm	10 années = 143 mm
AMAZONIE:	Puyo:	moyenne =	109 mm
		10 années =	144 mm

6. Les grandes classes de climats de l'Equateur

Selon R. ARLERY, *"le problème de la classification des climats est insoluble et il ne peut recevoir que des solutions arbitraires et artificielles Pour avoir une utilité pratique, une classification ne peut en effet que partir de données simples ou au moins facilement accessibles, pour aboutir à un cadre à la fois suffisamment général (pour permettre de comparer des climats ayant de nombreux traits communs) et cependant assez détaillé pour y différencier des climats que séparent seulement quelques caractères plus ou moins importants"*. Essayant de mettre ces conseils en pratique, la classification présentée ci-après est basée sur des critères qui ont été choisis pour leur simplicité; elle n'a en aucun cas la prétention d'être exclusive.

Ces critères concernent les températures moyennes, ainsi que le régime et la hauteur de pluie annuelle.

Le régime des pluies est fondé sur le nombre et la distribution annuelle des maximums pluviométriques; il est:

- "équatorial" lorsqu'on observe deux pointes pluviométriques plus ou moins liées au mouvement apparent du Soleil. C'est le régime général de la planète à proximité de l'équateur géographique: deux saisons pluvieuses coïncident avec les équinoxes, une saison relativement sèche correspond au solstice d'été et une courte saison peu pluvieuse se situe à l'époque du solstice d'hiver;
- "tropical", quand on n'enregistre qu'un seul maximum pluvieux et une seule saison sèche bien marquée;

- "uniforme", lorsque les pluies sont relativement bien distribuées tout au long de l'année.

Pour caractériser les hauteurs des précipitations, on a choisi les limites et les définitions suivantes:

- "aride à semi-aride", pour des totaux annuels inférieurs à 500 mm;
- "sec à semi-humide", entre 500 et 1.000 mm;
- "humide", entre 1.000 et 2.000 mm;
- "très humide", pour les totaux annuels supérieurs à 2.000 mm.

Pour distinguer les températures, trois classes ont été choisies en fonction des moyennes enregistrées annuellement:

- "mégathermique", pour des températures moyennes supérieures à 22 °C;
- "mésothermique", pour des températures entre 12 et 22 °C;
- "froid", pour des températures inférieures à 12 °C.

A partir de ces critères simples, il a été possible de distinguer neuf grandes classes de climats (voir fig. 5). Chacune des grandes régions naturelles est composée d'une ou de plusieurs classes dont on donne ci-après une brève description.

6.1. Région côtière

D'Ouest en Est, on peut distinguer trois types de climats:

- *le climat tropical mégathermique aride à semi-aride* règne dans la péninsule de Santa Elena, le cap San Lorenzo et la frange littorale méridionale. Étant donnée l'influence prépondérante du courant de Humboldt, c'est au cap de Salinas qu'on observe les minimums annuels des pluies et des températures, avec 125,5mm et 23,4 °C. Les températures maximales dépassent rarement 32 °C et les minimales sont de l'ordre de 16 °C. Les précipitations annuelles sont inférieures à 500 mm et se produisent pendant une seule saison pluvieuse, de janvier à avril. Entre juillet et octobre, le temps se caractérise par un ciel très nuageux et par des brouillards ou des "garúas", sans impact notable sur la végétation. Cependant, l'irrégularité interannuelle des précipitations est très élevée, supérieure à 4, principale conséquence de l'apparition épisodique d'un phénomène du Niño pouvant provoquer des pluies exceptionnellement intenses, seules occasions où le paysage reverdit;
- *le climat tropical mégathermique sec à semi-humide* est situé à l'Est du climat précédent et son influence est ressentie sur une frange d'environ 60 km de large. La pluviométrie annuelle est comprise entre 500 y 1.000 mm, recueillis de décembre à mai. La saison sèche est très marquée et les températures moyennes sont élevées, supérieures à 24 °C. La végétation est principalement constituée d'une forêt sèche avec de nombreux fromagers, les "ceibos".
- *le climat tropical mégathermique humide* est présent dans une frange dont la largeur maximale est légèrement inférieure à 110 km et qui débute vers Esmeraldas pour disparaître au niveau du golfe de Guayaquil. La pluie totale annuelle varie généralement entre 1.000 et 2.000 mm bien qu'elle puisse atteindre ponctuellement des valeurs supérieures sur les bas contreforts de la cordillère. Comme

dans le cas précédent, les pluies sont concentrées sur une période unique, de décembre à mai, le climat étant sec le reste de l'année. Les températures moyennes fluctuent aux alentours de 24 °C et l'humidité relative varie entre 70 et 90% selon l'époque. La végétation est une forêt dense dont le cycle végétatif observe une période de repos.

6.2. Région andine

Sans entrer dans le détail d'un grand nombre de microclimats et topoclimats, on peut y décrire quatre types principaux:

- *le climat tropical mégathermique très humide* est un climat de transition entre ceux de la région andine et ceux des zones littorale et amazonienne. Il est représenté sur les versants extérieurs des deux cordillères, entre 500 et 1.500 m d'altitude environ. La température moyenne annuelle varie sensiblement avec l'altitude mais elle reste élevée et l'humidité relative s'établit aux alentours de 90%. Les précipitations annuelles, recueillies pendant une seule saison pluvieuse, sont fortes et supérieures à 2.000 mm, pouvant parfois atteindre 4000 mm. La végétation est essentiellement forestière, mais une exploitation incontrôlée associée à un déboisement intense pour l'installation de pâturages la mettent sérieusement en péril;
- *le climat équatorial mésothermique semi-humide à humide* est le climat le plus fréquent de la zone interandine, à l'exception des vallées abritées et des zones d'altitude supérieure à 3.200 m. Les températures moyennes annuelles se situent généralement entre 12 et 20 °C, bien qu'elles puissent être inférieures sur les versants peu ensoleillés. La durée de l'ensoleillement peut varier sensiblement entre 1.000 et 2.000 heures annuelles et les températures maximales ne dépassent pas 30°C alors que les températures minimales descendent rarement au-dessous de 0°C. Variant en fonction de l'altitude et de l'exposition, l'humidité relative a des valeurs comprises entre 65 et 85%. Les précipitations annuelles fluctuent entre 500 et 2.000 mm et sont réparties en deux saisons pluvieuses, de février à mai et en octobre-novembre, la principale saison sèche, entre juin et septembre, étant bien marquée; par contre, la durée d'une courte période sèche (15 jours à 3 semaines) appelée "veranillo del Niño" est très variable et sa position est très aléatoire entre les mois de décembre et janvier, bien qu'elle se situe souvent fin décembre, d'où son nom. La végétation naturelle de cette zone est largement remplacée par des cultures;
- *le climat équatorial mésothermique secest* associé aux vallées interandines abritées et de plus basse altitude. Les températures moyennes annuelles y fluctuent entre 12 et 20 °C, avec très peu de différence entre les mois d'été et ceux d'hiver. Aux mêmes époques que celles du climat décrit précédemment, les pluies annuelles sont distribuées suivant deux pics séparés par deux saisons sèches mais les totaux observés sont généralement inférieurs à 500 mm. L'accumulation, dans ces cuvettes basses, de masses d'air relativement froid et par conséquent plus dense contribue à créer des conditions climatiques assez stables, un ciel généralement peu nuageux, une humidité relative comprise entre 50 et 80% et un ensoleillement qui dépasse toujours 1.500 heures par an;
- *le climat équatorial froid de haute montagne* se situe toujours au-dessus de 3.000m. L'altitude et l'exposition des versants déterminent les valeurs des températures et des pluies. Les températures maximales dépassent rarement 20 °C et les minimales atteignent généralement des valeurs inférieures à 0 °C mais les moyennes annuelles sont très variables quoiqu'elles fluctuent le plus souvent entre 4 et 8 °C. De même, les totaux annuels de pluie sont irréguliers, compris entre 800 et 2.000 mm, généralement provoqués par des averses de longue durée mais de faible intensité. L'humidité relative est toujours supérieure à 80%.

La végétation naturelle, appelée "matorral" à l'étage le plus bas, est substituée à l'étage immédiatement supérieur par une épaisse pelouse herbacée fréquemment saturée d'eau: le "páramo".

6.3. Région amazonienne

Le climat décrit ci-après, c'est-à-dire celui qui règne en règle générale sur le bassin amazonien, concerne également une partie de la région septentrionale de la province côtière d'Esmeraldas. Il s'agit du:

- *climat uniforme mégathermique très humide*: il est caractérisé par une température moyenne élevée, voisine de 25 °C, et par des totaux pluviométriques très importants, presque toujours supérieurs à 3.000 mm et pouvant dépasser localement 6.000 mm. La distribution des pluies est très régulière tout au long de l'année, bien qu'il existe une pointe pluvieuse centrée sur les mois de juillet-août et une faible récession entre décembre et février. L'humidité relative est évidemment très forte, supérieure à 90% et le ciel est très souvent nuageux, ce qui se traduit par un ensoleillement faible de l'ordre de 1.000 heures par an. Etant donné qu'il n'existe pas de repos du cycle végétatif, la végétation est une forêt sempervirente.

