Estimation de la demande en eau du secteur agricole et des disponibilités pour la satisfaire

Éléments de base pour la planification de l'irrigation en Équateur

Pierre POURRUT
Ingénieur hydrologue à l'ORSTOM

RÉSUMÉ

La détermination des données nécessaires à la planification rationnelle de l'irrigation, à l'échelle nationale, fait appel, d'une part, à l'évaluation des apports totaux nécessaires aux régions encore non irriguées ainsi que des apports complémentaires requis par les zones où l'irrigation actuelle est déficiente, et d'autre part, à l'estimation des ressources hydriques locales susceptibles de les satisfaire, l'auteur faisant volontairement abstraction des ressources d'origine éloignée telles que les grands barrages régionaux.

L'étude présentée ci-après s'appuie sur l'expérience actuellement menée en Equateur pour dégager certains caractères généraux d'ordre méthodologique, en vue d'une possible application dans les pays en voie de développement.

L'évaluation de la demande est basée, tout d'abord, sur la délimitation à partir de certaines caractéristiques climatiques des grandes régions ayant des besoins en irrigation identiques ainsi que sur le tracé de zones, dites « zones irrigables » où les facteurs sols et pentes sont propices à une mise en valeur agricole. Ensuite, l'estimation des besoins en eau des cultures donne lieu à deux approches différentes : une méthode globale dans les parties non encore irriguées et une méthode d'études de « zones-témoins » représentatives dans les régions actuellement sous irrigation.

Les disponibilités locales en eaux superficielles sont étudiées dans l'optique de deux types d'aménagements hydrauliques : petites retenues et prises directes dans les cours d'eau. Leur estimation est faite à partir des valeurs du module annuel et du débit caractéristique d'étiage de 30 jours consécutifs, attribués à des bassins hydrographiques unitaires de superficie réduite. Le manque généralisé de données hydrogéologiques quantitatives en Equateur n'a pas permis de faire une étude approfondie de l'évaluation des ressources en eaux souterraines et celles-ci ne sont abordées que sous la forme d'une esquisse méthodologique sommaire.

Les résultats obtenus permettent de confronter les disponibilités potentielles avec l'utilisation actuelle et les besoins réels, de définir les successives priorités d'installation de projets et, ainsi, de préparer les diverses étapes d'un plan national d'irrigation.

RESUMEN

La determinación de los datos necesarios para una planificación racional de la irrigación, a escala nacional, requiere, por una parte de la evaluación de los aportes globales en las regiones todavía no regardas así como de los aportes complementarios necesarios en las zonas donde la irrigación actual es deficiente, y por otra parte de la estimación de los recursos hídricos locales aptos para satisfacerlos. El autor voluntariamente hace abstracción de los recursos de origen más lejano tal como las grandes represas regionales.

El estudio presentado a continuación se apoya en la experiencia que se está llevando a cabo en Ecuador, para separar algunas características generales de orden metodológico, con miras a una posible utilización en los países en vías de desarrollo.

La evaluación de la demanda está basada, en primer lugar, en la delimitación a partir de ciertas caracteristícas climaticas, de las grandes regiones en las cuales las necesidades de riego son idénticas, así como en el trazado de zonas llamadas « zonas regables », en las cuales los factores suelos y pendientes son propicios para la instalación de cultivos.

Luego, la estimación de los requerimientos en agua de los cultivos se hace en base a dos enfogues diferentes : un método global en las partes todavía no regadas y un método de estudio de « zonas testigos » representativas en las regiones irrigadas...

Las disponibilidades locales en aguas superficiales se estudian con la óptica de dos tipos de acondicionamientos hidraúlicos : pequeñas represas y tomas directas en los cursos de agua. Su estimación se hace a partir de los valores del módulo anual y del caudal característico de estiaje de 30 días consecutivos, atribuídos a cuencas hidrográficas unitarias de superficie reducida. La falta generalizada de datos hidrogeológicos cuantitativos en Ecuador, no ha permitido hacer un estudio detallado de la evaluación de los recursos en aguas subterráneas y solo se presenta un esbozo metodológico sumario.

Los resultados obtenidos permiten comparar las disponibilidades potenciales con el uso actual y los requerimientos efectivos, definir las sucesivas prioridades para la instalación de proyectos y, de esta manera, preparar las varias etapas de un plan nacional de riego.

ABSTRACT

The determination of the necessary data for the rational planification of irrigation, at the national level, calls for :

— *on the one hand, a computation of the total water requirements for the areas not yet irrigated and of the complementary waters needed for the zone where the existing irrigation is deficient;*

— *on the other hand, the appraisal of the local hydric resources likely to satisfy them (the resources of the big regional dams are not taken into consideration because of distance).*

The study described hereby is based on the experiment now in process in Ecuator to draw some general characteristics of methodological nature with a view to a possible adaptation to the developing countries.

The assessment of the demand is based, primary, on the delimitation based upon some climatical characteristics of the large areas presenting similar needs in irrigation, as well as on the definition of zones, called « irrigable zones » where the factors soil and slope are favorable to the agricultural development. Afterwards, the estimation of the water needs for farming give rise to two different possibilities : a global method in the parts not yet irrigated and a survey method of typical « test zones » in the parts presently irrigated.

The local availabilities in surface waters are examined in view of two types of hydraulic structures : small pools and river intakes. The estimation of these availabilities is calculated by means of the mean annual discharge values and the law water discharges of 30 consecutive days related to small surface unit hydrological basins. Due to the wide lack of quantitative data concerning the hydrogeology of Ecuator, a thorough survey of the assessment of ground water resources was not possible; it explains that only a methodological outline of such resources can be carried out.

The results produced by this survey enable to compare the potential availabilities with the present utilization and the actual requirements, to determine the successive priorities for the implementation of projects and hence to prepare the various phases of a national irrigation plan.

SOMMAIRE

1. *Avant-propos*

2. *Introduction méthodologique*

3. *Contexte géographique équatorien*

   3.1. La zone côtière

   3.2. La dépression du Guayas

   3.3. Le couloir interandin

4. *Où irriguer ?*
   - 4.1. Le facteur climatique
   - 4.2. Les facteurs physiques
     - 4.2.1. Délimitation des zones irrigables dans la zone côtière. Méthodologie générale
       - 4.2.1.1. Importance et rôle des facteurs physiques
       - 4.2.1.2. Délimitation des zones irrigables suivant les facteurs sols-pentes
     - 4.2.2. Application de la méthodologie aux zones en partie irriguées. Cas de la dépression du Guayas et du couloir interandin
       - 4.2.2.1. Délimitation des sous-zones bénéficiant d'une irrigation actuelle et estimation quantitative des superficies réelles irriguées
       - 4.2.2.2. Délimitation des zones irrigables suivant les facteurs sols-pentes
   - 4.3. Détermination de zones irrigables en fonction des facteurs physico-climatiques
5. *Quand et combien irriguer ?*
   - 5.1. Périodes au cours desquelles l'irrigation est nécessaire
   - 5.2. Demande globale des zones non irriguées
   - 5.3. Demande complémentaire des zones imparfaitement irriguées
     - 5.3.1. Délimitation des régions où se feront les extrapolations
     - 5.3.2. Choix de la zone-témoin
     - 5.3.3. Etudes à réaliser dans la zone-témoin
     - 5.3.4. Résultats acquis
       - 5.3.4.1. Estimation des besoins en eau des cultures
       - 5.3.4.2. Estimation de la demande complémentaire
     - 5.3.5. Extrapolation des résultats
   - 5.4. Total des apports en eau nécessaires
6. *Avec quoi irriguer ?*
   - 6.1. Estimation du potentiel en eaux souterraines
   - 6.2. Evaluation des ressources en eaux superficielles
     - 6.2.1. Aménagements au fil de l'eau
     - 6.2.2. Petites retenues agricoles
7. *Conclusion*
8. *Bibliographie...* dans le texte, les références sont entre parenthèses

PRÉFACE

Cet article a été réalisé dans le cadre d'une convention signée entre l'ORSTOM et le Programme National de Régionalisation (PRONAREG), du ministère de l'Agriculture et de l'Elevage de l'Equateur. Il n'aurait pu voir le jour sans l'aide de mes collègues de l'ORSTOM nommés ci-après qui m'ont apporté une aide précieuse dans leur discipline respective :

Alain BERNARD
Eric CADIER
Pierre GONDARD
Charles HUTTEL
Jean-François NOUVELOT
François VICARIOT
Alain WINCKELL
Claude ZEBROWSKI

Il est aussi le résultat de la collaboration effective de l'ensemble du personnel du Département d'Hydrologie du Programme National de Régionalisation Agricole. Je voudrais citer tout particulièrement :

Ing. Roberto CRUZ, chef du Département
Ing. Alejandro BERMEO
Ing. Marcelo CISNEROS
Ing. Gustavo GOMEZ
Ing. Eugenio PESANTEZ
Sr. Iván ROMO
Sr. Oscar ROVERE
Sr. Angel SEGOVIA

Je voudrais enfin remercier publiquement le Directeur de PRONAREG, l'ingénieur Baldemar ALAVA A., pour m'avoir toujours fourni l'aide matérielle indispensable à la réalisation de cette publication.

P. POURRUT.

1. AVANT-PROPOS

Après la réalisation d'une convention d'une durée de trois ans (1974-1977) destinée principalement à établir l'inventaire des ressources naturelles renouvelables de l'Equateur, un nouvel accord d'une durée de cinq ans (1977-1982) a été signé entre le Ministère de l'Agriculture (MAG et l'ORSTOM. En ce qui concerne les travaux hydrologiques, de nouvelles tâches ont été assignées et, en particulier :

— « Cuantificación y inventario del uso actual y potencial del agua. »

— « Determinación de alternativas para satisfacer la demanda en agua para uso agrícola, en las regiones juzgadas como prioritarias para al desarrollo del dicho sector. »

C'est-à-dire :

— Quantification et inventaire de l'usage actuel et potentiel de l'eau.

— Détermination d'alternatives pour satisfaire la demande en eau à usage agricole dans les régions où la mise en valeur agricole sera jugée prioritaire.

Le présent article s'efforce d'exposer une méthodologie répondant aux thèmes proposés, et tout en s'appuyant sur l'exemple des travaux déjà réalisés ou des études en cours d'exécution en Equateur, de la généraliser en vue de la rendre applicable à d'autres pays et principalement aux pays en voie de développement.

2. INTRODUCTION MÉTHODOLOGIQUE

Le problème de la planification de l'irrigation, à l'échelle régionale ou nationale, peut être abordé de diverses façons suivant que l'on donne priorité aux facteurs physico-climatiques, aux impératifs politiques ou aux conditions socio-économiques.

Cependant, et ceci sera notre hypothèse de travail, il est permis de penser que la mise en valeur rationnelle d'une région hydriquement déficitaire puisse réellement s'envisager une fois connues les réponses aux quatre questions suivantes :

OU,
COMBIEN ET QUAND,
AVEC QUOI,
ET COMMENT IRRIGUER ?

Répondre à la dernière question sort des limites de cette étude puisqu'elle entre directement dans le cadre des projets spécifiques de mise en valeur agricole et concerne les sociétés régionales d'aménagement ou les instituts nationaux chargés de la maîtrise de l'eau. C'est la raison pour laquelle nous ne tiendrons pas compte des diverses options possibles quant à la technique d'irrigation et nous placerons dans le cas le plus défavorable, malheureusement le plus fréquent dans le pays en voie de développement, celui d'une irrigation par ruissellement. De la même façon nous ne tiendrons compte que des disponibilités en eau locales, propices à de petits aménagements agricoles, et ne ferons pas intervenir les possibilités d'alimentation à partir de grandes retenues régionales.

Par contre, nous sommes convaincus qu'il est possible de répondre correctement aux trois premières questions si l'on s'appuie sur des études hydroclimatiques orientées vers une application pratique, dans le cadre d'une action multidisciplinaire nécessitant la collaboration partielle des pédologues, des géographes, des géomorphologues, des écologues, des agronomes et des économistes. Correctement menées, ces études doivent fournir aux planificateurs les éléments suffisants pour qu'ils puissent, pour une région déterminée :

— situer les projets de mise en valeur dans les zones les plus favorables ;
— déterminer l'amplitude de ces projets grâce à la connaissance des surfaces potentiellement irrigables en fonction de l'eau disponible et suivant trois alternatives : politique de petites retenues agricoles, aménagements au fil de l'eau, et utilisation des eaux souterraines.

L'organigramme de la figure 1 schématise les différentes articulations proposées entre les documents de base nécessaires et les documents élaborés, la finalité étant de confronter les besoins potentiels des zones aptes à la mise en valeur agricole et les disponibilités en eau.

3. CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE ÉQUATORIEN

En définitive, les études consistent à découvrir les sources d'alimentation possibles pour satisfaire les besoins estimés dans les zones à vocation agricole non encore irriguées ou insuffisamment irriguées. Mais il est évident que la problématique sera différente suivant qu'il s'agisse de grandes zones non cultivées et sans système d'irrigation, d'une mosaïque de petites parcelles irrégulièrement arrosées suivant des pratiques traditionnelles ou encore de cultures irriguées à partir d'un réseau parfaitement adapté.

En première approximation, l'Equateur, qui offre un éventail très large de zones climatiques (pluviométries moyennes annuelles comprises entre 200 et 6 000 mm), peut être divisé en trois grandes zones qui, d'ouest en est, présentent des caractères très différents quant au mode d'irrigation :

— la zone côtière semi-aride ou très sèche,
— la dépression du Guayas,
— le couloir interandin.

Afin que le lecteur puisse mieux comprendre certaines variations dans le processus méthodologique employé, qui seront exposées ultérieurement, nous donnons ci-après une brève description de ces trois zones (voir fig. 2).

3.1. La zone côtière

De Muisne à Arenillas, de part et d'autre de la zone la plus arrosée de la Cordillera de Chongon-Colonche, un régime de précipitations annuelles inférieures à 600 mm affecte une frange côtière dont l'importance varie de quelques kilomètres au nord, à plusieurs dizaines de kilomètres dans les régions de Manta-Portoviejo et de la péninsule de Santa Elena. Une saison des pluies unique, s'étalant de janvier à mai, ainsi que des températures moyennes élevées

