

POTENTIALITES DES AÇUDES DU NORDESTE BRESILIEN

POUR UN USAGE EN IRRIGATION.

François MOLLE

Recife

1985

## REMERCIEMENTS

Mes remerciements les plus sincères à Mrs. Sylvio Campello et Bernard Cavallé, organisateurs de ce stage, à Pierre Audry pour ses conseils précieux et bienveillants, à Maria José Cavalcanti pour son secrétariat efficace et dévoué et à Eric Cadier qui est à l'origine de ce travail et sans la collaboration duquel il eut été impossible.

TABLE DES MATIERES

	Page
RESUME .....	4
I - INTRODUCTION .....	5
II - LES AÇUDES ET LEUR GEOMETRIE .....	19
III - MODELE SIMPLE N° 1 .....	37
IV - MODELE SIMPLE N° 2 .....	48
V - PRESENTATION DU MODELE N° 3 .....	53
1) DESCRIPTION DU MODELE .....	54
A) Données climatiques .....	54
B) Module hydrologique .....	63
C) Caractéristiques de l'açude .....	66
D) Modelisation du sol .....	67
E) Modelisation de la plante .....	77
F) Module de politique .....	108
G) Fluxogramme général .....	114
2) SORTIES DU MODELE .....	118
VI - EXPLOITATION ET APPLICATIONS .....	119
1) POTENTIALITES .....	119
2) APPLICATIONS .....	
VII - LIMITATIONS ET PROLONGEMENTS .....	126
VIII - CONCLUSION .....	129
ANNEXES .....	130
BIBLIOGRAPHIE	

RESUME

Le développement de la petite irrigation dans le Nordeste Brésilien et principalement dans les zones cristallines passe par une meilleur ex pl oi tation des ressources hydriques stockées superficiellement: des ré ser voi rs, petits barrages et collinaires ou "açudes", s'y rencontrent en grande quantité et il convient d'en déterminer les potentialités hy dro agri co les. Une étude préliminaire sur la géométrie de ces retenues permet de relier le volume et la surface du miroir d'eau à leur prof on de ur. Les spécificités climatiques de cette région, ainsi que la vol on té de développer des outils de complexité différente nous conduit à pro po ser trois approches successives. Un premier modèle simple débouche sur l'utilisation d'abaques. Une deuxième consiste en un programme informa tique permettant de déterminer les superficies optimales pouvant être irriguées par un açude donné et pour un calendrier cultural proposé. Le dernier constitue, enfin, une tentative de modélisation informatique globale (bassin hydrographique, açude et périmètre irrigué) qui fonctio ne à partir des informations fournies, au pas de temps journalier, par une banque de données hydrologiques. Quelques exemples des potentialités de ce modèle sont donnés et des prolongements possibles sont prop o sés.

## I - INTRODUCTION

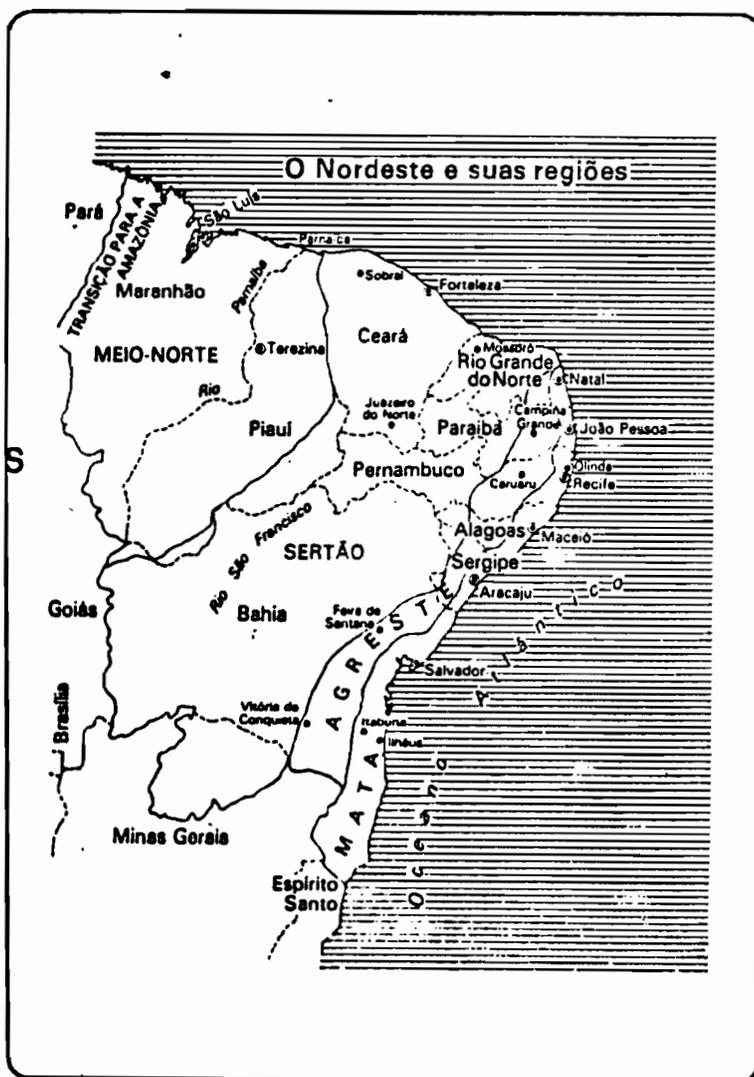
Parler du Nordeste Brésilien c'est, le plus souvent, évoquer une lointaine contrée déshéritée dont nous reviennent quelques relents sahéliens par les canaux médiatiques. C'est, au sein même du Brésil développé, provoquer une gêne derrière laquelle on relève parfois du mépris et, presque toujours, la méconnaissance qui en est la cause. Dans la variété des causes du sous-développement du Nordeste que nous évoquerons en introduction, nous retiendrons celles liées à l'absence d'une tradition de l'irrigation, cadre dans lequel se situe la présente étude.

### - Présentation du Nordeste

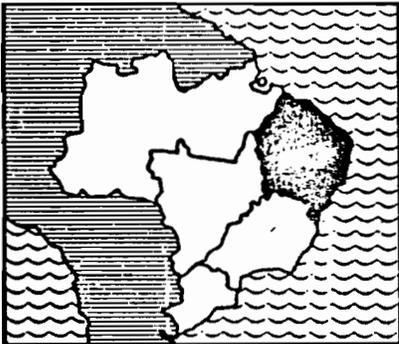
La région Nordeste occupe 20% du Brésil, soit 1.660.000 km<sup>2</sup>, ce qui représente plus de trois fois la France. Il englobe neuf états, à savoir le Maranhão (MA), le Piauí (PI), le Ceará (CE), le Rio Grande do Norte (RN), la Paraíba (PB), le Pernambouc (PE), l'Alagoas (AL), le Sergipe (SE), une partie du Minas Gerais et la Bahia (BA), cette dernière de superficie supérieure à celle de la France (voir carte 1.1).

On divise généralement le Nordeste en quatre grandes régions naturelles ce qui ne doit pas faire oublier pour autant qu'il existe une grande variété géographique.

## LE NORDESTE BRÉSILIEN ET SES RÉGIONS NATURELLES



## RÉGION NORDESTE



Population : 29,6 %.

Revenu national : 10,4 %.

Superficie : 18,2 %.

Principales villes : Salvador (1 500 000 hab.) et Recife (2 100 000 hab.)

Climat très contrasté : le littoral sud-est est chaud et humide, le littoral nord ne connaît que des pluies irrégulières. Près d'un million de kilomètres carrés appartiennent au « polygone des sécheresses ».

Zone pétrolière du Brésil. Uranium, tungstène, amiante, chrome, plomb, pierres semi-précieuses.

Neuf États : Bahia, Sergipe, Alagoas, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte, Ceará, Piauí, Maranhão.

L'autre Brésil. Celui de la sécheresse et de la pauvreté. Le réservoir de main-d'œuvre des régions développées du pays.

- a) La "zona da Mata" qui tire son nom du fait qu'elle fût historiquement la première investie et déboisée. Cette zone représente à peine 8% de la région et constitue la majeure partie de la bande du littoral. C'est là qu'on trouve les pluviométries les plus élevées, pouvant atteindre annuellement 2500 mm. On y cultive presque exclusivement la canne à sucre (Pernambouc, Paraíba), le cacao (Bahia), le cocotier (Sergipe), et l'on y déguste la plus grande variété de fruits tropicaux.
- b) L'Agreste est une zone de transition entre la Mata et l'intérieur, de relief plus accusé, de végétation assez exubérante et de pluviométrie moyenne. Ce fut d'abord une région exploitée par les éleveurs qui la délaissèrent pour investir le Sertão et qui laissèrent la place à la culture du coton, du maïs et du café. Longtemps principal producteur de céréales la zone est de nouveau progressivement occupée par l'élevage de bétail.
- c) Le Sertão est la partie intérieure, soumise à un climat de type semi-aride et couverte d'une végétation xérophile appelée caatinga (mot indigène signifiant forêt blanche). Tout auteur parlant du Sertão ne manquera pas d'insister, à la suite d'Euclides da Cunha, sur la grande hétérogénéité, physique et culturelle, de cette région. Nous reviendrons plus loin sur les problèmes et les potentialités de cette zone.
- d) Le Meio-Norte est constitué du Maranhão et d'une partie du Piauí. Région de transition avec l'amazone, il présente une végétation assez variée et l'on y trouve en particulier le babaçu et la carnaúba, deux types de palmier exploités industriellement pour l'huile et la cire qu'on en retire.

#### - Principales productions

Nous nous bornons à indiquer ici les principales productions agricoles pour donner une idée de leur importance relative, tant en superficie plantée qu'en valeur économique.

On constatera sur les tableaux (1.2) et (1.3) que les productions moyennes des cultures sont très basses pour le Nordeste: 411 kg/ha pour le maïs, 163 kg/ha pour le coton, 291 kg/ha pour le feijão (haricot du Nordeste).

On observe d'autre part que les cultures occupant la plus grande superficie (maïs, riz, coton) n'entrent que peu dans la valeur économique.

PRINCIPAUX PRODUITS AGRICOLES	SUPERFICIE PLANTEE (ha)		PRODUCTION (t)		RENDIMENTO MÉDIO (kg/ha)	
	NORDESTE	BRASIL	NORDESTE	BRASIL	NORDESTE	BRASIL
ANANAS	13.182	26.395	238.732	444.910	18.110	16.856
COTON	2.766.916	3.643.865	449.953	1.935.091	163	531
AIL	2.345	18.553	8.298	68.169	3.539	3.674
CACAHUETE	4.005	236.744	4.815	317.383	1.202	1.341
RIZ	1.567.945	6.016.255	1.977.045	9.718.074	1.261	1.615
BANANE	137.738	396.906	192.815	459.325	1.400	1.157
POMME DE TERRE	1.457	181.890	10.750	2.147.918	7.378	11.809
CACAO	(1) 459.270	(1) 529.208	(2) 294.400	(2) 318.400	641	602
CAFE	(1) 74.615	(1) 1.857.462	(2) 95.396	(2) 2.006.708	1.279	1.080
CANNE A SUCRE	1.116.578	3.073.033	55.651.931	184.219.067	49.842	59.947
OIGNON	9.143	62.342	100.489	669.240	10.991	10.735
COCO	161.584	165.873	519.515	541.876	3.215	3.267
FEIJÃO	2.511.119	5.929.740	730.144	2.907.213	291	490
TABAC	110.492	318.591	93.009	421.532	842	1.323
ORANGE	49.550	589.396	4.849.648	57.917.264	97.874	98.265
MALVA	5.950	52.784	6.130	54.432	1.030	1.031
RICIN	399.335	462.725	110.004	192.428	275	416
MANIOQUE	1.365.782	2.125.909	13.022.325	24.039.008	9.535	11.308
MAIS	2.760.298	12.601.262	1.133.485	21.865.439	411	1.735
PIMENT	1.652	22.580	1.799	38.800	1.009	1.718
RAMI	150	5.968	180	9.657	1.200	1.618
AGAVE	341.297	341.627	248.906	249.236	729	730
SOJA	1.180	8.202.181	354	12.834.624	300	1.565
SORGNO	19.105	115.012	15.255	211.045	798	1.835
TOMATE	15.727	55.145	410.037	1.739.527	26.072	31.545
RAISIN	524	57.548	6.440	688.589	12.291	11.965

TABLEAU (I-2) - SUPERFICIE PLANTEE, PRODUCTION ET RENDEMENTS (1982)

PRINCIPAIS PRODUTOS AGRICOLAS	(Cr\$ 1.000) VALEUR DE LA PRODUCTION			POURCENTAGE		
	1978	1979	1980	1978	1979	1980
ANANAS	501.529	446.852	1.062.073	0,83	0,45	0,57
COTON ARBORESCENT	4.077.633	4.669.812	8.848.683	6,76	4,72	4,76
COTON	1.652.509	2.311.762	4.325.038	2,74	2,34	2,32
AIL	61.907	93.672	168.049	0,10	0,09	0,09
CACAHUETE	28.878	48.886	76.546	0,05	0,05	0,04
RIZ	4.566.570	7.503.093	12.980.300	7,58	7,58	6,98
BANANE	2.802.765	4.600.096	8.347.583	4,65	4,65	4,49
POMME DE TERRE	60.829	84.068	123.465	0,10	0,08	0,07
CACAO	11.973.780	18.449.751	21.693.299	19,87	18,64	11,66
CAFE	1.793.255	3.105.335	4.532.728	2,98	3,14	2,44
CANNE A SUCRE	11.229.327	19.553.855	43.714.824	18,63	19,75	23,40
OIGNON	435.573	556.883	1.712.989	0,72	0,56	0,92
COCO	1.123.240	1.953.949	3.478.567	1,86	1,97	1,87
FEIJÃO	4.827.542	9.140.257	21.776.468	8,01	9,23	11,70
TABAC	1.205.732	1.178.190	2.556.046	2,00	1,19	1,37
ORANGE	1.221.306	2.145.273	3.746.438	2,03	2,17	2,01
MALVA	19.796	40.843	140.672	0,03	0,04	0,08
RICIN	766.527	1.712.884	2.044.590	1,27	1,73	1,10
MANIOQUE	6.921.651	12.424.783	31.540.034	11,49	12,55	16,95
MAIS	3.158.333	4.989.561	6.259.692	5,24	5,04	3,36
PIMENT	51.811	66.723	163.131	0,09	0,07	0,09
RAMI	1.320	1.800	4.245	0,00	0,00	0,00
AGAVE	875.755	2.232.250	3.732.831	1,45	2,26	2,01
SOJA	25.208	15.077	37.849	0,04	0,02	0,02
SORGNO	8.027	15.233	18.757	0,01	0,02	0,01
TOMATE	855.647	1.589.277	2.747.867	1,42	1,61	1,48
RAISIN	29.694	51.909	216.356	0,05	0,05	0,12

TABLEAU (I-3) - VALEUR DE LA PRODUCTION (REELLE ET POURCENTAGE)

que de l'ensemble.

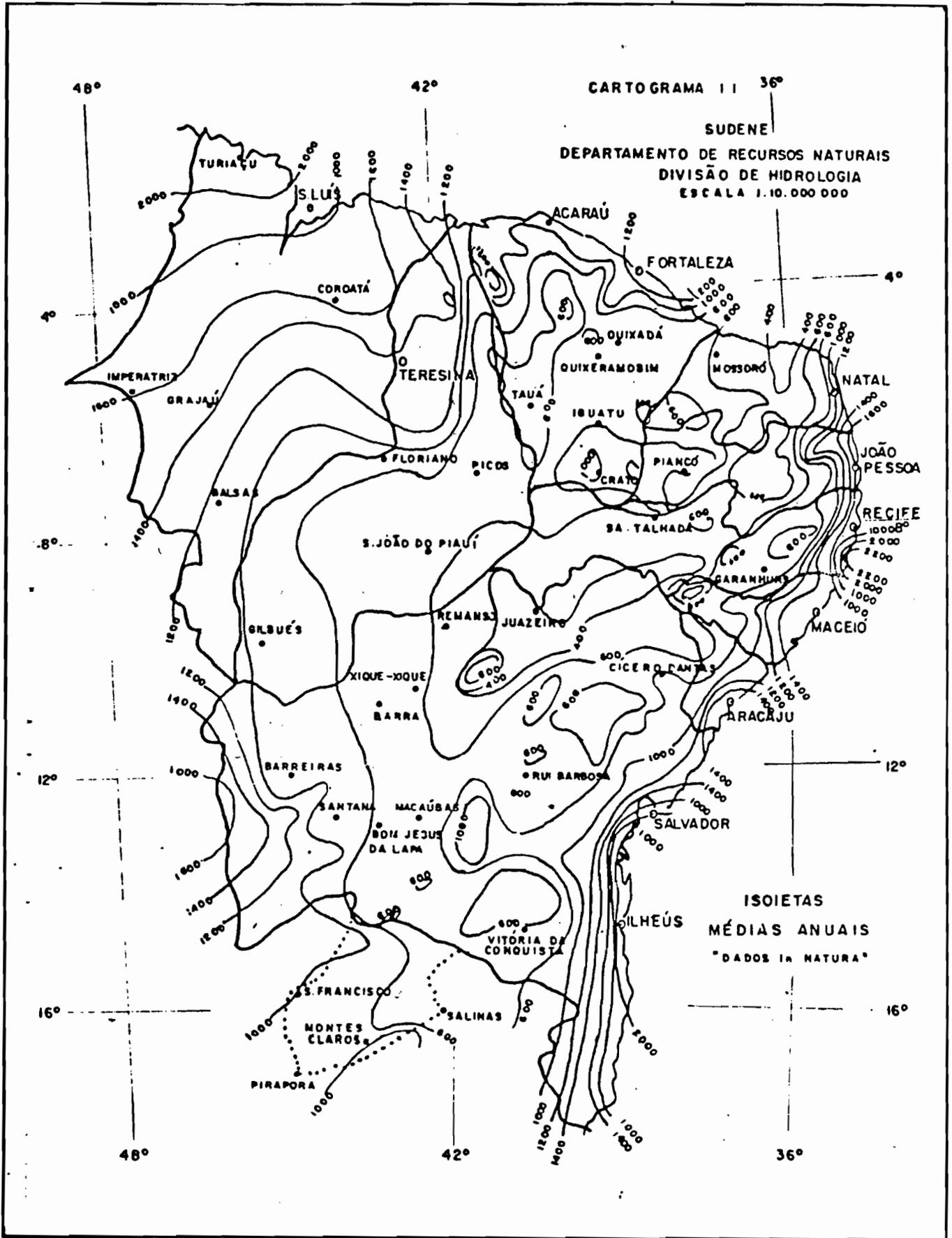
Ceci montre bien l'importance que pourrait avoir le développement de l'irrigation dans l'augmentation des rendements pour des cultures comme le coton qui multiplie par plus de 10 sa production en régime irrigué.

#### - Climat et sécheresse

Un coup d'oeil sur une carte du monde nous montre que le Nordeste brésilien se trouve à la même latitude que l'exubérante Indonésie et la Jungle de Bornéo ainsi que du Zaïre et de l'Angola; on comprend mal alors que cette région soit régulièrement la victime de sécheresses dramatiques. Cette irrégularité climatique est en fait le résultat de différents systèmes de circulations atmosphériques liés à la proximité de la mer qui induisent une pluviométrie faible et irrégulière.

Si l'on se borne à regarder la carte des isohyètes du Nordeste (1. 4) on constatera qu'au sein même du Sertão les moyennes annuelles varient entre 300 mm et 1000 mm. Cette grande variabilité spatiale n'indique que partiellement la cause des sécheresses puisque 12% seulement des terres reçoit moins de 500 mm, pluviométrie somme toute non négligeable : la spécificité du Nordeste est liée à la grande irrégularité des précipitations: d'une part au sein d'une même année, puisqu'il n'est pas rare de voir 40 ou 50% du total annuel tomber en moins d'une semaine (on a vu ainsi dans le Pernambouc en plein milieu de la dernière grande sécheresse de 5 ans, une pluie de période de retour plus que centennale), d'autre part dans la variabilité d'une année sur l'autre comme le prouvent les inondations exceptionnelles de cette année, succédant à la majeure sécheresse du siècle. Il résulte de ceci qu'il sera souvent dangereux de parler de pluviométrie moyenne, notion à laquelle on associe une "année moyenne" ou "normale". Au Nordeste une année normale est le plus souvent anormale en regard de la moyenne.

Cette grande irrégularité des pluies provoque parfois ce que l'on appelle "la sécheresse verte": le paysan nordestin attendra en général les premières pluies pour planter, ou encore se fiera-t-il plutôt au retour de "l'Asa branca" dans le ciel ou à l'éclosion des fleurs de Mandacaru. Il arrive alors que des pluies intenses et prolongées succèdent aux semailles et les pourrissent par excès d'humidité; certaines années le phénomène se répète pour plusieurs semailles successives et provoque ainsi des récoltes nulles.



CARTE DES ISOHYETES (1.4)

L'histoire a enregistré de nombreuses séquences sèches entre lesquelles se distinguent la sécheresse de 1876/1880 et celle de 1979/1983. On estime que la moitié de la population d'alors soit 500.000 personnes, moururent pendant la Grande Sécheresse de 1877. On a, par ailleurs, pu observer une périodicité de l'ordre de 9-12 ans. La carte (1.5) donne une idée de l'intensité du risque de sécheresse et de sa distribution dans le Nordeste. Le drame toujours renouvelé de la sécheresse provoque un exode rural qui vient aggraver les problèmes endémiques classiques des grandes métropoles; quand il ne s'arrache pas à sa terre le nordestin ira s'inscrire à un "front d'urgence" où il travaillera pour un salaire dérisoire. Ces fronts de travail sont lancés par le gouvernement pour maintenir la population en état de survie et réaliser des ouvrages d'utilité publique. On a pu observer des dernières années que ces travaux concernaient malheureusement souvent des usages privés et contribuaient à fortifier les grandes propriétés.

Pour lutter contre ce fléau naturel, le gouvernement brésilien a créé au début de siècle le DNOCS (Département National des Ouvrages Contre la Sécheresse) dont le rôle était de développer des ouvrages publics de stockage de l'eau: ces grands réservoirs (açudes) n'ont pas résolu les problèmes du Nordeste car la réalisation des périmètres d'irrigation correspondants a été plus que déficiente et parce que les problèmes fondamentaux sont autres.

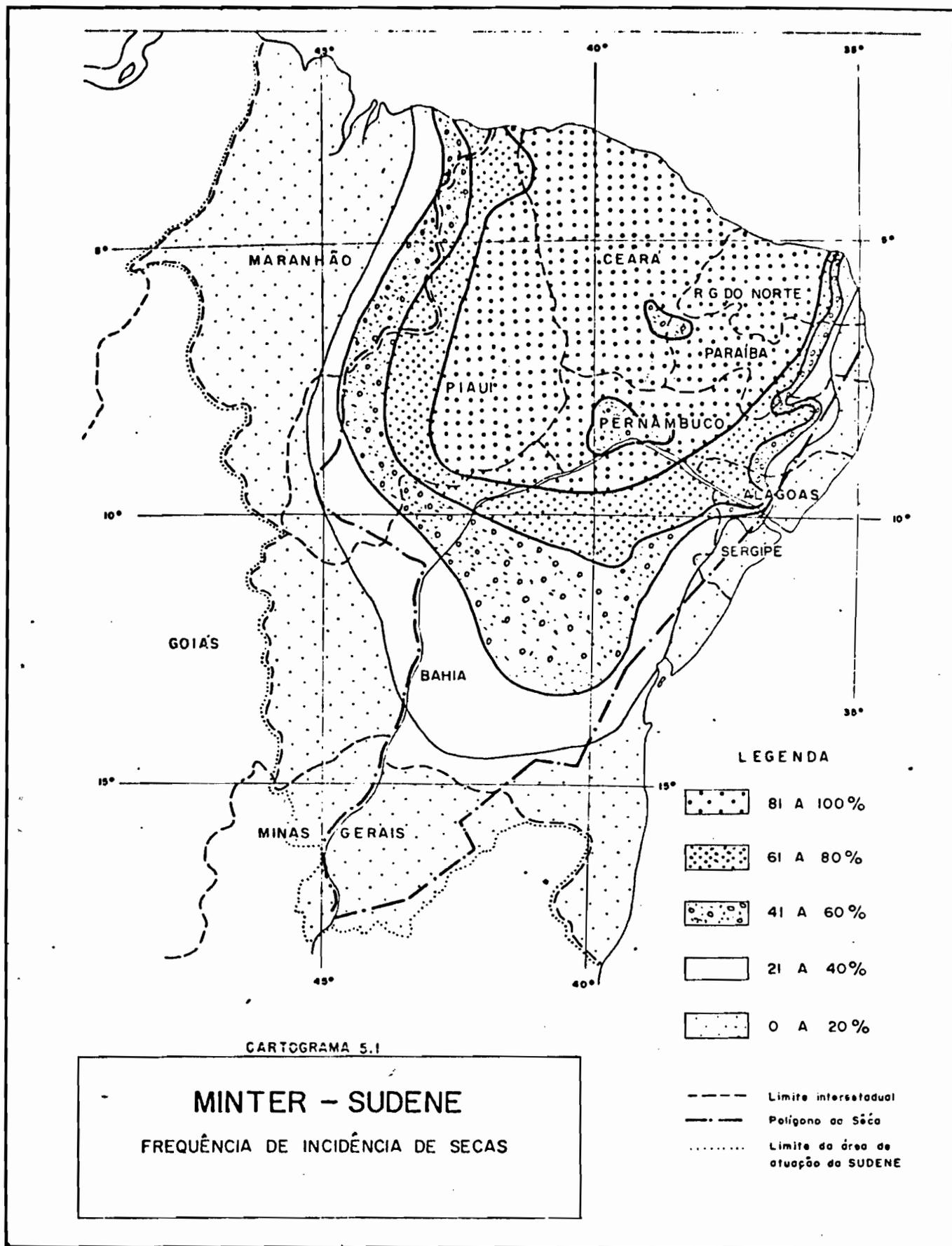
#### - L'eau dans Nordeste

Avant de faire le point sur l'état de développement de l'irrigation et ses perspectives nous devons définir quelles sont les ressources en eau disponibles.