6.4. Région insulaire

Les îles Galapagos sont le siège de différents topoclimats qui se traduisent par un étagement de la végétation entre le niveau de la mer et la cime des volcans. Cependant, le manque de stations climatologiques d'observation ainsi que le nombre limité des zones habitées ne permettent pas de quantifier avec certitude les éléments responsables des différences climatiques existantes. Pour cette raison, malgré la diversité, on a été pour l'instant amené à ne décrire qu'une seule classe de climat.

- *climat insulaire*: il est de type équatorial, mais se caractérise par une forte irrégularité qui dépend de l'altitude et de l'exposition des versants par rapport aux vents dominants. Sur les zones côtières, les températures moyennes fluctuent autour de 23 °C et le climat, jusqu'à 100 m d'altitude environ, présente des caractéristiques qui le situent entre aride et très sec; il passe peu à peu à semi-humide et humide au fur et à mesure que l'altitude augmente. En ce qui concerne le régime des pluies, nous avons déjà indiqué au paragraphe 5.3 qu'il fallait différencier celui des zones de basse altitude de celui des zones hautes. Dans le premier cas, on observe deux saisons relativement plus humides d'environ trois mois chacune, centrées sur le mois de février et sur la période juin-septembre, la première étant nettement plus marquée que la seconde; dans le deuxième cas, le refroidissement adiabatique provoque la condensation de l'humidité de l'air, formant ainsi des brouillards ou des "garúas", entre novembre et février. L'analyse de quelques séries pluviométriques observées montre la grande hétérogénéité spatiale des pluies annuelles qui peuvent varier de moins de 100 à près de 2.000 mm. Ces valeurs montrent l'influence de l'exposition aux vents, les zones situées au Sud des îles étant plus humides. C'est ainsi que sur l'île de Santa Cruz, à altitude égale, on observe 92,3 mm au Nord à la station Seymour et 350mm à la Station Charles Darwin située au Sud. Par ailleurs, on a pu mettre en évidence un important gradient pluviométrique croissant avec l'altitude; tel est le cas dans l'île de San Cristobal: sur une période de 10 ans, on observe 288,9mm à 30 m d'altitude, 1.383,7 mm à 300m et 1.706,6 mm à 400 m. Evidemment, le gradient thermique est inverse et les températures baissent de quelques degrés avec l'altitude.

Une autre caractéristique du climat insulaire est l'importante irrégularité interannuelle des pluviométries. On a déjà indiqué que le régime pluviométrique général était soumis à l'influence de deux facteurs principaux: les déplacements du FIT,

qui suivent le mouvement apparent du Soleil et ceux du Front Equatorial FE qui marque la zone de transition entre les eaux froides du courant de Humboldt et les eaux chaudes du courant Equatorial Sud. Tout changement anomal de ces deux facteurs peut provoquer de très fortes différences dans les hauteurs pluviométriques observées habituellement. C'est ainsi que des positions très méridionales du FIT et du FE produisent des conditions favorables à l'accroissement des précipitations puisqu'elles permettent l'incursion de masses d'air océanique chaud et humide. Au contraire, les années présentant une pluviométrie déficitaire répondent à un modèle opposé: le FIT et le FE se situent et restent plus longtemps que de coutume dans une situation septentrionale anormale qui empêche la pénétration de l'air chaud humide, la région étant alors exposée à l'air relativement froid originaire des zones sous l'influence du courant de Humboldt. La végétation est très fortement zonée en fonction de l'altitude et de l'exposition des versants aux vents; dans les parties basses, elle est essentiellement composée de plantes épineuses.

7. Aspects climatiques anomaux et spécifiques à l'Equateur

Le tour d'horizon du chapitre précédent révèle la complexité de la réalité climatique équatorienne: il ne s'agit pas seulement d'un système unique riche en variantes mais d'un ensemble de climats liés à des systèmes régionaux et microrégionaux d'une grande diversité, conditionnés en grande partie par les caractéristiques géographiques.

Cette diversité confère déjà au pays une forte originalité mais il est un trait encore plus spécifique qui est l'extrême irrégularité des éléments climatiques, en particulier celle des pluies. C'est ainsi qu'on ne peut porter un jugement valable sur les climats de l'Equateur si on se base uniquement sur les valeurs moyennes annuelles, car les années exceptionnelles ont des effets déterminants (par exemple en ce qui concerne la distribution spatiale de la population ou par leur impact important sur l'économie nationale). De même, il serait également risqué de considérer la réalité climatique actuelle du pays comme un paramètre fixe et inaltérable et il faut la situer dans un cadre temporel de référence le plus large possible afin de rechercher une éventuelle évolution, telle une tendance croissante ou décroissante des pluies.

C'est pour cela qu'on analysera ci-après deux aspects des événements climatiques extrêmes qui affectent l'Equateur: le phénomène du Niño et le déroulement d'un actuel processus de désertification, ou plutôt de décroissance des pluviosités, dans la région côtière.

7.1. Le phénomène du Niño

Il y a plus d'un siècle, les pêcheurs sudaméricains ont baptisé du nom de "Niño" (terme désignant l'Enfant Jésus) le réchauffement de la surface de l'océan qui se produit tous les ans à l'époque de Noël, le long des côtes péruviennes et équatoriennes, et qui dure environ trois à quatre mois, jusqu'en mars ou avril.

Cependant, il arrive que cet événement prenne une ampleur anormale et que le réchauffement des eaux soit plus accentué et dure beaucoup plus longtemps que d'habitude. C'est ce qui a été observé dernièrement en 1953, 1957, 1958, 1965, 1972-73, 1976-77 et, plus récemment en 1982-83. Actuellement, dans les milieux scientifiques, le terme de "phénomène du Niño" ou plus simplement de "Niño" ne se réfère pas au réchauffement limité observé annuellement mais est réservé de préférence aux événements exceptionnellement marqués. Le SCOR (Scientific Committee for Ocean Research) définit le Niño de la manière suivante: *"un flux d'eaux chaudes qui, pendant une période d'au moins quatre mois, présente une anomalie*

positive de température égale ou supérieure à la valeur d'un écart-type et se déplace vers les côtes de l'Equateur et du Pérou", définition qui a été élargie pour caractériser les flux d'eaux océaniques superficielles anormalement chaudes dans toute la zone de l'océan Pacifique tropical. Cette invasion peut s'étendre au delà de 12° de latitude sud, le long des côtes péruviennes où on observe habituellement d'importants mouvements ascendants d'eaux profondes froides (upwelling), favorisés par des alizés intenses. Ce sont ces eaux, riches en éléments nutritifs, qui ont permis au Pérou de développer des industries importantes liées à la pêche et à l'exploitation du "guano".

L'apparition du phénomène du Niño a une forte incidence tant sur le plan biologique que sur le plan climatique¹³. D'une part, la biomasse du phytoplancton océanique subit une considérable réduction en diatomées et une augmentation en dinoflagellés d'eaux chaudes, accompagnées d'une forte diminution en oeufs et alevins de poissons pélagiques (maquereaux, sardines et surtout anchois), ce qui a des répercussions catastrophiques sur la vie marine et la population d'oiseaux aquatiques. C'est ainsi qu'au Pérou, faute d'alimentation, le Niño de 1957-58 a réduit la faune avicole marine de 28 à 6 millions d'individus et que le Niño de 1972 a fait passer de manière spectaculaire les captures d'anchois de 12 millions de tonnes en 1970 à 4 millions en 1972 et à 1,5 million en 1973; l'impact du Niño 1982-83 a été encore plus important puisqu'il les a fait chuter à moins de 0,5 million de tonnes.

Les conditions observées simultanément sur l'océan Pacifique, c'est-à-dire des eaux superficielles particulièrement chaudes et des alizés relativement faibles, de même que la situation très méridionale du FIT, s'unissent pour provoquer d'abondantes précipitations. A cet égard, le Niño 1982-83 a été particulièrement exceptionnel et Joan HOCK, du Service d'information et d'observation du milieu ambiant des Etats Unis, a établi la liste des dommages suivants: *"inondations dans les cinq provinces occidentales de l'Equateur et sur la plaine côtière du Pérou, se soldant par 260 victimes, 200 millions de dollars en destruction des propriétés, 100 millions en pertes agricoles. En Equateur, les inondations ont détruit une grande partie des plantations de riz et des infrastructures d'irrigation"*.