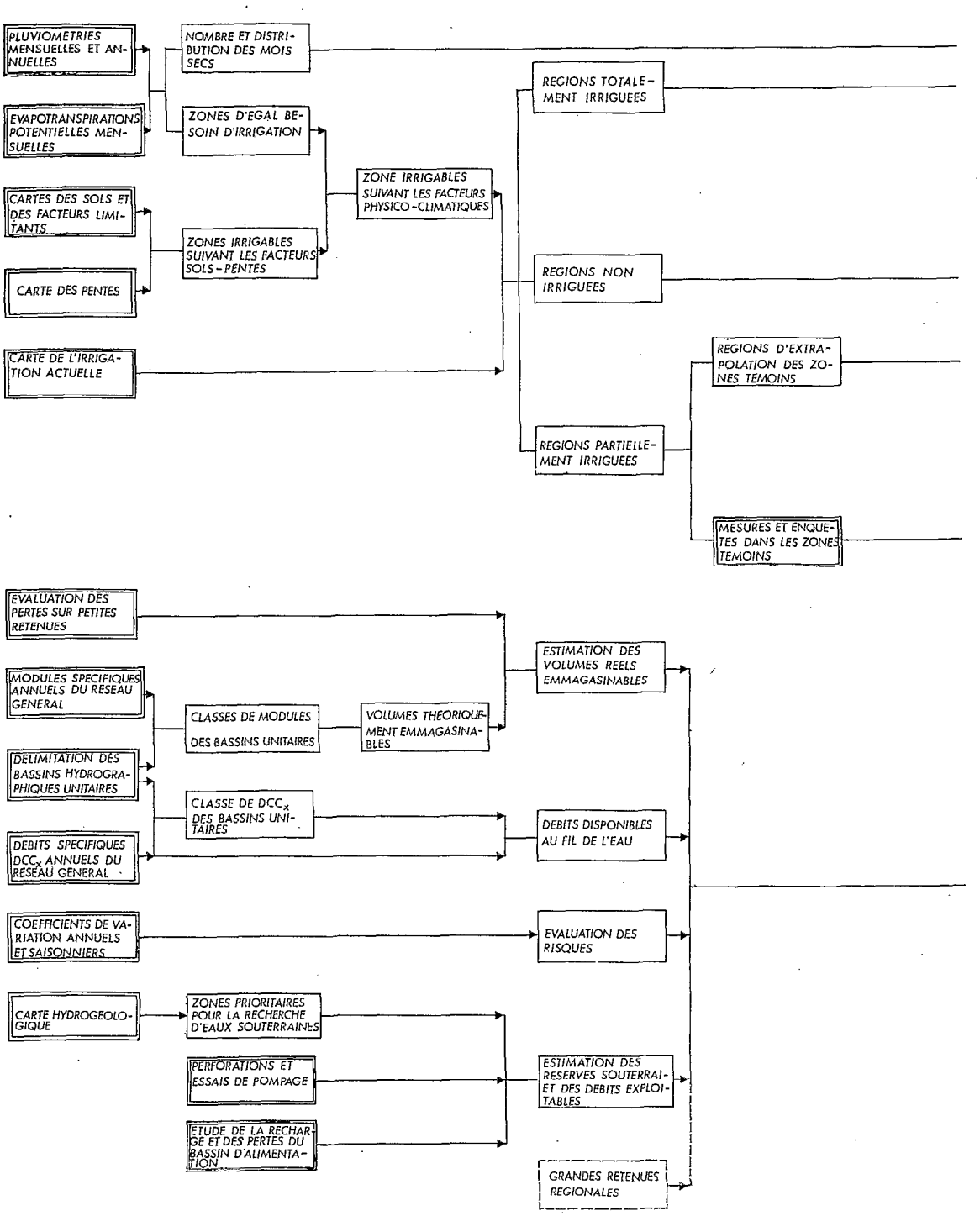
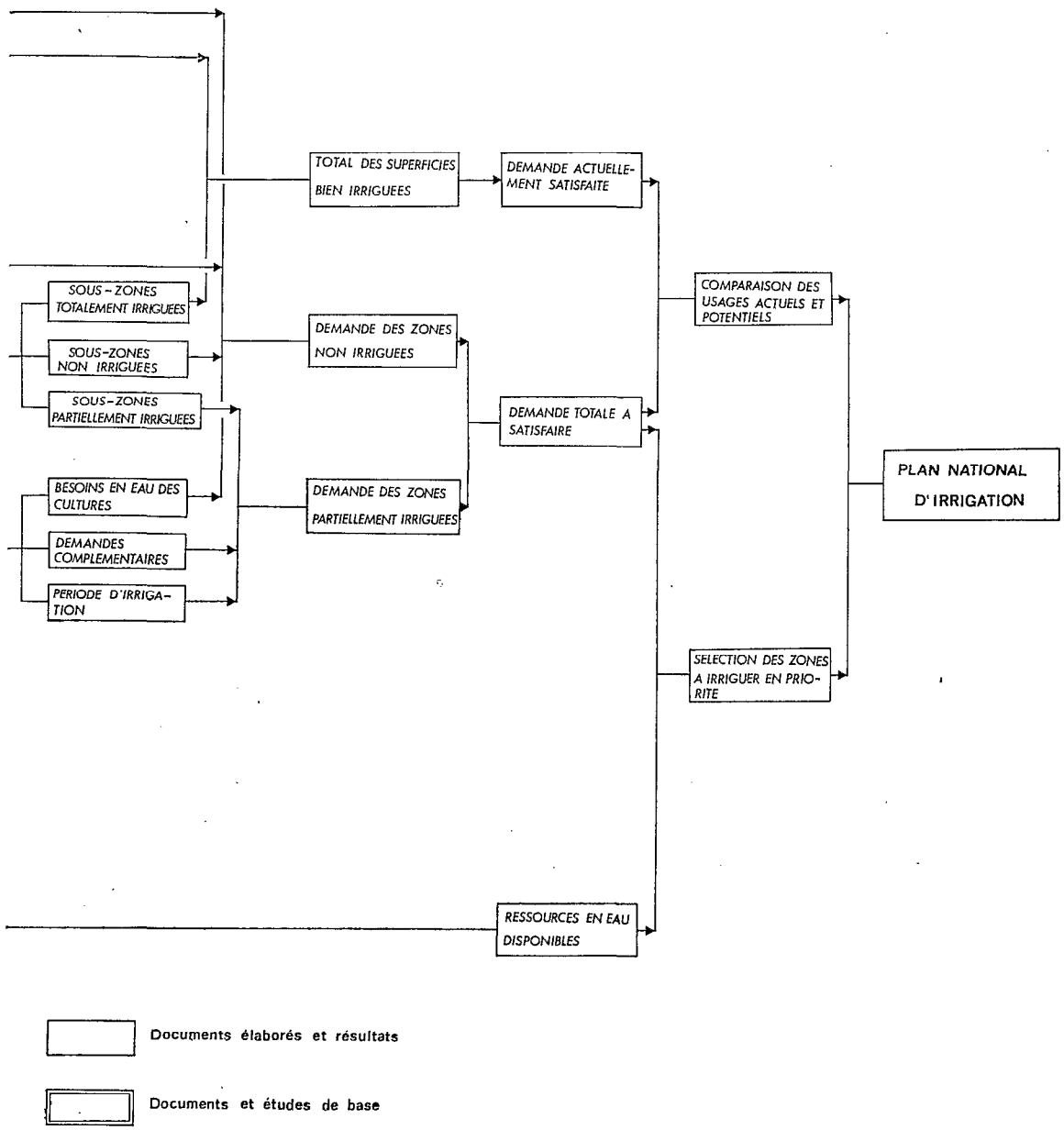


Fig. 1. — Organigramme schématique



de la méthodologie proposée

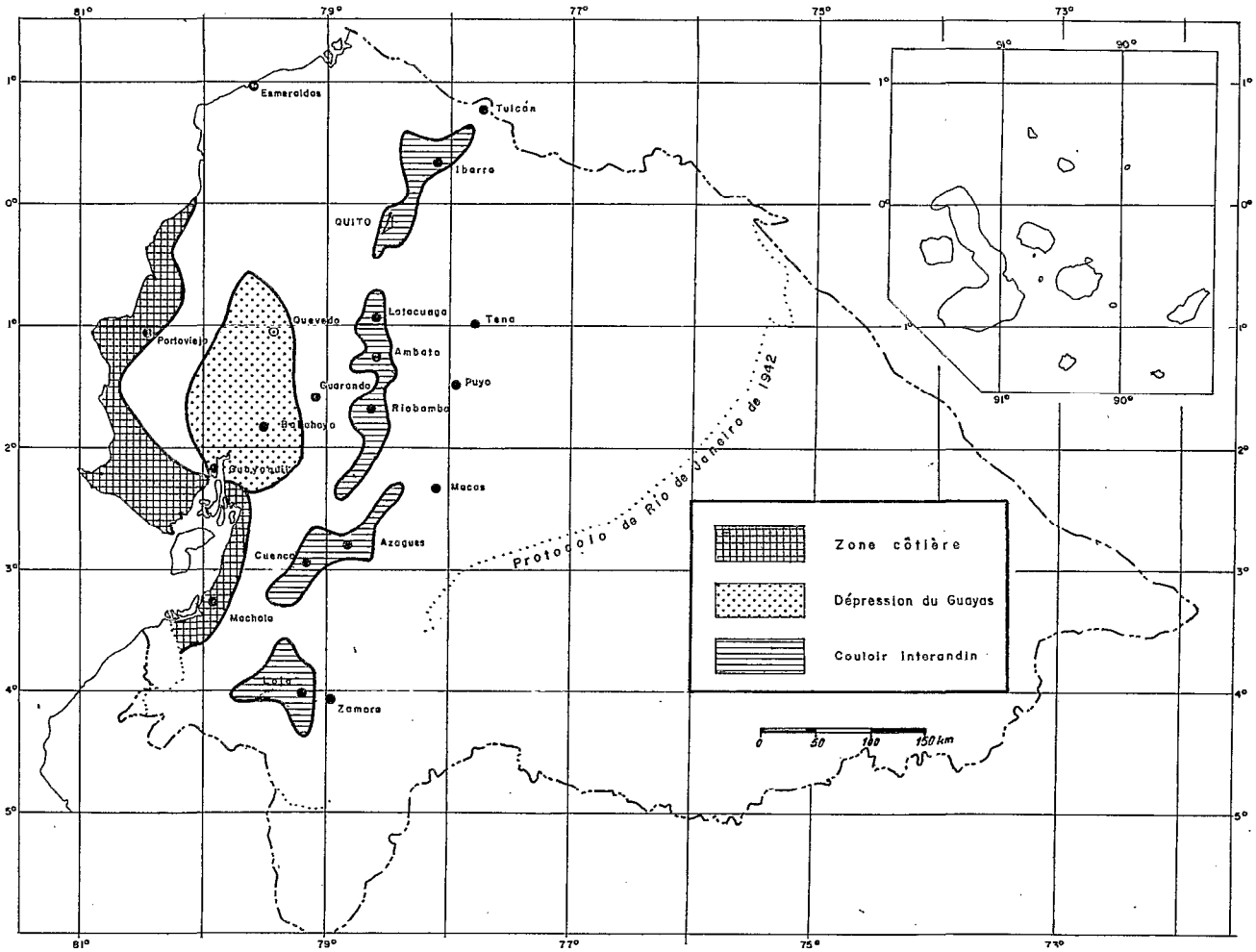


Fig. 2. — Carte des grandes zones d'irrigation en Équateur

(de l'ordre de 25 °C) créent des périodes fortement déficitaires que les faibles ressources en eau actuellement exploitées ne permettent pas de compenser. Aussi, l'irrigation y est-elle sporadique et, sauf exception, organisée par des instituts spécialisés : projet Poza Honda par le CRM (Centro de Reconversion del Manabi), projets Arenillas et Naranjal - Rio Siete par l'INERHI (Instituto Ecuatoriano de Recursos Hidraulicos), etc.

3.2. La dépression du Guayas

Cette zone correspond à une région déprimée, limitée à l'est par la Cordillère occidentale et à l'ouest par les monts de Chongon-Colonche et les reliefs de Balzar. La pluviométrie annuelle y est supérieure à 1 000 mm répartis de décembre à avril. Alors que la partie nord et nord-ouest, où les pluies dépassent 1 500 mm/an, donne lieu à d'intenses et riches cultures pluviales (café, cacao, banane...), la moitié sud est plus sèche et se consacre soit à l'élevage extensif (zone ouest), soit à la culture irriguée, principalement le riz dans les zones dépressionnaires. Les réseaux d'irrigation y sont généralement bien définis quoique, périodiquement, d'immenses zones soient inondées à partir des crues parfois catastrophiques en provenance des flancs de la Cordillère occidentale.

3.3. Le couloir interandin

Située entre les Cordillères orientale et occidentale, la zone interandine est le siège de divers micro-climats secs. Exceptions faites de la vallée du Chota au nord et de la plaine du Catamayo au sud, qui sont alimentées en eau au moyen d'aménagements hydrauliques modernes, les zones de Guayllabamba, Latacunga-Ambato, Riobamba-Alausi, Cañar et Sta Isabel, sont irriguées à partir de systèmes extrêmement complexes où se mêlent des réseaux d'« acequias » séculaires (quelques-unes datent des Incas) et des canaux récents autorisés par l'INERHI (« concesiones »). Ces dernières ont souvent été accordées aux propriétaires du « Latifundio » (grandes « haciendas », le plus souvent à vocation d'élevage bovin), et les prises d'eau peuvent être éloignées de plusieurs dizaines de kilomètres, quelquefois originaires d'un autre bassin hydrographique.

C'est ainsi que des canaux dont les débits dépassent parfois 1 000 l/s traversent, sur de grandes distances, une multitude de petites parcelles de quelques ares (« minifundio ») que les propriétaires arrosent imparfaitement à partir d'autres sources. L'étude de l'irrigation du minifundio se révèle difficile, non seulement par la complexité d'un réseau extrêmement dense et souvent souterrain (la « cangahua », constituée de poussières volcaniques consolidées et imperméables, se prête facilement au creusement manuel de tunnels) mais aussi par la diversité des systèmes traditionnels de répartition de l'eau (« Juntas de aguas »). Les débits y sont comptés par « óvalos » (débit fourni par un tube de 15 cm de diamètre... quelle que soit la charge !) et chaque propriétaire, suivant la superficie de ses champs ou suivant sa contribution financière, peut irriguer un certain nombre d'heures fixes suivant une fréquence qui peut être journalière, hebdomadaire, tous les dix jours, bimensuelle, etc.

4. OU IRRIGUER ?

Comme nous l'avons déjà laissé entendre au chapitre 2, la délimitation des zones à irriguer se fera à partir des conditions physiques et climatiques locales, sans tenir compte des réalités économiques et sociales qui pourraient d'ailleurs être prises en compte ultérieurement (orientation vers un certain type de production agricole, choix de la localisation des projets d'aménagement, par exemple).

4.1. Le facteur climatique

Il est bien évident que le premier travail consiste à définir les zones qui, du point de vue climatique, ont besoin d'être irriguées, les régions bénéficiant d'un apport pluvial suffisant n'offrant qu'un intérêt mineur. En confrontant les pluviométries et les E.T.P. mensuelles, méthodologie exposée dans un article et un rapport précédents (1 et 2), il est possible de tracer une carte des isolignes d'égal déficit hydrique annuel D, et celles-ci, grâce au choix de valeurs limites supérieures et inférieures adéquates, permettent à leur tour de délimiter des zones que l'on classe suivant leurs besoins en irrigation. Bien que le nombre théorique des classes soit illimité, puisque dépendant étroitement des conditions climatiques naturelles, on a pu, dans le cas de l'Equateur, en définir cinq principales (fig. 3) :

Classe 1 : Zone où l'irrigation est *indispensable* quel que soit le type de culture (zones arides).
$D > 1\,000$ mm dans la zone côtière, par exemple.

Classe 2 : Zone où une forte dose d'irrigation est *nécessaire* pour l'obtention de rendements normaux.
$700 \text{ mm} < D < 1\,000$ mm, dans la zone côtière.

Classe 3 : Zone où une irrigation *complémentaire* permet d'améliorer nettement les rendements, ou de faire une récolte supplémentaire.
$500 \text{ mm} < D < 700$ mm, dans la zone côtière.

Classe 4 : Zones où l'irrigation est *facultative*, seulement utile au cours des années fortement déficitaires.
$250 \text{ mm} < D < 500$ mm, dans la zone côtière.

Classe 5 : Zones où l'irrigation est *inutile* car bénéficiant d'une pluviométrie suffisante et bien répartie.
$D < 250$ mm dans la zone côtière.

Ce sont les surfaces comprises entre les frontières climatiques délimitées par les classes 1 et 2 et accessoirement 3, qui feront l'objet des études exposées ci-après.

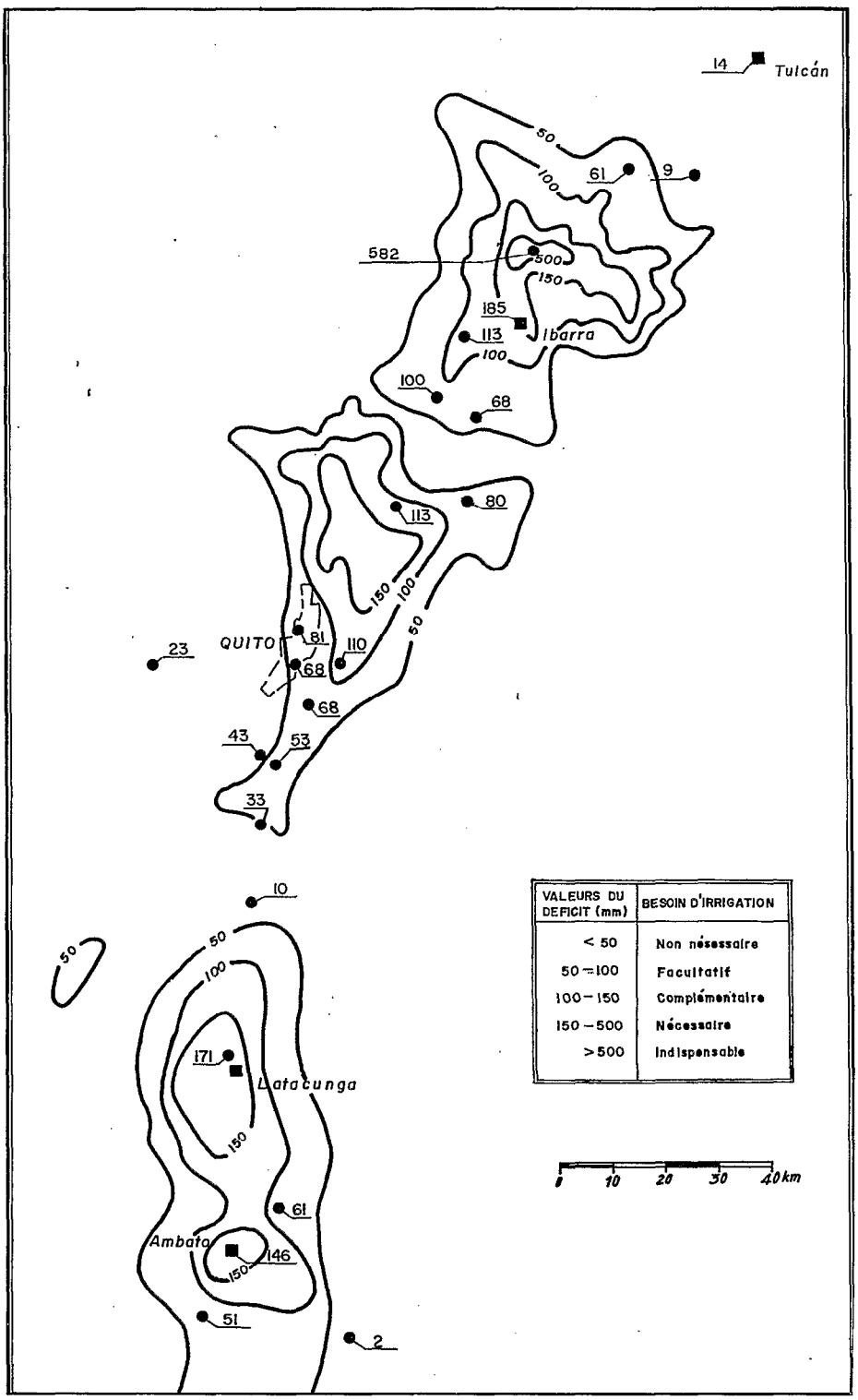


Fig. 3. — Carte des zones d'égal besoin d'irrigation

4.2. Les facteurs physiques

Ces facteurs interviennent pour la délimitation des zones les plus aptes à une mise en valeur agricole. Pour la commodité, nous appellerons ces dernières « zones irrigables ». Plusieurs types de paramètres auraient pu être pris en compte mais nous avons jugé que les plus importants étaient les suivants :

— La qualité agronomique des sols, élément fourni par les pédologues ;

— La valeur des pentes et, accessoirement, l'altitude relative des zones par rapport aux sources possibles d'alimentation, données fournies par les géomorphologues.