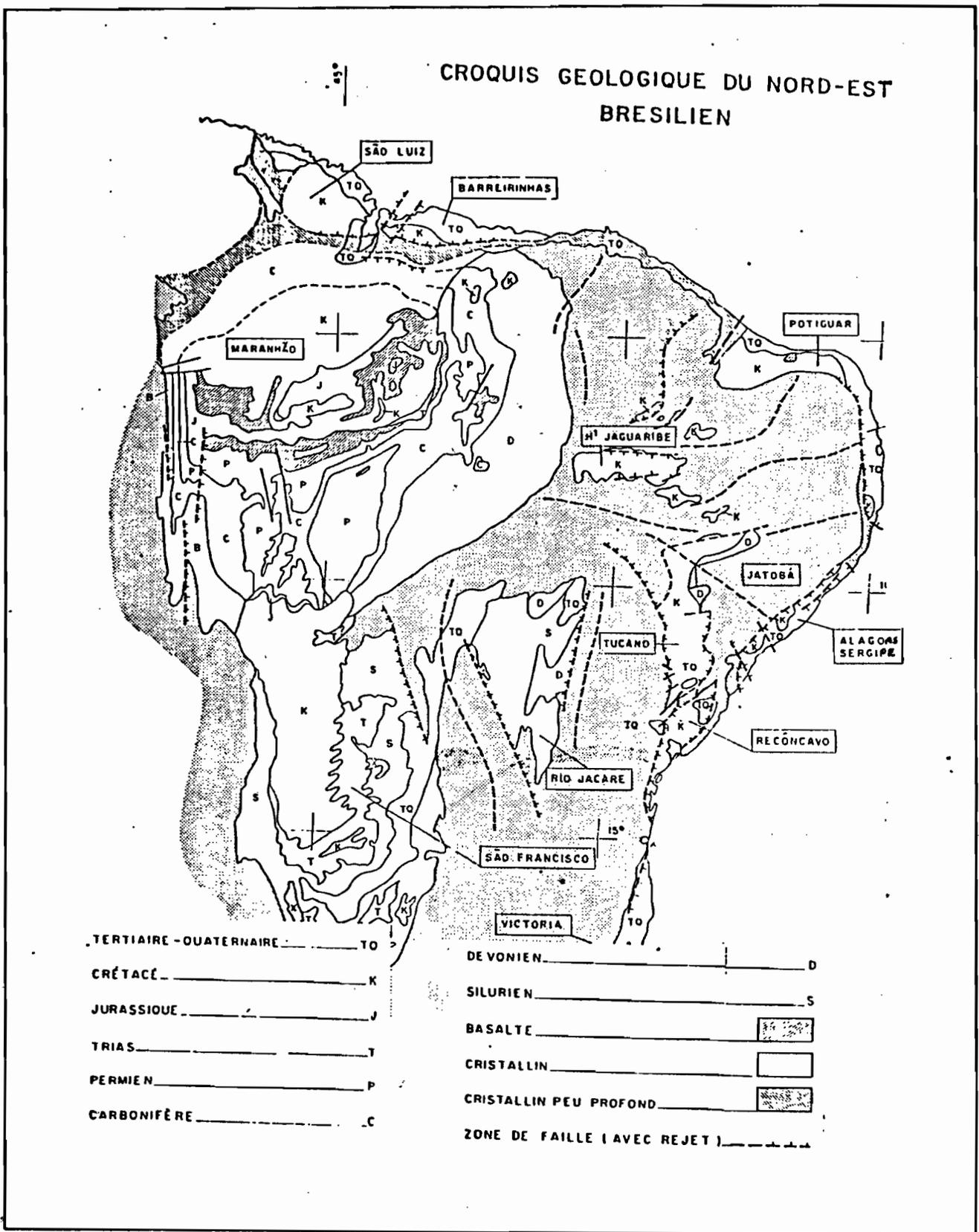
D'un point de vue géologique on distingue deux grandes zones principales d'égale importance: celle des bassins sédimentaires et celle du socle cristallin, tel que le montre la carte géologique (1.6).

Les réserves en eau sont tout d'abord celles des grands fleuves du Nordeste, c'est à dire principalement le Parnaíba, le Jaguaribe et le São Francisco. La potentialité de ces rivières pour l'irrigation est très importante et ils demeurent sous-exploités.

Dans les bassins sédimentaires la majeure partie des ressources est constituée des réserves souterraines auxquelles les conditions géologiques confèrent souvent des propriétés d'artésianisme. Ces ressources ont considéra-



(1.5) FREQUENCE DE L'INCIDENCE DES SECHERESSES



CROQUIS GEOLOGIQUE (1.6)

bles et en général sous-utilisées.

Les réserves souterraines des zones cristallines sont faibles car l'infiltration est très réduite en dehors de quelques failles locales. Dans ces régions il faut avoir recours à des stockages superficiels qui, s'ils profitent d'un écoulement superficiel important, seront soumis à une importante évaporation. La carte (1.7) donne les évaporations annuelles dans le Nordeste et l'on constate que ce phénomène peut atteindre 3 mètres par an. Un cas particulier d'eau souterraine dans ces régions est constituée par les réserves des alluvions des rios ce qui représente 5% de la superficie totale, soit 35.000 km<sup>2</sup>. Ces ressources sont parfois utilisées pour l'irrigation à partir de puits (puits amazone), car les terres correspondantes sont bonnes, mais pourraient l'être d'avantage.

#### - L'irrigation dans le Nordeste

L'irrigation dans le Nordeste n'a commencé que très tardivement, vers 1970, et on ne comptait à cette époque que 3.000 hectares équipés.

De manière générale, le Brésil qui se place au cinquième rang mondial pour les ressources en eau ne se trouve qu'au 31<sup>ème</sup> pour ce qui est de leur utilisation.

Le Nordeste ne compte qu'un peu plus de 140.000 hectares irrigués alors que le reste du pays en totalise plus d'un million. On estime que 5 millions d'hectares de terres sont susceptibles d'être irrigués alors qu'à l'heure actuelle la demande en eau d'irrigation n'atteint que 2% des ressources hydriques superficielles: les potentialités de développement sont donc considérables.

La superficie irriguée dans le Nordeste se décompose comme suit (janvier 1985):

irrigation public:	- DNOCS (colons)	23.658 ha
	- CODEVASF (colons)	19.872 ha
	- CODEVASF (entreprises)	22.183 ha
irrigation privée:		<u>80.919 ha</u>
		146.632 ha implantés

La CODEVASF est la compagnie d'aménagement du São Francisco et a mis en place des périmètres publics comme l'a fait de son côté le DNOCS à par-



tir des grands açudes.

L'irrigation privée est parfois le fait de propriétaires suffisamment riche pour se permettre de faire l'investissement et qui s'adressent à des bureaux d'études privés. Cette irrigation ne représente cependant qu'un tiers de l'irrigation privée, le restant correspondant aux projets implantés dans le cadre de programmes spéciaux (PROVARZEAS, SERTANEJO, PROHIDRO...) approuvés et suivis par la SUDENE.

#### - Cadre du présent travail

En dehors de toute raison politique, le retard du Nordeste dans le domaine de l'irrigation peut s'expliquer par l'absence totale d'une tradition de l'irrigation, la région ayant principalement gardé sa vocation de zone d'élevage.

Ignorance, réticences, la résistance culturelle à l'irrigation semble peu à peu vaincue: il y a maintenant sept candidats pour une place dans les périmètres du DNOCS, alors que les premiers périmètres expérimentaux (type Bebedouro) étaient assortis d'incitations spectaculaires.

Les derniers projets de développement du Nordeste se proposent de faire porter leurs efforts sur l'extension de la petite irrigation. C'est le petit producteur qui n'a jusque là que peu profité des sommes investies dans la région qui est visé. Il faut bien comprendre que l'importance des petites propriétés dans la production régionale est essentielle. Si les propriétés de moins de 10 ha n'occupent que 4% de la superficie du Nordeste elles sont en revanche la base de la production (32%). Les grandes propriétés (de plus de 1000 ha) n'y contribuent pour leur part que dans une proportion de 7,5%.

Les premières produisent 72% du riz, 68% du feijão, 67% du manioc, 57% du maïs alors que pour les propriétés de plus de 500 ha les productions respectives sont dérisoires: 3%, 3%, 2% et 5%.

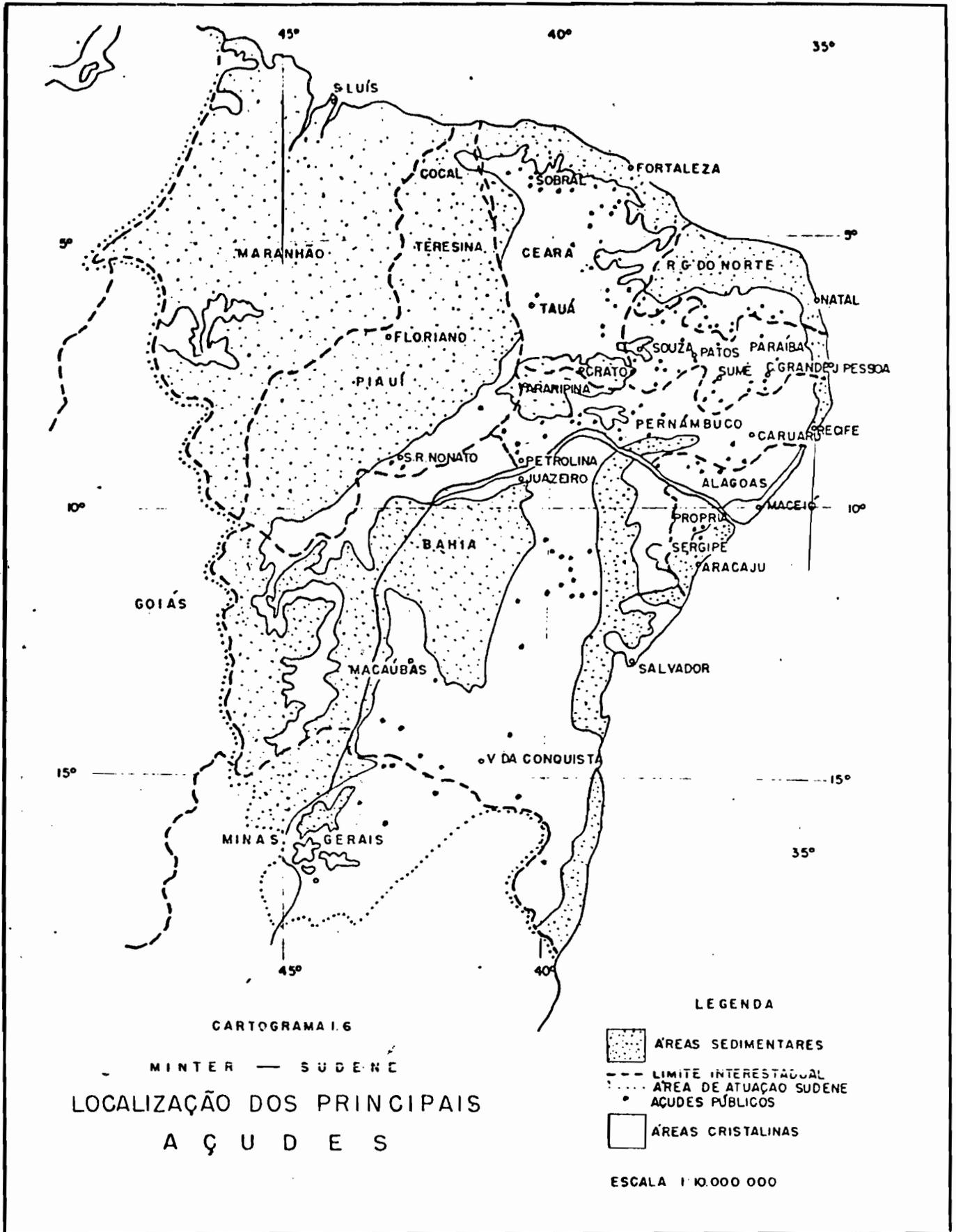
Beaucoup voient dans le développement de l'irrigation la recette magique qui devrait sortir le Nordeste de sa misère séculaire. D'autres objectent avec quelque raison que c'est dans la zone la plus humide, à savoir la zone côtière de la Mata, que l'exploitation et la pauvreté atteignent leur comble. Il semble plus juste de ne pas opposer ces deux aspects mais de considérer que les solutions techniques, encore peu développées, permettant de réduire l'impact des sécheresses ne peuvent être viables que si d'autres mesures politiques et sociales sont prises dans le même temps.

Tout le monde semble s'accorder sur la nécessité d'une réforme agraire susceptible de modifier une structure sociale archaïque et une structure foncière inique. 5% des propriétaires fonciers possèdent 70% de la terre, perpétuant ainsi le système latifundiste hérité des grandes exploitations d'élevage. La conséquence directe de ce déséquilibre est la présence de centaines de milliers d'hectares cultivables laissés à l'abandon tandis que des légions d'affamés sans terre errent par le pays. Mais une réforme agraire, comme un développement technologique, demandent, outre une réelle volonté politique, un accompagnement et un suivi technique, des facilités d'accès au crédit rural, tout un effort pédagogique sans lesquels ils sont voués à l'échec.

La majeure partie des ressources en eau disponibles en zone cristalline sont, on l'a vu, constituées par les açudes. On appelle açude, par abus de langage, toute retenue d'eau sans distinction de taille. Les petits collinaires sans fondations réelles seront de préférence nommés "barreiros" et les grands açudes, "barragem". Le plus grand nombre d'entre eux se situent dans une catégorie de volume et dans une typologie qui les rapprochent de ce que l'on nomme collinaire. Leur capacité peut atteindre plusieurs milliards de  $m^3$ , comme pour l'açude ORÓS et, à l'inverse, se réduire à quelques milliers de  $m^3$ . Selon les estimations on considère qu'il y a entre 40.000 et 100.000 açudes dans le Nordeste et que leur nombre pourrait être accru. La carte (1.8), quoiqu'ancienne, donne une idée de la répartition de la densité des açudes les plus importants et l'on peut noter qu'ils se trouvent presque en totalité dans les zones cristallines. Quand on parcourt le Sertão on se rend compte que très peu de ces açudes sont utilisés pour l'irrigation et qu'ils le sont en général pour l'alimentation animale.

Il y a bien sûr de nombreuses raisons à cet état de fait comme on l'a vu, manque de savoir faire, de crédit rural pour investir, mais ils'ajoute ici une composante psychologique fondamentale: le paysan, dans une région soumise à de rudes sécheresses, à tendance à considérer son açude comme un sanctuaire et répugne à en utiliser l'eau. Il résulte de cette attitude une perte par évaporation considérable et un gaspillage de cette ressource précieuse qu'est l'eau.

C'est du problème de l'optimisation de l'utilisation de ces açudes pour l'irrigation que l'étude qui suit va débattre.



(I-8) LOCALISATION DES PRINCIPAUX GRANDS AÇUDES

## II - LES AÇUDES ET LEUR GEOMETRIE

### 1) GENERALITES

Il est d'une grande importance pour notre étude de pouvoir disposer d'une formule mathématique rendant compte de la géométrie des réservoirs.

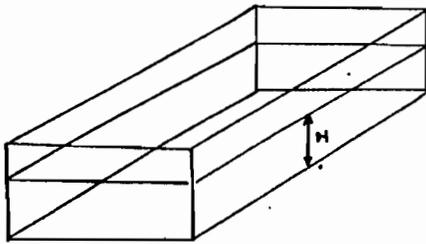
D'abord pour avoir une idée la plus précise possible des volumes réellement disponibles et ensuite pour pouvoir estimer à tout instant les pertes par évaporation. L'idée la plus naturelle consiste à vouloir relier le volume stocké (V) et la surface du miroir d'eau (S) à une hauteur (H) quelconque.

Considerant les formes géométriques les plus simples, parallélépipède, prisme, pyramide, on est amené de manière évidente à rechercher une relation du type

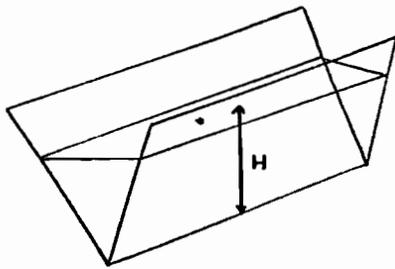
$$V = KH^{\alpha}$$

ce qui par dérivation, en supposant  $\alpha$  constant, donne par la même

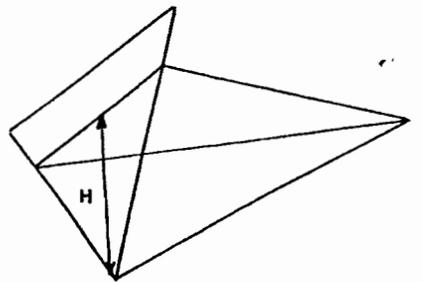
$$S = \alpha KH^{\alpha-1}$$



$$V = KH$$



$$V = KH^2$$

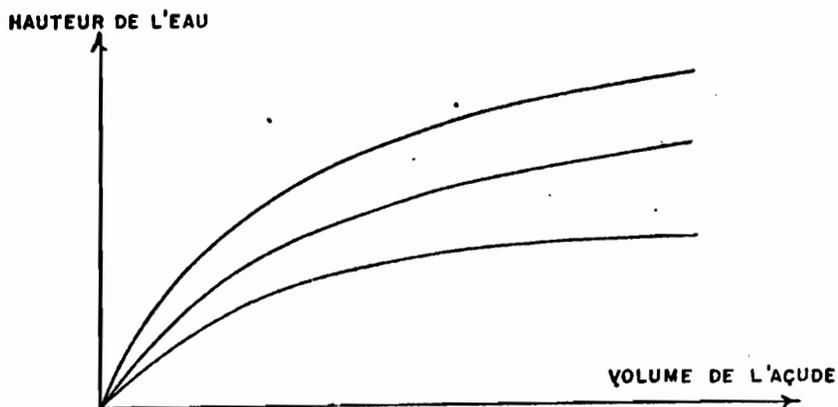


$$V = KH^3$$

Expérimentalement on obtient des courbes  $S = f(H)$  en calculant (par photo aérienne ou avec des théodolites) la surface du plan d'eau pour une série de valeurs de H.

On en déduit la courbe  $V = f(H)$  par simple intégration.

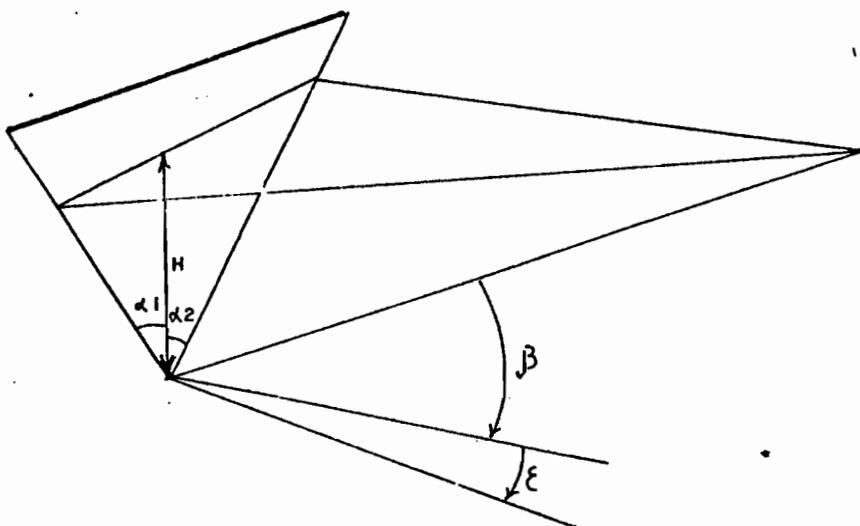
Les courbes obtenues sont, typiquement, de la forme suivante:



La relation  $V = KH^\alpha$  fait apparaître deux paramètres,  $K$  et  $\alpha$ , qui seront des caractéristiques du réservoir.

Si l'on prend  $\alpha = 3$ , cas de la pyramide, on peut relier  $K$  à l'angle d'ouverture du cône de même volume ( $K = \frac{\pi + g^2 \beta}{3}$ ).

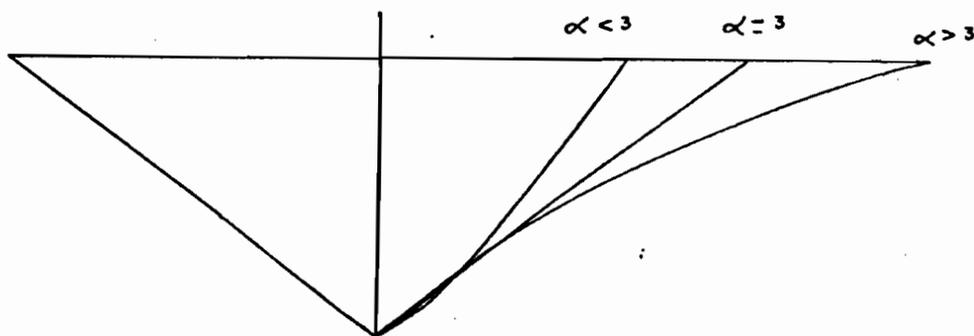
$K$  sera donc assimilé à un coefficient d'ouverture qui, dans le cas de la pyramide, se calcule d'ailleurs facilement.



$$K = \cotg \beta \operatorname{cas} \epsilon | \operatorname{tg}^{\alpha_1} + \operatorname{tg}^{\alpha_2} |$$

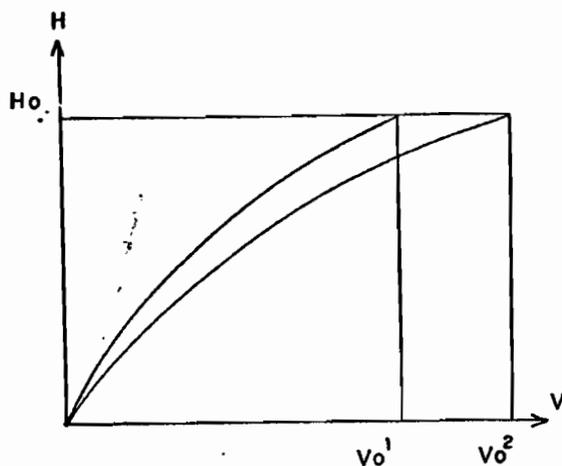
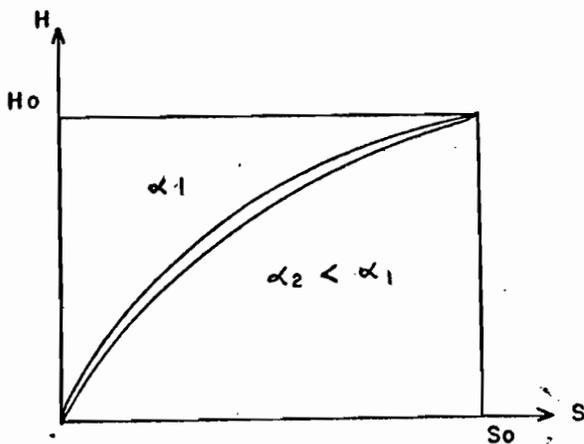
Pour un coefficient d'ouverture donné, l'exposant ( $\alpha$ ) sera relié à la forme des bords de l'açude.

Si l'on se ramène de nouveau au cône de révolution on voit que l'on aura grossièrement les formes suivantes :



$\alpha$  sera donc identifié à un coefficient de forme.

On peut déjà se faire une idée de l'importance de  $\alpha$  en considérant deux açudes de même surface ( $S_0$ ) à la Hauteur ( $H_0$ ) et de ( $\alpha$ ) différents,  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  :



$$S_0 = L_1 K H_0^{\alpha_1 - 1} \Rightarrow K = \frac{S_0}{L_1 H_0^{\alpha_1 - 1}}$$

$$S_2 = L_2 K H_0^{\alpha_2 - 1}$$

$$S_1 = S_0 \left(\frac{H}{H_0}\right)^{\alpha_1 - 1}$$

$$S_2 = S_0 \left(\frac{H}{H_0}\right)^{\alpha_2 - 1}$$

$$(V_0 = \frac{H_0 S_0}{\alpha} \left(\frac{H}{H_0}\right)^{\alpha})$$

$$\text{en fait: } V_0 = \frac{S_0 H_0}{\alpha}$$

Le rapport des volumes stockés sur la hauteur  $H_0$  pour les deux valeurs de ( $\alpha$ ) est donc

$$\frac{V_0^1}{V_0^2} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1}$$

figure

$$(\alpha_2 < \alpha_1)$$

Entre les açudes de coefficient de forme 2 et 3 et de même surface en ( $H_0$ ) le rapport des volumes est de  $\frac{3}{2}$  soit une différence de 50%.