Etant donnée l'importance de son impact sur l'économie de la région, il était inévitable qu'en plus d'études météorologiques à l'échelle planétaire globale, le Niño fasse aussi l'objet d'études plus spécifiques. C'est ainsi que le Chili, la Colombie, l'Equateur et le Pérou ont constitué le groupe ERFEN (Etude Régionale du Phénomène du Niño), qui essaie de découvrir les mécanismes du phénomène et de prévoir son apparition grâce à un échange constant de données climatologiques et d'observations recueillies lors de croisières océanographiques. Par ailleurs, au niveau international, un groupe mixte de travail COI-OMM-CPPS (Commission Océanographique Internationale - Organisation Météorologique Mondiale - Commission Permanente du Pacifique Sud) effectue l'étude détaillée des conditions physiques, météorologiques et biologiques de l'océan, utilisant pour cela les données enregistrées et transmises par des stations météorologiques fixes, des navires océanographiques ou marchands, des bouées dérivantes, des satellites, etc....

C'est ainsi que peu à peu on est arrivé à cerner le problème de la formation et du développement du Niño, bien que les hypothèses avancées ne soient pas toujours concordantes et que les véritables facteurs conditionnant certains paramètres soient encore l'objet d'études.

Au début on avait cru qu'il s'agissait d'un phénomène local provoqué par l'affaiblissement des vents de basse altitude le long du littoral. Cependant, après une étude détaillée, K. WYRTKI a prouvé qu'il n'existait pas de diminution appréciable de la force de ces vents et que les Niños étaient accompagnés de manifestations météorologiques inhabituelles; l'étude du phénomène devait donc être envisagée dans un cadre spatial beaucoup plus étendu.

Bien qu'il ne soit pas possible d'avancer une explication définitive des causes d'apparition du phénomène car un examen comparatif des événements antérieurs montre que, malgré certaines caractéristiques communes, ils ne se ressemblent jamais complètement, plusieurs théories explicatives ont été émises. Malgré les nombreux progrès faits récemment grâce à l'accumulation de données d'observation, les hypothèses les plus satisfaisantes restent jusqu'à présent celles de Klaus WYRTKI ¹⁴ et de Jacob BJERKNES ¹⁵.

Après avoir prouvé que, pendant les 18 mois qui précèdent un Niño, les alizés soufflaient plus fort qu'ils ne le faisaient normalement, WYRTKI formule sa thèse de *"la réponse dynamique de l'océan à l'augmentation de la force des alizés"*. Citons un extrait de ses articles: " de forts alizés du Sud-est soufflant pendant plus de 18 mois, provoquent une accumulation d'eau chaude dans le Pacifique ouest, accompagnée d'une hausse du niveau de l'océan et d'un enfoncement de la thermocline. Dès que ces vents faiblissent, l'eau accumulée a tendance à revenir vers le Pacifique oriental et les côtes sudaméricaines; l'arrivée de ces eaux chaudes provoque une hausse du niveau de l'océan, tandis que la thermocline s'enfonce, ce qui remplace les effets de l'upwelling et marque le début d'un Niño ".

De son côté, BJERKNES propose sa théorie de l' *"interaction thermodynamique entre l'océan et l'atmosphère"*. C'est en 1966 que se situe le point de départ de son hypothèse pour la compréhension du Niño: il remarque que le réchauffement anormal de l'océan est associé à l' *"oscillation sud"*, phénomène qui avait été observé pour la première fois en 1924 par WALKER. L'oscillation sud S.O. est due à une fluctuation de la circulation atmosphérique transversale, mise également en évidence par WALKER, et elle se manifeste par une variation plus ou moins cyclique (période d'environ 3 ans) de la différence de pression atmosphérique entre le système de hautes pressions du Pacifique sud-est (île de Pâques - Tahiti) et celui de basses pressions de la région Indonésie - Australie. Ce phénomène est mesuré par un indice d'oscillation sud, différence existant entre les deux systèmes mentionnés ci-dessus: l'indice est positif lorsque la différence entre Est et Ouest est supérieure à l'écart habituel et il est négatif dans le cas contraire. BJERKNES remarque que le Niño est associé à un indice négatif: il débute lorsque l'indice commence à diminuer et finit lorsque l'indice atteint sa valeur la plus faible, la branche ascendante de la circulation zonale se déplaçant vers l'Est, entre la Nouvelle Guinée et le méridien 180°. L'affaiblissement des alizés et la hausse des températures superficielles de l'océan contribuent au renforcement du contre-courant équatorial, en association avec les ondes de Kelvin, ce qui, sur le littoral sudaméricain, se traduit par un apport d'eaux chaudes et une hausse du niveau océanique; les eaux sont alors redistribuées vers le Nord et plus particulièrement vers le Sud, donnant lieu à un Niño. De manière simultanée, on observe que le FE et le FIT occupent des positions anormales, le premier étant repoussé au Sud par l'afflux d'eaux chaudes et le second se situant aussi en position très méridionale suite à une forte altération de la circulation atmosphérique d'Hadley. L'ensemble des conditions énumérées ci-dessus contribue à augmenter substantiellement les précipitations.

Prévoir l'apparition d'un Niño serait très utile car cela permettrait de prendre les précautions nécessaires à la mitigation des dégâts. Les deux hypothèses exposées précédemment en établissent la possibilité grâce à certains indicateurs: variation positive du niveau de l'océan et de la profondeur de la thermocline entre le Pacifique oriental et le Pacifique occidental, dans le premier cas, augmentation significative des températures superficielles des eaux et fortes anomalies de la différence de pressions atmosphériques entre le Pacifique sud-est et l'Australie-Indonésie, dans le deuxième cas. On doit cependant remarquer que, malgré quelques observations anormales, les indicateurs cités n'ont pas permis de prévoir suffisamment à l'avance le Niño 1982-83 et que le phénomène s'est produit de façon inopinée.

7.2. Irrégularité pluviométrique et tendance climatique

7.2.1. *Irrégularité des pluviométries*

Le chapitre précédent montre que les hauteurs pluviométriques peuvent atteindre des valeurs nettement supérieures aux valeurs normales lors des périodes correspondant aux Niños, quand le FIT et le FE occupent une position méridionale anormale. Par contre, l'inverse, c'est-à-dire une position septentrionale anormale des fronts, est responsable d'années déficitaires et de fortes sécheresses.

Ces anomalies sont mises en évidence par la grande irrégularité retrouvée dans les séries d'observations pluviométriques où coexistent des pointes élevées (qui correspondent à des Niños sur la Côte) et des années exceptionnellement sèches.

L'irrégularité est plus accentuée dans la région littorale parce qu'elle reçoit directement l'impact des masses d'air océanique alors que, dans le couloir interandin, la cordillère Occidentale contribue à réduire sensiblement le rôle de ces masses d'air, les distribue de façon hétérogène et peut même en annuler l'influence. A l'échelle nationale, on peut tracer des isolignes qui matérialisent le degré d'irrégularité interannuelle en utilisant par exemple le coefficient K3 qui, pour chaque station d'observation, est calculé en faisant le rapport *pluviométrie décennale humide / pluviométrie décennale sèche*.

En appliquant cette formule aux valeurs présentées au paragraphe 5.3., on s'aperçoit que l'irrégularité croît d'Est en Ouest. Les coefficients sont inférieurs à 1,5 dans la région amazonienne alors qu'ils sont compris entre 1,5 et 1,8 dans la région andine et qu'ils peuvent atteindre des valeurs très fortes, supérieures à 4, dans la région littorale.

Cette grande irrégularité pluviométrique de la zone côtière peut être illustrée en comparant les précipitations interannuelles et celles qui correspondent au Niño 1982-83, dont l'influence s'étend d'octobre 1982 à septembre 1983, c'est-à-dire pendant une année complète. Comme le montre la figure 6, l'impact du Niño est particulièrement important sur la frange littorale, jusqu'à une latitude de 0°30'N, et sur les contreforts de la cordillère Occidentale: les pluviométries annuelles, mensuelles et journalières observées sont véritablement exceptionnelles. Nous allons en donner ci-après un aperçu bien que, comme le souligne F. MONIOD* *"... attention sur les considérations statistiques des phénomènes hydropluviométriques consécutifs à El Niño : la réalité des fréquences ou temps de retour annoncés est très discutable, car le fait observé n'est peut-être pas le paroxysme d'une situation latente dont le "germe" serait contenu dans l'échantillon de référence, mais la manifestation accidentelle, quoiqu'assez courante, d'une autre situation ignorée dans l'échantillon de référence: auquel cas les extrapolations par Galton, Pearson ou autre de la distribution de l'échantillon n'ont aucune raison de refléter la fréquence de l'accident."* L'estimation des fréquences n'est donc fournie qu'à titre indicatif.

* Président de la Sous-commission Scientifique d'Hydrologie ORSTOM - communication personnelle - 1989.

GUAYAQUIL (67 ans)

- moyenne annuelle : 1.015,7 mm
- Niño 1982-83 : 4.600,4 mm, ce qui correspond à une période de retour supérieure à 5.000 ans;
 - . 6 mois ont une période de retour supérieure à 100 ans;
 - . 12 pluies journalières ont une fréquence annuelle, 4 une fréquence décennale et 1 une fréquence centennale;
 - . on a enregistré 33,9 mm en 10 minutes, soit une intensité de 203 mm/heure.