Le principe général de cette étude a déjà fait l'objet de publications antérieures (1 et 2), mais devra souvent être modifié en fonction des conditions locales existantes, la plus importante étant sans aucun doute l'utilisation actuelle des sols et des eaux. En ce qui concerne l'Equateur, par exemple, il faudra tenir compte des considérations exposées au chapitre 3 ; c'est ainsi que la méthodologie peut être appliquée sans modifications aux régions sèches et non encore irriguées de la côte, mais qu'un certain nombre de paramètres supplémentaires interviendra dans le couloir interandin et, à un degré moindre, dans la dépression du Guayas et certaines zones de la Côte où il existe déjà un système d'irrigation.

4.2.1. *Délimitation des zones irrigables dans la zone côtière : Méthodologie générale*

Nous décrivons successivement le rôle des facteurs physiques que nous avons pris en considération, puis le procédé pratique aboutissant à la détermination des zones irrigables.

4.2.1.1 Importance et rôle des facteurs physiques

Le sol, support nutritif des futures cultures, a une importance prédominante. Les études pédologiques permettent de connaître :

— La qualité agronomique de la couverture superficielle et sa vocation agricole.

— L'existence de facteurs limitants pour la mise en valeur, et principalement :
  — le manque de profondeur du sol ;
  — un pH prohibitif, trop acide ou trop alcalin ;
  — la présence de sels (Cl Na et SO_4 Ca principalement)

— L'existence de roches dans les horizons superficiels (obstacle à la mécanisation).

— Une texture trop argileuse.

— Une texture trop sableuse (pertes lors des irrigations).

Il est ainsi possible d'établir un classement préliminaire : sols de bonne, moyenne, médiocre et mauvaise qualité.

Les pentes, dont la carte est fournie par les géomorphologues, sont en elles-mêmes un facteur limitant de la mise en valeur agricole quand elles sont trop fortes, car elles conditionnent :

— La mise en place d'un système de mécanisation agricole moderne.

— L'installation d'un réseau d'irrigation ordonné.

— L'érosion des versants et la dégradation des couches arables.

4.2.1.2. Délimitation des zones irrigables suivant les facteurs sols-pentes.

La superposition des cartes de sols et de pentes permet la délimitation de zones ayant différentes potentialités agricoles, ce qui permet l'établissement d'une échelle de priorités pour leur mise en valeur rationnelle (fig. 4).

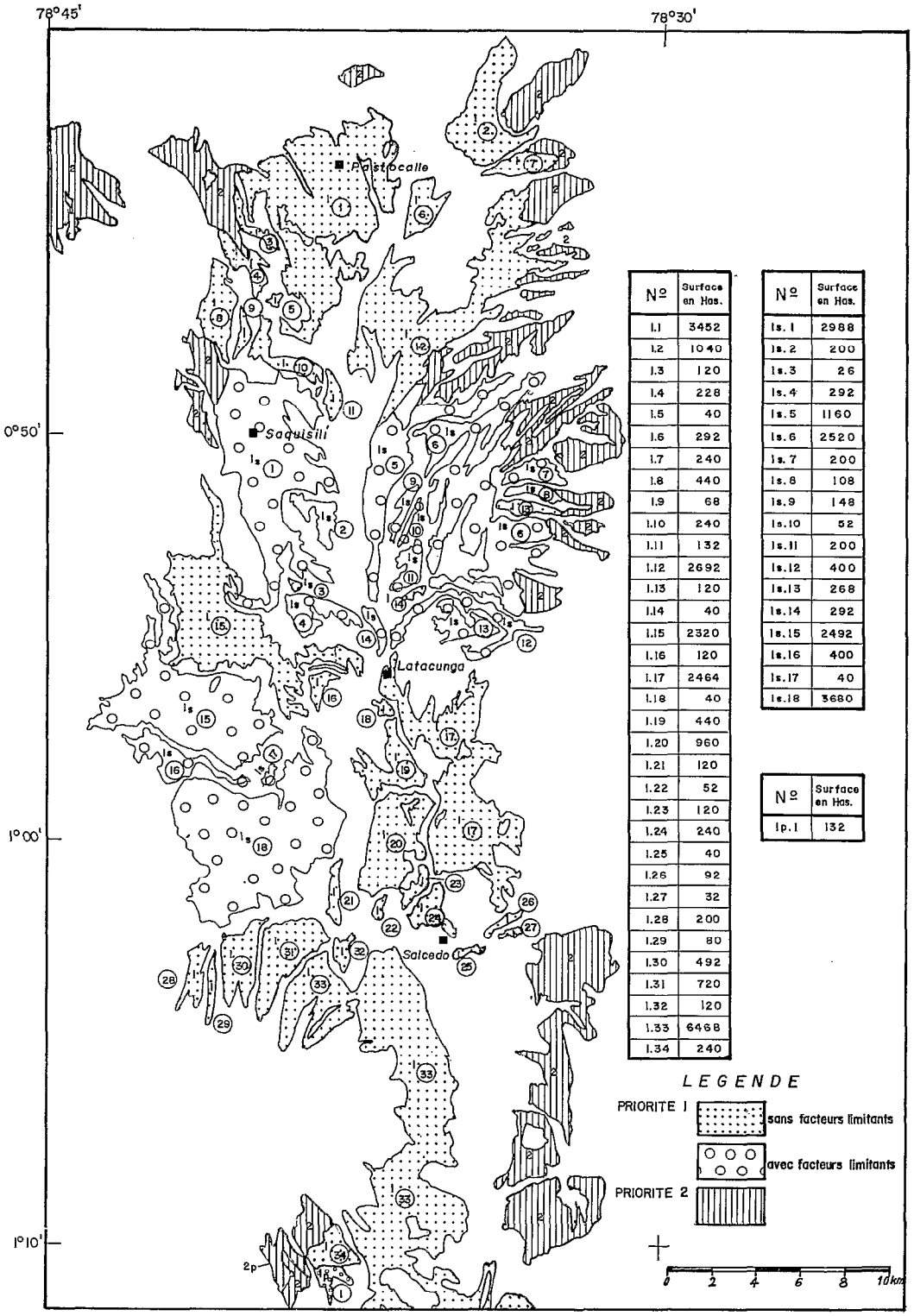
Classe 1 : Bons sols et pentes faibles, inférieures à 12%.

Classe 2 : Sols de qualité moyenne et pentes faibles.

Classe 3 : Sols médiocres mais pentes faibles, à n'exploiter que dans le cas d'un excès d'eau.

De plus, un certain nombre de sous-classes est défini en ajoutant des indices caractérisant les possibles facteurs limitants :

« p »	quand la pente est moyenne, de 12 à 25%,
« pp »	quand la pente est forte, de 25 à 40%,
« r »	quand le sol est rocailleux en surface,
« s »	quand la texture est sableuse,



Nº	Surface en Has.
1.1	3452
1.2	1040
1.3	120
1.4	228
1.5	40
1.6	292
1.7	240
1.8	440
1.9	68
1.10	240
1.11	132
1.12	2692
1.13	120
1.14	40
1.15	2320
1.16	120
1.17	2464
1.18	40
1.19	440
1.20	960
1.21	120
1.22	52
1.23	120
1.24	240
1.25	40
1.26	92
1.27	32
1.28	200
1.29	80
1.30	492
1.31	720
1.32	120
1.33	6468
1.34	240

Nº	Surface en Has.
1s.1	2988
1s.2	200
1s.3	26
1s.4	292
1s.5	1160
1s.6	2520
1s.7	200
1s.8	108
1s.9	148
1s.10	52
1s.11	200
1s.12	400
1s.13	268
1s.14	292
1s.15	2492
1s.16	400
1s.17	40
1s.18	3680

Nº	Surface en Has.
1p.1	132

Fig. 4. — Carte des zones où l'irrigation est prioritaire

« a » quand la texture est argileuse,
« S » quand les sols sont salins,
« e » quand les sols manquent de profondeur,
« F » ou « f » quand le pH est trop acide ou trop alcalin,
« d » quand la zone est dépressionnaire (risque d'inondation).

C'est ainsi qu'une zone de caractéristiques « 1 pr » possédera des sols de bonne qualité, quoique de mécanisation difficile par le fait d'une pente un peu forte et par la présence de roches dans les horizons superficiels.

4.2.2. *Application de la méthodologie aux zones en partie irriguées. Cas de la dépression du Guayas et du couloir interandin*

4.2.2.1. Délimitation de sous-zones bénéficiant d'une irrigation actuelle et estimation quantitative des superficies réelles irriguées

Ce travail, basé sur l'étude des photographies aériennes existantes, jointe à de nombreuses vérifications de terrain, nous a été fourni, en Equateur, par les départements de géomorphologie et de pédologie dans les régions de la Côte et du Guyas, et par le département de géographie dans le couloir interandin (études faites dans le cadre du Programme National de Régionalisation, PRONAREG).

Dans le premier cas, il s'agit de zones mises récemment en irrigation par le truchement de projets modernes régionaux ou nationaux. On peut, en première approximation, juger que la demande en eau de ces secteurs est entièrement couverte par les apports, et donc éliminer purement et simplement ces zones dont les besoins sont déjà satisfaits.

Le problème est beaucoup plus délicat quand il s'agit d'une irrigation traditionnelle comme c'est le cas dans le couloir inter-andin, où, de surcroît, se superposent parfois des aménagements modernes (conf. chap. 3). Le réseau de canaux d'irrigation, ainsi que le système de distribution, sont d'une telle complexité et d'une telle hétérogénéité, qu'il est hors de question, dans des limites de temps raisonnables, de quantifier exactement et en tout lieu l'irrigation actuelle. En nous basant sur les travaux des géographes, dont les cartes d'utilisation actuelle du sol prennent en compte un facteur « irrigation » en délimitant les zones agricoles qui bénéficient d'une superficie irriguée supérieure à 50% (fig. 5) et celles où elle est inférieure à 50%, nous avons jugé que, dans le cadre d'une planification à l'échelle nationale, nous pouvions, sans risque d'erreurs trop grossières, estimer que :

— dans les zones bénéficiant de plus de 50% d'irrigation, en moyenne 75% des surfaces étaient irriguées, c'est-à-dire que l'on pouvait considérer que 25% de la superficie totale restaient à irriguer ;
— dans les zones irriguées à moins de 50%, seulement 25% de la surface l'étaient, et que 75% de la superficie restaient à irriguer.

Nous verrons plus loin au chapitre 5, que le facteur superficie est insuffisant pour juger de la demande et qu'un facteur supplémentaire devra être pris en compte : celui de la confrontation irrigation actuelle — besoins réels pour une mise en valeur optimale.

4.2.2.2. Délimitation des zones irrigables suivant les facteurs sols-pentes

En fonction de ce qui vient d'être exposé, la délimitation des zones irrigables suivant les facteurs sols-pentes, dans les régions partiellement sous irrigation, sera réalisée en plusieurs étapes :

a) utilisation de la méthodologie classique (§ 4.2.1.) ;
b) recherche des sous-zones déjà irriguées et parmi celles-ci :
— élimination de celles influencées par les projets d'irrigation moderne,
— prise en compte de 25 et 75% de la superficie de celles étant respectivement irriguées à plus ou moins de 50%.

4.3. Détermination des zones irrigables en fonction des facteurs physico-climatiques

La simple superposition des cartes réalisées en 4.1 et 4.2 permet de définir, sur la base des réalités climatiques et physiques, un ordre de priorité des zones aptes à l'établissement de projets de mise en valeur agricole, toutes les priorités intermédiaires étant permises entre les deux extrêmes :

Première priorité : classe climatique 1, classe physique 1.

Dernière priorité : classe climatique 4, classe physique 3 avec n facteurs limitants.

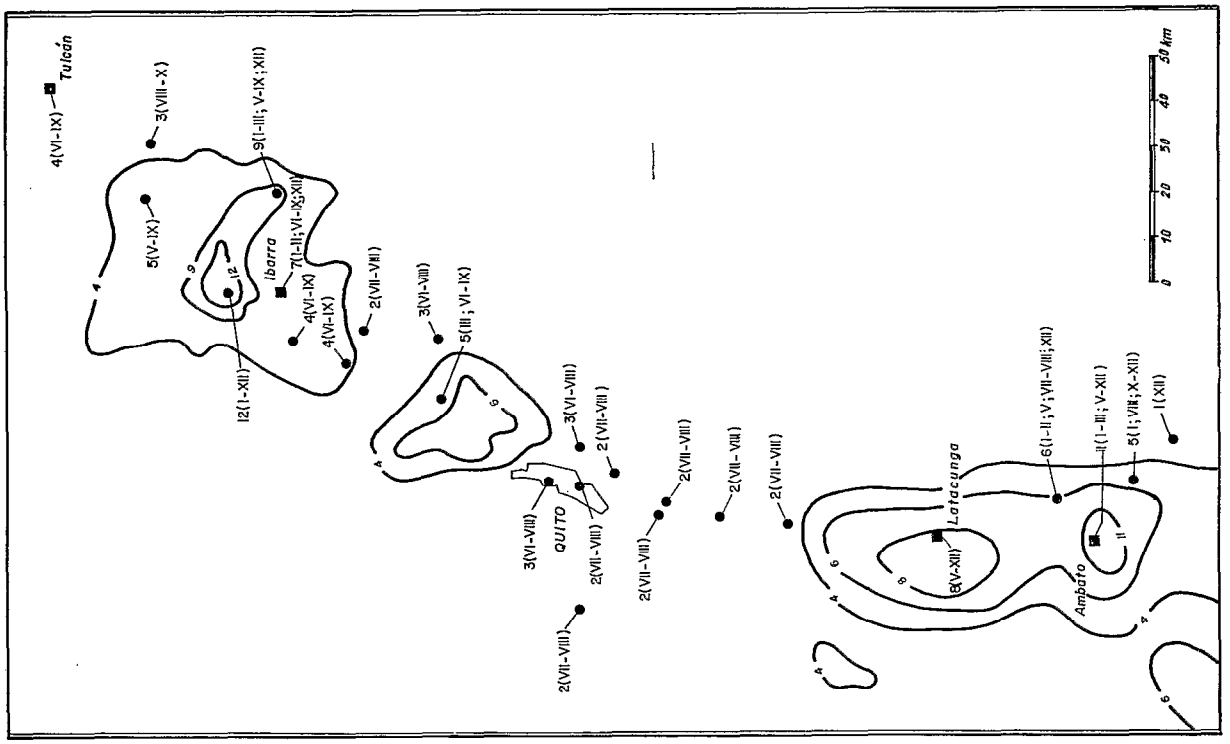


Fig. 6. — Carte du nombre de mois secs

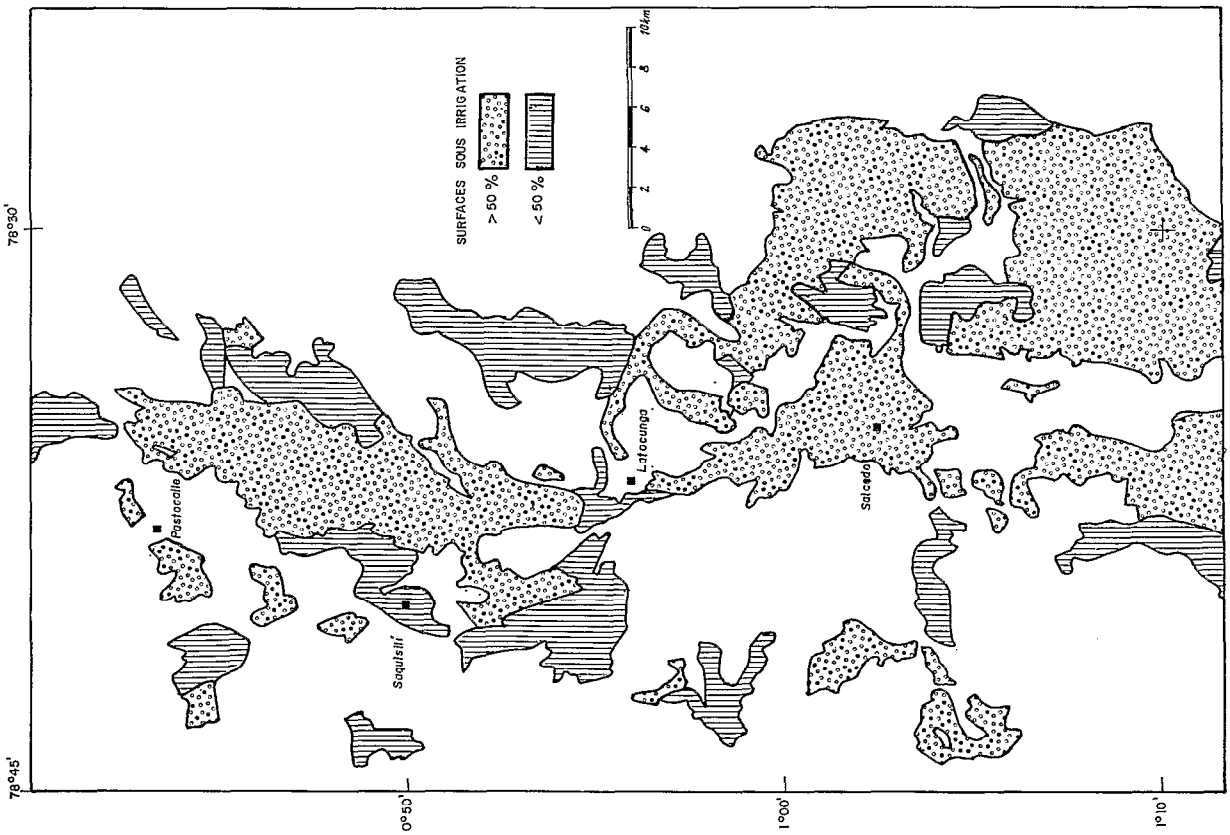


Fig. 5. — Carte d'irrigation actuelle

5. QUAND ET COMBIEN IRRIGUER

Une fois délimitées les zones potentiellement aptes à une mise en valeur agricole mais situées dans les zones de grand déficit hydrique, il s'agit de déterminer les périodes où les apports sont nécessaires et de quantifier les besoins annuels en eau d'irrigation, afin de connaître la quantité d'eau requise dans le cas théoriquement optimal d'une mise en culture intégrale de ces zones.