Pour un même coefficient d'ouverture, le rapport des volumes est

$$\frac{V_0^1}{V_0^2} = \frac{K}{K} (H_0)^{\alpha_1 - \alpha_2}$$

$$\frac{V_0^1}{V_0^2} = H_0^{\alpha_1 - \alpha_2}$$

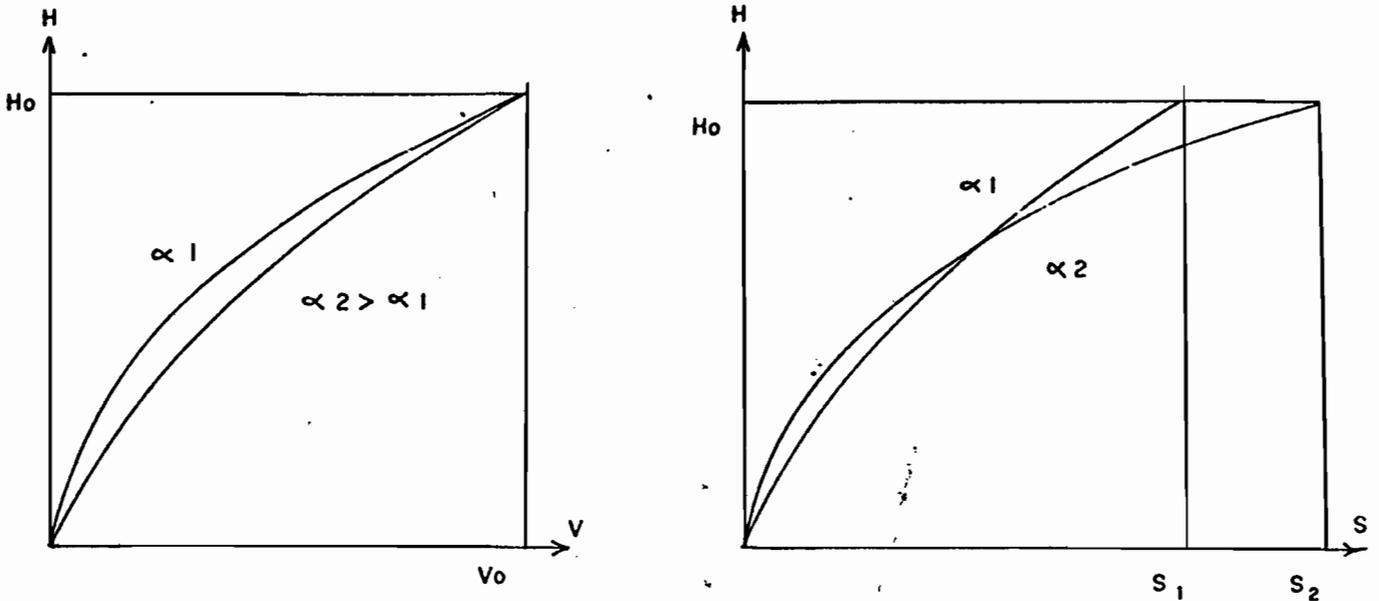
ce qui, par exemple, pour  $\alpha_1 = 2$

$$\alpha_2 = 3$$

$$H_0 = 4$$

donne un rapport de  $\frac{1}{4}$

Si l'on considère maintenant deux açudes de même volume, pour  $H=H_0$ , et de ( $\alpha$ ) différents on aura bien sûr des surfaces  $S_0$  différentes;  $S_1$  et  $S_2$



On trouve un rapport

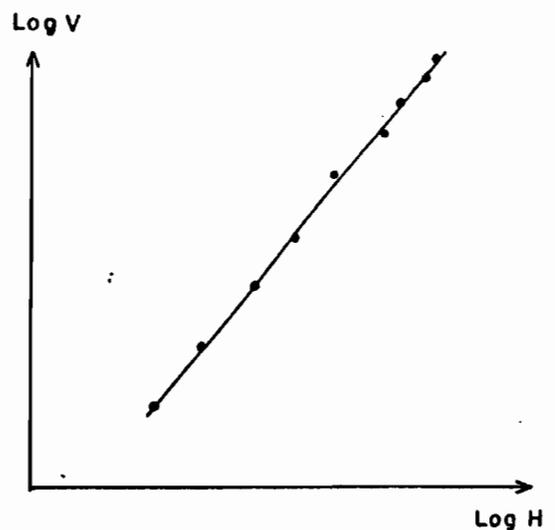
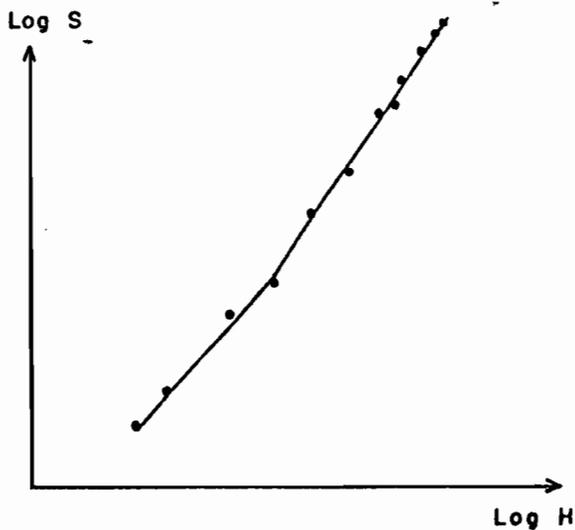
$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}$$

## 2) DETERMINATION DE K et $\alpha$ : CAS IDEAL

Supposons pour commencer que l'on a accès à des courbes  $V=f(H)$  et  $S=f(H)$  déterminées par calcul précis des miroirs d'eau pour un grand nombre de hauteurs.

On peut alors reporter les points  $(H,S)$  et  $(H,V)$  sur un papier log-log et prendre la pente de la droite obtenue par regression lineaire. On obtient ainsi, normalement, des coefficients  $(\alpha - 1)$  et  $(\alpha)$ .

Pratiquement on constate que les points sont effectivement plus ou moins alignés.



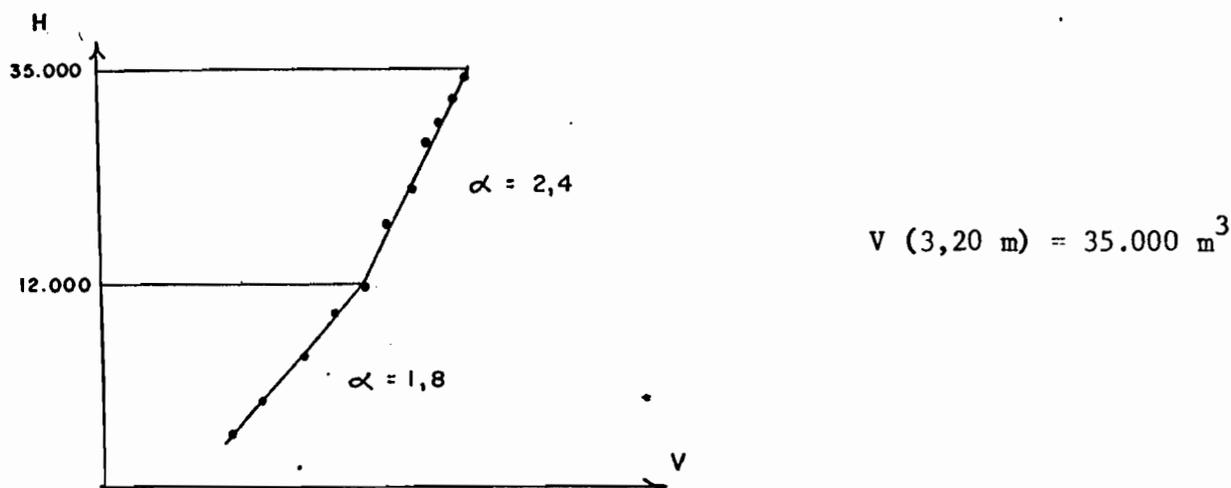
Il n'est pas indifférent, comme le suggère la figure 1, d'étudier la courbe  $V=f(H)$  ou la courbe  $S=f(H)$ . la première étant obtenue par intégration de la seconde, elle induit un lissage qui peut faire disparaître certaines particularités.

Ceci est apparent sur les courbes expérimentales  $S=f(H)$  qui présentent parfois des irrégularités et des points d'inflexions qui disparaissent dans le passage au volume.

Pour une première détermination du  $\alpha$  on pourra prendre la courbe  $V=f(H)$ ; si l'on veut relier  $\alpha$  aux caractéristiques naturelles observées de l'açude on utilisera  $S=f(H)$  qui fera souvent apparaître deux pentes donc deux valeurs de ( $\alpha$ ) variables chacune sur un intervalle.

Dans ce cas, qui peut aussi concerner  $V=f(H)$ , on peut prendre une moyenne pondérée par les volumes correspondants aux deux branches.

Prenons par exemple l'açude qui présente la courbe suivante  $V(H)$ ;



La partie  $\alpha = 1,8$  concerne environ le tiers du volume total et la partie  $\alpha = 2,4$  les  $2/3$  restant.

On prendra alors  $\alpha = \frac{2 \times 2,4 + 1,8}{3} = 2,2$

On constate pratiquement que les points bas de la courbe induisent presque toujours des variations de ( $\alpha$ ). Il est alors bon de commencer le tracé des courbes à partir d'une hauteur correspondant à 10% du volume potentiellement stockable.

Le coefficient ( $\alpha$ ) étant déterminé on calculera (K) en prenant un couple (H,V), ou (H) sera une hauteur moyenne (par exemple celle qui donne  $V = \frac{V_0}{2}$ ).

Une deuxième méthode plus rapide consiste à utiliser le triplet

connu ( $H_0$ ,  $S_0$ ,  $V_0$ ) et de tirer ( $K$ ) et ( $\alpha$ ) des deux équations:

$$V_0 = K H_0^\alpha$$

$$S_0 = \alpha K H_0^{\alpha-1}$$

ce qui donne

$$\alpha = \frac{S_0 H_0}{V_0} \quad \text{et} \quad K = \frac{V_0}{\frac{H_0 S_0}{V_0}}$$

Ces valeurs intègrent à priori les variations de ( $\alpha$ ) et procurent donc une moyenne. En contrepartie ils sont assez sensibles aux erreurs de mesures, en particulier sur la profondeur.

### 3) ORDRE DE GRANDEUR DE ( $\alpha$ ) ET ( $K$ )

Pour tenter d'obtenir un ordre de grandeur de ces deux coefficients nous avons utilisé trois échantillons d'açudes.

- A - 24 açudes de l'ouest de la Paraíba, étudiés par l'Université de Campina Grande.
- B - 10 açudes étudiés par le DRN, dans le cadre de l'étude de bas sins représentatifs.
- C - 104 açudes choisis parmi ceux étudiés par la FIAM/SUDENE, et pour lesquels on dispose des valeurs ( $H_0$ ,  $S_0$ ,  $V_0$ ).

Tous ces açudes ont un volume compris entre  $6000 \text{ m}^3$  et  $1.200.000 \text{ m}^3$ .

Le tableau (2.1) présente les résultats obtenus pour chaque échantillon.

$\overline{\alpha}_{\text{inf}}$  (resp.  $\overline{\alpha}_{\text{sup}}$ ) représente la moyenne des ( $\alpha$ ) inférieurs (resp. supérieurs) à la moyenne ( $\overline{\alpha}$ ).

$(\alpha < \alpha_m)_m$  (resp.  $\alpha > \alpha_m)_m$  représente la médiane des ( $\alpha$ ) inférieurs (resp. supérieurs) à la médiane  $\alpha_m$ .

$\overline{\alpha}_{\text{graphique}}$  est la moyenne des ( $\alpha$ ) obtenus par la méthode graphique.

L'échantillonnage (c) a été purgé pour les calculs sur  $\overline{K}$ , de 4 açudes "pathologiques" dont les caractéristiques ( $\alpha$ ,  $K$ ) calculées sont

Echan- tillon	Nombre d'açudes	$\bar{\alpha}$ moyenne	$\overline{\alpha < \alpha}$	$\overline{\alpha < \alpha}$	$\alpha_m$ mediane	$(\alpha < \alpha_m)_m$	$(\alpha < \alpha_m)_m$	$\bar{K}$ moyenne	$K_m$ mediane	$(K < K_m)_m$	$(K > K_m)_m$	$\bar{\alpha}_{\text{graphique}}$	$(\alpha_{\text{grap}})_m$	rang moyenne
A	25	2,60	2,33	3,04	2,5	2,3	3	1967	1284	900	2000	2,55 2,24/2,95	2,4 2,2/2,9	$\bar{\alpha}$ :14 $\bar{K}$ :19
A + B	34	2,7	2,3	3,1	2,7	2,3	3	2144	964	780	1540	/	/	$\bar{K}$ :27
C	104 (100)	2,17	1,7	2,5	2,2	1,8	2,5	2660	1700	500	3660	/	/	
A + B + C	138 (134)	2,3	1,83	2,6	2,3	1,9	2,7	2413	1392	533	3200	/	/	$\bar{K}$ :93

TABLEAU (2-1)

(1,5; 16.000) (1,7; 46.000) (1,7; 39.000) (1,3; 26.000).

Ces valeurs extrêmes font passer  $\bar{K}$  de 2660 à 3660 ce qui explique que l'on ait préféré présenter les médianes, plus significatives.

On constate qu'il y a une différence très nette entre  $\bar{\alpha}(A+B)$  et  $\bar{\alpha}(C)$ , respectivement 2,7 et 2,17.

Il se pose ici un problème de critique des données et deux arguments nous poussent à conserver la première valeur. Tout d'abord la qualité des relevés, assurée dans l'échantillonnage (A+B) ne l'est pas pour (C); le calcul effectué à partir d'un nombre restreint de point (H,S), voire même d'une formule, peut, selon la méthode employée, expliquer une tendance à minorer ( $\alpha$ ). En second lieu, une valeur de 2,7 est beaucoup plus compatible avec la géométrie même: on trouve dans l'échantillonnage (C) des valeurs de ( $\alpha$ ) de 1,2 ce qui correspond pratiquement à un açude parallélépipédique: on peut trouver cette valeur pour des açudes creusés mais l'importance du volume conduit parfois à douter que l'on soit dans ce cas.

Ces raisons nous conduisent à retenir les valeurs suivantes

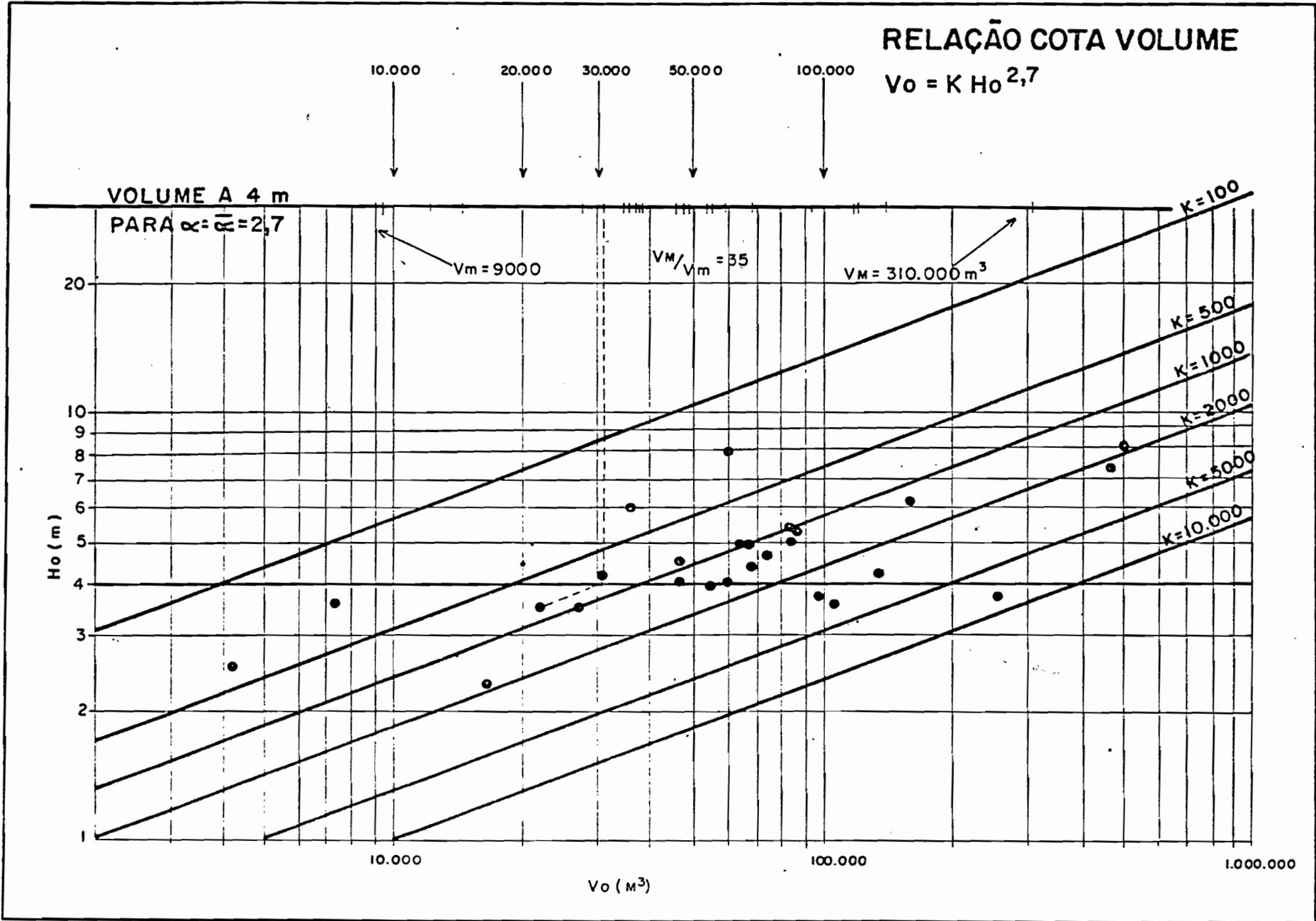
$\bar{\alpha} = 2,7$	
$\bar{\alpha}_{\text{inf}} = 2,3$	$\bar{\alpha}_{\text{sup}} = 3,1$

En ce qui concerne le coefficient d'ouverture K on adoptera, pour fixer des ordres de grandeur, une valeur médiane de 1200.

La grande variabilité de ce coefficient apparaît clairement si l'on dispose sur un graphique log-log les points ( $V_0, H_0$ ): il nous suffit alors de tracer des droites parallèles de pente  $\alpha = \bar{\alpha} = 2,7$  qui coupent l'axe des abscisses en log K. Les açudes de même loi de volume se retrouvent ainsi dans les mêmes "fuseaux" ainsi tracés.

Pour obtenir un critère de comparaison plus parlant on peut aussi comparer les volumes des açudes à une valeur  $H_0 = 4m$  arbitrairement fixée: sur notre graphique (2.2) il suffit de projeter nos points sur l'axe  $H_0 = 4m$  selon la direction des droites de pente  $\alpha$ .

On obtient ainsi une visualisation graphique de la répartition des volumes à  $4m$  ( $V_4$ ). On constate, pour l'échantillonnage A+B, que la moyenne se situe aux alentours de  $48.000 m^3$  et que la dispersion est très grande: le rapport entre les valeurs extrêmes,  $V_M/V_m$ , est de 35.



GRAPHIQUE (2-2)

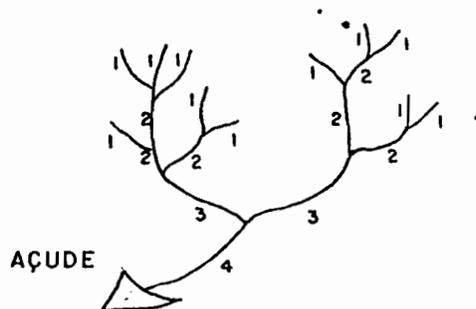
Sur l'échantillonnage C ce rapport peut atteindre plusieurs centaines. On retiendra donc ici qu'un açude de 4 mètres de profondeur peut contenir un volume d'eau variant entre quelques milliers et quelques centaines de milliers de  $m^3$  avec une moyenne située entre 40.000 et 60.000

#### 4) CORRELATIONS ENTRE (K), ( $\alpha$ ) ET D'AUTRES PARAMETRES

A/ On est tenté, au vu de l'interprétation géométrique de (K) et ( $\alpha$ ), d'essayer de relier ces paramètres aux caractéristiques morphologiques et hydrologiques.

Il est clair, par exemple, qu'un açude situé dans une grande plaine alluviale aura tendance à être plus ouvert qu'un açude de montagne situé dans une vallée plus encaissée. On peut penser rendre compte d'une telle caractéristique avec un paramètre (N), ordre de la rivière alimentant l'açude. Cet ordre se définit en traçant le réseau hydrographique du bassin d'alimentation de l'açude puis, en portant des sources, en déterminant l'ordre de chaque tronçon de rivière: celui-ci est égal au plus grand des ordres des tronçons arrivant à son noeud amont ou augmente d'une unité s'il y converge plusieurs tronçons d'ordre maximum.

Ex:



On peut aussi définir (R), indice de relief, proposé par G. Guiscafre et P. Dubreuil et qui est utilisé en Hydrologie. Soit  $I_G = \frac{D}{L}$  ou D est l'altitude séparant  $H_5$  et  $H_{95}$  définis comme la partie du bassin la plus basse et de superficie 5% du total et comme la partie la plus haute et de superficie 5% du total.

Cette définition permet d'éliminer certains points singuliers qui pourraient fausser l'indice.

L est la longueur du rectangle équivalent au bassin c'est à dire un rectangle de même périmètre et même indice de compacité.

$$L = \frac{CA^{1/2}}{1,28} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,28}{C}\right)^2}\right)$$

ou A = superficie du bassin

P = périmètre du bassin

C = indice de compacité (GRAVELIUS)

$$= 0,282 \text{ PA}^{-1/2}$$

$I_G$  variant avec la superficie du bassin

On définit

$$DS = I_G \times \sqrt{A}$$

et on adopte la classification suivante :

$R_1$	relief très faible	$DS < 10m$
$R_2$	relief faible	$10 < DS < 25$
$R_3$	relief assez faible	$25 < DS < 50$
$R_4$	relief modéré	$50 < DS < 100$
$R_5$	relief assez fort	$100 < DS < 250$
$R_6$	relief fort	$250 < DS < 500$
$R_7$	relief très fort	$500 < DS < 1000$

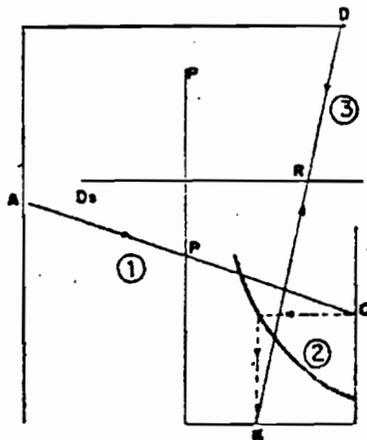
Le calcul de DS est simplifié par l'utilisation de l'abaque suivant (figure 3.1)

Il est évident que cet indice doit être relatif à une certaine classe de superficie de bassin, par exemple de quelque dizaines de  $km^2$ . Ceci implique des contraintes sur la précision des courbes de niveau des cartes éventuellement utilisées.

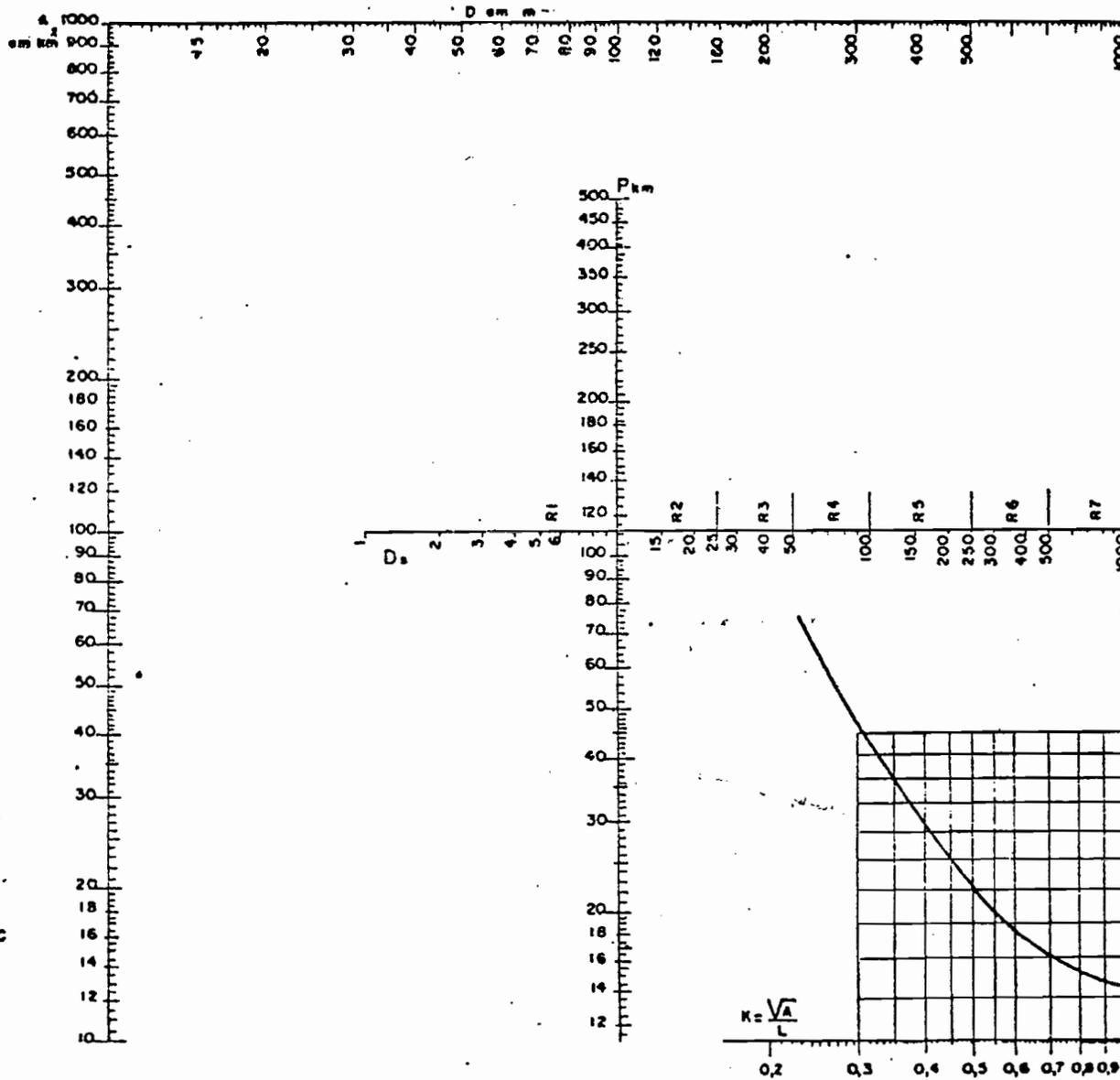
A = AIRE DU BASSIN  
 P = PERIMETRE DU BASSIN  
 D = DENIVELE

R = INDICE DE RELIEF

Modo de operação



segundo J. GUISCAFRE



GRAPHIQUE (3-1) ABAQUE DE CALCUL DE L'INDICE R.

Ces deux coefficients étant définis, on peut essayer, sur un échantillonnage conséquent, d'établir un tableau croisant ces paramètres avec des valeurs de ( $\alpha$ ) et (K).

Il est en effet loisible de penser qu'aux reliefs accentués, auxquels correspondront en général des ordres (N) faibles, seront associées des vallées plus encaissées ((K) et ( $\alpha$ ) faibles).

Dans les parties basses des plaines alluviales ((R) faible et (N) élevé) les açudes seront plus ouverts et de forme convexe ((K) élevé, ( $\alpha$ ) élevé).

Le tableau (2.4) donne les valeurs de ( $\alpha$ ) et (K) proposées par 3 travaux différents.

Tous ces tableaux ont été élaborés à partir des mêmes données, à savoir les relevés de la SERETE.

L'hétérogénéité très importante des résultats - malgré leur source commune - peut être expliquée de plusieurs manières:

- l'insuffisance de l'échantillonnage, en particulier pour la détermination de (K) - très variable comme on l'a vu. Une moyenne sur une douzaine d'açudes est très influencée par un açude de (K) très grand comme c'est le cas pour certains réservoirs de l'échantillonnage (C).