SALINAS (27 ans)

- moyenne interannuelle : 125,5 mm
- Niño 1982-83 : 2.833,0 mm, ce qui correspond à une période de retour supérieure à 5.000 ans;
 - . 5 mois ont une fréquence plus rare que la fréquence centennale
 - . 33 pluies journalières ont une fréquence annuelle, 8 une fréquence décennale et 2 une fréquence centennale (signalons en particulier une pluie de 223 mm)

MANTA (32 ans)

- moyenne inierannuelle : 225,8 mm
- Niño 1982-83 : 1.835,1 mm, ce qui correspond à une période de retour supérieure à 5.000 ans;
 - . 7 mois ont une période de retour supérieure à 100 ans;
 - . 14 pluies journalières ont une fréquence annuelle et 1 une fréquence centennale (180 mm).

En revanche, dans la zone interandine, il est très difficile d'établir une relation directe entre le Niño et les pluviométries enregistrées en 1982-83. Dans leur ensemble, elles sont très supérieures aux valeurs normales mais l'augmentation est très variable: généralement elle est de l'ordre de 20 à 30% mais elle peut aussi être de 0% ou atteindre 400%, les augmentations pouvant être très différentes entre stations voisines. Par conséquent, il semble que l'influence du Niño ne se traduise pas principalement par l'invasion de masses d'air humide mais plutôt par l'accroissement d'une activité convective qui répond à des conditions strictement locales et assez aléatoires. C'est ainsi qu'à Quito on a observé 219 jours de pluie, soit 33 jours de plus que le nombre annuel moyen, totalisant 1.780 mm (au lieu de 1.204 mm) dont 1.678 mm ont été enregistrés d'octobre à mai, la fréquence de l'évènement étant d'ordre centennal. Par contre, on doit remarquer que le phénomène n'a eu aucune influence sur les hauteurs pluviométriques journalières et sur les intensités qui sont proches des valeurs médianes.

Il faut finalement signaler que la probabilité de coexistence d'années exceptionnellement sèches ou humides est forte à l'intérieur d'une même grande région géographique, notamment sur la Côte; cette probabilité est au contraire beaucoup plus faible lorsqu'il s'agit de deux régions différentes. Par exemple, l'année 1968 fut extraordinairement sèche sur la Côte, moyennement sèche dans la Sierra et presque normale dans l'Amazonie, alors que l'année 1966 fut sèche dans toute la Sierra, normale sur la Côte et un peu excédentaire en Amazonie.

7.2.2. Décroissance des précipitations dans la région littorale

Le but de ce paragraphe est d'illustrer l'existence possible d'un actuel processus de désertification consécutif à une décroissance des précipitations, sur la frange côtière centrale et méridionale, fait très commenté bien qu'il n'ait été analysé que récemment^{13,16}.

Pour démontrer l'évolution positive ou négative des valeurs de certains éléments climatiques, ou en d'autres mots pour mettre en évidence une "tendance climatique", il est indispensable de se référer au cadre temporel le plus large possible, c'est-à-dire qu'il faut analyser des séries d'observations suffisamment longues et continues. Par ailleurs, il est nécessaire d'éliminer l'influence des variations accidentelles ainsi que l'effet des fluctuations de courte période. On a donc:

- choisi les stations de longue durée de Guayaquil (période 1915-1983), Milagro (1921-1983) et Machala (1931-1983) pour caractériser la région littorale et la station de Quito (1891-1988) pour représenter la région andine;
- calculé les moyennes mobiles en remplaçant chaque valeur annuelle par la moyenne arithmétique entre celle-ci et les valeurs qui l'encadrent:

$$(n-2 + n-1 + n + n+1 + n+2) / 5$$

- tracé les droites de régression ;
- comparé les séries choisies au reste des séries disponibles, bien que ces dernières aient une durée et une fiabilité inférieures.

Les résultats obtenus sont présentés aux figures 7 à 10 et les principales conclusions sont les suivantes:

- la distribution des années très pluvieuses et celle des années très sèches est pratiquement aléatoire et les séries observées sur la Côte et à Quito sont indépendantes;
- à Quito, les moyennes mobiles mettent en évidence un pseudo-cycle, avec des pics pluviométriques centrés sur les années 1899, 1916, 1933, 1952, 1970, soit des écarts très voisins variant de 17 à 19 ans.

La série montre également une très légère tendance à la baisse de la pluviométrie, de l'ordre de 1,3 mm par an:

$$P \text{ mm} = 1.287 - 1,3 t \quad \text{où } t \text{ est le nombre d'années compté à partir du début des observations;}$$

- jusqu'en 1982, les quatre séries observées sur la Côte mettent également en évidence une forte tendance à la décroissance des pluies, de l'ordre de 7 mm par an à Machala et à Guayaquil et proche de 16 mm par an à Milagro:

Guayaquil	:	P mm	=	1.350	-	7,6 t
Machala	:	P mm	=	724	-	7,0 t
Milagro	:	P mm	=	1.948	-	15,8 t

A Guayaquil et à Milagro, où la pluviosité est relativement élevée, ce phénomène passe pratiquement inaperçu, tandis qu'à Machala et sur toute la frange littorale

sud et centrale^{**}, où le climat est beaucoup plus sec, les totaux pluviométriques décroissants sont perçus chaque année avec une vive inquiétude et sont interprétés comme l'installation d'un processus de désertification.

L'analyse ci-dessus va dans ce sens ce qui peut évidemment faire naître des craintes légitimes, mais il ne faut pas pour autant pronostiquer que les pluies seront bientôt nulles dans la région littorale. En effet, les séries d'observations sont trop courtes pour tirer une conclusion aussi pessimiste et aucun argument ne permet pour l'instant de savoir s'il s'agit d'une tendance ayant une forte probabilité de se prolonger ou, au contraire, si la réalité actuelle se situe dans le contexte d'un processus cyclique, ce qui permettrait alors de penser que les pluviométries annuelles vont augmenter.

8. Conclusion

Conséquence directe des nombreux facteurs naturels dont on a essayé de montrer le rôle respectif, l'Equateur possède une forte originalité climatique qui est un élément important du développement socio-économique du pays puisqu'elle combine les avantages liés à l'existence d'écosystèmes diversifiés mais, en contrepartie, se révèle parfois un agent dévastateur.

Il ne faut pas non plus oublier qu'aux facteurs naturels s'ajoute un agent externe dont l'influence ne peut être négligée: l'action humaine. Face aux modifications volontaires que l'homme peut apporter, dont certaines sont souvent bénéfiques à court terme comme c'est le cas des pluies artificielles ou du drainage de vastes surfaces marécageuses, un bon nombre de pratiques traditionnelles ou délibérées peuvent aussi se traduire par de graves dommages. Sous ce rapport, il ne fait aucun doute que l'action anthropique la plus néfaste, malheureusement la plus généralisée, est celle consécutive à la déforestation qui affecte profondément l'équilibre hydrique et énergétique de l'atmosphère.

En Equateur, sans affirmer que ce mécanisme soit le responsable exclusif de la baisse des précipitations ci-dessus analysée, il est incontestable qu'il a dû et doit encore jouer un rôle important et qu'il contribue à accentuer les conditions semi-désertiques qui règnent sur une partie de la zone littorale.

Au même titre que l'eau ou le sol, le climat est une ressource naturelle dont nous dépendons étroitement. C'est un devoir d'en prendre un soin jaloux.

^{**} Malgré les nombreuses lacunes de l'information, une forte baisse, de l'ordre de 8 mm par an, est également observée à Portoviejo.