Il faut noter qu'il n'est pas question de faire ici une étude agroclimatologique détaillée, qui est du ressort de chaque projet spécifique, et nous insistons à nouveau sur le fait que la finalité de cette étude est d'obtenir une estimation destinée à être traitée à l'échelle de la planification nationale. De ce fait il a fallu recourir à certaines simplifications et utiliser certains « raccourcis » méthodologiques qui, à juste titre, sont très criticables à une échelle plus détaillée.

Les deux facteurs principaux qui conditionnent les doses d'irrigation à apporter, sont la durée de la saison sèche et la consommation des cultures. C'est ainsi que l'évaluation des quantités d'eau et des moments propices pour irriguer, sans tenir compte de la technique d'irrigation employée, doit se faire à partir :

— de la connaissance des périodes agronomiquement sèches (ressources hydriques du sol inférieures à la consommation des plantes) et de leur répartition au cours de l'année ;

— des options agricoles choisies : cultures à cycle végétatif plus ou moins long et nombre de récoltes annuelles ;

— de l'évaluation de l'usage actuel de l'eau dans les zones partiellement irriguées.

Pour des intervalles de temps « t » donnés, la comparaison entre les totaux pluviométriques moyens P et l'évapotranspiration potentielle correspondante ETP (rappelons que, sous un climat donné, c'est l'évapotranspiration maximale, somme de l'évaporation physique du sol et de la transpiration physiologique des plantes de couverture, produite par une surface suffisamment alimentée en eau) permet de séparer des périodes hydriquement excédentaires ($P > ETP$) et déficitaires ($ETP > P$). En première approximation, on pourrait penser que les périodes au cours desquelles l'irrigation est nécessaire, correspondent à celles qui sont hydriquement déficitaires et que les doses d'irrigation équivalent au déficit défini par $D = ETP-P$. En réalité cette approximation n'est pas satisfaisante, d'une part, parce que D représente le déficit hydrique climatique maximal et non le besoin réel en eau de la culture envisagée, d'autre part, parce que le sol peut avoir auparavant capitalisé certaines réserves mobilisables ultérieurement, et enfin parcequ'il existe des pertes dues au système d'irrigation. Par ailleurs, il faut faire la distinction entre les besoins des zones vierges (apport total) et ceux des zones sous irrigation actuelle insuffisante (apport complémentaire).

Nous allons traiter successivement :

— des périodes au cours desquelles l'irrigation est nécessaire,

— de la demande globale des zones non irriguées,

— de la demande complémentaire des zones imparfaitement irriguées.

5.1. Périodes au cours desquelles l'irrigation est nécessaire

De façon schématique, on peut dire que les plantes trouvent la quantité d'eau suffisante à leur croissance quand leurs racines explorent un sol dont l'humidité est comprise entre le point de flétrissement et la capacité de rétention. Pour une période donnée, quand la pluviométrie est supérieure à la consommation des plantes de couverture et à l'évaporation directe (évapotranspiration réelle ETR), le sol met en réserve l'excédent (en supposant un ruissellement nul), la limite supérieure étant atteinte à la capacité de rétention, au-delà de laquelle il y a percolation. Quand la pluviométrie est inférieure à l'évapotranspiration réelle, les plantes utilisent le capital hydrique stocké dans le sol, la limite inférieure étant le point de flétrissement, point en deçà duquel l'eau est difficilement mobilisable. La quantité d'eau mise en réserve entre le point de flétrissement et la capacité de rétention, appelée réserve facilement utilisable ou RFU, dépend directement des caractéristiques du sol et de la profondeur d'investigation du système radiculaire de la plante de couverture.

Ce bref rappel démontre qu'une période peut être climatiquement déficitaire sans être agronomiquement sèche puisque les réserves du sol continuent à alimenter les cultures. Plusieurs options peuvent être envisagées, suivant que l'on tienne compte ou non de la variété des cultures, du type et de la profondeur de l'enracinement, des caractéristiques des sols, etc., mais considérant l'échelle de travail, les simplifications suivantes ont été adoptées :

— intervalle de base ou pas de temps t : 1 mois ;

— RFU : 50 mm libérables en 1 mois, quel que soit le type de sol;

— mois agronomiquement sec ou « mois sec » pour la facilité, au cours duquel l'irrigation est nécessaire, quel que soit le type de culture envisagé, lorsque :

P + 50 mm ⩽ ETP, si le mois antérieur est excédentaire, et
P < ETP, si le mois antérieur est déficitaire.

En faisant cette hypothèse on a cherché un moyen terme susceptible d'être représentatif dans la majorité des cas, une certaine compensation résultant de l'utilisation des valeurs de l'ETP (supérieure à l'ETR) et de la RFU (inférieure à l'ETR puisque correspondant seulement à 0,2 l/s/hectare).

La confrontation des totaux pluviométriques et des évapotranspirations potentielles mensuelles, ces dernières calculées suivant la formule la plus adaptée au climat local, permet donc d'évaluer le nombre de mois secs au cours desquels il faut irriguer. Si le nombre de stations climatologiques est suffisant, il est alors possible de réaliser une carte des isolignes du nombre des mois secs N et d'indiquer, pour chaque station, les périodes d'occurrence (fig. 6).

5.2. Demande globale des zones non irriguées

Le calcul exact de l'apport annuel en eau d'irrigation, applicable aux « zones irrigables » et au cours des « mois secs », lesquels sont déterminés dans tout ce qui précède, fait appel à un facteur principal : la connaissance des besoins moyens en eau des cultures pour accomplir la totalité de leur cycle végétatif, à laquelle vient s'ajouter le nombre de récoltes annuelles prévues pour des cultures à cycle court, les pertes par infiltration dans les canaux et celles par percolation profonde et évaporation lors de l'épandage.

Au stade de la planification, il est impossible d'envisager toutes les alternatives découlant des besoins en eau des divers types de cultures pouvant être installées dans une zone donnée, et pour évaluer les nécessités en eau d'irrigation il faut trouver une valeur moyenne applicable tout au long de la période sèche, quelle que soit la plante cultivée. Après de multiples spéculations (3, 4, 5 et 6), nous avons basé nos évaluations, principalement destinées aux zones sèches de l'Equateur (classes climatiques 1 et 2, voir chap. 4), sur l'hypothèse, le calcul et les données de terrain suivants :

Hypothèse : A une même période du cycle végétatif, exprimée en pourcentage de la durée de ce dernier, la consommation en eau est identique (courbes affines pour différentes cultures). Elle est donc indépendante de la durée totale du cycle.

Calcul : Des évapotranspirations potentielles Thornthwaite et Turc, et comparaison avec nos résultats.

Données de terrain : Connaissance des doses d'irrigation effectivement appliquées par les cultivateurs, et de l'efficience des divers systèmes d'irrigation gravitaires (données INERHI et conclusions des études de terrain du § 4.3.).

En définitive, nous avons adopté les valeurs des consommations totales (transpiration physiologique et évaporation immédiate) consignées dans le tableau n° 1 et représentées graphiquement à la figure 7.

Tableau 1

VARIATION DES BESOINS JOURNALIERS

	(%) de la durée du cycle				(mm/jour)
	0	Semailles puis germination			3,1
	10	»	»		4,6
	20	»	»		5,9
	30	»	»		7,0
	40	»	»		8,0
Instant	50	»	»		8,5
	60	»	»	(± floraison)	8,8
	70	»	»	(± fructification)	8,8
	80	»	»		7,8
	90	»	»		6,05
	100	Flétrissement			0

Il faut ajouter à ces valeurs les pertes dues au système d'amenée de l'eau, pertes qui peuvent être estimées à 30% pour des réseaux primaires et secondaires revêtus, sur des sols pas exagérément sableux, cas envisageable dans le cadre d'ouvrages hydrauliques planifiés. On trouvera, au tableau 2 et à la figure 8, l'évaluation des besoins en eau d'irrigation, en mm/mois et en débit mensuel moyen par hectare, pour des cultures dont le cycle varie entre deux et neuf mois.

TABLEAU 2

ÉVALUATION DES BESOINS MENSUELS ET TOTAUX POUR DES CYCLES VÉGÉTATIFS DE DURÉE VARIABLE

Mois	*Cycle de 2 mois*			*Cycle de 3 mois*			*Cycle de 4 mois*			*Cycle de 5 mois*			*Cycle de 6 mois*			*Cycle de 9 mois*		
	besoins des cultures (en mm)	*besoins totaux* (en mm)	*dose d'irrigation* (l/s/ha)	*besoins des cultures*	*besoins totaux*	*dose d'irrigation*	*besoins des cultures*	*besoins totaux*	*dose d'irrigation*	*besoins des cultures*	*besoins totaux*	*dose d'irrigation*	*besoins des cultures*	*besoins totaux*	*dose d'irrigation*	*besoins des cultures*	*besoins totaux*	*dose d'irrigation*
1	198,8	258,4	0,98	163,4	212,4	0,80	165,6	215,3	0,81	150,3	195,4	0,74	132,5	172,3	0,65	117,5	152,8	0,58
2	215,3	279,9	1,06	261,6	340,1	1,28	215,3	279,9	1,06	217	282,1	1,07	198,8	258,4	0,89	167,9	218,3	0,82
3				196,2	255,1	0,88	265	344,5	1,30	233,8	303,9	1,15	231,9	301,4	1,14	218,2	283,7	1,07
4							182,2	236,8	0,89	267,2	347,4	1,31	265	344,5	1,30	235,1	305,6	1,16
5										166,9	217	0,82	265	344,5	1,30	251,8	327,3	1,24
6													149,1	193,8	0,73	268,6	349,2	1,32
7																251,8	327,3	1,24
8																235,1	305,6	1,16
9																117,5	152,8	0,58
Total en mm	414,1	538,3		621,2	807,6		828,1	1 076,5		1 035,2	1 345,8		1 242,3	1 614,9		1 863,5	2 422,6	
Volume nécessaire en $10^3 m^3$/ha		5,4			8,2			10,8			13,4			16,2			24	
Débit mensuel moyen en l/s/ha			1,02			0,99			1,02			1,02			1,00			1,02

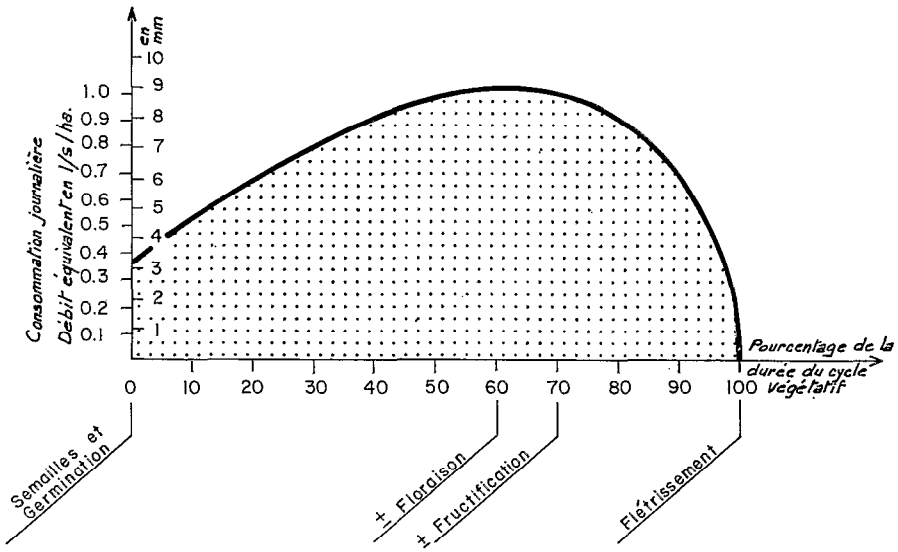


Fig. 7. — Évolution de la consommation en eau totale journalière
au cours d'un cycle végétatif complet
Régions semi-arides et sèches en Équateur

On constate que le débit continu moyen q_r applicable, quelle que soit la durée du cycle, est très voisin de 1 l/s/ha, *ce qui correspond à un apport mensuel moyen équivalent à 2 650 m³/ha.* C'est cette valeur qui devra être adoptée lors de la planification des besoins au cours des « mois secs », les valeurs extrêmes de 0,57 et 1,30 l/s/ha (respectivement 1 500 et 3 450 m³/mois/ha) ne devant être prises en considération qu'au stade de l'élaboration des projets particuliers de mise en valeur.

Si S est la superficie des zones irrigables encore dépourvues de tout système d'alimentation, le débit total continu q_t nécessaire à l'irrigation de ces zones est égal à :

$$q_t = S\, q_r \qquad \text{soit } q_t = S \text{ (S en ha, avec } q_r = 1 \text{ l/s/ha)}$$

et le volume v_t correspondant pendant N mois secs :

$$v_t = 2{,}628 \cdot 10^6\, N\, q_t{}^* \text{ soit } v_t = 2{,}628 \cdot 10^6\, NS, \text{ en l}$$

$$v_t = 2{,}628\, NS, \text{ en milliers de m}^3$$

Nota : Dans les zones déjà irriguées, sous différents climats et pour des systèmes d'irrigation plus ou moins efficients, la valeur de q_r pourra être mesurée directement (§ 5.3.4).

*Nota * :* Etant donné l'échelle de l'étude et par le fait que les mois secs sont généralement des mois de faibles précipitations (soumis à une très forte irrégularité interannuelle dans les zones sèches équatoriennes), on a volontairement fait abstraction de l'apport effectif des pluies au cours de ces périodes. Il serait cependant souhaitable d'en tenir compte dans les régions caractérisées par un régime pluviométrique régulier. v_p étant le volume des pluies, on aurait alors :

$$v_t = 2{,}628 \cdot 10^6\, Nq_t - v_p$$

5.3. Demande complémentaire des zones imparfaitement irriguées

Au paragraphe 4.2.2., nous avons vu comment nous étions arrivés à l'évaluation grossière des superficies nécessitant un arrosage d'appoint à l'intérieur des sous-zones géographiques bénéficiant actuellement d'une irrigation partielle. Mais il est bien certain que les parcelles déjà irriguées ne le sont pas toujours suffisamment, surtout dans les régions très cultivées ayant un potentiel hydrique déficient, comme c'est le cas des vallées sèches interandines. Il faut donc essayer d'estimer quels seraient les apports complémentaires permettant la mise en valeur intégrale de ces surfaces actuellement sous-exploitées, qui, lorsqu'elles sont situées dans des zones physiques adéquates (voir chap. 4), devraient avoir logiquement priorité sur les zones encore non cultivées.