Géotecnica, par exemple, utilise un échantillon dont la répartition est la suivante:

ORDRE	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	R <sub>5</sub>	TOTAL
1	-	-	-	14	14
2	-	27	15	11	53
3	10	16	16	13	55
4	5	13	8	-	26
5	8	-	-	-	8
TOTAL	23	56	39	38	156

	ORDRE	1	2	3	4	5	6
	RELIEF						
K	R <sub>2</sub>	- 0,23	- 0,77	9,14 2,62	23 8,46	56 29	- 95
		-	-	1,06	20	34,5	-
	R <sub>3</sub>	- 0,029	0,36 0,11	1,24 0,4	4,28 1,75	- 6,77	- 26,3
		-	0,19	0,57	8,2	-	-
	R <sub>4</sub>	- 0,15	0,26 0,49	1,07 1,47	4 5	- 15,2	- 50
	-	0,3	1,08	5	-	-	
	R <sub>5</sub>	0,78 0,88	1,8 2	3,8 4,3	- 9,5	- 20,8	- 46,4
		3,8	2,2	1,86	-	-	-
L	R <sub>2</sub>	- 1,89	- 1,89	1,26 1,89	1,36 1,89	1,52 1,89	- 1,89
		-	-	2,7	1,45	1,86	-
	R <sub>3</sub>	- 3,2	2,6 3,2	2,4 3,2	2,1 3,2	- 3,2	- 3,2
		-	3,1	3,1	1,75	-	-
	R <sub>4</sub>	- 2,08	2,4 2,08	2,3 2,08	2,1 2,08	- 2,08	- 2,08
	-	2,3	2,1	1,9	-	-	
	R <sub>5</sub>	1,14 1,06	1,17 1,06	1,13 1,06	- 1,06	- 1,06	- 1,06
		2,3	1,04	1,6	-	-	-

(Tableau 2.4)

- 1) - SERETE/SERTANEJO  
 2) - Dr. RÔMULO (Manejo de água no Nordeste Semi-árido)  
 3) - RECURSOS HÍDRICOS III (GEOTECHNICA).

1	2
3	

- la difficulté de déterminer l'ordre de la rivière, celui-ci dépendant de la précision de l'outil employé (photo aérienne, échelle de la carte...);
- le paramètre (R), nous l'avons vu, se prête mal à certaines généralisations. La carte générale établie pour le Nordeste à des fins de planification aura pu être abusivement utilisée pour traiter des cas particuliers. Seule la deuxième étude semble avoir pris des précautions d'emploi.

Pour séduisante que soit l'idée de départ, il apparaît clairement qu'une recherche désireuse d'utiliser ces paramètres devra dans un premier temps les redéfinir de manière plus adéquate.

#### B/ RELATION ENTRE $\alpha$ et (K)

Le graphique  $\alpha(K)$  fait apparaître que pour  $K < 1000$ ,  $\alpha$  est en général plus élevé que la moyenne (aux alentours de 3). Géométriquement cela signifie que les pentes des petits açudes - ou plutôt des açudes faiblement capacitifs - sont en général concaves. De même, pour  $K > 4000$ ,  $\alpha$  prend une valeur proche de 2,3 ce qui correspond à des réservoirs de grande capacité et de versants convexes.

Dans la zone intermédiaire,  $K \in ]1000, 4000[$ , la dispersion est trop grande pour en dégager une tendance.

#### C/ RELATION ENTRE $V_0$ et (K)

Les points (V,K) disposés sur un diagramme log-log forment un nuage assez diffus. Qualitativement, on peut dire que les açudes de grand volume ( $V_0$ ) ont tendance à avoir un coefficient d'ouverture (K) élevé mais ce n'est pas toujours le cas.

#### D/ RELATION $\alpha(S,H)$

(H) et (S) étant les deux variables d'accès facile, on a tenté de voir s'il existait une corrélation avec  $\alpha$ . Nous avons divisé les açudes en trois classes:  $H < 6m$ ;  $3m < H < 6m$ ;  $H > 6m$ ; on pouvait penser que pour une

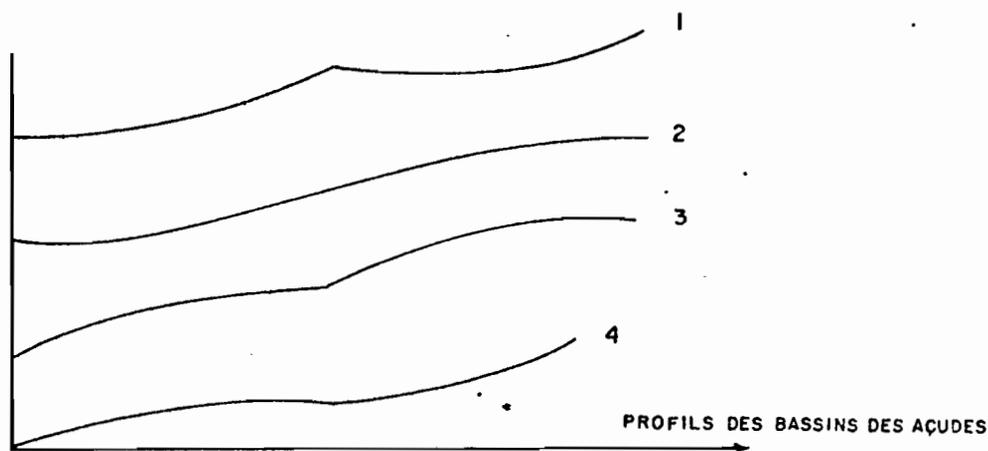
classe donnée il y aurait une relation  $\alpha(S)$ .

Le diagramme montre clairement qu'il n'en est rien.

#### E/ RELATIONS TOPOGRAPHIQUES

Il est clair que des bassins encaissés correspondront à des (K) petits et les bassins évasés à des (K) grands.

La concavité observable des versants peut, on l'a vu, donner une indication sur la valeur de  $\alpha$ . Signalons qu'une étude graphique de  $(\alpha)$  à partir des relevés  $S(H)$  donnent souvent deux segments de droite dont les pentes semblent indiquer que quatre types qualitatifs se dégagent. Graphiquement ceci correspond aux profils suivants:



Il ne faut pas perdre de vue que les bassins sont parfois de forme très irrégulière, surtout pour les plus grands, et que leurs pourtours le sont aussi. On peut avoir, par exemple, un açude bien représenté par un  $(\alpha)$  égal à trois et qui soit loin d'être pyramidal, le  $(\alpha)$  étant le simple résultat d'une intégration sur tout le contour.

#### 5) DETERMINATION PRATIQUE

Si l'on dispose de nombreuses mesures sur un réservoir on utilisera les méthodes déjà décrites. Dans la pratique les données accessibles minimum seront une profondeur donnée et la surface du miroir d'eau correspondant. La première s'effectuera par sondage et la deuxième au théodolite. La mesure de la surface pourra se faire éventuellement par planimétrage sur une carte ou une photoaérienne. Si tous ces moyens ne peuvent être utilisés il

restera l'estimation visuelle.

Une fois en possession d'un couple de point  $(H_0, S_0)$  on détermine  $K$  en considérant que le coefficient  $\alpha$  de l'açude est  $\bar{\alpha} = 2,7$  (à moins que d'autres observations induisent un autre choix)

$$\text{Soit } K = \frac{S_0}{\alpha \cdot H_0^{1,7}}$$

Selon la valeur obtenue on pourra procéder à un réajustement de  $(\alpha)$ .  
Si  $(K) \in ]0, 1000|$  on prendra  $\alpha = 3$  et on calculera la nouvelle valeur du coefficient  $(K)$ .

Si  $(K) \in ]4000, +\infty|$  on adoptera  $\alpha = 2,3$  et on recalculera de même la valeur de  $(K)$ .

Une erreur sur le  $(\alpha)$  de plus de 0,5 est ainsi relativement improbable et l'on peut calculer le rapport des  $(K)$  qui découlerait de  $(\alpha)$  et  $(\alpha + 0,5)$ .

$$S_0 = \alpha K H_0^{-1}$$

$$S_0 = (\alpha + 0,5) K H_0^{-0,5}$$

$$\frac{K}{K^1} = \frac{\alpha + 0,5}{\alpha} \sqrt{H_0}$$

$$\text{Soit, typiquement, } \alpha = 2,7 \quad H_0 = 4m$$

$$\frac{K}{K^1} = 1,18 \sqrt{H_0} = 2,36$$

L'erreur correspondante sur les volumes est:

$$V_0 = K H_0^\alpha$$

$$V_0^1 = K^1 H_0^{\alpha+0,5}$$

$$\frac{V_0}{V_0^1} = \frac{K}{K^1} \times \frac{1}{\sqrt{H_0}}$$

$$\text{avec } \frac{K}{K^1} = \frac{\alpha + 0,5}{\alpha} \sqrt{H_0}$$

Soit

$$\boxed{\frac{V_0}{V_0^1} = \frac{\alpha + 0,5}{\alpha}}$$

c'est à dire environ  $(\alpha = 2,7)$

$$\boxed{V_0 = 1,19 V_0^1}$$

On obtient une différence de volume de 20% à laquelle peuvent éventuellement

s'ajouter les erreurs comises sur l'évaluation de  $(H_0, S_0)$ .

Cette méthode simple permet d'améliorer l'évaluation du volume en général faite avec la formule de la pyramide.

Des études plus poussées devraient permettre d'indiquer si nos moyennes de  $(\alpha)$  et  $(K)$  sont générales ou si les valeurs correspondant à l'échantillon C représentent une réalité topographique locale différente.

Les caractéristiques géométriques des açudes sont une donnée essentielle. Les réservoirs faiblement capacitifs, de  $(K)$  faible, limitent l'évaporation et nécessitent des talus de retenue élevés et peu longs. Les açudes de plus grande capacité de stockage subiront plus de pertes par évaporation et posséderont des retenues plus longues.

Il serait aisé de relier un triplet  $(\alpha, K, H_0)$  donné à un volume de terre nécessaire pour construire l'açude, voire à un coût. Une telle étude sort du cadre de notre travail.

### III - MODELE SIMPLE N° 1

Dans une première approche on peut estimer les potentialités des açudes en considérant des hypothèses simplifiées.

Nous prendrons comme exemple un açude qui se trouve, en fin de saison des pluies, rempli d'eau jusqu'à une hauteur de 4 m. Nous convenons de négliger les apports de pluies sur les mois suivants et adoptons des moyennes d'évaporation mensuelle de la région de Catolé do Rocha. Nous nous trouvons donc le 1<sup>er</sup> juillet avec un açude plein et désirons évaluer le nombre de jours qu'il faudra pour l'assécher en prélevant chaque jour un volume donné. En fonction de ce volume prélevé (et donc du nombre de jours pendant lesquels l'irrigation sera assurée), il sera possible de déterminer la part du volume évaporé et celle du volume d'eau vraiment utilisé.

#### 1) CAS DE L'AÇUDE PYRAMIDAL

Considérons dans un premier temps un réservoir pyramidal représenté alors par le couple (3,K).

- L'évaporation du miroir d'eau de superficie à un instant quelconque et pendant un intervalle de temps  $dt$  est  $esdt$  où ( $e$ ) est une constante.
- On ramène le volume prélevé chaque jour par l'irrigation à un débit fictif continu ( $Q$ ), ce qui donne à tout instant une variation de volume  $Qdt$ .

A l'instant  $t$ , le bilan de l'açude est:

$$\boxed{-sdH = Qdt + esdt \quad (1)}$$

avec  $v = KH^3$

$$s = 3KH^2$$

$$\text{soit } -3KH^2 dH = Qdt + 3eKH^2 dt$$

$$\text{qui s'écrit } dt = \frac{-3KH^2}{Q+3eKH^2} dH$$

$$\text{en posant } c = \left(\frac{Q}{3eK}\right)^{1/2}$$

$$dt = \frac{1}{e} \left| \frac{c^2}{c^2+H^2} - 1 \right| dH$$

$$t - t_0 = \frac{H_0 - H}{e} + \frac{c}{e} \left[ \operatorname{arctg} \frac{H}{c} - \operatorname{arctg} \frac{H_0}{c} \right]$$

si l'on prend  $t_0 = 0$

et  $H = 0$  on obtient en particulier le temps nécessaire à l'assèchement soit

$$T_{AS} = \frac{H_0}{e} + \frac{c}{e} \left[ \operatorname{arctg} \frac{H_0}{c} \right]$$

## 2) CAS D'UN AÇUDE QUELCONQUE

Considérons ici un réservoir représenté par un couple  $(\alpha, K)$  quelconque. L'équation précédente devient

$$dt = \frac{-\alpha K H^{\alpha-1}}{Q + \alpha e K H^{\alpha-1}} dH \quad (2)$$

Endiscretisant (1) au pas de temps journalier on obtient

$$H_n = H_{n-1} - e - \frac{V}{\alpha K H_{n-1}^{\alpha-1}}$$

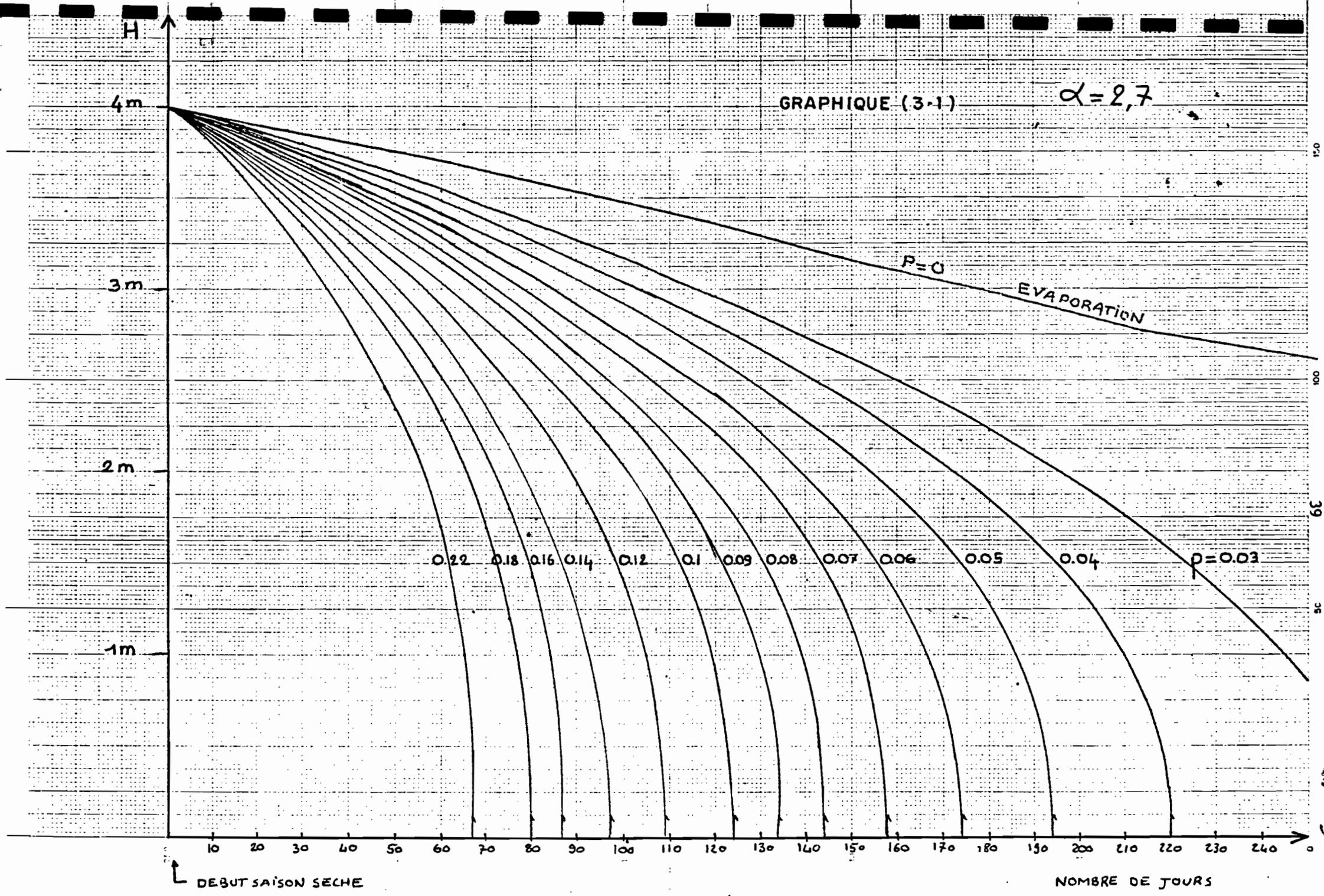
où  $(V)$  est la dose volumique prélevée chaque jour

et où  $(e)$  est le coefficient d'évaporation que nous allons faire varier au pas de temps mensuel. Nous prendrons

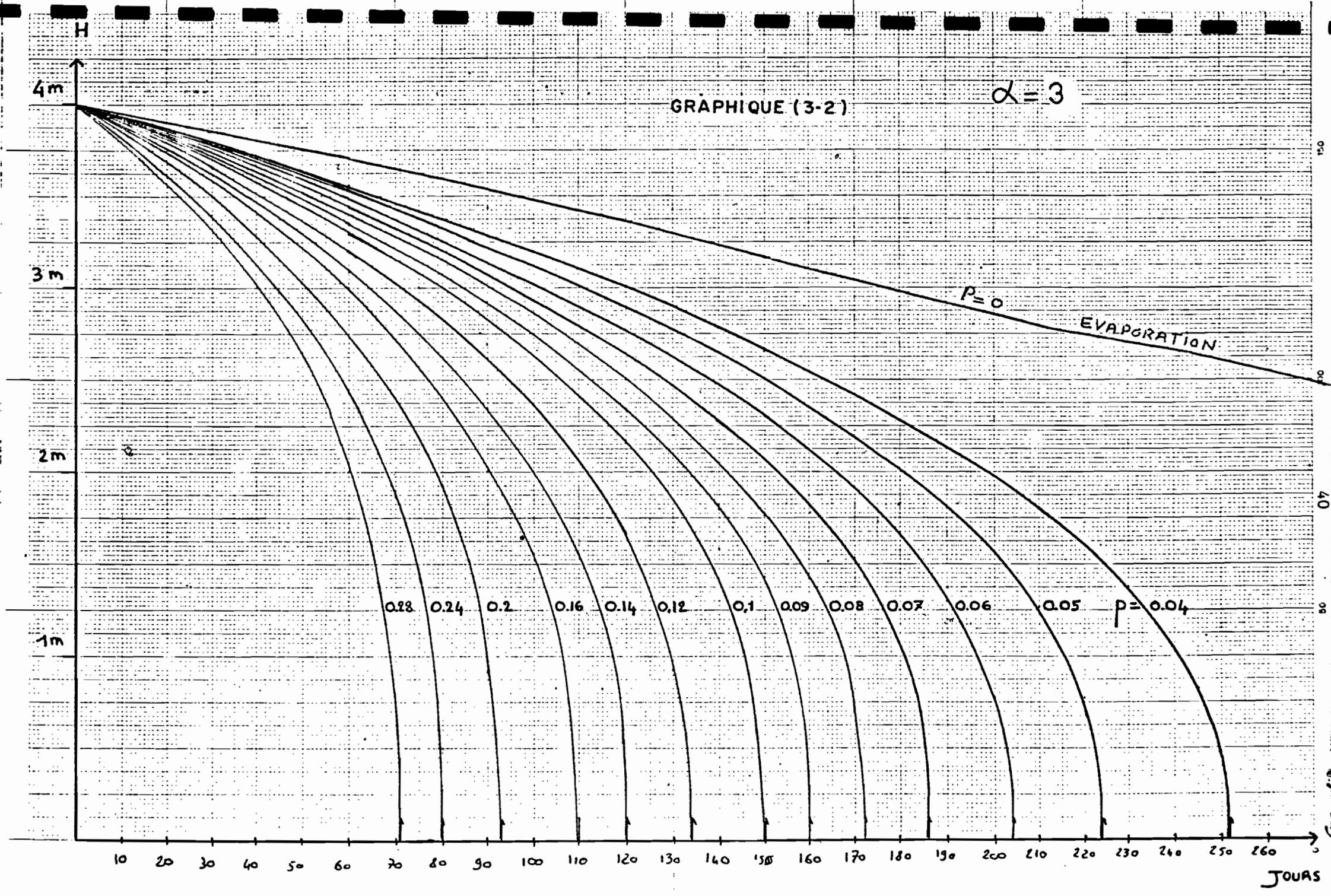
Mois	J	A	S	O	N	D	J
$e(\text{mm/j})$	4,4	5,2	5,6	6,2	6,2	6,3	6,2

Le coefficient  $(p)$  intègre la géométrie de l'açude et l'importance du volume  $(V)$  prélevé quotidiennement.

Les graphiques suivant (3-1/3-2/3-3) donnent les résultats de la simulation pour les valeurs de  $(\alpha)$ : 2,3; 2,7; 3; et pour différentes valeurs du paramètre  $(p)$ . On constate que la rapidité avec laquelle se vide l'açude augmente bien évidemment avec  $(p)$ , c'est à dire avec l'importance du volume retiré chaque jour  $(V)$ . Il est clair que la part du volume d'eau perdue par évaporation sera d'autant plus faible que l'on aura utilisé l'eau rapidement. Dans les cas où la profondeur de l'açude le condamne à s'assécher avant le début de la saison des pluies suivante, ou dans le cas où l'on dispose de plusieurs açudes, il sera conseillé d'utiliser l'eau dans un délai minimum.

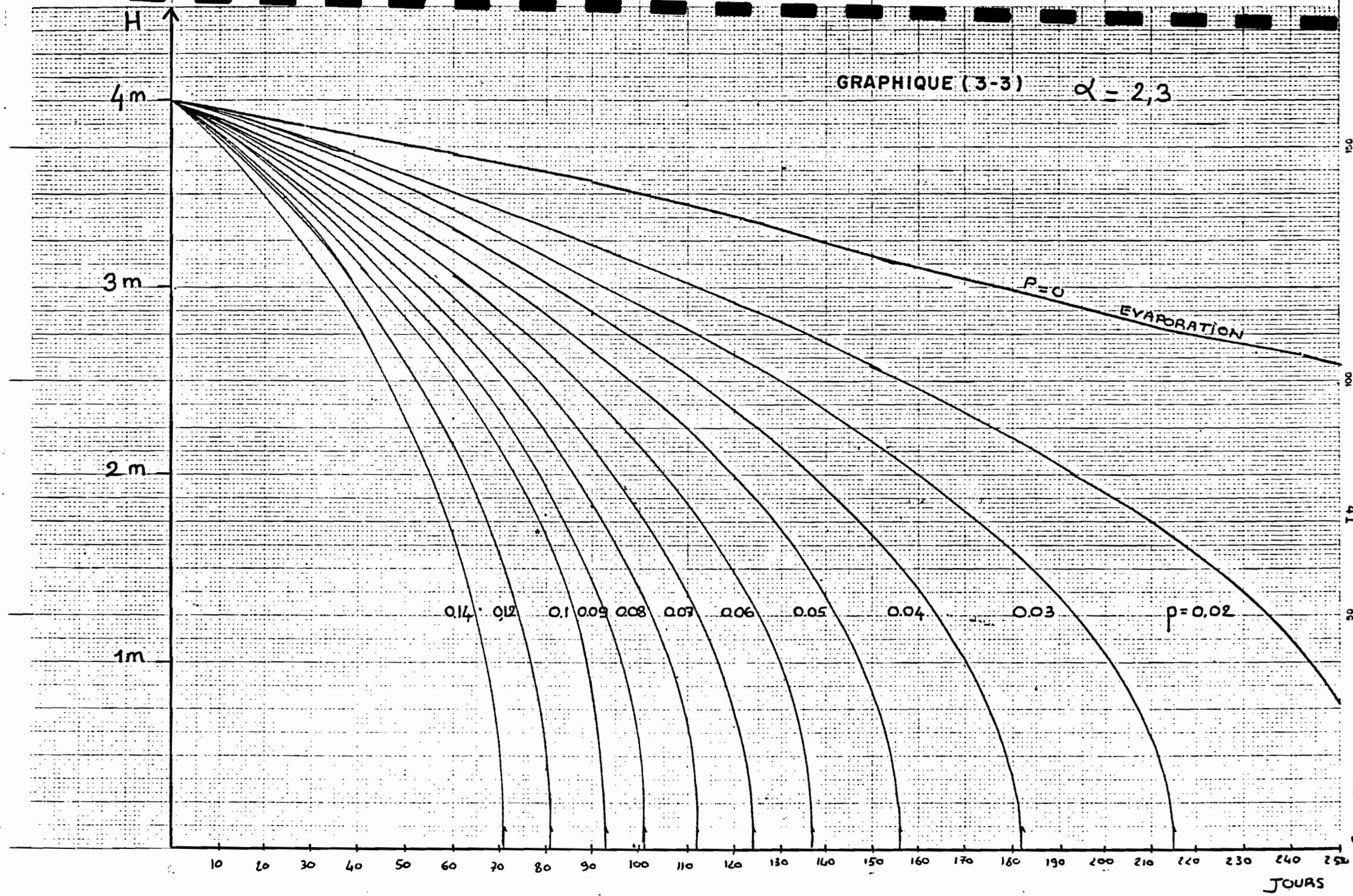


150  
100  
60  
50  
40  
30  
20  
10  
0  
 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 160 170 180 190 200 210 220 230 240  
 210 x 297 mm - Divisto 100 x 280 mm  
 Formato A4  
 11/11 11'



150  
100  
50  
07  
50  
50  
Granulit® - NIREI 115 - 1 - Formato A4 - 210 x 297 mm - Diviso 180 x 280 mm.

GRAPHIQUE (3-3)  $\alpha = 2,3$



Grand... 17 1. Formato A 4 210 x 297 mm - Divisio 160 x 280 mm.

3) UTILISATION DES ABAQUES

Les trois diagrammes établis peuvent être utilisés pour des açudes quelconques de la région de Catolé do Rocha dont on a pris les moyennes d'évaporation mensuelles. Dans le cas, fréquent, où les variations de ces dernières seront faibles ou pourra utiliser ces abaques dans une première approximation. Si l'on possède une estimation des pertes par infiltration il sera facile de les prendre en compte en majorant d'autant les évaporations.

Pour un réservoir de coefficients ( $\alpha_0$ ,  $K_0$ ) donnés ou estimés on considèrera l'abaque dont le  $\alpha$  est le plus proche de  $\alpha_0$  ou l'on fera la simulation pour ce cas précis.