BIBLIOGRAPHIE

- 1 P. POURRUT, "*Los climas del Ecuador. Fundamentos explicativos*" Documentos de Investigación, No. 4, CEDIG-IPGH-ORSTOM, 1983, pp. 8-43 - Préface de Nelson GÓMEZ.
- 2 M. ACOSTA SOLIS, "*División fitogeográfica y formaciones geobotánicas del Ecuador*", Casa de la Cultura Ecuatoriana, 1968.
- 3 M. ACOSTA SOLIS, "*Bases ecológicas para clasificar áreas fitogeográficas*", IPGH, 1975.
- 4 C. BLANDIN LANDIVAR, "*El clima y sus características en el Ecuador*", IPGH, 1977.
- 5 P. NARANJO, "*El clima del Ecuador*", Casa de la Cultura Ecuatoriana, 1981.
- 6 L. CAÑADAS CRUZ, "*El mapa bioclimatológico y ecológico del Ecuador*", MAG-PRONAREG-Banco Central del Ecuador, 1983.
- 7 R. CRUZ, E. CADIER, P. POURRUT et al., "*Estudio hidrometeorológico e hidrogeológico preliminar*":
 - de las cuencas de los ríos Pastaza, Chimbo y Chanchán, PRONAREG-ORSTOM, 1976
 - de las cuencas de los ríos Cañar, Paute y del Sur ecuatoriano, PRONAREG-ORSTOM, 1976
 - de las cuencas de los ríos Esmeraldas y del Norte ecuatoriano, PRONAREG-ORSTOM, 1977
 - de las cuencas del río Guayas, de los ríos de la Península y de Manabí, PRONAREG-ORSTOM, 1978
 - del Nor y Centro-Oriente de la región amazónica ecuatoriana, PRONAREG-ORSTOM, 1980.
- 8 P. POURRUT, "*Clima*", Atlas del mundo: ECUADOR, Jeune Afrique y Banco Central del Ecuador, 1982, pp. 17-20.
- 9 A. BALDIT, "*Les éléments météorologiques du climat*", Traité de climatologie de M. Picry.
- 10 R. ARLERY, H. GRISOLLET et B. GUILMET, "*Climatologie - Méthodes et pratiques*", Gauthier Villars, 1973.
- 11 Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), "*Anuarios meteorológicos*", No. 1 à 22, 1961 à 1982.
- 12 J.F. NOUVELOT, "*Normas pluviométricas propuestas para el Ecuador*", PRONAREG-ORSTOM, 1982.
- 13 J.F. NOUVELOT, P. POURRUT, "*El Niño - Phénomène océanique et atmosphérique - Importance en 1982-1983*", Cahiers ORSTOM, Hydrologie, XXI, No. 1, 1984-1985, pp. 39-67.
- 14 K. WIRTKY, "*El Niño*", La Recherche, No. 106.

- 15 S.G.H. PHILANDER, "*El Niño southern oscillation phenomena-NOAA/Geophys, fluid dynam. labo*", Princeton University.
- 16 P. POURRUT, "*Algunas consideraciones acerca de los fenómenos climáticos extremos observados en el Ecuador*", Actas del Coloquio Ecuador 1986, Banco Central del Ecuador, Revista Cultura Vol. VIII, número 24, 1986.