TABLEAU 3

IRRIGATION DES CULTURES — PROVINCE DU COTOPAXI (ÉQUATEUR)

Superficie des parcelles (en ha)	0 — 1			1 — 5			5 — 20			20 — 100			+ de 100			*Total*		
	Superficie totale	*Superficie irriguée*	*% irrigué*	*Superficie totale*	*Superficie irriguée*	*% irrigué*	*Superficie totale*	*Superficie irriguée*	*% irrigué*	*Superficie totale*	*Superficie irriguée*	*% irrigué*	*Superficie totale*	*Superficie irriguée*	*% irrigué*	*Superficie totale*	*Superficie irriguée*	*% irrigué*
Produits :																		
Petits pois	31	—	0	51	—	0	—	—	0	—	—	0	—	—	0	81	—	0
Haricots	10	—	0	125	—	0	—	—	0	831	—	0	—	—	0	966	—	0
Fèves	158	—	0	2 142	135	6,3	644	—	0	—	—	0	—	—	0	2 944	135	4,6
Lentilles	21	—	0	914	—	0	104	—	0	—	—	0	—	—	0	1 040	—	0
Pommes de terre	427	31	7,2	2 889	509	17,6	1 329	228	17,1	416	416	100	—	—	0	5 061	1 148	23,4
Orge	613	—	0	5 974	883	14,8	3 553	405	11,4	2 286	—	0	831	831	100	13 257	2 119	16,0
Maïs	1 922	145	7,5	9 673	1 184	12,2	1 496	613	41,0	1 974	—	0	—	—	0	15 065	1 942	12,9
Blé	31	—	0	176	51	29,0	114	41	36,0	—	—	0	—	—	0	321	92	28,7
Fourrages	73	42	57,5	1 267	353	27,9	1 433	207	14,4	—	—	0	—	—	0	2 773	602	21,7
Maïs - haricots	769	62	8,1	1 101	124	11,3	1 528	655	42,9	—	—	0	—	—	0	3 398	841	24,7
Total	4 055	280	6,9	24 312	3 239	13,3	10 201	2 149	21,1	5 507	416	7,6	831	831	100	44 906	6 915	15,4

Comme nous l'avons laissé entendre au chapitre 3, il se révèle souvent impossible, dans un intervalle de temps raisonnable, de mener à bien l'inventaire exhaustif de l'usage actuel de l'eau. C'est précisément le cas de l'Equateur, et, afin de fixer les idées sur l'ampleur de cette entreprise, nous prendrons l'exemple de la province du Cotopaxi, qui peut être considérée comme représentative des conditions générales de l'usage de l'eau dans la zone andine. Le tableau 3 résume les résultats qui nous ont été fournis par les économistes à la suite d'une enquête de terrain réalisée en 1974-75. Sur les 44 906 ha représentant neuf cultures principales (sans tenir compte d'environ 4 000 ha de cultures diverses et 159 000 ha de prairies irriguées), 6 915 ha, soit 15,4% sont sous irrigation, dont 3 519 ha sont des parcelles de superficie inférieure à 5 ha, souvent très dispersées dans l'espace.

Il a donc fallu avoir recours à un artifice méthodologique, certainement discutable, mais inévitable dans le cas présent. Il consiste à sélectionner, à l'aide des études des géographes et grâce à de nombreuses reconnaissances de terrain, des zones-témoins de superficie réduite (de quelques dizaines à quelques centaines d'hectares) susceptibles d'être suffisamment représentatives pour pouvoir extrapoler les observations et résultats qui y sont obtenus à des régions beaucoup plus étendues, supposées avoir la même problématique agricole (dimensions des parcelles, pratiques agricoles et usage de l'eau, entre autres).

Dans chacune de ces zones-témoins, il faut alors réaliser une étude détaillée, principalement basée sur la distribution mensuelle de l'eau d'irrigation au cours de une ou deux années hydrologiques et sur une enquête de terrain, celle-ci permettant de connaître, entre autres, la dimension des parcelles irriguées, la rotation des cultures, l'avis des paysans sur la suffisance ou l'insuffisance de l'alimentation, etc. (voir fig. 9).

Les différentes actions à mener sont décrites ci-après :

5.3.1. *Délimitation des régions où se feront les extrapolations*

Elles sont délimitées à l'aide des opinions émises par divers spécialistes, principalement les géographes, les pédologues et les géomorphologues, et doivent être géographiquement homogènes en ce qui concerne l'usage actuel des sols et de l'eau.

5.3.2. *Choix de la zone-témoin*

Elle doit représenter toutes les caractéristiques requises pour l'extrapolation future des résultats :

- situation théorique de la ou des zones-témoins à l'intérieur des régions délimitées antérieurement, à l'aide de la carte de la figure 5 ;
- situation définitive des zones-témoins par des reconnaissances de terrain permettant :
  - de repérer une aire où l'irrigation est parfaitement définie, en particulier un réseau de canaux sans dérivations vers d'autres zones et sans apports annexes exceptionnels,
  - de confirmer l'existence de sous-zones correspondant à la classification de l'usage de l'eau donnée par les géographes (irriguées à + 50% et — 50% dans le cas de l'Equateur, voir fig. 5),
  - de s'assurer que les principales modalités locales de distribution des terres (petites parcelles du « minifundio » et grandes haciendas du « latifundio » dans la région du couloir interandin, par exemple) et d'utilisation du sol (types de cultures) y sont représentées.

5.3.3. *Etudes à réaliser dans la zone-témoin*

- Recherche des sources d'alimentation en eau.
- Cartographie des canaux d'amenée principaux et de la zone cultivée correspondante.
- Jaugeages périodiques, mensuels en Equateur, à l'entrée et à la sortie de la zone-témoin. On considère que ces mesures sont représentatives de la période, ce qui est une approximation pouvant prêter flanc à la critique, à un niveau autre que celui de la planification.
- Cartographie des réseaux secondaire, tertiaire et terminal, et des limites exactes des parcelles cultivées correspondant à chacun des canaux.
- Sélection de parcelles représentatives des diverses utilisations du sol (différentes cultures et pâturages), de l'occupation de la terre (dimension de la superficie irriguée) et de leur situation dans les sous-zones géographiques de classification de l'usage de l'eau.
- Jaugeages périodiques des canaux d'alimentation de ces parcelles.
- Enquête sur la périodicité et le temps de distribution de l'eau pour chacune des parcelles.
- Suivi mensuel du type de culture et appréciation de son état végétatif apparent.
- Enquête auprès des paysans sur le nombre de mois au cours desquels l'irrigation est nécessaire et sur son efficience actuelle (« indice de satisfaction » et appréciation personnelle des débits supplémentaires requis).

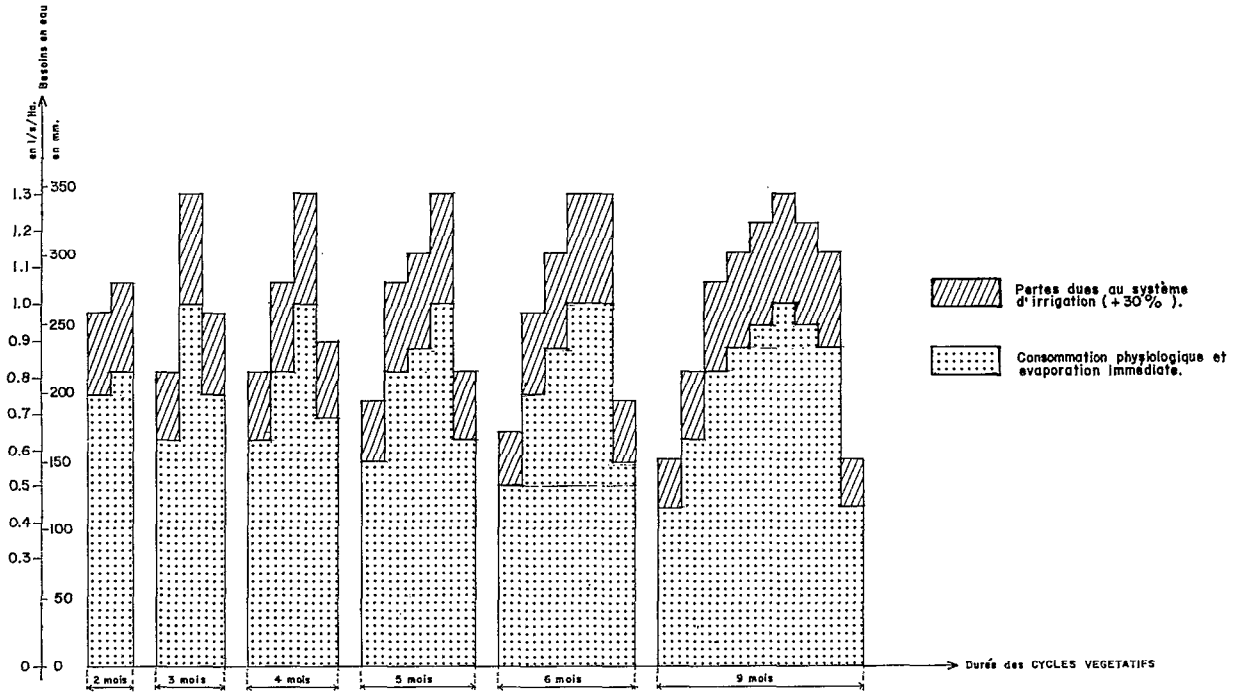


Fig. 8. — Évaluation des besoins en eau pour l'accomplissement de différents cycles végétatifs

1.- NOM DU CANAL.....

2.- ZONE.....

3.- FEUILLES TOPOGRAPHIQUES.....

4.- SOLS: 4.1. TEXTURE.....

4.2. CLASSIFICATION.....

5.- PENTE (MOYENNE ET EXTREMES).....

6.- NAISSANCE	7.- DEBOUCHE	8.- COORDONNEES DE LA STATION DE JAUGEAGES	9.- SURFACE IRRIGUEE			10.- CULTURES			
			9.1 OBSERVEE ET PLANIMETREE	9.2 INFORMATION INDIRECTE	9.3 ENQUETE	10.1 PERMANENTES	%	10.2 SAISONNIERES	%

11.- DEBIT (l/s)	12.- DATE	13.- OBSERVATIONS
		- " indice de satisfaction " au sujet de l' alimentation en eau. - période au cours de laquelle l'irrigation est nécessaire. - rotation annuelle des cultures.

Fig. 9. — Formulaire d'enquête. Zones témoins en Équateur

5.3.4. *Résultats acquis*

5.3.4.1. Estimation des besoins en eau des cultures

Cette estimation se fait dans plusieurs parcelles que l'on peut considérer comme suffisamment irriguées (bon indice de satisfaction du paysan, rendement à l'hectare élevé). Elle est basée sur le débit moyen q_r (estimé au § 5.2.) consommé réellement sur les différentes parcelles pendant la période d'irrigation, sachant que, si N est le nombre de mois d'irrigation et q_i le débit consommé chaque mois (différence entre les débits d'entrée et de sortie estimés par un jaugeage mensuel) pendant N mois secs :

$$q_r = \frac{\Sigma q_i}{N}$$

Dans le cas de la zone-témoin de Saquisili, province du Cotopaxi, que nous avons choisie comme exemple, 3 parcelles peuvent être considérées comme suffisamment irriguées (fig. 10).

Le calcul de q_r est donné au tableau 4 ci-après, sachant que l'irrigation y est permanente (sauf pendant les travaux de réfection des canaux).

TABLEAU 4

CALCUL DES BESOINS RÉELS

Zone	*Cultures* (en ha)	*Superficie totale* (en ha)	*Moyenne des débits mensuels* (en l/s) (*)	*Débit unitaire* (en l/s / ha)
1	233 de prairie 156 d'orge	389	461	1,15
2	0,5 de maïs 0,5 de luzerne	1	1	1
3	luzerne	3	3	1
				qr = 1,05 (moyenne non pondérée)

(*) Résultats provisoires, sujets à modifications.

Dans des conditions optimales q_r peut être calculé pour chaque type particulier de cultures (zone 3).

L'irrigation de cette zone-témoin étant nécessaire sept mois par an en moyenne, le débit moyen réparti sur l'année peut être ramené à 0,61 l/s/ha.

5.3.4.2. Estimation de la demande complémentaire

Cette estimation se fera indifféremment sur toutes les parcelles des sous-zones, quel que soit leur pourcentage en surfaces irriguées.

Soit, pour chacune des parcelles :

q_m la moyenne des débits mensuels d'alimentation mesurés (jaugeages) ou estimés (dans le couloir interandin : mesures traditionnelles à peu près constantes telles que « ovalos » ou « molinos »), en l/s ;

n le nombre annuel d'heures d'irrigation effective (enquête auprès de la coopérative chargée de la distribution, généralement « Junta de Aguas » en Equateur) ;

n_1 le nombre d'heures correspondant à la période au cours de laquelle l'irrigation est nécessaire (8 760 si elle est nécessaire toute l'année) ;

A' la superficie de la parcelle en hectares.

On peut écrire que le débit continu fictif q_f fourni au cours de la période sèche, en l/s/ha, est égal à :

$$q_f = \frac{q_m}{A'} \cdot \frac{n}{n_1}$$

Un exemple de calcul de q_f est donné au tableau 5, ci-après, pour la zone représentée à la figure 10.

TABLEAU 5

ESTIMATION DE L'APPORT CONTINU FICTIF q_f DES ZONES INSUFFISAMMENT IRRIGUÉES
PÉRIODE D'IRRIGATION : 7 MOIS

Zone	*Cultures* (en ha)	*Superficie totale* (en ha)	*Débits moyens d'alimentation*(*) (l/s)	*Nombre d'heures d'irrigation nécessaires*	*Nombre d'heures irriguées*	*q_f unitaires* (en l/s/ha)
4	82 de prairie 5 de luzerne 4 d'orge	91	52	5 136	permanent	0,57
5	4 de maïs 4 de luzerne	8	6	5 136	permanent	0,57
6	36 de luzerne 18 de céréales diverses 18 de prairie	72	110	5 136	2 568	0,76
7	104 de luzerne 63 de céréales diverses 63 de maïs	230	125	5 136	permanent	0,54
	Total	401	293	20 544	17 976	q_f moyen pondéré = 0,64

(*) Résultats provisoires, sujets à modifications.

Le débit complémentaire nécessaire q_c est égal à :

$$q_c = q_r - q_f$$

Dans l'exemple choisi $q_c = 1{,}05 - 0{,}64 = 0{,}41$ l/s/ha, pendant 7 mois d'irrigation nécessaires, valeur qui peut être ramenée à 0,24 l/s/ha répartis sur toute l'année.

5.3.5. *Extrapolation des résultats*

La figure 11 représente la région à laquelle les données de Saquisili peuvent être extrapolées. Elle s'étale dans toute la zone déprimée comprise approximativement entre Pastocalle, au nord, et Salcedo, au sud.

Selon les recommandations du § 4.2.2., on peut conclure que :

— *dans les sous-zones bénéficiant de + de 50% d'irrigation, de superficie totale égale à 26 116 ha :*

A_1 = 25% de la superficie de cette sous-zone et nécessite une irrigation complète. Dans l'exemple choisi, A_1 = 6 529 ha ;

A'_1 = 75% de la superficie de cette sous-zone et nécessite une irrigation complémentaire. Ici A'_1 = 19 587 ha ;

— *dans les sous-zones bénéficiant de moins de 50% d'irrigation, de superficie totale égale à 11 714 ha :*

A_2 = 75% de la superficie et nécessite une irrigation complète ;

A_2 = 8 805 ha ;

A'_2 = 25% de la superficie et nécessite une irrigation complémentaire ;

A'_2 = 2 935 ha.