Un autre problème d'utilisation généralisée de ces abaques se pose au niveau de la hauteur  $H_0$  considérée. Pour un  $H_0 < 4m$  il suffira d'utiliser les courbes en dessous de leur intersection avec la droite horizontale  $H = H_0$ . Pour un  $H_0 > 4m$  on pourra recourir à une transformation mathématique simple déduite de l'équation différentielle (2).

Une réduction d'échelle sur la variable  $H$ ,  $H' = (\frac{H_0}{4})H$ , laisse l'équation inchangée moyennant la transformation.

$$t' = t / (\frac{H_0}{4}) \quad \text{et} \quad K' = (\frac{H_0}{4})^{\alpha-1} K$$

Du changement de ( $K$ ) en ( $K'$ ) on déduira une modification de ( $p$ ) en ( $p'$ ) et de  $T_{AS}$  en  $T'_{AS}$ .

L'utilisation pratique de ces abaques se fait à l'aide du paramètre  $p$  qui peut être réécrit comme suit:

$$p = \frac{V}{\alpha K} = \frac{\text{dose } (d) \times \text{surface } (S) / \text{efficience } (E)}{\alpha \cdot K}$$

Le numérateur décrit la composante irrigation du problème tandis que le dénominateur rend compte des caractéristiques géométriques de l'açude.

Les abaques peuvent être utilisées de plusieurs manières selon le problème posé. Voici quelques exemples dans le cas où l'utilisation totale de l'açude est recherchée:

- le périmètre d'irrigation ( $S$ ) est donné et l'on veut savoir quelles sont les cultures que l'on peut irriguer. On considère les valeurs de ( $p$ ) dont les courbes donnent un temps d'assèchement  $T_{AS}$  compris entre la durée du cycle de la culture envisagée et le début de la saison pluvieuse suivante. On vérifie ensuite que ces valeurs sont compatibles avec les paramètres ( $d$ ), ( $S$ ) et ( $E$ );

- on veut produire une culture donnée (d) et l'on cherche à déterminer la superficie (S) que l'on peut planter en assurant une irrigation (E) tout au long de son cycle. On prendra alors le (p) dont la courbe donne un  $T_{AS}$  immédiatement supérieur à la durée du cycle. De cette valeur de (p) on déduira directement (S);

Exemple:

AÇUDE:  $\alpha = 3$

$V_0 = 96.000 \text{ m}^3$

$K = 1500$

$E = 0,6$

$H_0 = 4$

CULTURE: MAÏS

$\rightarrow \bar{K}_c = 0,87$        $ETP = 6 \text{ mm/j}$

Cycle: 120 jours

$\bar{d} = 5.22.10^{-3} \text{ m/j}$

$T_{AS} : 120 \text{ jours}$

$p: 0,14$

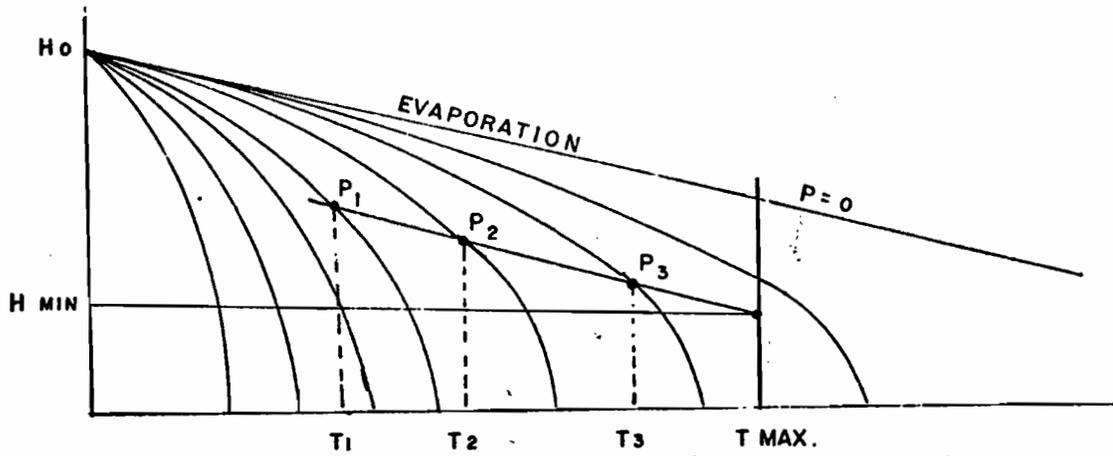
$$S = \frac{p \cdot \alpha \cdot K}{d/E} = \frac{0,14 \cdot 3 \cdot 1500 \cdot 0,6}{522.10^{-3}} = 72.413 \text{ m}^2$$

$S = 7 \text{ hectares}$

- le raisonnement précédent peut s'étendre au cas de plusieurs cultures simultanées ( $d_i$ ) en prenant le (p) correspondant au  $T_{AS}$  le plus grand. Il ne restera plus qu'à tester un assolement donné c'est à dire

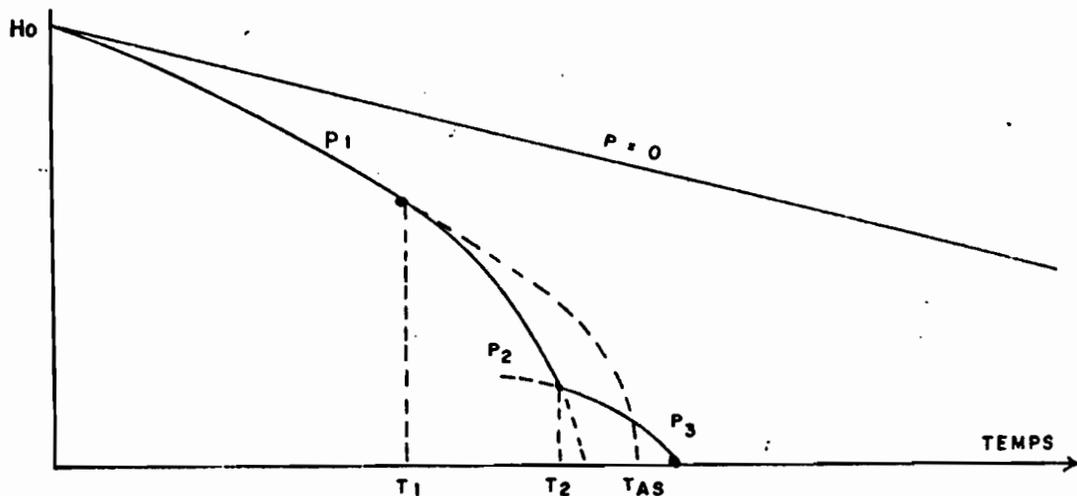
$$\sum S_i d_i = p \cdot \alpha \cdot K \cdot E.$$

On peut éventuellement introduire une contrainte consistant à imposer un niveau d'eau minimum à une date donnée. Cela peut être le cas si, par exemple, on désire maintenir la salubrité et la disponibilité d'un eau utilisée pour des besoins humains ou animaux. Ces besoins en général négligeables n'ont pas été pris en compte dans ce qui précède, mais peuvent être inclus dans la dose d. Graphiquement, on part alors du point ( $T_{max}, H_{min}$ ) ainsi considéré et on remonte selon la pente de la courbe d'évaporation  $p=0$ . Les points d'intersection avec les différentes courbes, une fois projetés sur l'axe, donnent les dates limites d'irrigation à la dose correspondant à la valeur de (p).



Dans le cas où la consommation de la plante varie beaucoup selon les différents stades de croissance il est possible de prendre en compte ces variations.

Considérons une surface plantée (S). Selon les doses ( $d_i$ ) à apporter on peut descendre sur les courbes ( $P_i$ ) correspondantes en changeant à chaque changement de dose. On comparera alors le  $T_{AS}$  obtenu avec la durée du cycle et en cas d'incompatibilité on procédera à un réajustement de (S).



(pratiquement il sera intéressant d'utiliser un abaque surcalque).

#### 4) EFFICIENCE DE L'UTILISATION

Il ressort de ce qui précède que plusieurs variables sont reliées entre elles. Il peut être intéressant de développer d'autres abaques les reliant entre elles. Le graphique (3.4) montre, par exemple, la relation entre (V) et (T<sub>AS</sub>) pour un (α) égal à trois et différents coefficients d'ouverture (K).

Pour faire ressortir l'intérêt d'une utilisation rapide en vue de diminuer les pertes par évaporation on peut considérer les relations entre le volume initial (V<sub>o</sub>), l'eau utilisée pour l'irrigation (V.T<sub>AS</sub>), et l'eau perdue par évaporation (V<sub>o</sub> - V.T<sub>AS</sub>). Le graphique (3.5) nous donne les pourcentages  $\frac{V.T_{AS}}{V_o}$  et  $\frac{V_o - V.T_{AS}}{V_o}$  pour un (K) moyen de 1500 et différentes valeurs de α.

Pour un (α) de 2,7, on constate qu'un volume V<sub>o</sub> est utilisée à 88% en 90 jours et ne l'est plus qu'à 60% pour 200 jours.

#### 5) LIMITES DE LA MÉTHODE

Cette méthode devra être utilisée en priorité pour des açudes de capacité insuffisante pour rester en eau pendant toute la période sèche.

Sa principale limitation vient de ce qu'elle considère une hypothèse hydrologique très schématique. En moyenne, cette distinction saison sèche-saison humide est acceptable mais ne rend pas compte de la très importante irrégularité des apports hydriques.

ASSECHEMENT DES AÇUDES DE COEFFICIENT  $\alpha = 3$   
 EN FONCTION DU VOLUME PRELEVE CHAQUE JOUR.

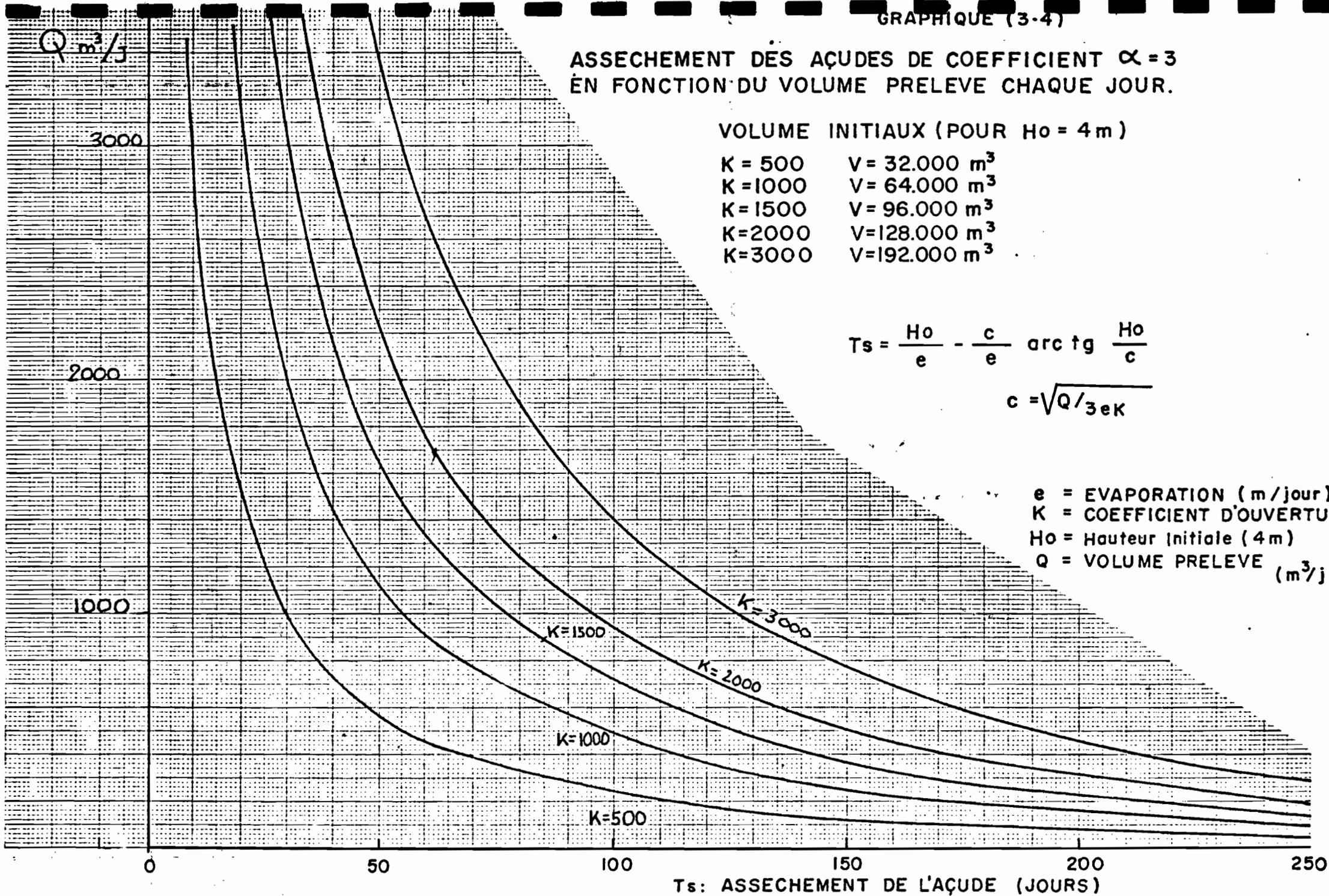
VOLUME INITIAUX (POUR  $H_0 = 4\text{ m}$ )

K = 500	V = 32.000 m <sup>3</sup>
K = 1000	V = 64.000 m <sup>3</sup>
K = 1500	V = 96.000 m <sup>3</sup>
K = 2000	V = 128.000 m <sup>3</sup>
K = 3000	V = 192.000 m <sup>3</sup>

$$T_s = \frac{H_0}{e} - \frac{c}{e} \text{ arc tg } \frac{H_0}{c}$$

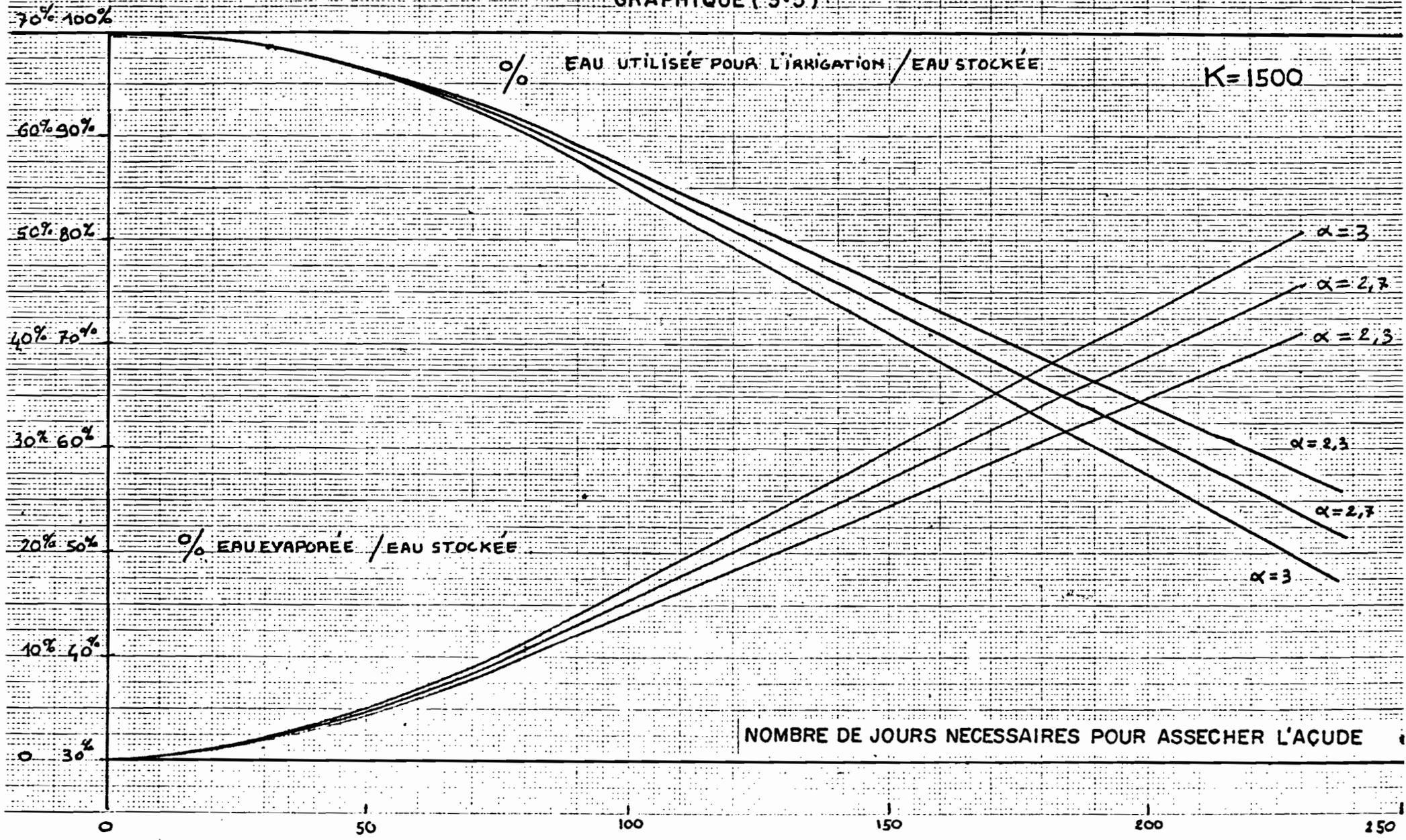
$$c = \sqrt{Q/3eK}$$

- e = EVAPORATION (m/jour)
- K = COEFFICIENT D'OUVERTURE
- H<sub>0</sub> = Hauteur initiale (4m)
- Q = VOLUME PRELEVE (m<sup>3</sup>/j)



Ts: ASSECHEMENT DE L'AÇUDE (JOURS)

GRAPHIQUE (3.5)



IV - MODELE SIMPLE N° 2

Ce modèle constitue une amélioration du précédent dans la mesure où il prend en compte les apports mensuels et permet d'optimiser une "boucle" sur une année choisie (moyenne, année sèche de période de retour quelconque: la superficie plantée y est déterminée comme la superficie maximum dont l'irrigation respecte deux conditions:

- 1) La hauteur d'eau dans l'açude ne descend jamais en dessous d'une valeur HLIM (éventuellement nulle).
- 2) En fin de saison des pluies l'açude se trouve à nouveau plein.

On voit que le but est ici très différent du cas précédent qui s'adressait de préférence à une utilisation rapide et totale de l'eau stockée: il est recherché ici une pérennisation et un équilibre annuel.

Les données sont les suivantes: une superficie X est plantée d'une ou de plusieurs cultures déterminées, successives ou simultanées, qui définissent un coefficient  $K_c(I)$  décrivant l'ensemble des besoins sur l'année ( $I = 1, 2$ ), l'évapotranspiration potentielle  $ETP(I)$ , les ruissellements mensuels  $DF(I)$ , la pluie effective  $PEF(I)$  sont les données climatiques.

A partir de ces données le programme calcule dans un premier temps l'évaporation mensuelle d'un plan d'eau,  $EVP(I)$ , et les volumes nets à apporter chaque mois par irrigation (DOSE (I)).

Les paramètres de la simulation sont les caractéristiques géométriques de l'açude, ( $\alpha$ , K). Sa profondeur maximale HMAX, la profondeur minimale admise, HMIN, et un incrément Y.

La simulation est mensuelle; chaque mois le volume de l'açude est recalculé par le bilan suivant.

$$V(n + 1) = V(n) + DF(n) - EVP(n) \cdot S_n^* - X \cdot DOSE(n)$$

( $S_n^*$  est une surface moyenne calculée par la relation  $S(V)$  à partir de  $\frac{V(n + 1) + V(n)}{2}$  où  $V(n + 1)$  est d'abord obtenu en prenant la surface S correspondante à  $V(n)$ ).

Le programme part d'une valeur de X arbitrairement grande ce qui nous mène rapidement à une incompatibilité avec l'une des deux contraintes.

A chacune de ces incompatibilités la simulation est reprise avec une valeur  $X = X - Y$ .

Le programme s'arrête dès que l'on atteint une valeur de X qui respecte, pour le plan cultural proposé, les deux conditions. ( $X = X_{opt}$ ).

Sont donnés de même les volumes perdus par le déversoir et par évaporation au cours de la "boucle annuelle" correspondant à  $X_{opt}$ .

Notons que dans le cas où l'on a plusieurs cultures simultanées on doit imposer un pourcentage pour chacune d'elles à fin de conserver la proportionnalité à X.

Ce modèle est plus séduisant que le précédent dans la mesure où il tient compte des apports mensuels et où sa formulation informatique le rend très facile à utiliser.

Ce que l'on gagne de ce côté est compensé par l'incertitude sur les valeurs des écoulements mensuels: sur une période de 50 ans on constate que des pluies mensuelles de moyenne proche de 100 mm varient entre 0 et plus de 300 mm. Cette variation se répercute sur les écoulements. A cette incertitude s'ajoute le fait que les ruissellements sont fortement dépendants de la répartition, de l'intensité et de la durée des pluies ainsi que des pluies antérieures.

La modélisation suivante constitue une tentative de résoudre ce problème en considérant des bilans au pas de temps journalier et des séries de données réelles.

#### Exemple d'utilisation du Modèle simple n° 2

La première étape consiste à se fixer un calendrier cultural pour un périmètre dont la dimension est à optimiser.

Voici par exemple un plan cultural comprenant du Feijão (F), de la tomate (T) et du coton (C).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Cultures présentes 1/2	T	T	T	T		F	F	F	F		-	-
1/2	C	C	C	-							C	C
$K_C$ global	0,8	0,9	1	0,45	0	0,5	0,95	0,95	0,5	-	0,25	0,4

Le  $K_C$  global se calcule en fonction des  $K_C$  des cultures présentes au mois considéré, pondérés par la proportion du périmètre que ces cultures occupent.

On considère un açude de 4 mètres de profondeur ( $\alpha=3$ ,  $K=1500$ ) de volume maximal:  $96\ 000\ m^3$ .

Le bilan se fait au premier Juin. Le tableau (4.1) donne les résultats de la simulation: on obtient une superficie optimale de 8.8 ha. Selon le calendrier cultural testé et sa place par rapport aux variations de ETP(I) et DF(I) c'est l'une ou l'autre des deux contraintes qui sera la plus restrictive. Dans notre exemple c'est la première puisque le niveau de l'eau descend jusqu'à 1,03 m.

2<sup>ème</sup> exemple: le périmètre est prévu pour comporter 1/3 de Banane et 2/3 de Feijão.

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Cultures 1/3	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
2/3	-	-	-	-	-	-	F	F	F	F	-	-
$K_C$	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,66	0,96	0,96	0,70	0,33	0,33

Les résultats obtenus (tableau (4.2)) donnent une superficie de 8.6 ha, c'est à dire 2.86 ha de banane et 5.73 de feijão, et un niveau de 1.03 m.

Notons ici qu'il est possible de se donner une culture de superficie fixe à laquelle on ajoute une surface à déterminer; cela peut être le cas dans notre exemple si l'on veut irriguer en plus d'une parcelle de banane de superficie donnée.

Dans ce cas la forme de DOSE(I) est:  $A + BX$ .

3<sup>ème</sup> exemple: on peut aussi étudier l'influence de certaines variables en les faisant varier une à une.

Supposons que l'on prenne le couple ( $\alpha, K$ ) égal à (2.5, 3000) au lieu de (3, 1500). (Ces deux couples correspondent à un miroir d'eau identique ( $H=4m$ ) et peuvent donc être choisis pour représenter un même açude)

Les résultats obtenus pour le calendrier de l'exemple 1) sont:

(2.5, 3000) :  $X_{OPT} = 9.6\ ha$   
 (3, 1500) :  $X_{OPT} = 8.8\ ha$

CARACTERISTIQUES DE L'ACUDE ALPHA #3.00 K# 1500 HMAX# 4.00 VMAX 96000.

DATE DU BILAN ANNUEL PREMIER JUIN

ETP MENSUELLES	122	135	163	169	192	192	196	192	155	160	128	125
MOYENNES MENS. DES COTES	3.97	3.82	3.54	3.21	2.33	2.39	1.75	1.06	1.99	2.93	3.56	3.92
MOYENNES MENS. DES VOLUMES -	93531.	83351.	66724.	49707.	34032.	20433.	8010.	1739.	11781.	37834.	67550.	90525.
DOSE D'IRRIGATION %MM	0.	26.	48.	53.	57.	56.	106.	118.	10.	0.	0.	0.
VOLUME D'IRRIGATION M3	0.	2197.	4110.	4538.	4933.	4847.	9147.	10176.	843.	0.	0.	0.

EFFICIENCE DU SYSTEME D'IRRIGATION 1.00

SUPERFICIE OPTIMUM SHA 8.00

COTE MINIMA DE L'ACUDE 1.03

VOLUME PERDU PAR LE DEVERSOIR 4011. VOLUME PERDU PAR EVAPORATION - 112193. VOLUME IRRIGATION 40791.

TABLEAU (4-2) FEIJÃO / BANANE

CARACTERISTIQUES DE L'ACUDE ALPHA #3.00 K# 1500 HMAX# 4.00 VMAX 96000.

DATE DU BILAN ANNUEL PREMIER JUIN

ETP MENSUELLES	122	135	163	169	192	192	196	192	155	160	128	125
MOYENNES MENS. DES COTES	3.95	3.74	3.32	2.33	2.45	2.09	1.53	1.21	2.09	2.93	3.59	3.95
MOYENNES MENS. DES VOLUMES -	92734.	78329.	54665.	34050.	22122.	13739.	5372.	2660.	13769.	39877.	69339.	92142.
DOSE D'IRRIGATION %MM	19.	109.	149.	32.	0.	41.	55.	38.	0.	0.	0.	0.
VOLUME D'IRRIGATION M3	1372.	9614.	13099.	7172.	0.	3608.	4875.	7709.	44.	0.	0.	0.

EFFICIENCE DU SYSTEME D'IRRIGATION 1.00

SUPERFICIE OPTIMUM SHA 8.00

COTE MINIMA DE L'ACUDE 1.01

VOLUME PERDU PAR LE DEVERSOIR 5552. VOLUME PERDU PAR EVAPORATION - 103655. VOLUME IRRIGATION 47773.

TABLEAU (4-1) FEIJÃO / COTON / TOMATE

Les valeurs de X obtenues doivent être multipliées par l'efficience de l'irrigation. L'évaporation considérée est l'évaporation BAC, supérieure, on l'a vu, à l'évaporation des açudes. Cette majoration volontaire rend compte des infiltrations. Ceci doit bien sur être précisé pour chaque cas particulier.