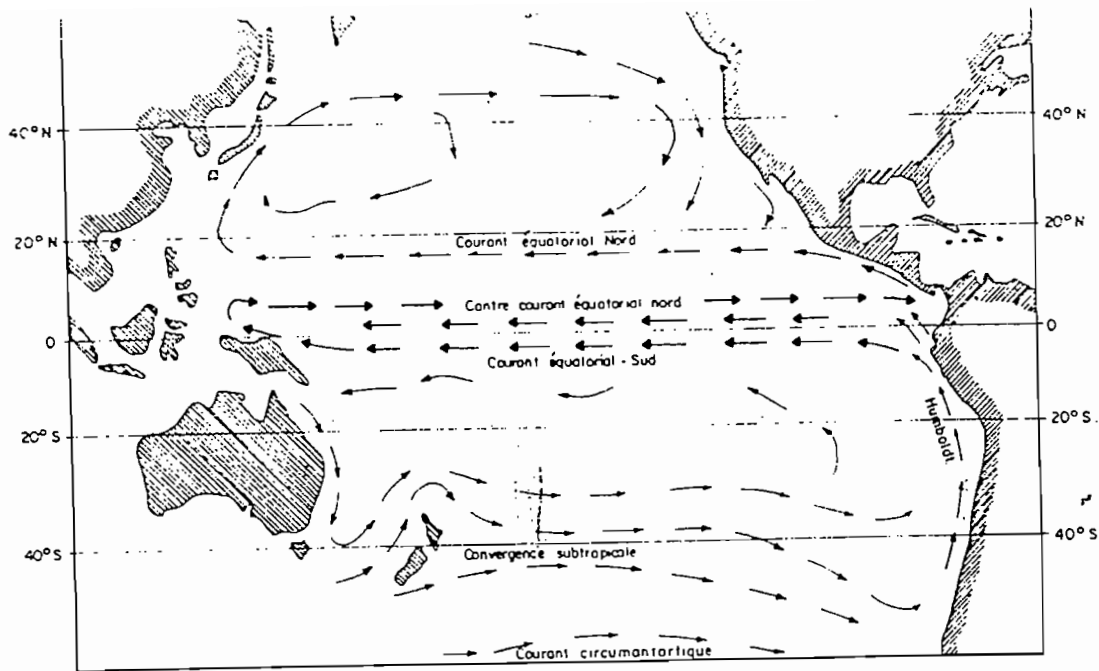


FIG. 1. - Schéma des principaux courants marins de l'océan Pacifique

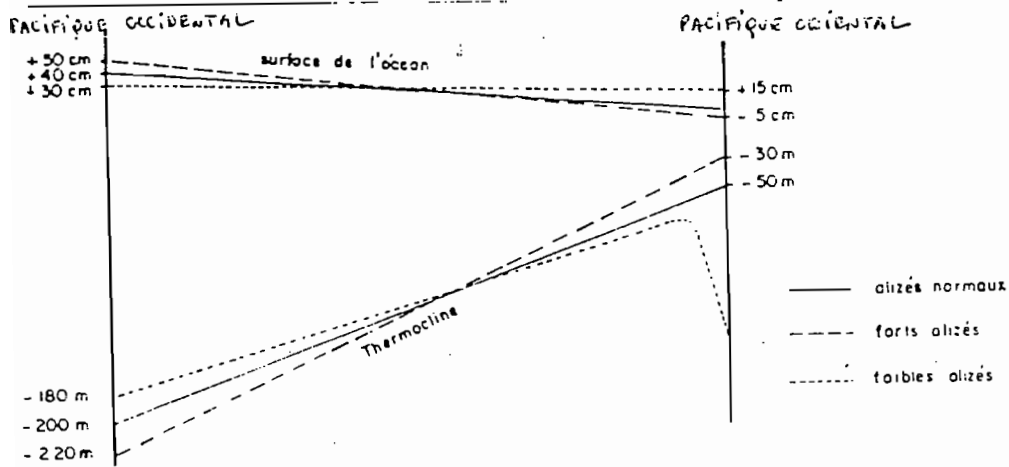


FIG. 2. - Réponse de l'océan Pacifique aux vents alizés.
D'après K. WYRTKI

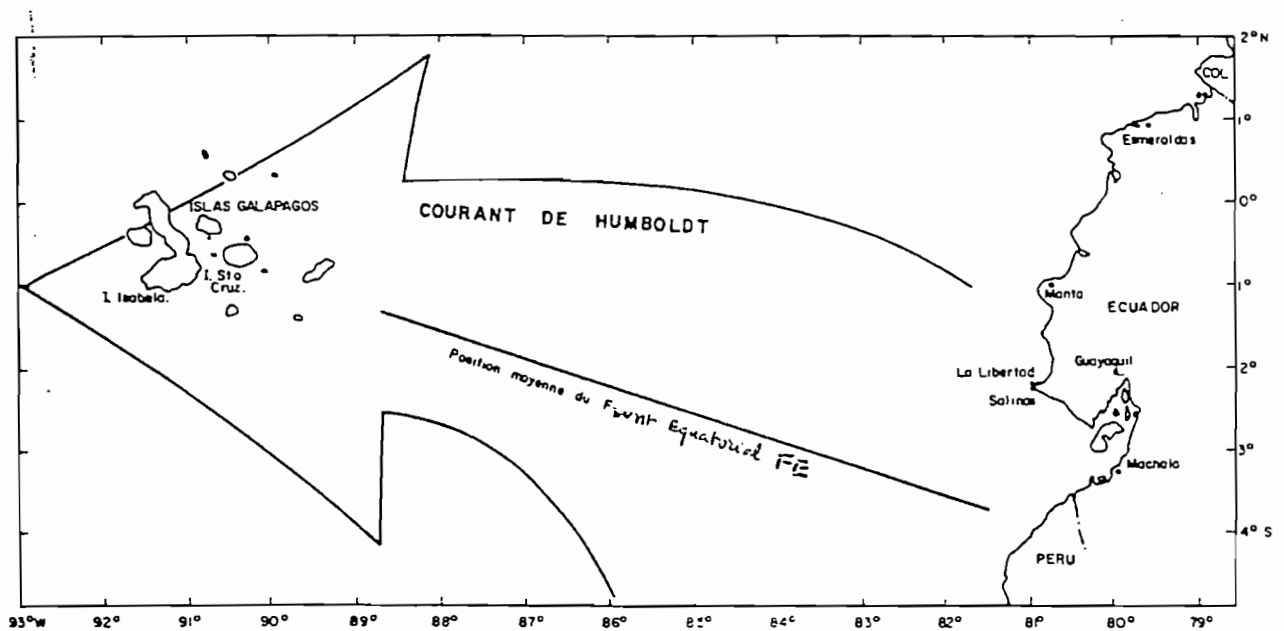
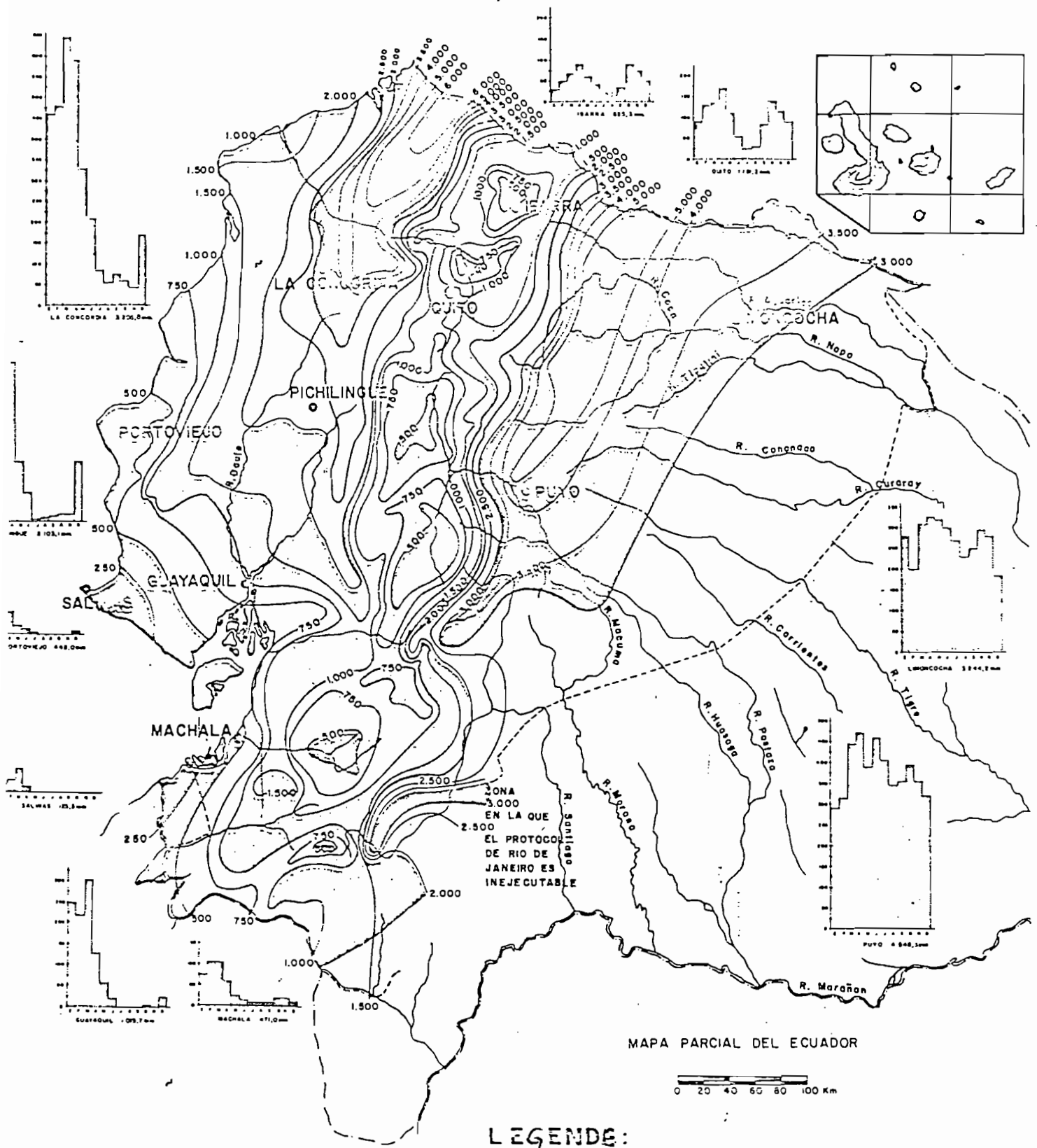


FIG. 3 - Les courants marins au large de l'Équateur

(PROVISOIRE)

Fig 4- PLUVIOMETRIE ANNUELLE
Period 1964-1978



(Provisoire)

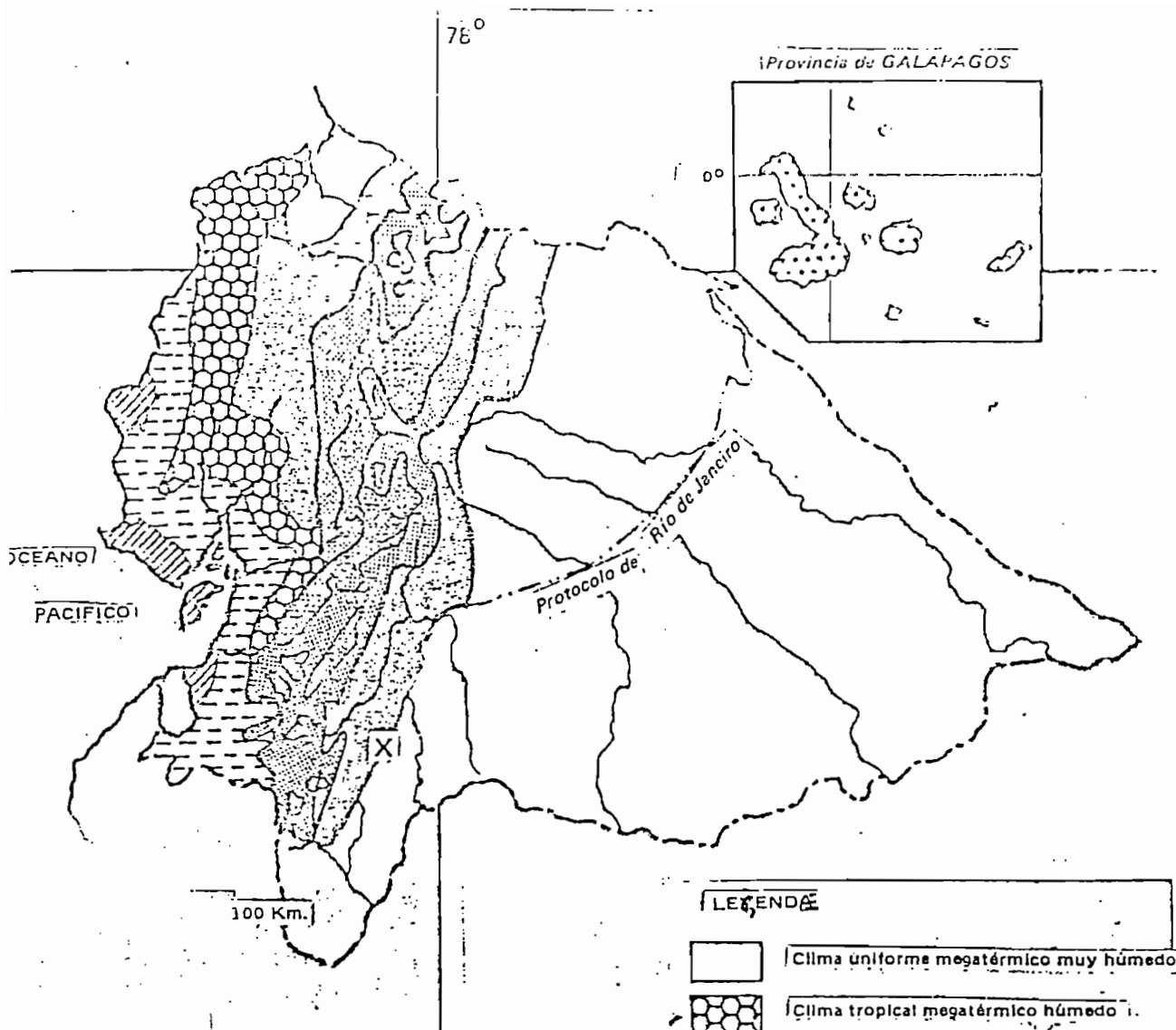


FIG 5 : REPARTITION DES PRINCIPAUX CLIMATS

(P Roussire)