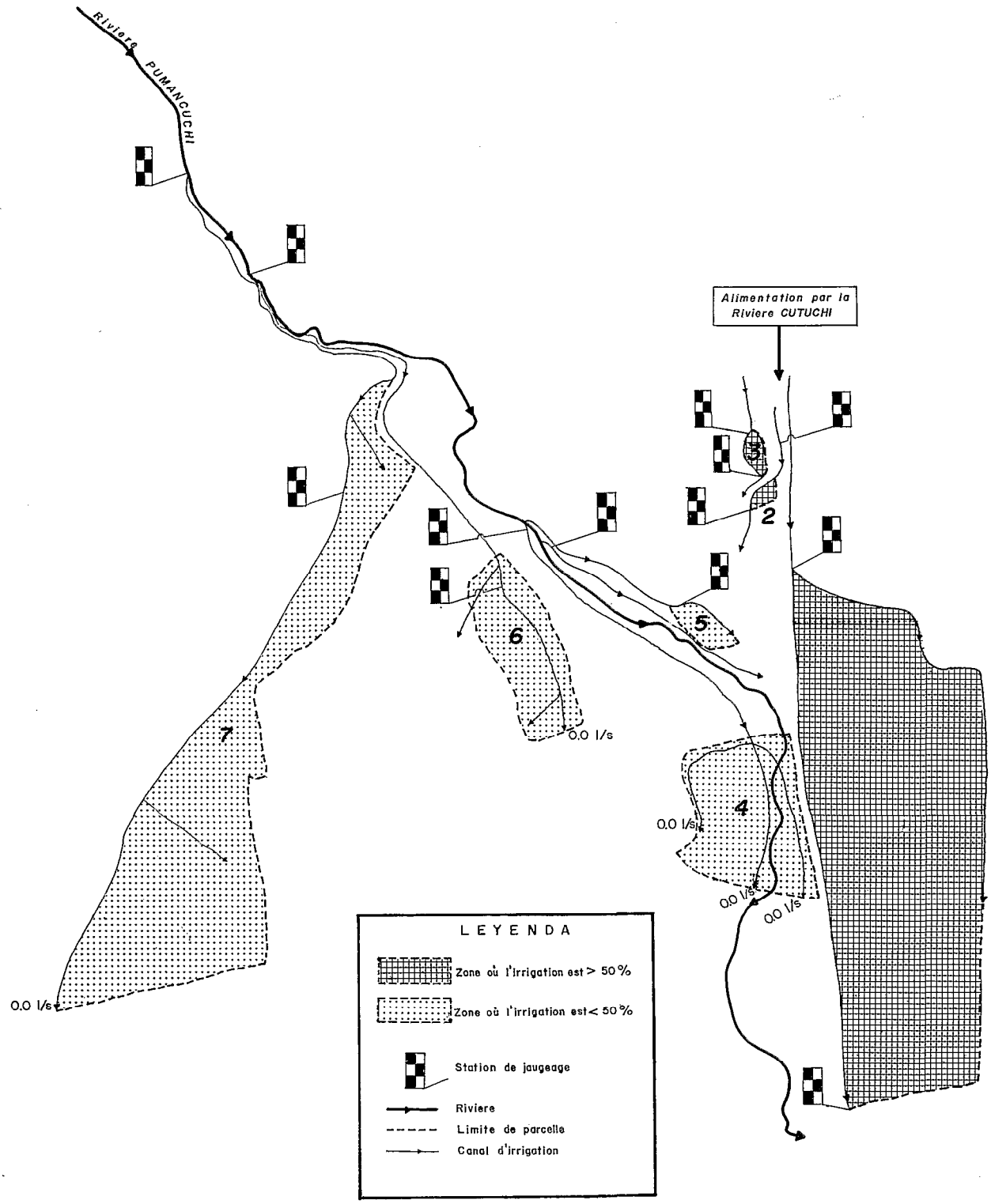


Fig. 10. — Plan de la zone témoin de Saquisili

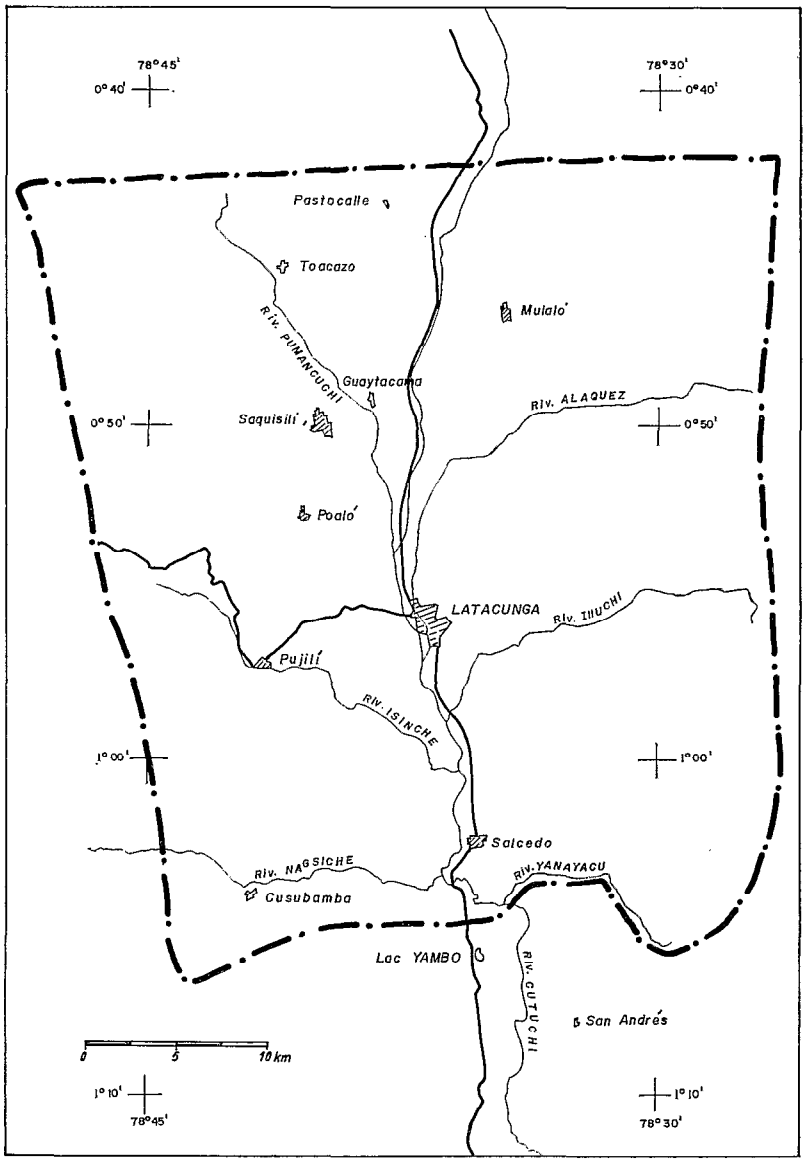


Fig. 11. — Région d'extrapolation de la zone de Saquisili

Dans ce cas précis, on peut écrire que l'irrigation totale q'_t en l/s, nécessaire à une mise en valeur optimale de ces sous-zones insuffisamment irriguées, pendant les 7 mois secs, est donnée par la formule :

$$q'_t = q_r (A_1 + A_2) + q_c (A'_1 + A'_2)$$
$$q'_t = 1{,}05 (15\,334) + 0{,}41 (22\,522)$$
$$q'_t = 25\,335 \text{ l/s, en gros } 25 \text{ m}^3/\text{s}$$

Le débit continu annuel correspondant est de 14,58 m³/s, soit un volume de 460 millions de m³ pour améliorer l'irrigation d'une surface proche de 38 000 ha.

Dans le cas général de x types de sous-zones ayant un pourcentage d'irrigation différent :

$$q'_t = q_r (A_1 + A_2 + \dots A_x) + q_c (A'_1 + A'_2 + \dots A'_x)$$

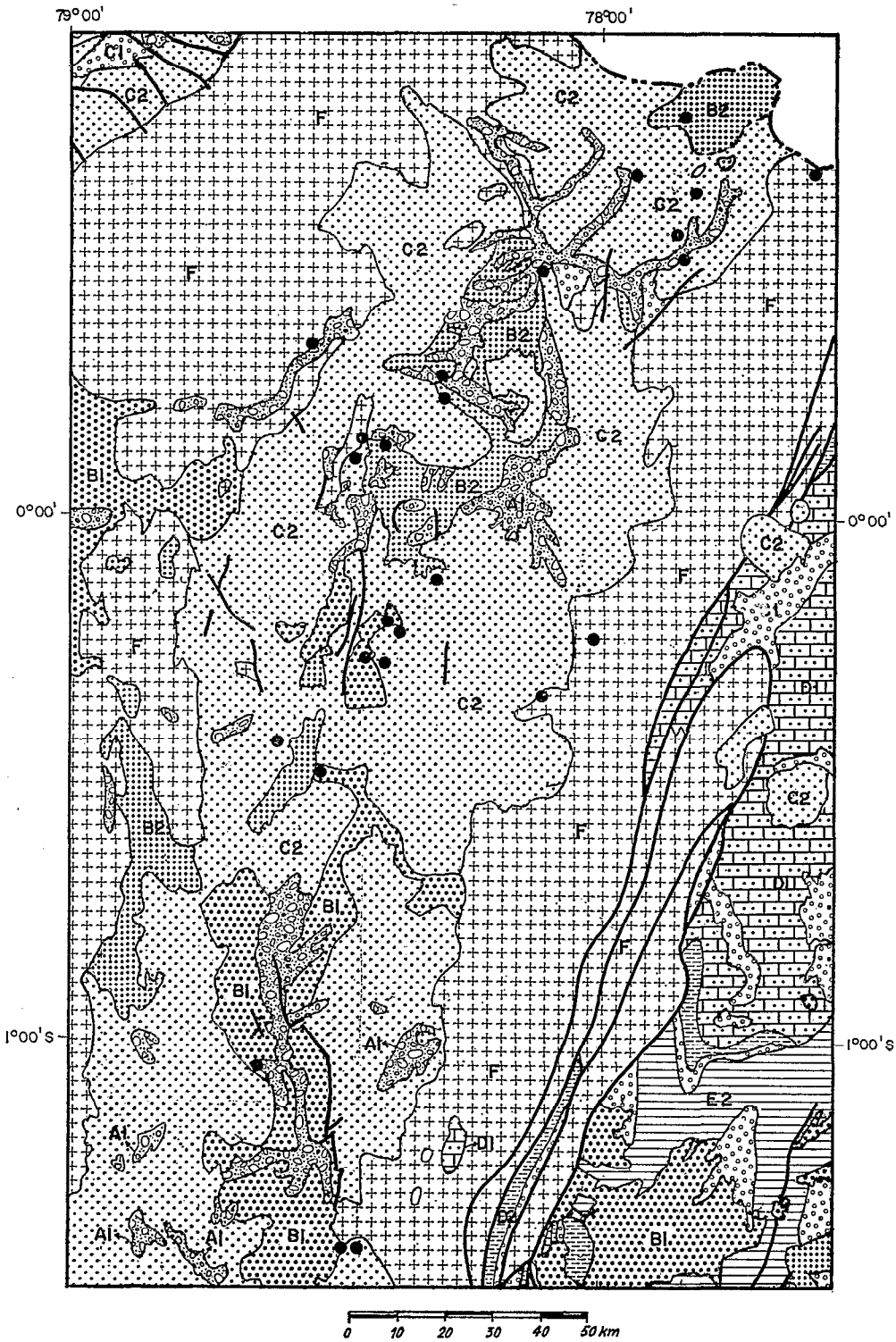


Fig. 12. — Carte hydrogéologique

ROCHES PERMEABLES	PERMEABILITE PRIMAIRE	NON CONSOLIDEES	Bonne Perméabilité A1	alluvions, colluvions, dépôts fluvio-glaciaires.
			Perméabilité Modérée A2	
		SEMI CONSOLIDEES	Bonne Perméabilité B1	terrasses, dépôts de piémont, projections volcaniques.
			Perméabilité Modérée B2	
		CONSOLIDEES	Bonne Perméabilité C1	Roches sédimentaires : marines, continentales et roches pirocla stiques.
			Perméabilité Modérée C2	
	PERMEABILITE SECONDAIRE	CONSOLIDEES	Bonne Perméabilité D1	Pélites, grès, calcaires plissées et karsts.
			Perméabilité Modérée D2	

ROCHES IMPERMEABLES	E1-E2	Roches sédimentaires horizontales ou legèrement inclinées Roches sédimentaires plissées
	F	Roches ignées et métamorphiques.

	Failles principales
	Sources thermominérales

Légende de la carte hydrogéologique

soit, pendant N mois secs, un volume équivalent à :

$$v'_t = 2{,}628 \cdot 10^6 \text{ N } q'_t, \text{ en litres}$$
$$v'_t = 2{,}628 \text{ N } q'_t, \text{ en milliers de m}^3$$

5.4. Total des apports en eau nécessaires

Dans une région hydriquement déficitaire, comportant diverses zones irrigables parmi lesquelles certaines sont dépourvues de toute irrigation et d'autres sous irrigation partielle, la totalité des apports nécessaires est égale à :

en débit continu : $Q = q_t + q'_t$
en volume, pendant N mois secs : $V = v_t + v'_t$

6. AVEC QUOI IRRIGUER ?

Grâce à tout ce qui précède, le planificateur dispose à présent des éléments suivants :
— la localisation des zones irrigables,
— la période au cours de laquelle il faut les irriguer,
— les quantités d'eau requises à leur mise en valeur agricole.

L'étape suivante consiste à découvrir les sources d'alimentation en eau susceptibles de couvrir les besoins.

Parmi les deux grandes options possibles, nous laisserons de côté celle qui consiste à distribuer l'eau à partir de grandes retenues régionales et ne nous occuperons que des possibilités d'alimentation locales. La première solution nécessite en effet une série d'études spécifiques de longue durée, type monographie hydrologique, en plus d'un investissement financier très important ; en outre, la mise en service de l'ouvrage ne peut s'effectuer qu'à long terme. La seconde option, par contre, permet une intervention rapide dans des zones qui peuvent être géographi-

quement très dispersées et ne nécessite que de faibles investissements, ce qui la rend plus opérationnelle à court terme dans les pays ayant des moyens financiers limités.

L'utilisation des ressources en eau locales fait appel à trois types principaux d'ouvrages hydrauliques :

— petites retenues,

— aménagement au fil de l'eau dans les cours d'eau permanents,

— captage des sources et forage de puits.

Nous étudierons successivement les méthodes permettant d'estimer les volumes exploitables, tant à partir des eaux souterraines que des eaux superficielles.

6.1. Estimation du potentiel en eaux souterraines

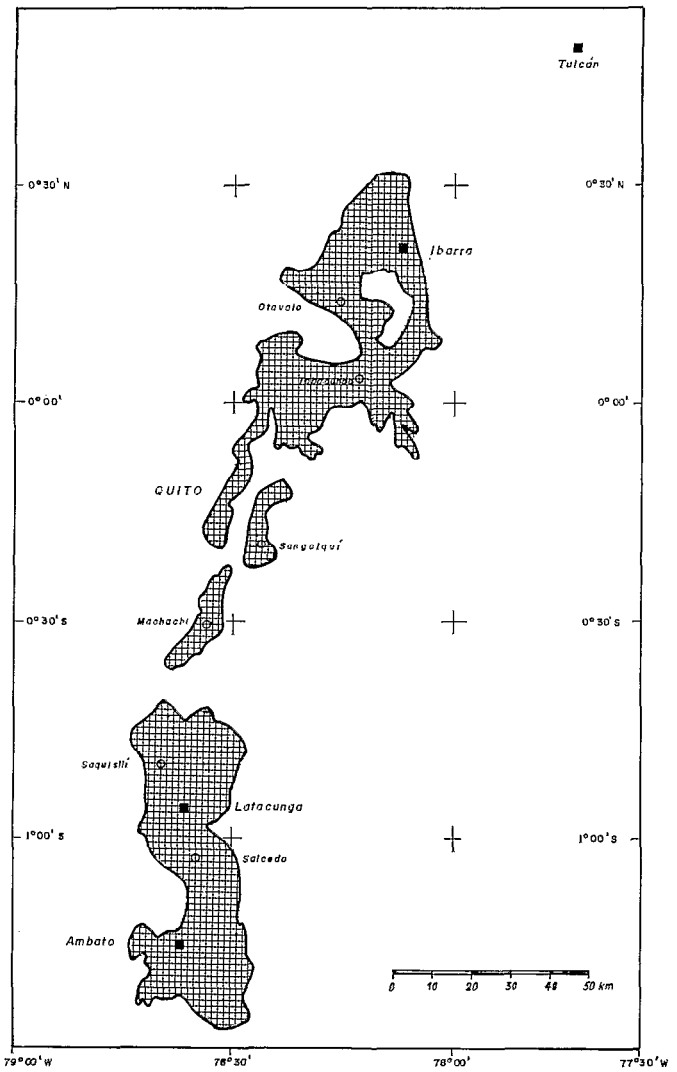
Ce genre d'études ayant été l'objet de multiples ouvrages et articles spécialisés, nous nous contenterons ici de résumer les différentes étapes successives nécessaires à l'évaluation des ressources en eaux souterraines :

1. Cartographie des grandes formations géologiques, plus directement orientée vers la qualité lithologique et la perméabilité des roches.
2. Inventaire le plus complet possible des points d'eau, sources et puits, et de leurs caractéristiques : débit, salinité, usage actuel, etc.
3. Réalisation d'une carte hydrogéologique nationale (fig. 12) basée sur les deux précédentes. Cette carte, essentiellement qualitative, doit faire la séparation entre :
   — roches imperméables : roches ignées et métamorphiques peu fracturées, formations sédimentaires argileuses,
   — roches perméables divisées en deux sous-classes : d'une part les roches présentant une microperméabilité, elles-mêmes subdivisées en sédiments non consolidés, sédiments semi-consolidés et roches consolidées, et d'autre part, les roches possédant une macroperméabilité due à un réseau de fractures ou à des cavités de dissolution.
4. Réalisation d'une carte des zones prioritaires pour la recherche et l'exploitation des eaux souterraines (fig. 13) directement dérivée de la précédente et qui tient également compte des facteurs suivants : déficit hydrique climatique de la zone, qualité physico-chimique observée aux points d'eau, ressources en eau déjà existantes, localisation des zones irrigables.