Dans tous les cas on n'oubliera pas que la surface trouvée correspond à une estimation des lames ruisselées et à un calendrier cultural donné. Elle ne saurait représenter une norme liée à une classe de volume des açudes. Ceci nous amène à deux remarques fondamentales: premièrement, il est dénué de sens de dire: "Cet açude de volume VX peut irriguer une superficie S". On a vu, en effet, le nombre de variables rentrant en jeu dans cette détermination ( $\alpha$ , K, évaporation, infiltration, choix de la culture et date de plantation, efficacité du système d'irrigation et évaluation des écoulements). En second lieu, on constate que le résultat XOPT peut, dans certaines conditions, être très sensible aux variations sur les lames mensuelles. C'est le cas, en particulier, quand le volume annuel ruisselé est proche de celui de l'açude.

Le problème majeur est donc dévaluer ces apports. La grande irrégularité des phénomènes hydrologiques dans le Nordeste rend cette tâche extrêmement délicate. Cette irrégularité existe au niveau du total annuel mais en core plus au niveau de la distribution mensuelle de ce volume. La corrélation de ces lames mensuelles avec les précipitations est, elle, encore plus hasardeuse.

Nous nous proposons d'utiliser la méthode suivante: on considère tout d'abord les 10 lames annuelles ruisselées correspondant aux quantiles 0.1, 0.2.....1. C'est à dire les lames de probabilité de retour 0.1, 0.2...1.

On distribue ensuite ces lames sur les 12 mois, proportionnellement aux moyennes des écoulements mensuels, obtenues, comme les quantiles précédentes à partir des résultats du Modèle n° III. (ces moyennes sont calculées sur un nombre conséquent d'années fournies par la banque de données).

On obtient donc, pour chacune des séries mensuelles, la superficie dont l'irrigation est assurée 1, 2, 3, ... 10 années sur 10. Ceci constitue toutefois un abus de langage car la distribution mensuelle peut être très différente et entraîner une estimation erronée. Au niveau de l'ingénieur il paraît toute fois difficile d'approcher plus la réalité. Le résultat concerne donc en fait le dimensionnement de la surface à équiper et il est évident que les plantations se feront avant tout en fonction de l'eau disponible dans l'açude en fin de saison des pluies.

V - PRESENTATION DU MODELE N° 3

Le premier modèle s'adressait à une valorisation des açudes en prolongement de la saison des pluies et comportait un bilan journalier avec des hypothèses simples.

Le second recherchait un usage annuel équilibré avec un bilan mensuel. Un troisième modèle informatique plus sophistiqué va maintenant nous permettre de définir les potentialités des açudes pérennes en ne se basant plus sur l'approximation de moyennes.

Le climat, les bassins de drainage, les réservoirs et les périmètres d'irrigation sont ici modélisés, reliés logiquement et mathématiquement entre eux puis soumis à plusieurs dizaines d'années de séries pluviométriques réelles. Divers paramètres de sortie décrivent le comportement annuel de l'ensemble (bilans des volumes en eau, bilan agronomique, productions ...).

Plutôt que de présenter d'emblée le fluxogramme du modèle nous choisissons dans un premier temps, de décrire chacun des modules du programme en nous livrant à l'occasion à une petite synthèse bibliographique; la modélisation des phénomènes agronomiques peut se faire à des degrés de complexification variables mais le facteur limitant est la donnée quantitative de grandeurs rentrant en jeu.

Cette incursion dans le détail nous permettra de comprendre plus aisément l'agencement général du programme présenté par son fluxogramme.

Puis nous décrirons, dans un deuxième temps, les différentes sorties de la simulation qu'il est possible d'obtenir et d'exploiter.

## 1) DESCRIPTION DU MODELE

### A) DONNEES CLIMATIQUES

Dès 1910, le DNOCS s'est employé à mettre en place un réseau hydro-météorologique comprenant entre autres 150 pluviomètres, Cet effort fût prolongé par le Département National de Météorologie (DNMET) qui créa, à partir de 1930, 65 stations principales.

Ce n'est qu'après la création de la SUDENE (1959) que le réseau climatologique fût réellement développé pour compter de nos jours 76 stations principales. Le Nordeste compte environ 2.500 pluviomètres et pluviographes dont les relevés sont de qualité et de durée diverses. Une banque de données informatisée a été élaborée pour une meilleure diffusion. Ceci nous permet d'utiliser directement pour notre programme des séries de pluviométries journalières sur une période atteignant parfois 60 ans.

#### - Evapotranspiration potentielle

La donnée climatique la plus importante, en dehors de la pluviométrie, est celle de l'évapotranspiration potentielle (ETP). Nous sommes d'une part confrontés à la nécessité d'obtenir une ETP de référence en vue d'évaluer les besoins en eau des cultures et, d'autre part, nous devons pouvoir estimer le pouvoir évaporant des miroirs d'eau de nos açudes. Du côté des données nous disposons des ETP mensuelles pour tout le Nordeste, établies par Hargreaves à partir d'une formule climatique, ainsi que des mesures des évaporations en BAC A des stations climatiques.

La définition donnée par Hargreaves de l'ETP est la suivante: l'ETP est la quantité d'eau transpirée par une culture verte, rase, dense, en pleine croissance et maintenue continuellement à une humidité proche de l'optimum. Cette définition, on le voit, est similaire à celle généralement avancée comme définition d'une ETP de référence. Considerant alors qu'elle varie peu avec la nature du végétal répondant aux caractéristiques ci-dessus, on présumera qu'elle est une donnée climatique.

Plusieurs formules bien connues donnent une estimation de cette ETP à partir de données climatologiques accessibles (composantes du bilan radiatif, humidité relative, vitesse moyenne du vent, température de l'air, amplitude thermique, durées d'ensoleillement ou précipitation décadaires).

Ce sont les formules de BLANEY et CRIDDLE, PENMAN, THORNWAITE, TURC, MAK KINK, BROCHET-GERBIER...etc...

L'équation utilisée par Hargreaves pour le Nordeste est la suivante:

$$ETP = MF.(32 + 1,8T).CH$$

où ETP = évapotranspiration potentielle en mm/mois

T = température moyenne en °C

CH =  $0,158 (100.U)^{0,5}$  coefficient d'humidité relative

MF =  $0,00483.RMM.DL/12.CL$

où RMM = radiation atmosphérique exprimée comme un équivalent en mm d'évaporation mensuelle

DL = durée du jour (en heures)

CL =  $0,17 (70 - ABL)^{1/2}$

avec ABL, valeur absolue de la latitude.

Un traitement informatique a permis d'obtenir une valeur d'ETP pour 723 postes climatologiques du Nordeste. Ces résultats sont largement utilisés dans le Nordeste bien qu'ils ne semblent jamais avoir été vérifiés, si l'on en croit certaines critiques faites à leur encontre.

L'ETP de référence intervient pour le calcul des coefficients culturaux et de la consommation en eau des cultures. Nous y reviendrons par la suite.

#### - Evaporation d'un plan d'eau

L'évaporation, phénomène affectant gravement les réserves en eau superficielles du Nordeste, est quant à elle plus facile à appréhender. Dans le début des années soixante la SUDENE a mis en service des stations évaporimétriques installées près des retenues. En 1968, les stations météorologiques étaient à leur tour équipées des bacs "classe A" du Weather bureau; les grandes retenues du DNOCS sont quant à elles généralement équipées d'échelles limnimétriques.

On peut estimer l'évaporation d'un plan d'eau (EVPa) à l'aide de l'équation du bilan hydrique de la retenue et l'expérience montre que l'on obtient un résultat très proche à celui obtenu à partir de bacs flottants. Toutefois cette méthode s'avère quelque peu hasardeuse en saison des

pluies où l'estimation des apports est très approximative.

Le diagramme (5.1) établi par Leimbock (1971) montre, à titre d'exemple, les variations de l'évaporation pour deux açudes du Nord du Ceará. Les pertes de la saison humide, pour les raisons évoquées plus haut, sont évaluées de préférence par la méthode du bilan énergétique, calée en saison sèche. On retiendra que l'évaporation annuelle totale est comprise entre deux et trois mètres, ce qui peut représenter dans les cas extrêmes près d'un centimètre par jour. Pour un miroir d'eau de deux hectares cette perte correspond à un volume de  $200 \text{ m}^3$ .

Parmi les formules climatiques qui se proposent d'évaluer l'évaporation signalons deux équations calées pour le Nordeste (Nilson A. Villa Nova et Al.). L'évaporation  $\bar{E}$  en mm/jour est évaluée pour les fortes et les faibles insolation par:

$$\bar{E} = 0,94 \quad |1 + 0,21 \bar{U} (\Delta\bar{e})| \quad (\text{insolation} > 0,8)$$

$$\bar{E} = 0,71 \quad |1 + 0,34 \bar{U} (\Delta\bar{e})| \quad (\text{insolation} < 0,2)$$

où  $\bar{U}$  est la vitesse moyenne des vents à 2 mètres au dessus du plan d'eau

$$\Delta\bar{e} = \bar{e}_s - \bar{e} \quad \text{est le déficit de pression de vapeur saturante (mm Hg)}$$

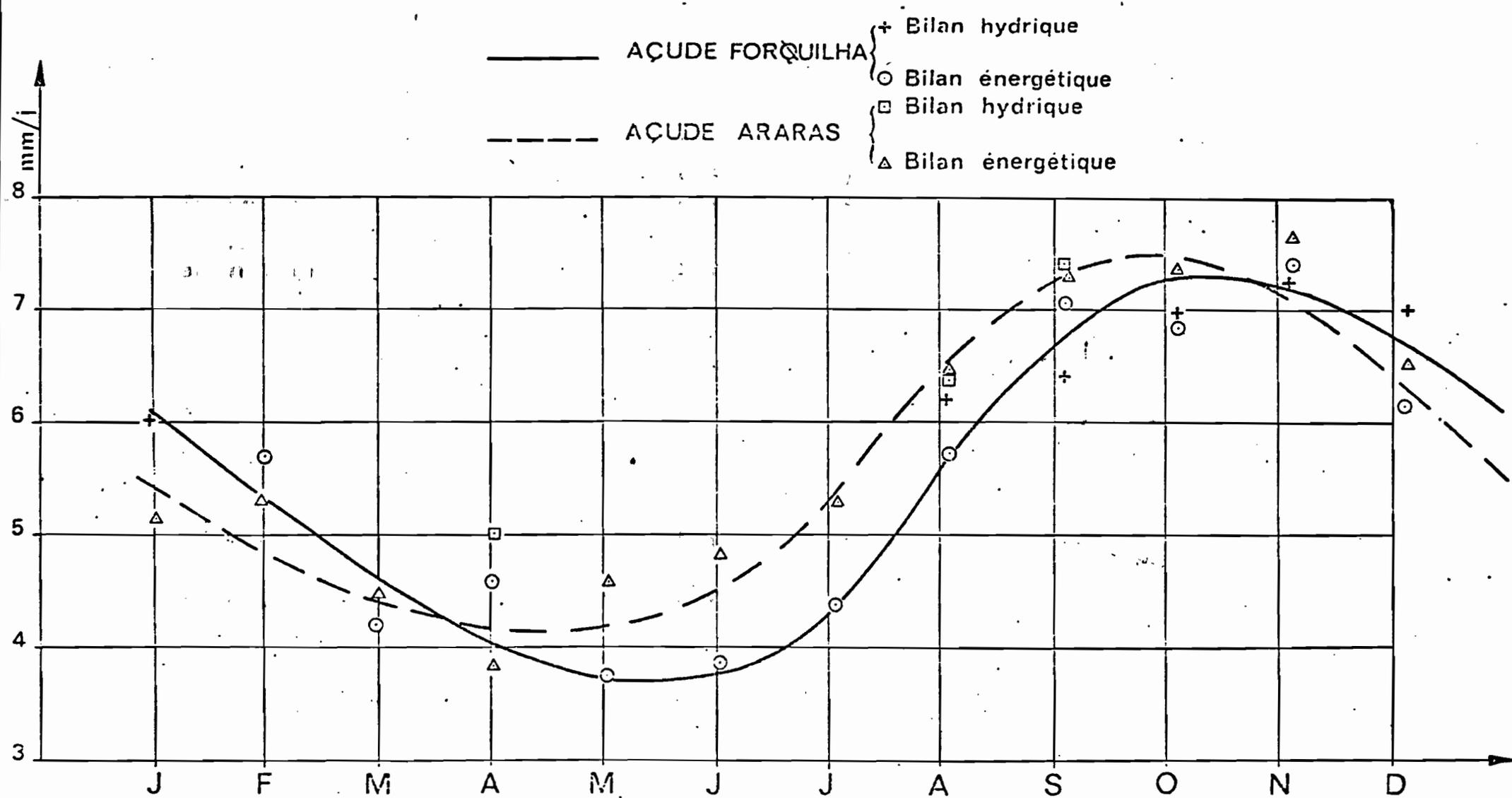
#### - Rélation évaporation BAC A/évaporation de la retenue

Le moyen le plus simple de mesurer l'évaporation étant fourni par un bac évaporimètre, la question de la relation de celle-ci avec l'évaporation d'un plan d'eau survient tout naturellement: Leimbock donne, pour les deux açudes précédents, un rapport mensuel entre ces deux évaporations (soit  $K_{EV}$ ).

RAPPORT  $K_{EV}$  entre l'évaporation du BAC A ( $EVP_b$ ) et l'évaporation calculée par la méthode du bilan énergétique (in S. CAMPELLO, 1979).

AÇUDE	EVAPO	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
FOR- QUI- LHA	CALC.	189	150	140	123	116	114	136	177	202	226	216	208	2078
	BAC A	233	207	160	130	168	173	210	265	276	281	262	274	2639
	$K_{EV}$	0,81	0,72	0,88	0,95	0,69	0,66	0,64	0,67	0,73	0,8	0,82	0,76	0,78
ARA- RAS	CALC.	167	136	138	127	132	135	167	203	220	232	214	198	2069
	BAC A	248	210	168	155	168	178	228	265	276	302	298	279	2775
	$K_{EV}$	0,67	0,64	0,82	0,82	0,78	0,76	0,73	0,77	0,8	0,77	0,72	0,71	0,75

Variation annuelle de l'évaporation moyenne journalière (mm/j) (D'après Leimbock)



GRAPHIQUE (5-1)

Une étude similaire menée par le DRN sur le bassin versant du RIA CHO DO NAVIO a donné le graphique (5.2).

On constate que le coefficient ( $K_{EV}$ ) moyen avoisine 0,83 ce qui est compatible avec le résultat précédent. L'étude montre par ailleurs que par les mois de grande évaporation ce coefficient a tendance à baisser; ceci correspond sans doute au fait que la masse de l'eau de l'açude joue un rôle de volant thermique modérant l'évaporation par rapport au BAC surchauffé.

#### - Facteurs influençant l'évaporation

D'après Pioget (FAO, 1964) la faible amplitude thermique journalière et la relative constance des températures annuelles font que la température de l'eau varie peu et, partant, n'a que peu d'influence sur l'évaporation. Il en déduit que cette dernière ne sera que faiblement dépendante de la profondeur moyenne de l'açude.

L'inertie thermique d'une grande masse d'eau est de fait un frein à l'échauffement et donc à l'évaporation. On a constaté sur l'açude Santo Antônio de Russas une réduction de 15% de l'évaporation quand la profondeur moyenne passe de 4 à 8 m (in CAMPELLO, 1979).

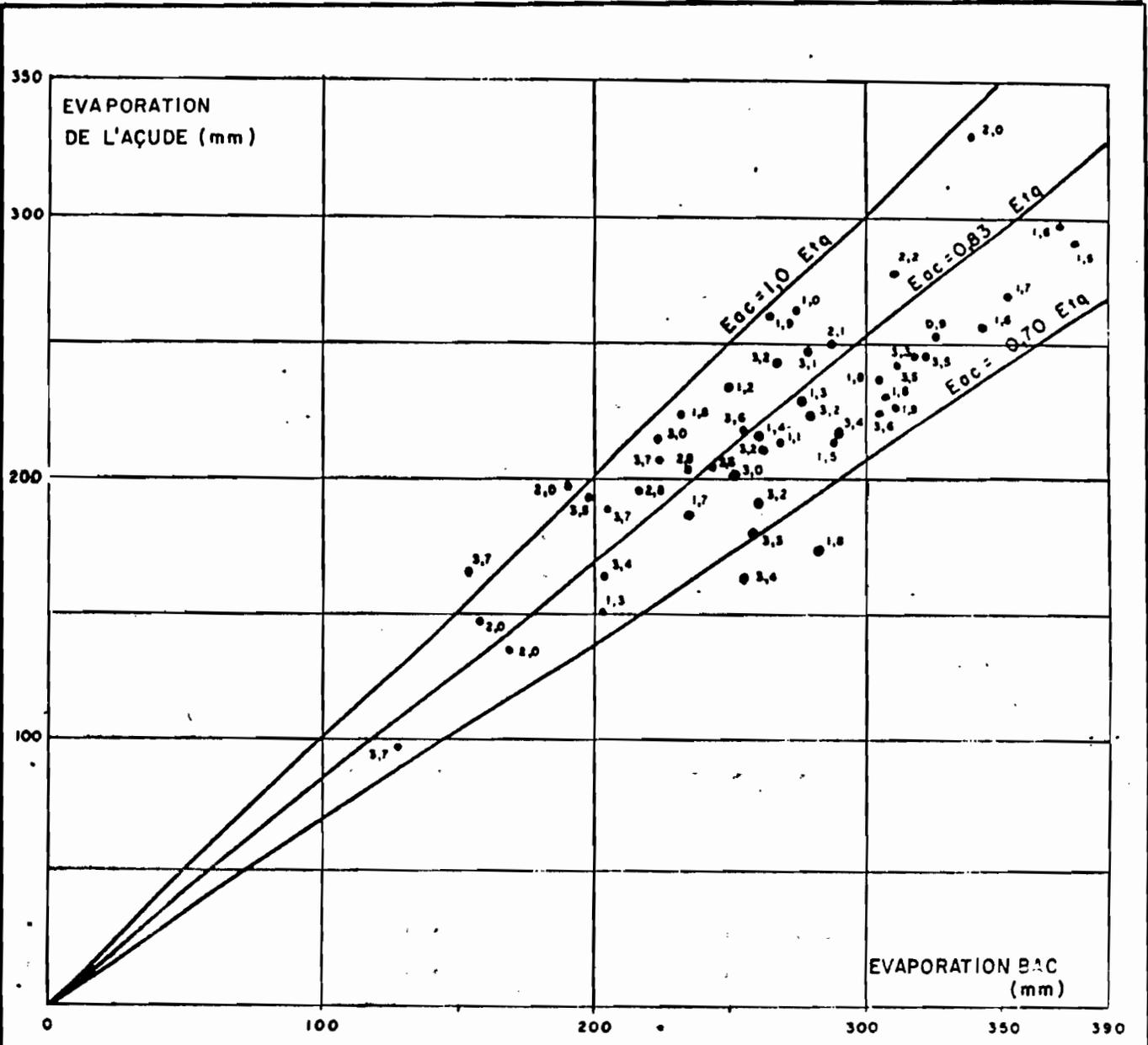
Le rapport du DRN tente lui aussi d'estimer l'importance de ce facteur et donne une variation de  $K_{EV}$  pour deux açudes (Betânia et Conceição):

Profondeur moyenne de l'açude (m)	$K_{EV}^{(1)}$	$K_{EV}^{(2)}$
1,17	0,89	0,85
1,8	0,87	0,83
2,68	0,85	0,81
3,29	0,84	0,80

Variation de  $K_{EV}$  avec la profondeur moyenne de l'açude

$$(EVPa = K_{EV} EVPb)$$

L'importance du phénomène étant de l'ordre de 5% nous le négligeons dans notre programme.



GRAPHIQUE (5-2)

RELATION ENTRE L'EVAPORATION MENSUELLE DE L'AÇUDE CONCEIÇÃO ET L'EVAPORATION BAC -

(les mois correspondants à des apports importants ont été éliminés - A côté du point figure la profondeur moyenne de l'açude au mois considéré).

Il est possible de réduire l'évaporation d'un plan d'eau par une action directe, à l'aide de films chimiques répandus en surface (alcool gras, matières plastiques). Des résultats expérimentaux ont été publiés par A.L. TISDALL dès 1953 et certains essais ont déjà été réalisés dans le Nordeste. Ces techniques restent marginales et quoique non dénuées d'intérêt, elles ne concernent pas, à l'heure actuelle, le petit propriétaire. Toutefois, une réduction de l'évaporation pourra être testée dans le modèle et son importance sur la production même sera mise en évidence.

L'évaporation est de même fortement influencée par l'état du temps, diminuant sensiblement lorsque le ciel est couvert et lorsqu'il pleut.

Notre modèle prend pour évaporation journalière une fraction de la moyenne mensuelle du mois correspondant.

Cette moyenne est bien sûr variable selon le mois et prend en compte l'état moyen du ciel. Ceci revient à dire, dans une première approximation, que l'évaporation mensuelle est corrélée avec la pluviométrie mensuelle.

Le diagramme (5.3), tiré d'une étude de la COMPESA, montre l'allure d'une telle corrélation. Chaque point représente un mois dans le diagramme mensuel (EVPb, Pluies). L'ensemble B est considéré comme provenant des erreurs provoquées par les pluies fortes (pertes) et la nuage C comme le résultat d'une sous-estimation des pluies fines. La droite D donne alors une relation assez nette. Pour satisfaire notre souci de prendre en compte des séries réelles et non des moyennes, il sera possible d'essayer de relier les pluviométries et les évaporations journalières.

Ceci nécessiterait, en toute rigueur, l'introduction d'un diagramme mensuel intensité-durée-fréquence et pourrait constituer une amélioration futur de notre modélisation.

#### - Relation ETP/évaporation BAC A

La relation entre l'ETP calculée par Hargreaves et l'évaporation du BAC A est d'une grande importance puisqu'elle doit permettre de passer de l'une à l'autre, selon le cas pratique, et d'adapter les coefficients culturels. Elle permet, indirectement, de déduire l'évaporation de l'açude

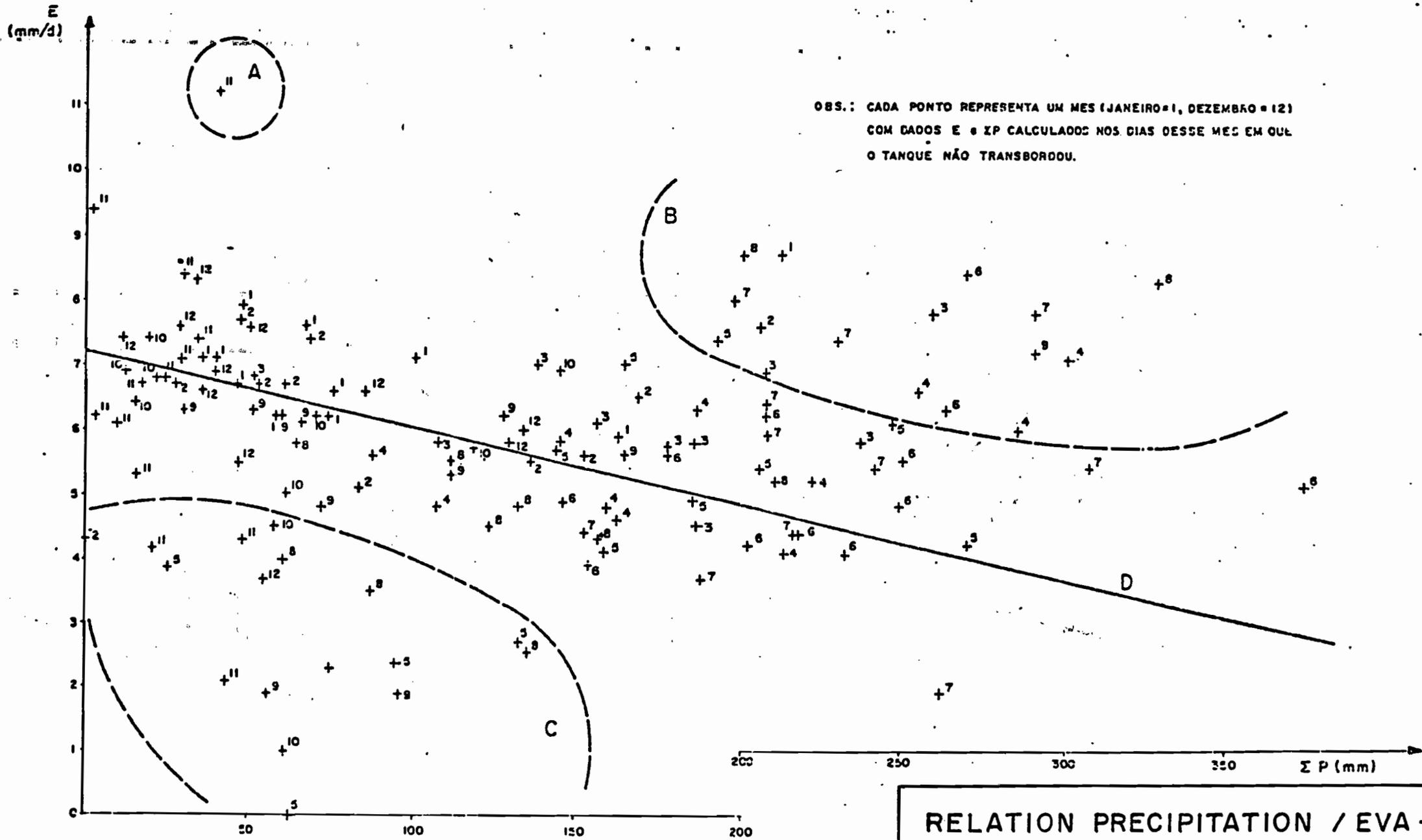


DIAGRAMME (5-3)

RELATION PRECIPITATION / EVA-  
 PORATION MOYENNE JOURNALIERE

de l'ETP.

$$\text{Soit } E\text{VP}_a = K_{ev} E\text{VP}_b$$

$$E\text{TP} = K_{et} E\text{VP}_b$$

Aragão et Araujo ont trouvé, par la région du Sub-médio São Francisco une relation  $E\text{TP} = -0,742 + 0,609 E\text{VP}_b$  qui confère au rapport  $K_{et} = \frac{E\text{TP}}{E\text{VP}_b}$  une valeur pratiquement constante de  $0,52 \pm 0,02$  (in Boletim de pesquisa n° 4/CPATSA).