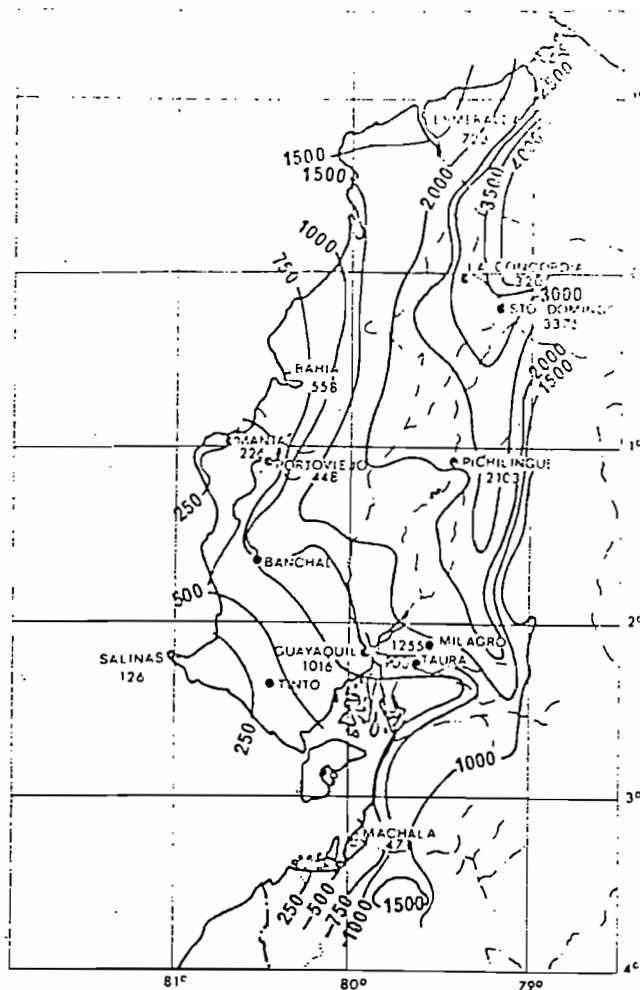


FIG. 18. - Isohyètes. 1964-1978

FIG 5

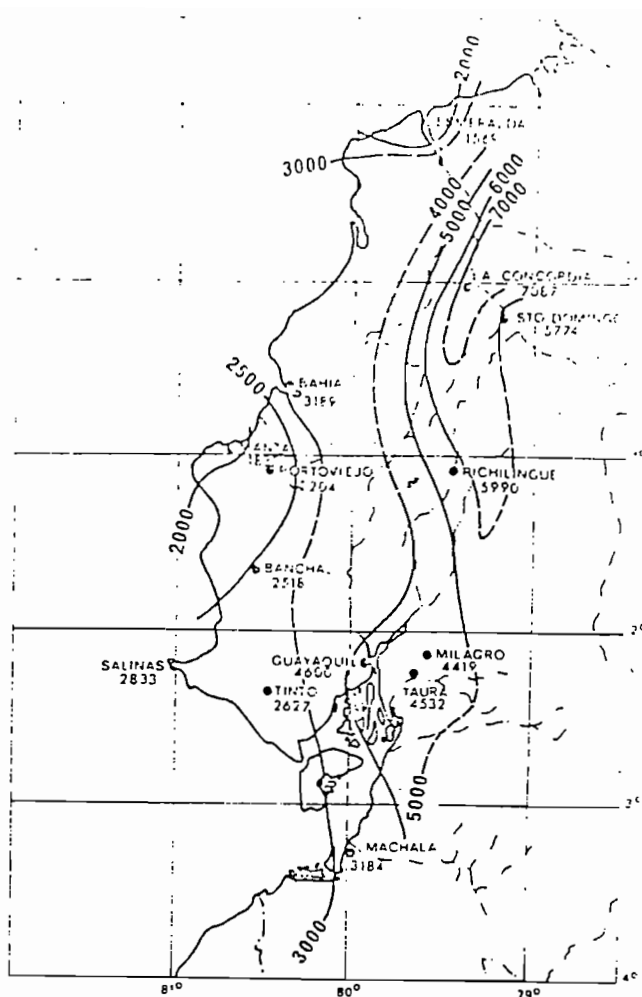


FIG. 19. - Isohyètes. oct. 1982 - sept. 1983

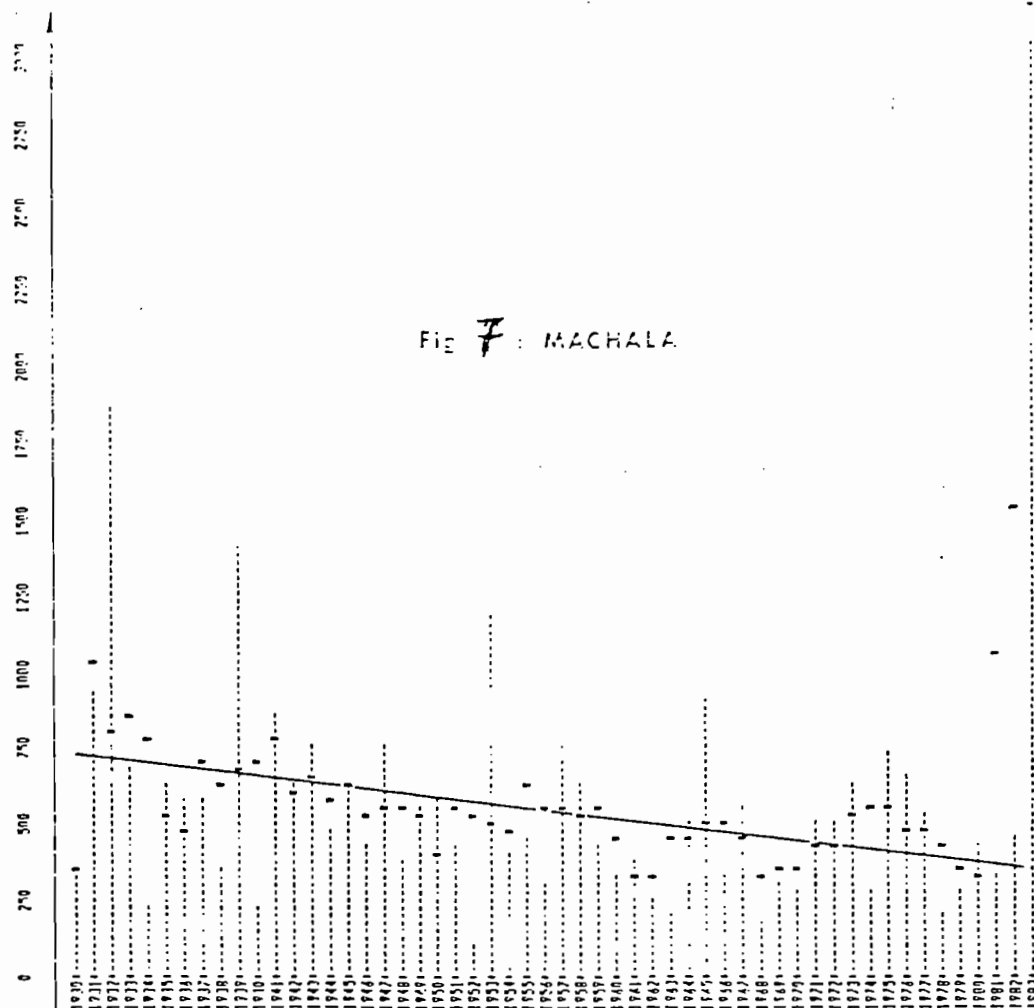


FIG 7: MACHALA

(Provisoire)