   Il faut signaler que les études menées en Equateur en sont à cette phase, c'est-à-dire qu'il est actuellement possible de délimiter les zones ayant une bonne probabilité de renfermer des eaux souterraines, mais qu'il est malheureusement hors de question, sauf en des zones très restreintes ayant fait l'objet des études exposées aux points suivants, de quantifier les ressources exploitables et donc d'élaborer des projets rationnels de mise en valeur agricole basés sur l'utilisation des nappes aquifères...
5. Etude de la variation des différentes sources.
6. Etude de la variation du débit des différentes sources.
7. Exécution de sondages profonds et de campagnes géophysiques pour délimiter l'extension des nappes.
8. Perforation des puits et réalisation d'essais de pompage pour déterminer les principales caractéristiques hydrodynamiques des formations aquifères et les débits d'exploitation q_p de chacun des puits.
9. Quantification des réserves souterraines à l'aide des quatre points précédents.
10. Evaluation du volume de la recharge naturelle annuelle moyenne R à l'aide d'une étude hydroclimatologique menée sur le bassin d'alimentation, et estimation des pertes naturelles p correspondantes à l'aide des points 5 et 6 (volume d'eau restitué par la nappe aux rivières et aux sources).

Les diverses étapes présentées ci-dessus permettent de connaître les quantités d'eau exploitables qui, dans la mesure du possible, ne doivent utiliser que le capital renouvelable. En effet, et sauf dans le cas de fortes sécheresses au cours desquelles il sera licite d'utiliser les réserves permanentes, le volume exploitable doit respecter les lois de conservation de l'aquifère et répondre à la proposition suivante, T étant la durée annuelle de pompage :

$$\Sigma q_p T \leqslant R - p$$



F.g. 13. — Carte des zones prioritaires pour la recherche d'eaux souterraines

Pour une région donnée, ce volume exploitable détermine directement les superficies qui peuvent être irriguées. Soit :

S la superficie des zones irrigables dépourvues de tout système d'irrigation, en ha,

A la superficie des sous-zones nécessitant une irrigation complète, définies au paragraphe 5.3.5., en ha,

A′ la superficie des sous-zones nécessitant une irrigation complémentaire, définies au paragraphe 5.3.5., en ha,

q_r le débit continu moyen applicable aux zones non irriguées, en l/s/ha,

q_c le débit complémentaire applicable aux zones partiellement irriguées, en l/s/ha,

N le nombre de mois secs.

La relation suivante doit être vérifiée :

$$\Sigma\, q_p\, T \geqslant 2{,}628 \cdot 10^6\, N\, [q_r\, (S + A) + q_c\, A']$$

Quand les volumes exploitables sont insuffisants, il faut faire une sélection des surfaces à irriguer pour respecter la relation antérieure.

6.2. Evaluation des ressources en eaux superficielles

Un article [1] et un rapport [2] antérieurs exposent le détail de la méthodologie utilisée pour estimer l'eau théoriquement emmagasinable dans de petites retenues ainsi que les débits exploitables au fil de l'eau.

Rappelons simplement qu'elle s'appuie sur une étude analytique détaillée de toute l'information hydropluviométrique existante [7, 8, 9 et 10], et qu'à l'aide de la méthode des zones hydrologiques théoriquement homogènes [11], il a été possible d'extrapoler les résultats obtenus à des bassins hydrographiques unitaires de dimensions telles (superficie généralement comprise entre 50 et 150 km²) qu'on peut y supposer l'homogénéité des divers facteurs conditionnels du régime hydrologique. C'est ainsi qu'en Equateur, l'ensemble Sierra-Costa (la zone amazonienne a été écartée étant donné sa très forte pluviosité) a été divisée en 1 244 bassins versants unitaires. Dans le cas général on peut alors, pour chacun de ces bassins, quantifier les principaux paramètres climatiques et hydrologiques, et en particulier, pour ce qui concerne l'objet de la présente publication :

— les modules spécifiques annuels,

— la moyenne annuelle des débits caractéristiques d'étiage non dépassés pendant x jours consécutifs : DCC_x, principalement les DCC_{30} en Equateur,

— l'irrégularité interannuelle des débits, représentée par le coefficient K_3

$$K_3 = \frac{\text{module annuel décennal humide}}{\text{module annuel décennal sec}} \quad \text{ou} \quad \frac{DCC_x \text{ décennal humide}}{DCC_x \text{ décennal sec}}$$

— la variabilité saisonnière des débits, caractérisée par le coefficient KE

$$KE = \frac{DCC_x}{\text{module}}$$

6.2.1. *Aménagements hydrauliques au fil de l'eau*

L'eau est prise directement dans la rivière, soit en installant des canaux de dérivation, soit par pompage.

Le problème consiste à évaluer le débit minimal sur lequel on peut compter, pendant une certaine période de l'année, correspondant à l'utilisation effective des aménagements.

Le paramètre de base qui sert à l'estimation de ce débit minimal est le débit caractéristique d'étiage observé en moyenne pendant x jours consécutifs. Dans le cas de l'Equateur où de nombreuses régions sont soumises à des climats très secs (N = 10 à 12 mois), nous avons choisi le DCC_{30}, qui quantifie le débit assuré pendant 11 mois par an. Il est certain que dans des pays moins secs on pourrait choisir DCC_{60}, DCC_{90} ou même DCC_{120}.

Les prélèvements peuvent se faire soit dans les grands cours d'eau, soit en utilisant les apports des petites rivières permanentes qui drainent les bassins unitaires, ce dernier cas ne se différenciant du premier que par la multiplication des aménagements, le principe de calcul des débits exploitables restant le même.

Le DCC_x à la station de prélèvement définit directement le débit d'exploitation. Quand la rivière a un bassin hydrographique important, il est déterminé :

— soit à partir de l'étude statistique des débits d'étiage quand il existe une station hydrologique suffisamment proche et bien observée ;

— soit estimé à partir de la moyenne pondérée des DCC_x correspondants, quantifiés sur chacun des bassins unitaires situés en amont du lieu de prélèvement.

Il est utile de rappeler ici que, lors de l'extrapolation des valeurs de DCC_x aux bassins unitaires, il n'est bien sûr pas question de leur attribuer des valeurs absolues précises mais de les ranger parmi un certain nombre de classes ayant des limites inférieures et supérieures judicieusement choisies (1 et 2). Pour l'estimation du DCC_x au point d'exploitation au moyen des bassins unitaires, il est conseillé, par mesure de sécurité, de choisir une valeur égale ou pour le moins très proche de la limite inférieure.

Si aux paramètres déjà définis au paragraphe 6.1., on ajoute les définitions suivantes :

- $X_1, X_2, X_3, X_4 \ldots\ldots X_n$ les superficies, en hectares, des bassins versants unitaires appartenant respectivement aux classes de DCC_x ayant pour limite inférieure les débits spécifiques $q_1, q_2, q_3, q_4 \ldots\ldots q_n$, en l/s/ha ;
- q_e le débit à garantir pour le maintien du système écologique et le bon fonctionnement des ouvrages en aval, en l/s ;
- q_a le débit déjà prélevé en amont pour l'irrigation actuelle, en l/s.

La relation suivante doit être respectée :

$$q_1 X_1 + q_2 X_2 + \ldots\ldots q_n X_n - q_a \geqslant q_r (S + A) + q_c A' + q_e$$

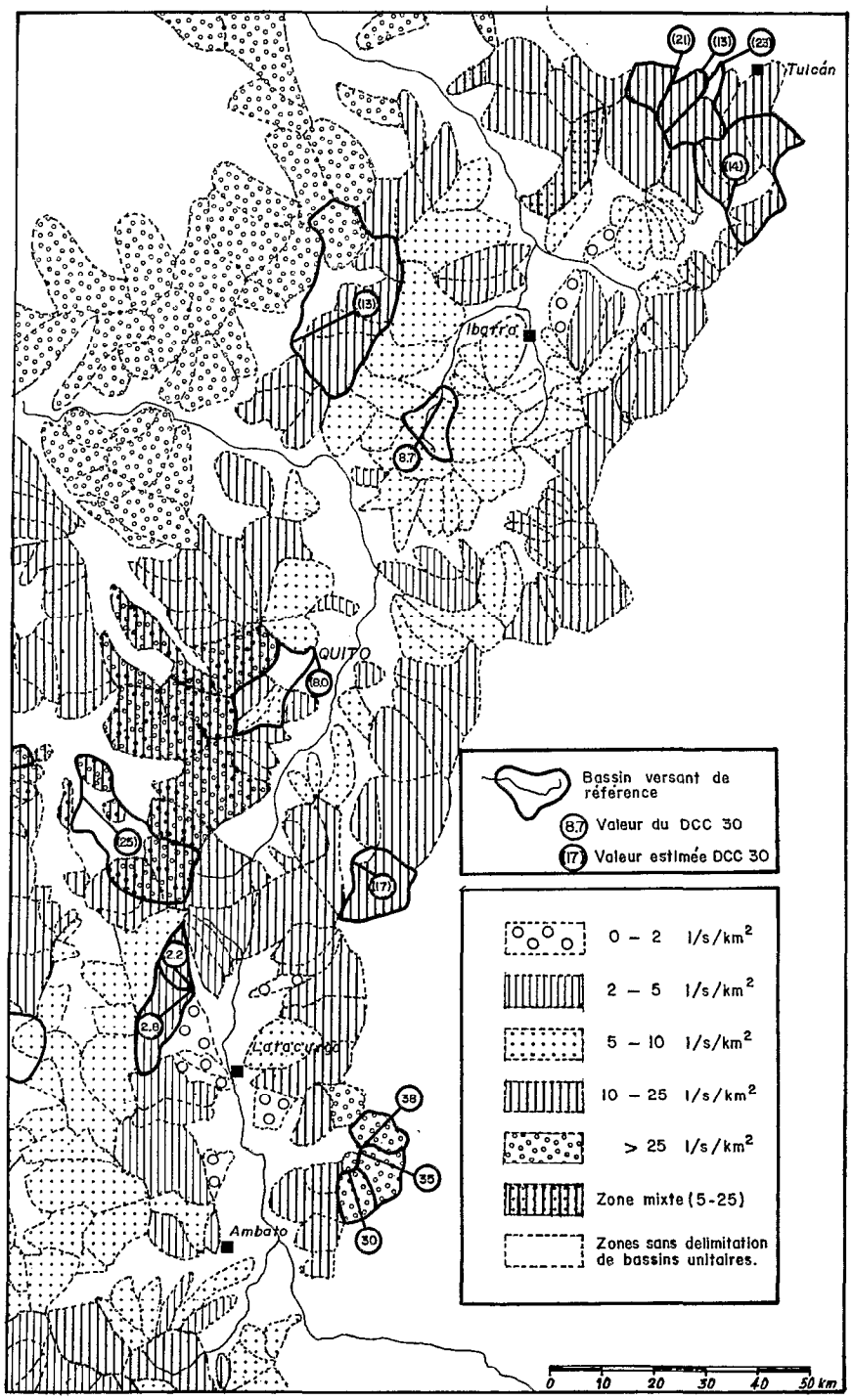


Fig. 14. — Carte des débits spécifiques d'étiage (DCC 30)

En multipliant ces débits par $2{,}628 \cdot 10^6 N$, on obtient les volumes correspondant pendant N mois secs.

En Equateur (fig. 14), les classes des débits d'étiage de 30 jours consécutifs (DCC_{30}) sont les suivantes : 0-2, 2-5, 5-10, 10-25 et > 25 l/s/km².

La relation précédente, si toutes les classes sont représentées, peut s'écrire :

$$0{,}02\ X_2 + 0{,}05\ X_3 + 0{,}1\ X_4 + 0{,}25\ X_5 - q_a \geqslant q_r\ (S + A) + q_c\ A' + q_e$$

De plus, il est nécessaire d'apprécier la rentabilité et les risques de défaillance des projets d'aménagements. En effet, les calculs sont effectués en s'aidant des valeurs annuelles moyennes, sans tenir compte des valeurs extrêmes. Cette appréciation est rendue possible grâce à la connaissance des coefficients d'irrégularité interannuelle K_3 et saisonnière KE qui permettent de tracer, au niveau national, des isolignes (fig. 15 et 16) dont le tracé est d'ailleurs assez régulier puisqu'il est surtout influencé par l'existence de grandes zones climatiques et peu conditionné par le relief local. Les risques sont directement évalués à partir de la localisation du bassin d'alimentation par rapport aux lignes d'égales valeurs de K_3 et KE.

Le coefficient KE donne une idée qualitative de la régularité du régime, c'est-à-dire de la distribution des débits au cours de l'année. Un KE élevé indique des apports soutenus, alors qu'un KE faible témoigne d'une grande irrégularité saisonnière. Dans ce dernier cas on sait que les débits disponibles pendant 11 mois pourront parfois être nettement plus élevés que le DCC_x, ce qui, éventuellement permet d'envisager l'irrigation de surfaces supplémentaires pendant des périodes limitées (cultures à cycle court) ; d'autre part, pour la construction des prises d'eau et dès installations de pompage, il faudra également tenir compte de ces très forts écoulements périodiques.

Le coefficient K_3 permet de quantifier l'irrégularité interannuelle du DCC_x. En effet, si on admet une loi normale de distribution des débits d'étiage, σ étant l'écart-type, et m la valeur du DCC_x de fréquence 0,5, on peut écrire :

$$K_3 = \frac{DCC_x \text{ décennal humide}}{DCC_x \text{ décennal sec}} = \frac{m + 1{,}28\ \sigma}{m - 1{,}28\ \sigma}$$

$$K_3 m = 1{,}28\ \sigma\ K_3 = m + 1{,}28\ \sigma$$

$$m\ (K_3 - 1) = 1{,}28\ \sigma\ (1 + K_3)$$

$$\sigma = \frac{m\ (K_3 - 1)}{1{,}28\ (K_3 + 1)}$$

Si on prend, par exemple, un DCC_x spécifique moyen égal à 2 l/s/km², provenant d'un bassin hydrographique ou $K_3 = 4$, on peut facilement calculer le DCC_x décennal sec, c'est-à-dire la valeur du débit minimal qui, statistiquement, pourra être observé une année sur dix.

Dans cet exemple :

$$\sigma = 0{,}9375$$

$$1{,}28\ \sigma = 1{,}2$$

$$\text{et } DCC_x \text{ décennal sec} = 0{,}8 \text{ l/s/km}^2$$

Nota : Pour certains régimes climatiques particuliers ayant des coefficients d'irrégularité interannuelle élevés, il est probable que la loi normale ne soit pas respectée et que la distribution des débits soit dissymétrique... On pourrait envisager l'utilisation d'une loi gausso-logarithmique qui présente l'avantage d'une facile transformation de la formule ci-dessous (logarithme des valeurs servant au calcul de m et σ).

6.2.2. *Petites retenues agricoles*

Tout comme pour le paragraphe antérieur, la méthodologie générale a déjà été exposée (1 et 2).

Afin de connaître les volumes d'eau emmagasinables, au cours d'une année d'hydraulicité moyenne, dans de petites retenues dont les bassins de drainage correspondent aux bassins versants unitaires décrits précédemment, on emploie le module spécifique annuel q_s (voir fig. 17). Les modules sont rangés par classes et la valeur utilisée pour le calcul des volumes est la limite inférieure de ces classes ou une valeur très proche.

Si, aux paramètres déjà définis au paragraphe 6.1., on ajoute les définitions suivantes :

- X'_1, X'_2, X'_3.....X'_n les superficies, en hectares, des bassins unitaires appartenant respectivement aux classes de modules q_{s1}, q_{s2}, q_{s3}.....q_{sn}, en l/s/ha.
- P_v le volume de la pluie directe sur la surface d'eau libre du barrage, en m³.