On trouve dans la littérature (Doorembas et Kassam, 1980) des tableaux donnant  $K_{et}$  en fonction de divers critères, humidité, vent et milieu libre, la hauteur des cultures ne dépassant pas 1 m dans un rayon d'une cinquantaine de mètres autour du bac (...). La station est supposée située dans une zone agricole où la densité de culture est de 50%. Le bac n'est pas muni d'un écran >>.

Le tableau (5.4) fournit les différentes valeurs de  $K_{et}$ .

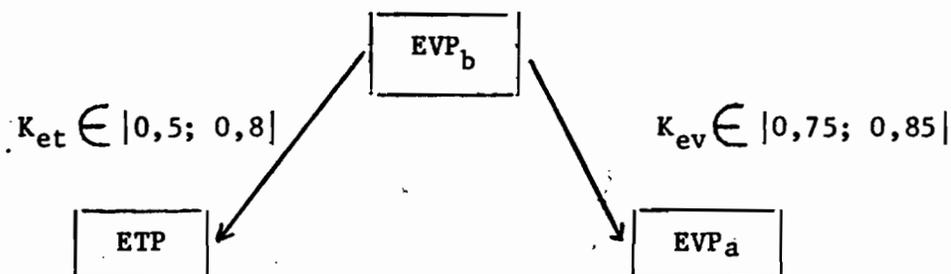
Tableau (5.4) Coefficient de conservation  $K_{et}$  pour un bac d'évaporation de la classe A, différents couverts du sol, degrés d'humidité relative moyenne et distance parcourue par le vent en 24 heures

$$K_{et} = E\text{TP}/E\text{VP}_b$$

HR moyenne %	Bac placé dans une zone portant une culture verte courte			Bac placé dans une zone de jachère sèche				
	faible <40	moyenne 40-70	forte >70	faible <40	moyenne 40-70	forte >70		
Vent km/jour	Distance côté vent de la culture verte m				Distance côté vent de la jachère sèche m			
Faible <175	1	.55	.65	.75	1	.7	.8	.85
	10	.65	.75	.85	10	.6	.7	.8
	100	.7	.8	.85	100	.55	.65	.75
	1000	.75	.85	.85	1000	.5	.6	.7
Modérée 175 - 425	1	.5	.6	.65	1	.65	.75	.8
	10	.6	.7	.75	10	.55	.65	.7
	100	.65	.75*	.8	100	.5	.6	.65
	1000	.7	.8	.8	1000	.45	.55	.6
Forte 425-700	1	.45	.5	.6	1	.6	.65	.7
	10	.55	.6	.65	10	.5	.55	.65
	100	.6	.65	.7	100	.45	.5	.6
	1000	.65	.7	.75	1000	.4	.45	.55
Très forte >700	1	.4	.45	.5	1	.5	.6	.65
	10	.45	.55	.6	10	.45	.5	.55
	100	.5	.6	.65	100	.4	.45	.5
	1000	.55	.6	.65	1000	.35	.4	.45

Azevedo H.M. (1984) conseille quant à lui d'utiliser un coefficient  $K_{et} = 0,75$  ; cette valeur semble inclure une certaine marge de sécurité sur le calcul ultérieur des besoins en eau des cultures.

De manière schématique on a donc les relations suivantes :



**B) MODULE HYDROLOGIQUE**

Nous avons besoin pour notre programme d'un module hydrologique capable d'évaluer la lame ruisselée dans l'açude pour chaque pluie journalière fournie par la banque de données.

Les études de bassins versants représentatifs menées par la SUDENE ont permis de mettre au point un modèle de simulation déterministe qui calcule les écoulements au pas de temps journalier. Ce modèle prend en compte les écoulements superficiels ainsi que les écoulements de base.

Cette méthode repose sur une classification préalable du bassin hydrologique à étudier. Celle-ci se fait à l'aide de divers critères, géologiques, pédologiques, topographiques, etc...

Le tableau (5.5) résume l'ensemble des caractéristiques qui doivent permettre de classer le bassin versant et de l'assimiler à l'un des six bassins-type présentés.

Pour chacune des classes de la typologie ont dispose de résultats expérimentaux qui permettent de déterminer l'écoulement relatif à une pluie journalière donnée. Cette lame écoulée  $L_n$  dépend de la pluie  $P_n$  et d'un indice d'humidité du sol  $IH(n)$ . Cet indice est calculé chaque jour par un sous-programme utilisant la formule classique de KOHLER:

$$IH(\text{jour}(n)) = \sum_{\text{jour}}^{\text{jour}(n-1)} (P_{ai} \times k^{t_{ai}}) \quad (0 < K < 1)$$

**GRAPHIQUE (5-6)**  
**LAME ECOULEE DES CRUES**  
**EN FONCTION DE LA PLUIE ET**  
**DE L'INDICE DE SATURATION**

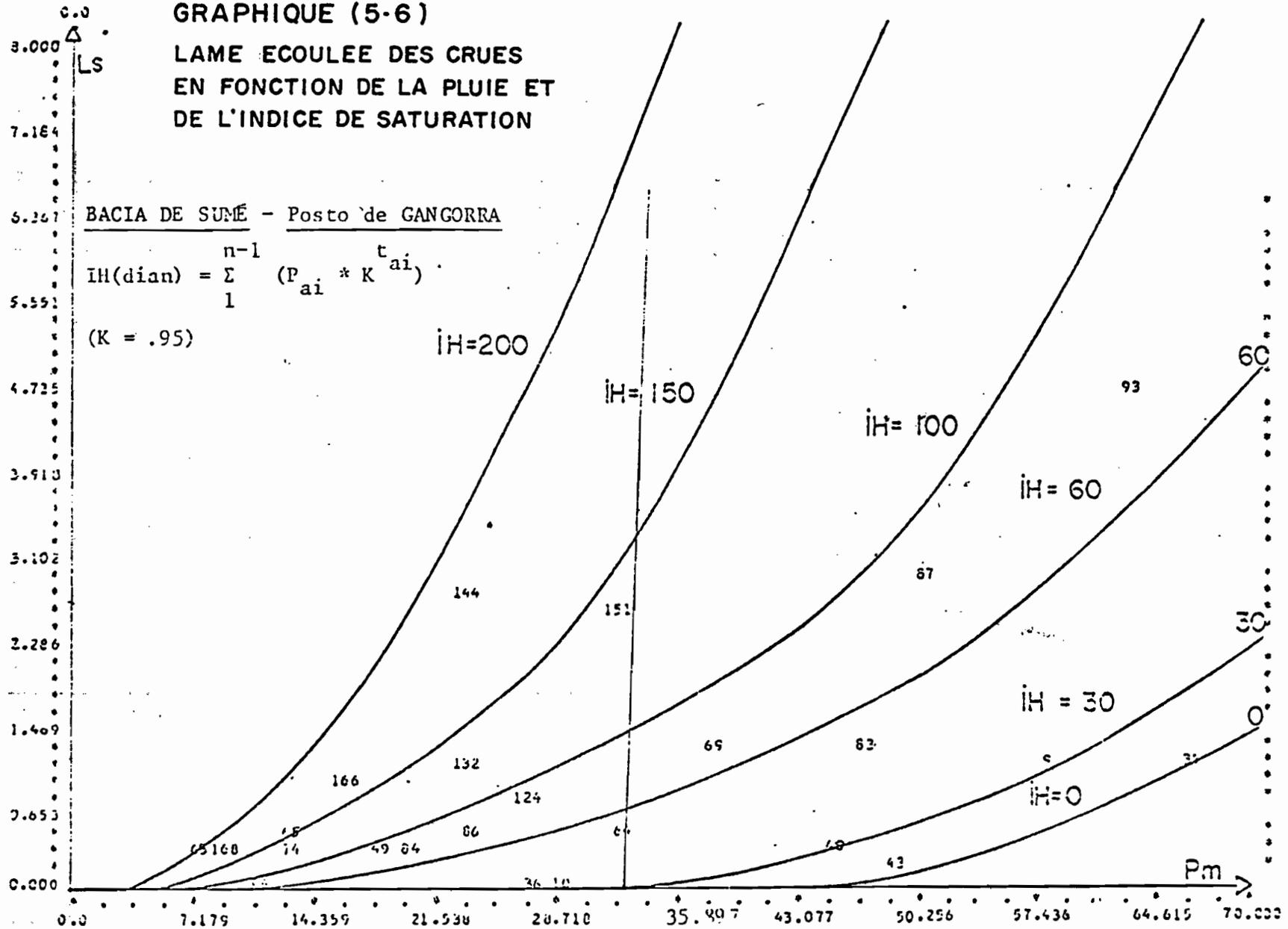
0.0  
 3.000  
 7.164  
 5.267  
 5.551  
 4.725  
 3.913  
 3.102  
 2.286  
 1.469  
 0.653  
 0.000

LS

BACIA DE SUMÉ - Posto de GANGORRA

$$IH(dian) = \sum_{i=1}^{n-1} (P_{ai} * K^{t_{ai}})$$

(K = .95)



**TABEAU (5-5) - RESUME DE LA CLASSIFICATION HYDROLOGIQUE DES PETITS BASSINS DU SEMI-ARIDE**

Classe	CRITERES DE CLASSIFICATION			CARACTERISTIQUES ASSOCIEES			
	Type et perméabilité de la FORMATION GEOLOGIQUE	SOL DOMINANT		Situation et séquences typiques de sols dans le bassin	Végétation	Relief	Réseau de drainage
		Type	Épaisseur et Perméabilité				
0	Sédimentaire perméable (Ares, dunes, calcaires, etc.)	AQ LA sableux Association LA+CA	Très épais 2m Très perméable (200 mm/h)	AQ et LA situés sur les parties basses quelque soient les sols en amont	Naturelle ou Cultivée	Nul ou faiblement ondulé	Inexistant ou très faible
1	Sédimentaire perméable p.e. Calcaires ou grès siliceux à ou Cristallin (granit grossier)	CA+LA (texture moyenne) PE, TR PL épais RE épais	Épais (1 à 2m) Perméable (100 mm/h)	CA, LA, PE, TR dans les parties hautes. PE dans les parties basses sans affleurement rocheux.	Naturelle ou Cultivée	Faiblement ondulé	Peu dense
2	Cristallin fissuré ou Sédimentaire avec des zones imperméables	PVA NC verticale RE épais PL sans SS V	Épaisseur moyenne (de 0,5 à 1 m). Perméabilité modérée (50 à 100 mm/h)	Sols avec une grande capacité de rétention dans les parties basses (PL, Alluvions, etc)	Naturelle ou peu dégradée	Ondulé	Marqué
3	Cristallin qui peut être fissuré ou Sédimentaire imperméable	NC, RE, Re PL+SS	Peu épais (0,5 m) Peu perméable (50 mm/h)	Association PL+SS dans les parties basses Quand la géologie le permet, quelques affleurements dans les parties hautes.	Naturelle ou peu dégradée	Ondulé à fortement ondulé	Bien marqué
4	Cristallins ou Sédimentaires imperméables (argilites, folhelos, laterites)	NC, Re, SS RE ras Sédiments argileux Laterites	Ras 0,5 m Perméabilité faible (50 mm/h)	Proportion d'affleurement de roche ou de zones imperméables supérieures à 5% du bassin	Naturelle ou peu dégradée	Ondulé à montagneux	Dense
5	Soussol imperméable: Cristallin sans faille ou sédimentaire imperméable	NC et Re ras, SS Laterites Affleurements Sédiments argileux Imperméabilisation artificielle (citernes, etc.)	Sols très ras Perméabilité très faible	Proportion d'affleurement ou de zones imperméables supérieures à 25% du bassin. Quand le relief est faible le soussol doit être totalement imperméable.	Peu développé dans ce type de bassin.	Tout type, de faible à montagneux	Très développé.

OBS.: dans les classes 2, 3 et 4 la dégradation de la végétation naturelle peut augmenter la classification d'une unité à une classe.

$T_{ai}$  étant le temps qui sépare la pluie  $P_{ai}$  de la pluie  $P_n$ . Le graphique (4.6) présente un faisceau de courbes correspondant chacune à une valeur de  $IH$ . De l'abscisse  $P_n$  on déduit  $L_n$  en ordonnée.

On peut obtenir ces ensembles de courbes pour diverses valeurs de  $K$  que l'on peut caler pour obtenir une dispersion minimum. La graphique (5.6) est tracé pour la valeur  $K = 0,95$ .

Ces valeurs  $L_n$  sont en réalité des lames fictives, reprises en compte dans un modèle plus complet, faisant intervenir les écoulements souterrains, qui donne les lames ruisselées nettes.

De ce modèle il est possible de tirer de multiples résultats (lame annuelle moyenne, lames de crues, périodes de retour etc...) (CADIER, 1984).

### C) CARACTERISTIQUES DE L'AÇUDE

#### - GEOMETRIE

L'açude est principalement décrit par son équation géométrique  $V = K H^\alpha$ , telle que nous l'avons discutée au II.

Son évaporation journalière sera déduite de  $S = \alpha K H^{\alpha-1}$ .

#### - PERTES PAR INFILTRATION

On distingue tout d'abord les pertes à travers le barrage même qui, si elles sont négligeables dans les grands ouvrages, apparaissent fréquemment dans les plus petits. Un mauvais compactage, une fondation précaire ou l'utilisation de matériaux inadéquats sont souvent la cause de ces fuites dont profitent en général quelques bananiers, cocotiers ou plants de canne à sucre. Cette zone perpétuellement humide est nommée "revência".

Les pertes par infiltration dans la retenue elle-même sont faibles dans le cas d'açudes construits en zone cristalline, ce qui est souvent le cas. Quand on en aura une idée plus précise il sera aisé d'en tenir compte dans le bilan de l'açude. Dans le cas général, nous prendrons en compte l'ensemble de ces infiltrations en majorant arbitrairement l'évaporation de surface. On avait  $EVP_a = K_{ev} EVP_b$  où  $K_{ev}$  était proche de 0,8; on prendra  $K_{ev} = 1$ . Ce choix est bien sûr facilement modifiable.

#### D) MODELISATION DU SOL

Nous nous intéresserons ici à la capacité des sols à stocker l'eau utile pour les plantes, donnée essentielle dans la détermination des doses et des fréquences d'irrigation.

L'aspect dynamique du problème et les bilans prenant en compte le rôle des plantes seront abordés au paragraphe suivant:

##### - Généralités

Le concept d'eau disponible dans le sol est généralement relié à ceux de "capacité au champ" et de "point de flétrissement". La capacité au champ est l'eau restant dans le sol après le ressuyage d'un sol saturé et couvert de plastique. On constate expérimentalement qu'une durée de 36 à 48 heures permet d'atteindre cet équilibre pour des sols moyens. Pour des sols argileux à drainage lent, un délai de 60 heures peut être nécessaire. Le point de flétrissement correspond à une humidité engendrant dans le sol un potentiel matriciel de 15 atmosphère, considéré comme valeur limite pour la plante bien que certaines puissent continuer à prélever l'eau du sol à des pressions bien supérieures. Ces deux définitions font d'emblée apparaître les paramètres physiques fondamentaux du sol: porosité, potentiels matriciels, teneur en eau.

Le sol est un système à trois phases, solide, liquide et gazeuse qui se trouvent en proportions très variables mais dont la première occupe en général au moins 50%.

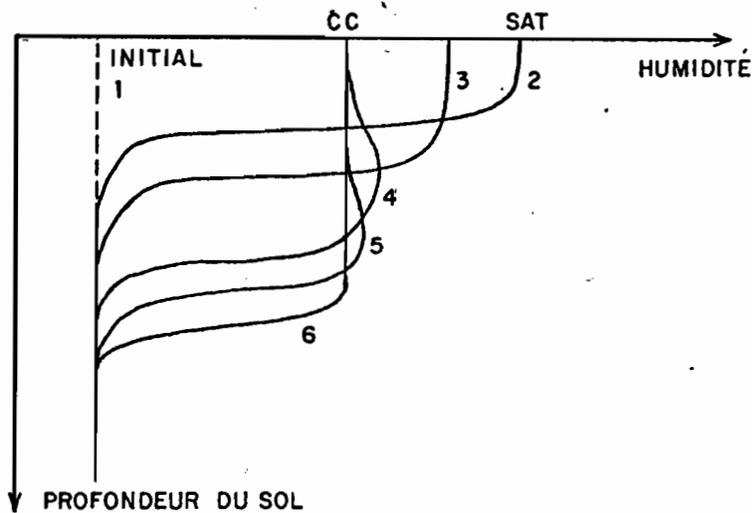
C'est la texture du sol qui va nous renseigner sur la nature, la taille et la distribution des particules solides du sol. La structure correspond (quant à elle) à l'assemblage de ces constituants en agrégats, en mottes, etc.. A cette texture et à cette structure seront associées une porosité ( $p$ ), définie comme la proportion du volume d'un échantillon qui n'est pas occupée par les éléments solides. Cette porosité relie la densité apparente du sol,  $d_a$ , et la densité de la phase solide  $d_s$ , en général peu différente de 2,6.

$$\text{On a } d_a = (1 - p) d_s$$

La connaissance de la densité apparente  $d_a$  permet donc de connaître le volume susceptible d'être occupée par l'eau dans un volume unité de sol.

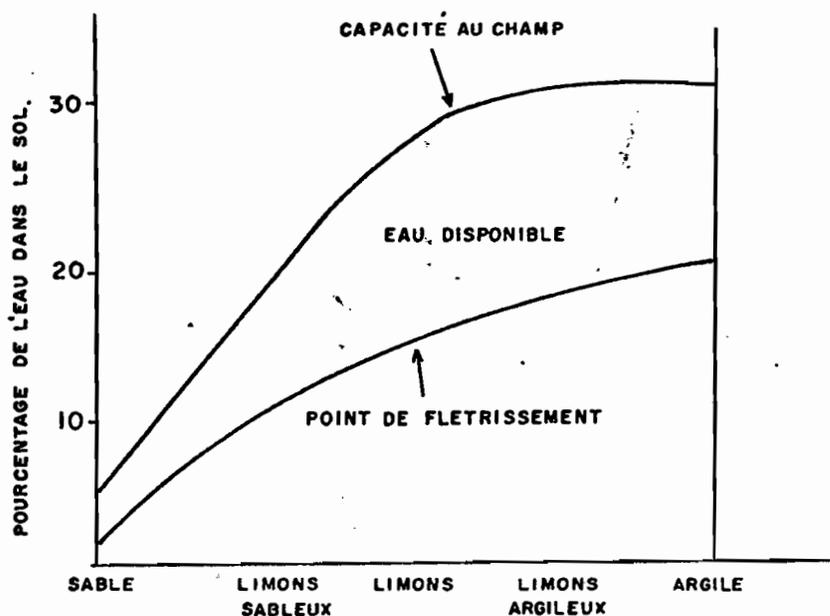
Cette porosité est très variable selon les sols mais n'indique pas directement le volume d'eau qui sera disponible pour les plantes. La porosité pleine correspond à la saturation et la vidange gravitaire qui va l'amener à la capacité au champ dépend de l'importance de la macroporosité, responsable du drainage rapide. L'eau perdue par cette percolation est donc plus ou moins importante selon la structure et la texture du sol; le potentiel du sol associé à cette capacité au champ variera de la même manière dans une bande de 0,1 à 0,3 bars, les valeurs faibles correspondant aux textures grossières et les valeurs élevées aux textures fines.

Le graphique ci-dessous montre l'évolution du profil hydrique du sol entre la saturation et la capacité au champ (le sol est supposé homogène)



Au fur et à mesure que la teneur en eau diminue, l'eau occupe une fraction de plus en plus faible et, surtout, de plus en plus fine de la porosité, ce qui engendre des forces capillaires chaque fois plus importantes. On a donc une augmentation du potentiel matriciel du sol avec la diminution de la disponibilité en eau, et l'on considèrera qu'au delà de 15 atmosphères l'eau n'est plus utilisable pour la plante (point de flétrissement PF). Cette fraction perdue peut être assez importante comme dans le cas des argiles et son extraction demande des forces considérables.

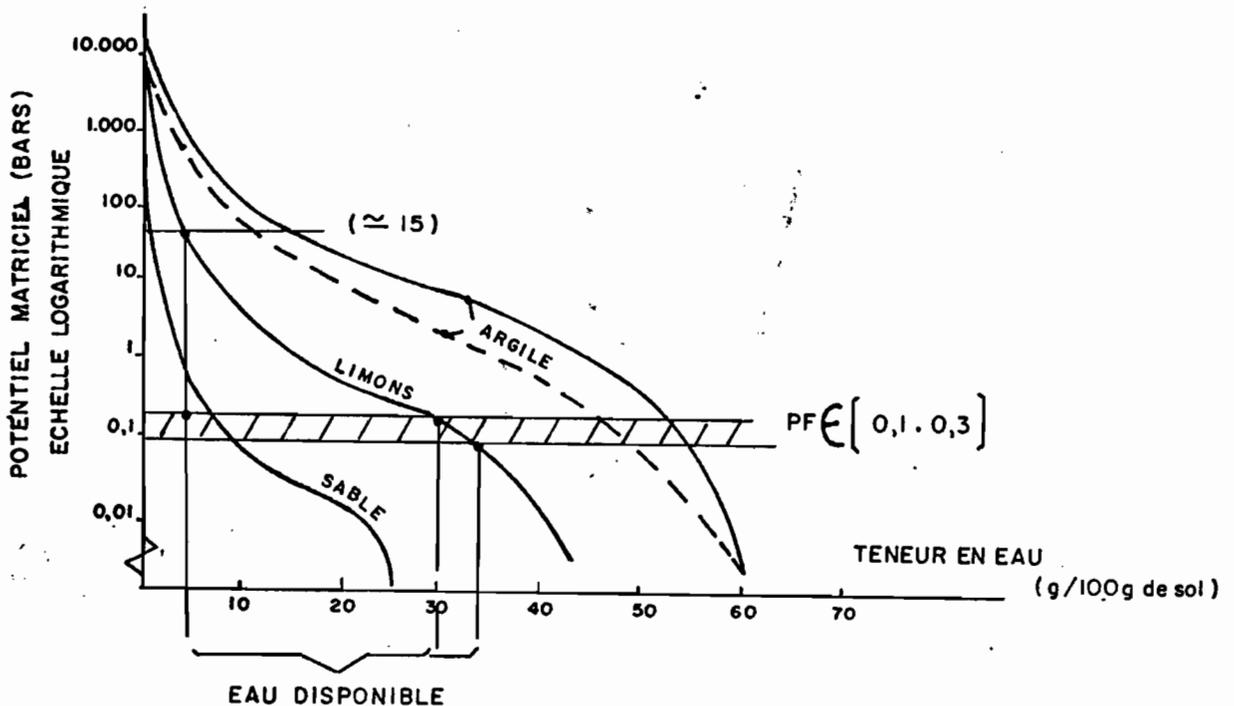
Le diagramme suivant résume de manière qualitative les proportions entre l'eau disponible à la capacité au champ et l'eau restant au point de flétrissement.



(adapté de Nyle C. Brasy (1983))

Notons qu'il existe des formules empiriques permettant d'évaluer la capacité au champ en fonction de la teneur en argile, en limons et en sable, du sol. Ces formules sont cependant d'un emploi délicat en milieu tropical : un latosol (Kaolinite + oxydes de fer) possède plus de 50% d'argile et présente de par sa structure une macroporosité élevée. Sa rétention relative est donc faible et son comportement dynamique plus proche de celui des sables. Il ne nous reste maintenant plus qu'à savoir comment varie le potentiel du sol en fonction de la teneur en eau.

Le diagramme qui suit montre de manière schématique que les sols lourds retiennent et emmagasinent plus d'eau que les sols sableux, moins capacitifs mais plus généreux.



(in Brady N.C. (1983))

L'intersection des courbes avec les potentiels associés au point de flétrissement et à la capacité au champ définissent des teneurs dont se déduit l'eau disponible.

Dans notre modélisation, l'état de la réserve en eau du sol sera représenté par le coefficient  $R$ , rapport de l'eau réellement disponible sur l'eau disponible à la capacité au champ, ou humidité relative ( $0 \leq R \leq 1$ ).

La réserve en eau maximale ( $R = 1$ ) sera donné par

$$RU = da \cdot (HCC - HPF) \cdot Z$$

$RU$  (en mm)

$da$  densité apparente

$HCC, HPF$  humidité en %

$Z$  profondeur de la couche de sol considéré (dm)

et si  $HA$  est l'humidité actuelle, on aura

$$R = \frac{HA - HPF}{HCC - HPF}$$

$R$  sera le lien entre la réserve en eau et le potentiel matriciel du sol.

- Données du Nordeste

La carte des sols SUDENE/EMBRAPA du Nordeste fait apparaître 24 types de sols principaux subdivisés en 210 sous-types distincts. Les sols que l'on trouve en majeure proportion sont les latosols jaune-rouge, les podzols jaune-rouges, les sols bruns non calciques.

Le CPATSA, à Petrolina, a mené une étude assez complète sur trois types de sol se trouvant dans la zone expérimentale de Bebedouro. Voici, par exemple, les résultats obtenus pour le Latosol de l'unité 37AA (bulletin CPATSA n° 4).