Fig 8: GUAYAQUIL

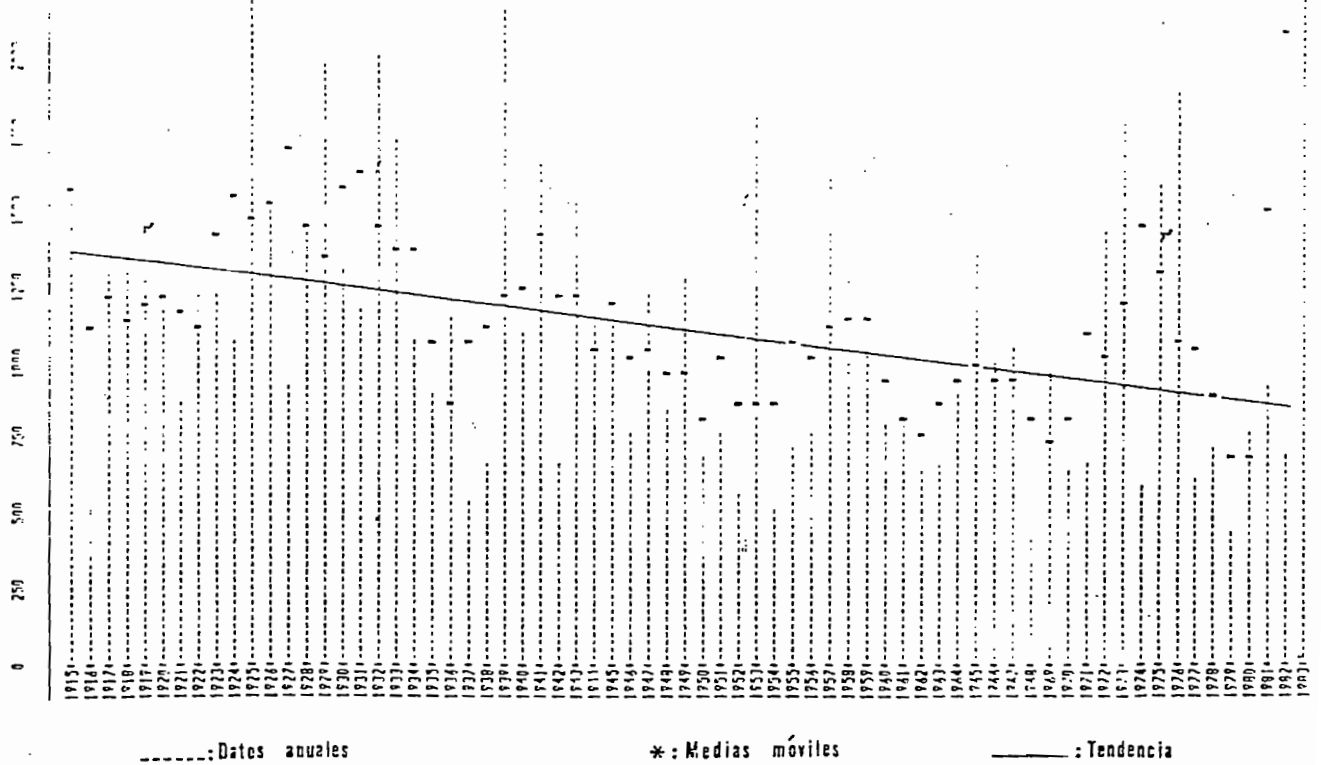
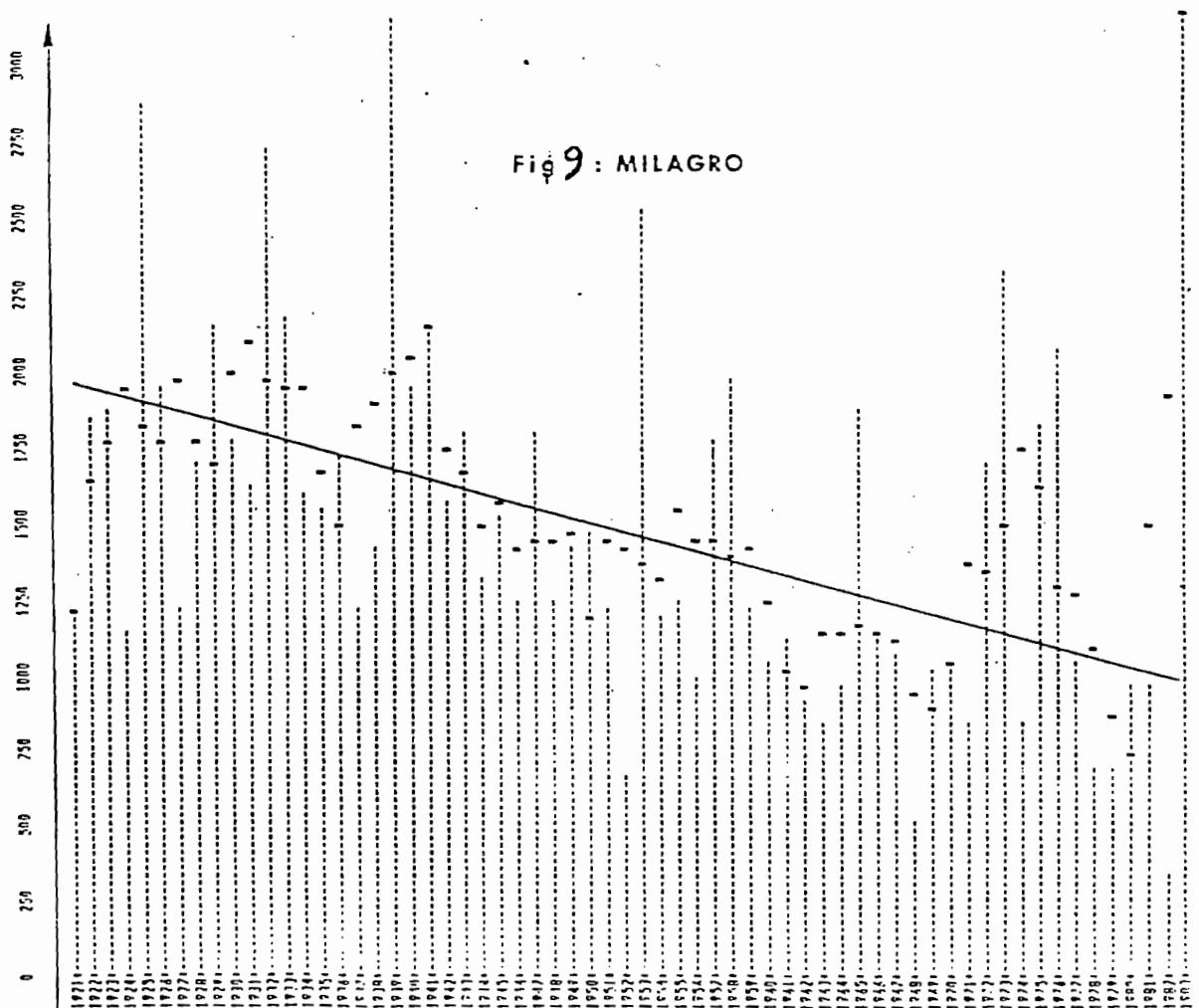


Fig 9: MILAGRO

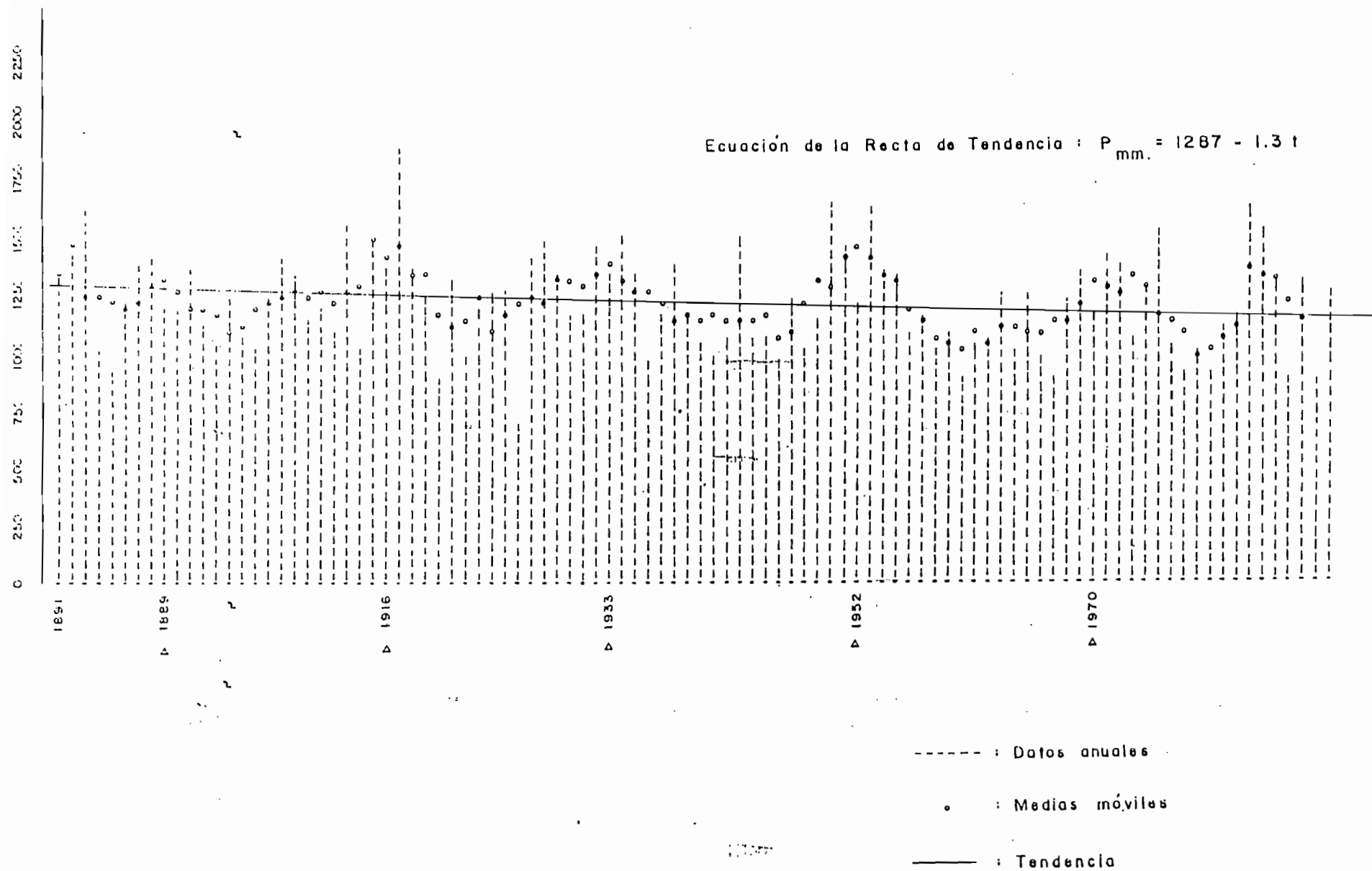


(PROVISORE)

FIG. 10

TENDENCIA Y FLUCTUACIONES PLUVIOMETRICAS

Estación QUITO - OBSERVATORIO



Nota : 4 años incompletos han sido rellenados
con un valor de 1200 mm.