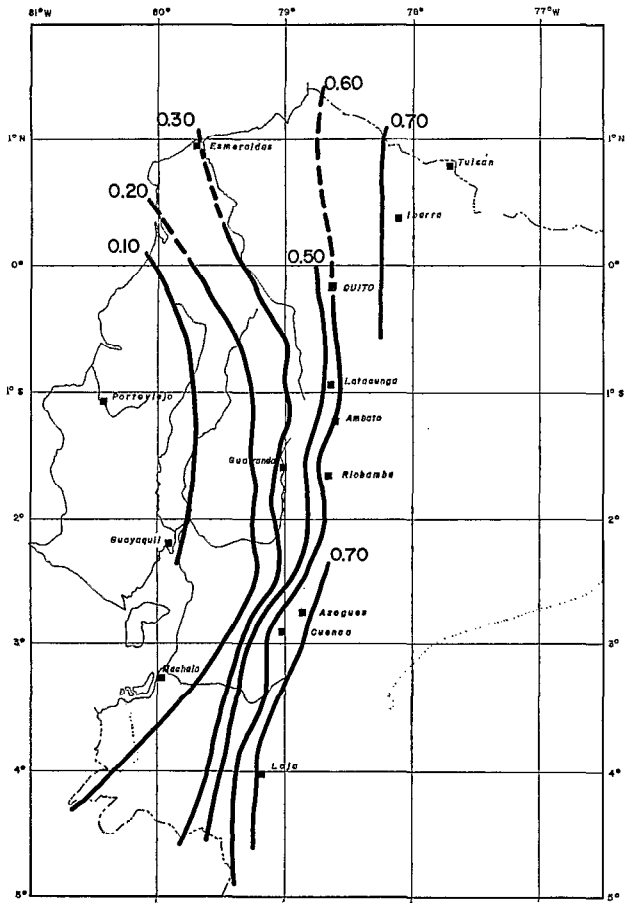


Fig. 15. — Distribution du coefficient de variation saisonnière KE en Équateur

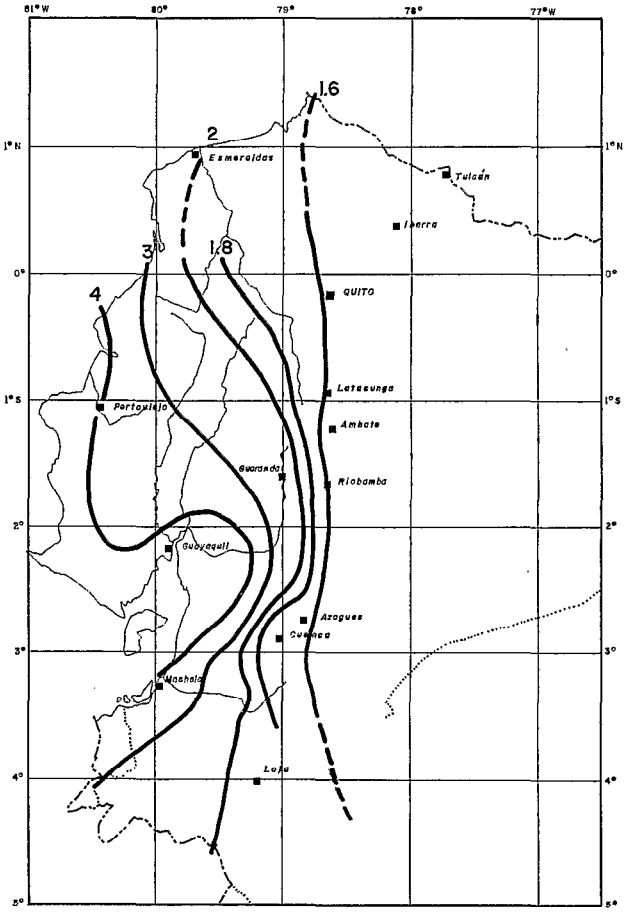


Fig. 16. — Distribution du coefficient d'irrégularité interannuelle K3 en Équateur

- P le volume des pertes : par évaporation sur la retenue, par percolation profonde, par infiltration à travers l'ouvrage, et par déversement de l'évacuateur de crue, en m³.

Pour une région donnée, comportant des bassins unitaires appartenant à plusieurs classes, la relation suivante doit être respectée, les volumes étant donnés en m³ :

$$31{,}536 \cdot 10^3 \, (q_{s1} \, X'_1 + q_{s2} \, X'_2 + \ldots q_{sn} \, X'_n) + P_v - P \geqslant 2{,}628 \cdot 10^3 \, N \, [q_r \, (S + A) + q_c \, A']$$

En Equateur, les classes de modules sont les suivantes : 0-10, 10-20, 20-30, 30-50 et > 50 l/s/km². Tous les calculs, par mesure de sécurité, ont été faits avec la limite inférieure des classes, sauf pour la classe 1 pour laquelle nous avons arbitrairement choisi 2 l/s/km² et éliminé certains bassins situés dans des régions pluviométriquement trop déficitaires.

La relation précédente peut s'écrire :

$$31{,}536 \cdot 10^3 \, (0{,}02 \, X'_1 + 0{,}1 \, X'_2 + 0{,}2 \, X'_3 + 0{,}3 \, X'_4 + 0{,}5 \, X'_5) + P_v - P \geqslant 2{,}628 \cdot 10^3 N \, [q_r \, (S + A) + q_c \, A']$$

La figure 18 donne un exemple du volume théoriquement emmagasinable (sans tenir compte de P et de P_v) dans certains bassins hydrographiques unitaires. Suivant une méthodologie déjà exposée [1 et 2] seuls les bassins comportant un fort pourcentage de sols inaptes à la mise en valeur agricole ont été retenus. Rappelons également qu'aucune étude des sites d'implantation des barrages n'a été faite et que, tout particulièrement, la géologie et la topographie devront donner lieu à des études détaillées au moment de l'élaboration des projets individuels de retenue.

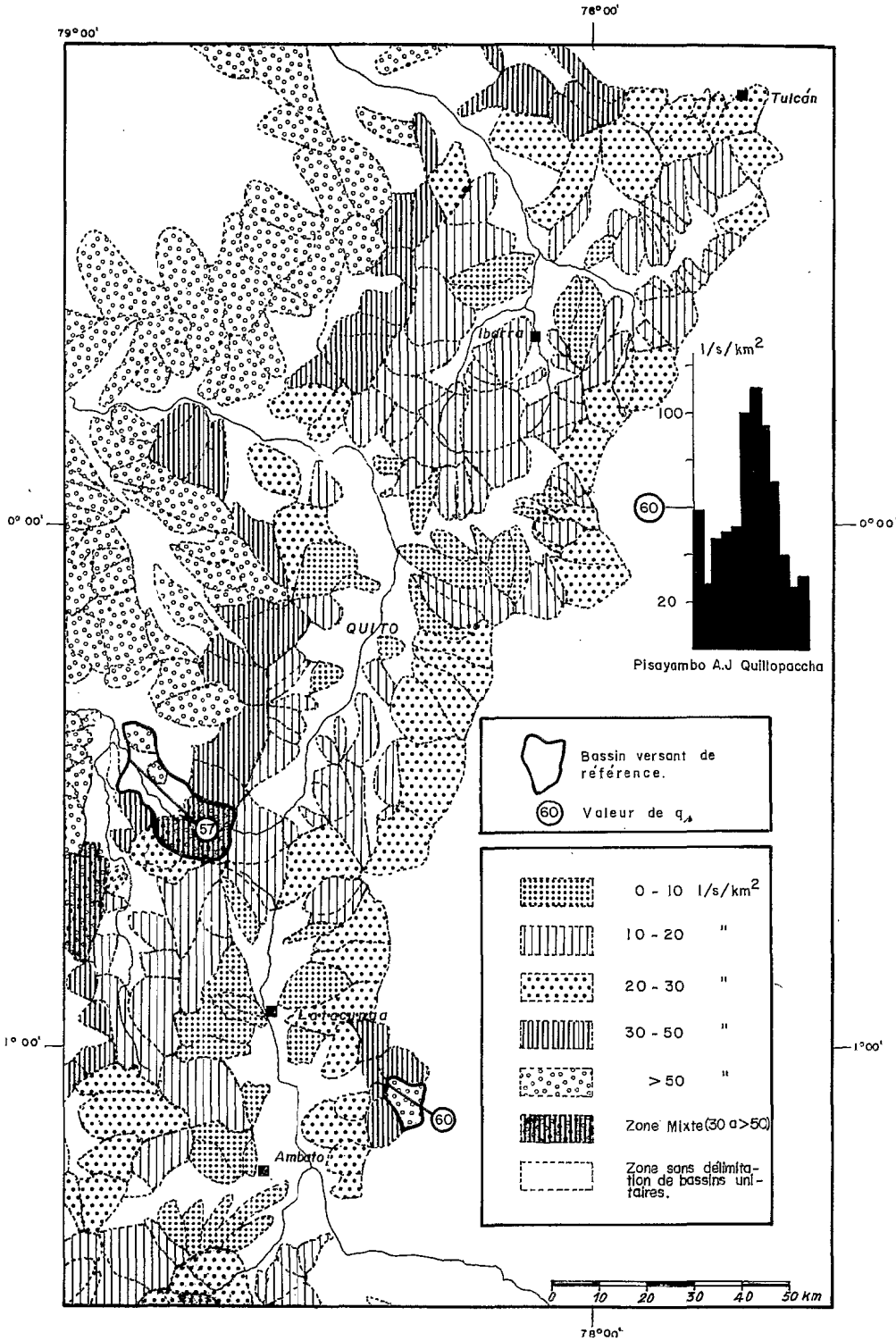


Fig. 17. — Carte des modules spécifiques annuels q_s

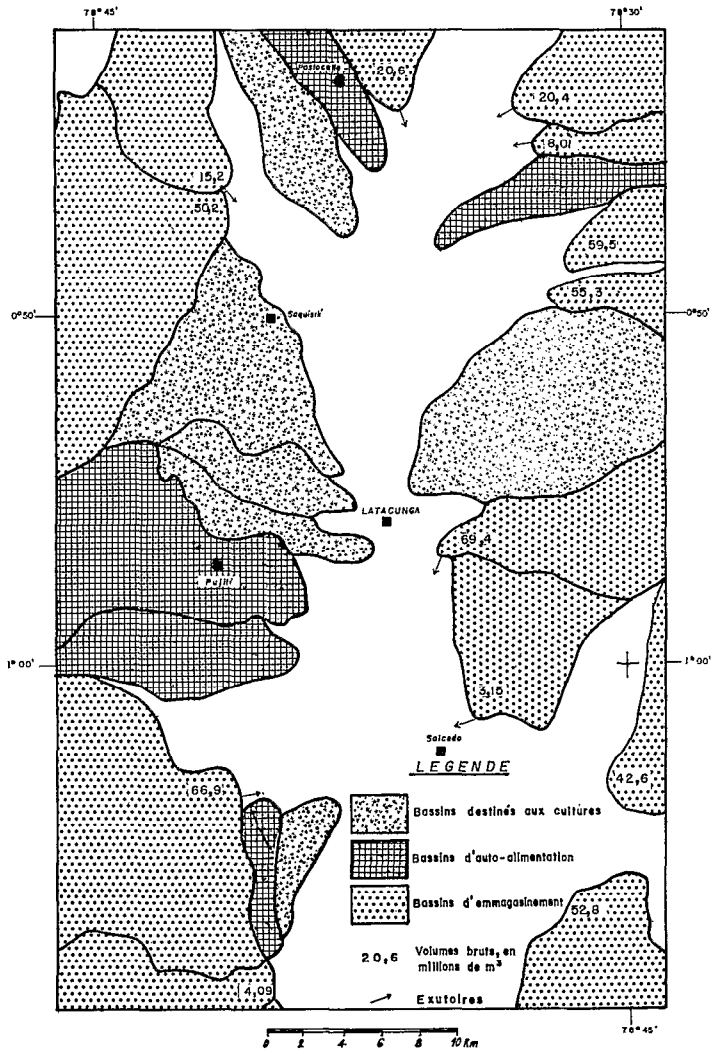


Fig. 18. — Volumes théoriquement emmagasinables

Il est également intéressant de noter que les volumes indiqués peuvent être très fortement diminués à cause des pertes et surtout par celles dues à l'évaporation. Pour fixer un ordre de grandeur de ces pertes, nous joignons à cet article la figure 19 qui chiffre le pourcentage des pertes par évaporation en fonction de la pluviométrie et de la profondeur au pied de la retenue. Les courbes représentées sont le résultat de travaux réalisés au Brésil [12], modifiés en fonction des conditions climatiques des régions sèches de l'Equateur. On s'aperçoit que, pour des profondeurs de l'ordre de 6 à 8 m et une pluviométrie annuelle de 500 mm, les pertes par évaporation représentent 40% du volume accumulé dans une retenue. En admettant que, malgré l'apport pluviométrique direct, les pertes supplémentaires soient d'environ 10%, seulement 50% du volume théoriquement emmagasinable reste disponible. Sauf en des cas très spéciaux, les volumes à prendre en considération pour l'établissement de projets de mise en valeur agricole peuvent être estimés voisins de la moitié des volumes indiqués à la figure 18.

Comme dans le cas des DCC_x, la localisation des bassins unitaires par rapport aux isolignes de KE et de K_3 permet d'estimer l'irrégularité saisonnière des apports ainsi que les volumes extrêmes pouvant être stockés statistiquement une année sur dix (même méthode de calcul en remplaçant DCC_x par q_s).

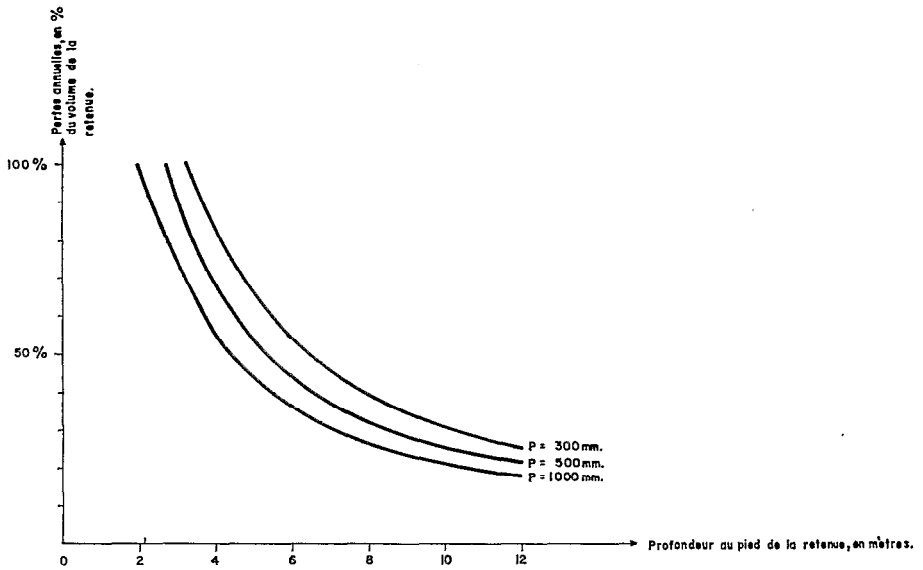


Fig. 19. — Estimation de l'évaporation d'une retenue
en fonction de sa profondeur maximale et de la pluviométrie annuelle

7. CONCLUSION

Les ingénieurs chargés de la maîtrise de l'eau disposent, à présent, des données estimatives suffisantes pour réaliser une planification harmonieuse et rationnelle de l'irrigation, à l'échelle nationale.

Les paramètres définis tout au long de cet article permettent en effet, dans chacune des régions pluviométriquement déficitaires du territoire national, de comparer les ressources hydriques disponibles localement et les besoins en eau des zones à vocation agricole. Si ces derniers sont inférieurs aux disponibilités, toute la demande peut alors être satisfaite. Dans le cas contraire, les éléments présentés ici sont susceptibles de fournir les bases indispensables à l'établissement des successives priorités d'installation. Des facteurs complémentaires (socio-économiques, possibilité de grande retenue régionale:.. etc.) peuvent, par ailleurs, intervenir dans le choix définitif.

Il reste alors à procéder à la mise en place des projets particuliers qui nécessitent bien sûr des études plus détaillées (topographie, géologie, population locale, types de cultures, techniques d'irrigation, infrastructures diverses... etc.) mais la confrontation entre ressources potentielles et usage actuel, permet d'ores et déjà au planificateur de préparer les diverses étapes chronologiques d'un plan national d'irrigation orienté vers la mise en valeur rationnelle des terres cultivables.

8. BIBLIOGRAPHIE

[1] 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'Equateur. E. Cadier et P. P. Pourrut. *Cah. ORSTOM, sér. hydrol., vol. XVI, n° 3-4*, 1979.

[2] Elementos básicos para la planificación del recurso hídrico en el Ecuador. E. Cadier, P. Pourrut et contrepartie équatorienne, 1979.

[3] Les réseaux d'irrigation : théorie, technique et économie des arrosages, M. Poirée et Ch. Ollier, 1971.

[4] Manuel de l'agent technique du Génie Rural. *SOGREAH*, 1974.

[5] Principio y aplicaciones del riego. O. W. ISRAELSEN y V. E. HANSEN, 1965.

[6] Mémento de l'Agronome. Ministère français de la Coopération, 1974.

[7] Estudio hidro-meteorológico e hidrogeológico preliminar de las cuencas de los ríos Pastaza, Chimbo y Chanchán. *PRONAREG-ORSTOM*, janvier 1976.

[8] Estudio hidro-meteorológico e hidrogeológico preliminar de las cuencas de los ríos Cañar, Paute y del Sur ecuatoriano. *PRONAREG-ORSTOM*, novembre 1976.

[9] Estudio hidro-meteorológico e hidrogeológico preliminar de las cuencas de los ríos Esmeraldas y del Norte ecuatoriano. *PRONAREG-ORSTOM*, octobre 1977.

[10] Estudio hidro-meteorológico e hidrogeológico preliminar de las cuencas del río Guayas y de los ríos de la Peninsula y de Manabi. *PRONAREG-ORSTOM*, mars 1978.

[11] La planification du réseau hydrométrique minimal. P. DUBREUIL et J. GUISCAFRE. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. VIII, nº 2, 1971.

[12] Bacia representiva do Riacho do Navio. Primeira estimativa dos recursos de agua. J. F. NOUVELOT y P. A. SANGUINETTI FERREIRA. *SUDENE*, Ser. Hidrol., nº 4, 1977.