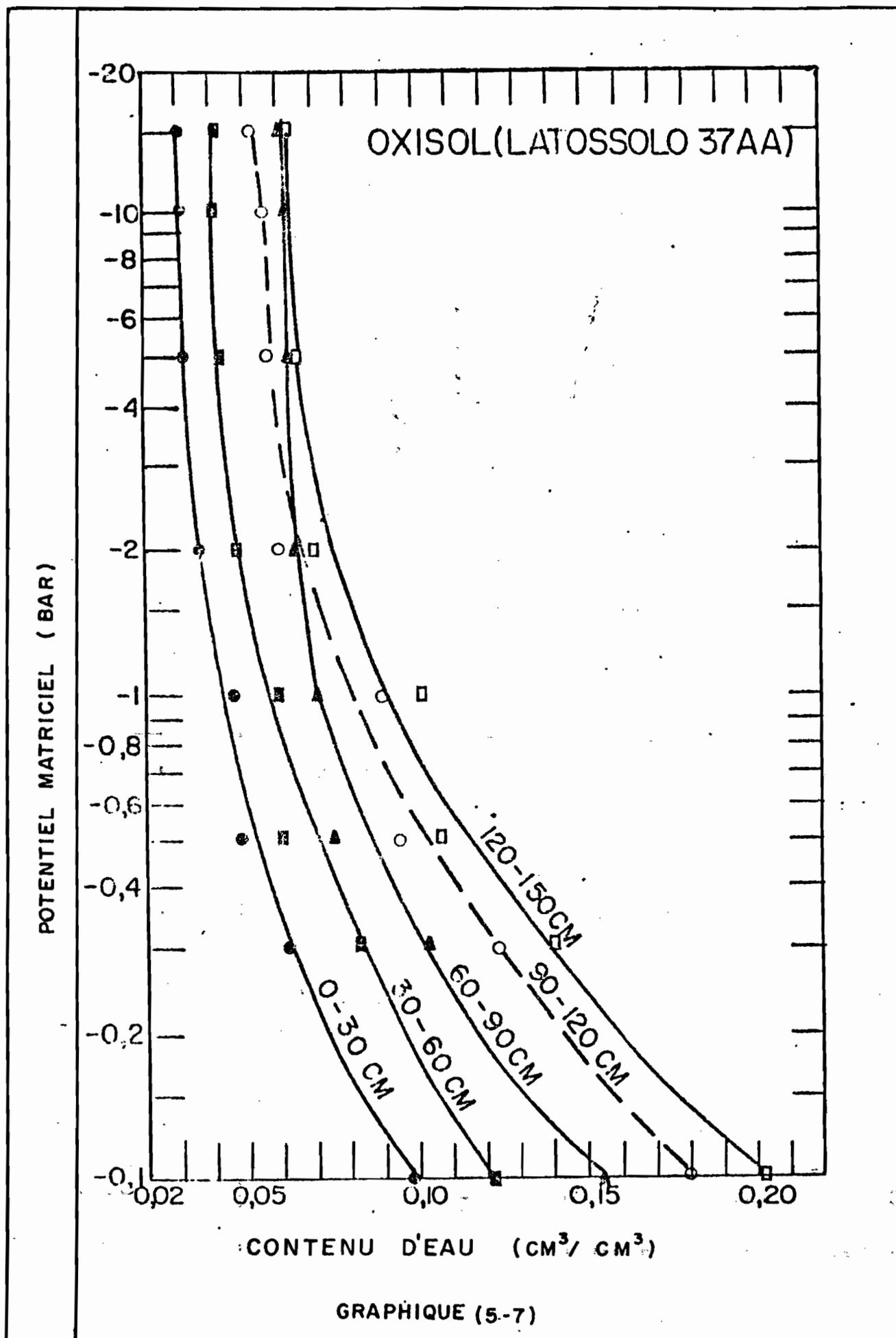
CARACTERISTIQUES	PROFONDEUR			
	0-30	30-60	60-90	90-122
Granulometrie				
Sables grossiers (%)	4	5	3	3
Sables fins (%)	87	81	79	76
Limons (%)	4	5	6	8
Argiles (%)	5	9	12	13
Densité apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,62	1,68	1,64	1,62
Porosité totale (%)	40,4	38,7	40,1	42,6
Capacité au champ (%)	8,94	9,00	9,2	9,00
Rétention au P.F. (%)	1,84	2,52	3,07	3,22
Eau disponible (cm)	3,45	3,27	3,00	3,01

Les caractéristiques des deux autres latosols étudiés sont données en annexe.

On constate qu'en définitive l'eau disponible dans la couche 0-60cm est de  $1,18 \pm 0,07$  mm/cm soit environ 12 cm/m de sol.

L'étude donne par ailleurs les courbes de variation du potentiel matriciel en fonction de la réserve en eau et ceci pour chaque couche de sol. Le graphique (5.7) donne les résultats obtenus pour l'échantillon 37AA et les autres sont reportés en annexe.

Ces caractéristiques ont été étudiées de même pour 12 échantillons représentatifs de 4 sols communs dans le Nordeste.



- 1) un Podzol rouge-jaune eutrophe (PE<sub>1</sub>)
- 2) un Podzol rouge-jaune latosolique (PV-9)
- 3) Latosol rouge-jaune distrofique (LVd1)
- 4) une terre rouge structurée eutrophe (TRe)

Le tableau (5.8) ressemble l'ensemble des résultats concernant la densité apparente, la texture, la granulométrie et les humidités correspondant à divers potentiels. (L. Bezerra de Oliveira, 1975).

De ces résultats on déduit, par la formule déjà vue plus haut, les disponibilités en eau des sols.

La capacité au champ correspond à une potentiel de 0,1 bar pour les structures grossières et 0,33 pour les structures moyennes et fines.

SOL	Profil	Eau disponible moyenne (cm/m)	Eau disponible cm/122cm de profondeur
PODZOL (PE <sub>1</sub> )	1	10	12,1
	2	8,4	10,2
	5	7	8,6
PODZOL (PV-9)	9	9,5	11,6
	8	6,9	8,4
	11	4,7	5,7
LATOSOL (LVd1)	7	6,8	8,3
	13	6,4	7,8
	15	4,3	5,2
TERRE ROUGE (TRe)	1	4,8	5,9
	5	3	3,7
	13	4,5	5,5

Il faut se rappeler qu'à l'intérieur même d'une classe de sol, les variations peuvent être assez importantes: les échantillons 9 et 11, bien que considérés comme répondant à la même dénomination, présentent des réserves en eau qui varient du simple au double.

TABLEAU (5-8).

SOLS et PROFILS.	HORIZON		DENSITÉ APPARENTE	ANALISE GRANULOMETRI- QUE (%)				CLASSIFICATION TEXTURALE	HUMIDITÉ RETENUE DANS LE SOL					
	SYMBOLE	PROFUND. (cm)		SABLE GROSSIER	SABLE FIN	LIMONS	ARGILE TOTAL		A1/10 atm	A1/3 atm	A2 atm	A5 atm	A10 atm	A15 atm
PE1														
Perfil 1	A <sub>p</sub>	0 — 9	1,47	31	10	41	18	Franco	24,7	17,5	11,8	10,2	8,5	7,8
	A <sub>2</sub>	9 — 20	1,48	25	13	41	21	Franco	24,8	18,3	13,5	11,5	10,1	8,8
	B <sub>1</sub>	20 — 39	1,41	21	10	37	32	Fr.-argiloso	26,3	20,4	15,8	14,0	12,7	12,0
	B <sub>2</sub>	39 — 137	1,25	16	6	20	49	Argiloso	20,7	24,3	20,5	19,4	18,0	17,5
Perfil 2	A <sub>p</sub>	0 — 14	1,46	29	14	27	30	Fr.-argiloso	26,6	17,0	13,7	13,1	11,1	11,0
	B <sub>1</sub>	14 — 36	1,29	22	11	20	47	Argiloso	26,8	21,5	17,8	16,6	16,0	16,0
	B <sub>2</sub>	36 — 126	1,25	17	9	30	44	Argiloso	32,2	27,3	23,2	22,3	21,0	20,4
Perfil 5	A <sub>p</sub>	0 — 17	1,58	47	21	22	10	Fr.-arenoso	13,0	9,8	6,8	5,4	4,7	4,4
	B <sub>1</sub>	17 — 34	1,41	31	21	22	26	Fr.-arg.-arenoso	20,0	15,2	12,3	10,3	9,9	9,5
	B <sub>2</sub>	34 — 148	1,27	20	9	18	53	Argiloso	26,9	22,9	19,6	19,0	17,8	17,2
PV9														
Perfil 1	A <sub>1</sub>	0 — 24	1,43	56	26	7	11	Fr.-arenoso	6,0	5,5	4,9	4,7	4,0	4,0
	A <sub>2</sub>	24 — 39	1,50	40	21	9	24	Aren.-franco	12,5	12,3	9,2	9,0	8,1	8,1
	B <sub>1</sub>	39 — 56	1,60	47	18	8	27	Fr.-arg.-arenoso	15,5	14,5	11,7	11,5	10,7	10,7
Perfil 5	A <sub>1</sub>	0 — 20	1,46	76	15	1	8	Arenoso	5,9	4,3	4,0	3,9	3,6	3,3
	A <sub>2</sub>	20 — 41	1,41	66	15	4	15	Fr.-arenoso	8,4	6,7	6,5	6,3	5,6	4,9
	B <sub>1</sub>	41 — 61	1,28	55	16	3	26	Fr.-arg.-arenoso	13,5	10,4	8,9	7,6	7,5	7,5
	B <sub>2</sub>	61 — 133	1,25	48	14	3	35	Arg.-arenoso	16,2	13,4	11,2	11,1	10,7	10,5
Perfil 13	A <sub>1</sub>	10 — 22	1,42	59	29	5	7	Aren.-franco	8,2	5,4	4,9	4,6	4,2	4,1
	A <sub>2</sub>	22 — 44	1,41	63	26	3	8	Aren.-franco	6,4	4,6	3,6	3,5	3,0	3,0
	B <sub>1</sub>	44 — 70	1,41	52	23	4	21	Fr.-arg.-arenoso	10,2	9,8	6,1	5,7	5,2	5,2
	B <sub>2</sub>	70 — 140	1,34	37	19	5	39	Arg.-arenoso	22,2	15,7	12,0	12,4	11,6	11,5
I.Vd1														
Perfil 7	A <sub>p</sub>	0 — 16	1,40	42	10	10	38	Arg.-arenoso	20,9	17,5	14,7	12,6	12,6	12,6
	A <sub>2</sub>	16 — 29	1,41	42	10	5	43	Arg.-arenoso	25,5	17,6	16,4	14,7	13,9	13,9
	B <sub>1</sub>	29 — 47	1,40	33	10	4	53	Argiloso	28,6	21,9	18,9	17,7	17,4	17,4
	B <sub>2</sub>	47 — 84	1,31	30	8	1	61	Argiloso	28,9	23,7	20,3	19,8	18,2	18,2
Perfil 13	A <sub>p</sub>	0 — 21	1,39	57	13	6	24	Fr.-arg.-arenoso	13,4	11,0	9,1	8,4	8,1	8,1
	A <sub>2</sub>	21 — 38	1,48	49	16	8	27	Fr.-arg.-arenoso	14,7	12,8	11,3	9,7	8,9	8,9
	B <sub>1</sub>	38 — 61	1,49	44	9	10	37	Arg.-arenoso	21,9	17,6	15,0	14,2	13,7	13,2
	B <sub>2</sub>	61 — 150	1,45	36	9	7	48	Arg.-arenoso	23,6	18,1	15,8	14,9	14,1	13,6
Perfil 15	A <sub>p</sub>	0 — 18	1,44	49	14	8	19	Fr.-arenoso	14,4	11,3	9,4	8,8	8,1	8,1
	A <sub>2</sub>	18 — 30	1,50	54	13	6	27	Fr.-arg.-arenoso	16,5	12,3	10,8	10,2	10,2	10,2
	B <sub>1</sub>	30 — 113	1,50	35	9	5	51	Argiloso	25,4	18,8	16,3	15,2	15,1	14,5
	B <sub>2</sub>	113 — 150	1,50	32	13	5	50	Argiloso	26,6	20,2	17,3	16,4	16,2	16,2
TRe														
Perfil 8	A <sub>p</sub>	0 — 24	1,25	28	15	19	38	Fr.-argiloso	23,3	20,4	16,1	15,8	15,8	14,5
	B <sub>1</sub>	24 — 46	1,18	28	10	14	48	Argiloso	27,2	23,3	19,5	18,3	18,2	17,3
	B <sub>2</sub>	46 — 95	1,28	27	11	19	43	Argiloso	27,2	22,1	18,6	18,1	19,6	16,8
Perfil 9	A <sub>p</sub>	0 — 24	1,25	39	15	22	24	Fr.-arg.-arenoso	21,4	19,9	15,0	14,2	12,5	11,9
	B <sub>2</sub>	24 — 48	1,18	29	13	20	38	Fr.-argiloso	24,3	21,3	16,7	15,7	14,5	13,5
	B <sub>1</sub>	48 — 114	1,28	27	11	22	40	Argiloso	23,3	21,7	17,4	15,9	14,9	14,3
Perfil 11	A <sub>p</sub>	0 — 12	1,28	31	15	19	35	Arg.-arenoso	20,1	16,7	13,8	12,7	12,3	12,2
	B <sub>2</sub>	12 — 40	1,20	28	10	18	44	Argiloso	21,2	19,0	16,8	15,4	14,8	14,8
	B <sub>1</sub>	40 — 118	1,20	22	12	29	37	Fr.-argiloso	22,9	20,9	18,2	17,9	17,2	17,2

On voit qu'il est difficile de donner des normes permettant de dé terminer la réserve d'un sol. Un sondage pédologique est toujours recommandé. En cas d'impossibilité on pourra utiliser le tableau suivant qui donne des caractéristiques en fonction de la texture (DAKER).

La correspondance des textures avec la nomenclature française se fera avec le triangle des textures reporté en annexe.

PROPRIEDADES FÍSICAS USUAIS DOS SOLOS  
Segundo Israelsen & Hansen (1965, p. 164)

Textura do Solo	Velocidade de infiltração <sup>1</sup> (VIB) (mm/hora)	Espaço poroso total (%)	Peso específico aparente (d)	Capacidade de campo % (c)	Umid. mur-cham. % (m)	Água disponível total <sup>2</sup>		
						Peso seco % (c - m)	Volume % (c - m) d	mm/m (c - m) d.p
Arenoso	50 (25-225)	38 (32-42)	1,65 (1,55-1,80)	9 (6-12)	4 (2-6)	5 (4-6)	8 (6-10)	80 (60-100)
Barro-arenoso	25 (13-76)	43 (40-47)	1,50 (1,40-1,60)	14 (10-18)	6 (4-8)	8 (6-10)	12 (9-15)	120 (90-150)
Barro	13 (8-80)	47 (43-49)	1,40 (1,35-1,50)	22 (18-26)	10 (8-12)	12 (10-14)	17 (14-20)	170 (140-200)
Barro-argiloso	8 (2,5-15)	49 (47-51)	1,35 (1,30-1,40)	27 (23-31)	13 (11-15)	14 (12-16)	19 (16-22)	190 (160-220)
Argilo-arenoso	2,5 (0,3-5)	51 (49-53)	1,30 (1,25-1,35)	31 (27-35)	15 (13-17)	16 (14-18)	21 (18-23)	210 (180-230)
Argiloso	0,5 (0,1-1)	53 (51-55)	1,25 (1,20-1,30)	35 (31-39)	17 (15-19)	18 (16-20)	23 (20-25)	230 (200-250)

Obs.: Em parênteses se encontram os intervalos usuais.

- Os intervalos de infiltração podem variar ainda mais do que os indicados, em função da estrutura e estabilidade estrutural dos solos.
- Considera-se que a água facilmente disponível corresponde a cerca de 75% da totalmente disponível.

### Infiltration et ruissellement

Notre modèle de sol est un modèle simple à un réservoir, variable dans le temps. Toute pluie arrivant sur le sol s'infiltré jusqu'à la saturation du sol. Ceci nous permet d'écrire que tout apport supérieur à l'eau permettant de se ramener à la capacité au champ est perdu: la partie correspondant à l'eau gravitaire le sera par percolation, le reste par ruissellement de surface.

Notons que l'eau gravitaire profite en fait à la plante durant la période de ressuyage ce qui compense partiellement le fait qu'on ne tienn pas compte des remontées capillaires.

Il n'apparaît pas utile d'introduire une loi d'infiltration, dépendant de l'humidité du sol et de sa pente, car les ruissellements importants correspondent à des fortes pluies qui de toute façon saturent le sol et sont ainsi pris en compte dans notre modèle.

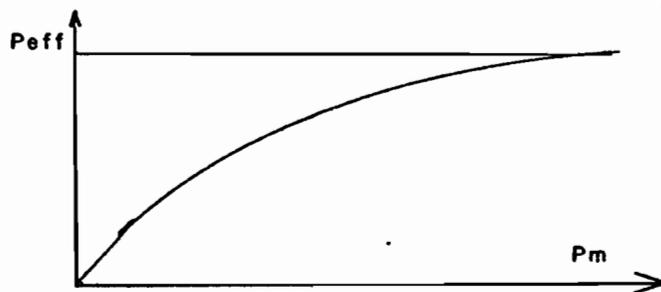
Un tel ajout n'a toute fois rien d'impossible mais devrait faire intervenir, en toute rigueur, le rapport durée-intensité des pluies; cette donnée n'est pas accessible.

La part des pluies utile, ou pluie effective, peut être approchée au niveau mensuel par la formule donnée par M. L. de Aguiar Borges.

$$P_{eff} = ETP (1 - e^{-C})$$

où ETP est l'évapotranspiration du mois

et  $C = \frac{1,1 \text{ Pluie mensuelle}}{ETP}$



Le rapport  $\frac{P_{eff}}{\text{Pluie}}$  nous donne un coefficient de réduction que l'on peut appliquer à toute les pluies du mois correspondant, en première approximation.

Doorembos et Pruitt (1976) donnent une estimation de la pluie effective tout à fait similaire et la corrigent en fonction du remplissage du sol.

Cette formule sera testée ce qui permettra d'évaluer l'importance des ruissellements qui ne seraient pas comptabilisés dans notre modélisation.

## E) MODELISATION DE LA PLANTE

Nous présentons ici une approche théorique de la modélisation d'une culture dans le cas général. (V) On utilisera les notations du programme informatique.

### Superficie plantée

Le périmètre d'irrigation est d'une superficie fixée, SURP, (surface du périmètre) et peut se subdiviser en trois parties réservées chacune à une culture donnée de nom NC. Leur part relative est définie par PERC(NC), pourcentage occupé par la culture NC. Chaque culture peut admettre jusqu'à trois sous-parcelles se trouvant à des stades de développement différents. Leur surface respective dépendra de la politique d'irrigation qui déterminera les dates et les superficies de plantation. Cette sous-culture KNC occupera un pourcentage PERC1 (NC, KNC) de la culture NC.

On aura donc  $\sum_{NC}^3 \sum_{KNC}^3 \text{PERC1 (NC, KNC)} \cdot \text{PERC(NC)} \cdot \text{SURP} \leq \text{SURP}$  c'est à dire la somme des 9 sous-parcelles (certaines éventuellement nulles) inférieure à la superficie totale.

On notera  $\text{SPP1 (NC, KNC)} = \text{PERC1 (NC, KNC)} \cdot \text{PERC(NC)} \cdot \text{SURP}$  la superficie de la sous-parcelle (NC, KNC).

### Cycle végétatif

On définira le cycle végétatif d'une culture par sa durée totale en jours et on distinguera cinq phases successives qui correspondront qualitativement à :

- 1) germination + installation
- 2) période végétative
- 3) floraison
- 4) formation du produit
- 5) mûrissement

La durée de chaque stade sera évidemment variable selon le végétal considéré. NDI (i, NC) est le numéro du dernier jour du  $i^{\text{ème}}$  stade de la culture NC (nom de la culture). Ainsi NDI(5, NC) est la durée totale du cycle.

### Croissance racinaire

La réserve en eau du sol disponible pour la plante dépend, on l'a vu, de la profondeur prospectée par les racines. La croissance racinaire dépend de la culture, des conditions climatiques et de la nature du sol; dans de bonnes conditions elle peut atteindre 2 cm par jour.

Soit JM le nombre de jours nécessaires pour atteindre la profondeur maximale PM; dans notre modèle on pourra prendre JM égal à la fin de la période végétative, soit NDI(2,NC), ce qui correspondra en moyenne à une durée représentant 40% du cycle environ.

Hanks et Hill (1980) utilisent une formule exponentielle du type suivant:

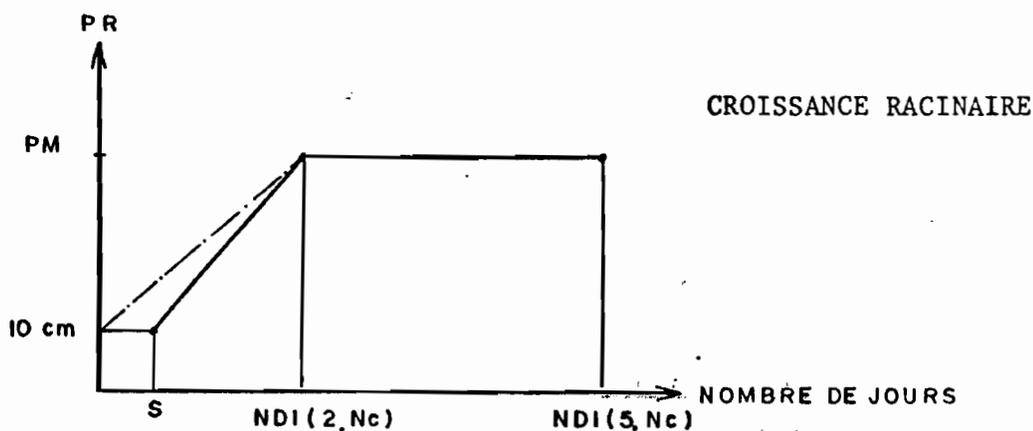
$$PR = PM / |1 + \exp(6 - 12.t/JM)|$$

où PR est la profondeur réelle au jour t.

Plus simplement, on peut représenter la croissance par une fonction linéaire, de 0 à PM, puis prolonger par l'horizontale jusqu'à la fin du cycle.

On voit tout de suite que l'on aura un problème en début de cycle où, de l'inexistence des racines, il résulte une disponibilité en eau nulle. On tourne généralement cette difficulté en attribuant à la graine une profondeur racinaire analogique égale, par exemple, à 10 cm. La semence bénéficie en fait des remontées capillaires constituant l'évaporation du sol et concernant une couche de sol dont l'importance est de cet ordre.

La modélisation qui découle de ces considérations est donc graphiquement la suivante.



Par simplification nous considérerons que  $S = 0$ .

Nous appelons ESTAG (NC,KNC) le nombre de jours écoulés depuis la plantation de la culture NC (sous-parcelle KNC).

On aura donc Si ESTAG(NC,KNC)  $\leq$  NDI(2,NC)

$$PR = 0,1 + \frac{ESTAG(NC,KNC)}{NDI(2,NC)} \cdot (PM - 0,1)$$

Si ESTAG(NC,KNC)  $>$  NDI(2,NC)

$$PR = PM$$

Si RFU est l'eau disponible pour un mètre de sol (RFU = RU(Z=1), la réserve en eau (en mm) contenue dans la couche prospectée par les racines (PR) est:

$$RRFU = PR \cdot RFU$$

Le bilan du sol, au pas de temps journalier, se fait donc en considérant la réserve en eau correspondant à la profondeur racinaire PR. Cette représentation ne tient donc absolument pas compte des remontées capillaires et encore moins des remontées de nappe. Des modélisations plus fines seront évoquées un peu plus loin mais on peut déjà prendre en compte ce phénomène en considérant que l'eau provenant de la couche de sol  $\Delta P$  située en dessous des racines et remontant par capillarité, alimente la plante comme si celle-ci avait une profondeur racinaire PR +  $\Delta P$ .

Selon l'évaluation qu'on fera de l'importance de ces apports on pourra majorer d'autant la valeur PR, ce qui implique déjà que l'on connaisse celle-ci avec une bonne précision.

Notons aussi que ces remontées compensent la percolation profonde qui persiste en fait même en dessous de la capacité au champ.

Hargreaves (1975) donne les résultats d'études menées au CAPTSA sur cette profondeur racinaire. Le tableau suivant les reproduit en colonne (1). En colonne (2) nous avons mis quelques valeurs tirées d'une note technique du projet Provarzeas. On constate que la concordance est peu satisfaisante. La 3<sup>ème</sup> colonne reproduit les plages de profondeur conseillées par DOOREMBOS ET PRUITT (FAO 1976).

CULTURE	PM (1) (m)	PM (2)	PM (3)
Haricot	60	25 (?)	50 - 90
Oignon	30 - 45	50	30 - 75
Betterave	60 - 90	-	-
Choux	60	-	30 - 60
Carotte	45 - 60	-	30 - 75
Maïs	60 - 120	60	75 160
Coton	60 - 120	-	75 - 170
Pomme de terre	60	-	30 - 75
Patate douce	75 - 90	-	-
Tomate	30 - 60	50	40 - 100
Céréale	60 - 75	30 - 50	60 - 150
Soja	60	-	60 - 125
Melon	60 - 75	-	-
Raisin	90 - 175	-	75 - 180
Pature	45 - 75	-	-
Ananas	30 - 60	-	-
Riz	-	40	-

Ces profondeurs varient essentiellement en fonction du type de sol, le tableau (5.9) donne les zones radiculaires de 5 classes de végétaux en fonction de la texture du sol et en déduit les disponibilités en eau.

Nous avons traduit les dénominations des sols en français en considérant le triangle de référence des textures en usage au Brésil. Celui-ci est reporté en annexe ce qui permettra de retrouver la composition de ces sols dont le nom en portugais figure sous le nom français.

#### Consommation optimale des cultures (ETM)

L'évapotranspiration maximale d'une culture, ETM, correspond à la consommation du périmètre planté quand celui-ci est convenablement approvisionné en eau et maintenu à une humidité proche de la capacité au champ.

Cette ETM correspond à une intensité limite dans le processus de transfert de l'eau depuis le réservoir-sol jusqu'à la surface-évaporante.

Ce besoin en eau varie avec la culture, son stade végétatif, la densité de plantation et le climat. La densité de plantation est rarement précisée, bien que d'elle dépende la proportion entre la transpiration de

CULTURE	PM (m)	E.D.	PM (m)	E.D.	PM (m)	E.D.	PM (m)	E.D.	PM (m)	E.D.
	Carottes, petit-pois, épinard, betterave		Maïs, coton, tabac, céréales		Paturages Trèfle Luzerne		Arbustes fruitiers		Arbres fruitiers développés	
SOL										
Sable fin (areia fina)	0,50	50	0,75	75	1,00	100	1,50	150	2,50	250
Sable argileux (franco arenoso fino)	0,50	75	1,00	150	1,00	150	1,67	250	2,00	300
Limon Sablo-argileux (franco limoso)	0,62	125	1,00	200	1,25	250	1,50	300	2,00	400
Argile Limon sableux (franco argiloso)	0,40	100	0,80	200	1,00	250	1,00	250	1,60	400
Argile (argiloso)	0,25	75	0,50	150	0,67	200	0,67	200	1,17	350

TABEAU 5.9

PM = profondeur racinaire  
E.D. = eau disponible

la plante et l'évaporation du sol, ce qui sousentend implicitement qu'elle est peu variable dans la pratique.

Pour chaque culture on reliera donc cette consommation ETM à la demande climatique représentée par ETP, défini plus haut (A). La relation est linéaire mais le coefficient de proportionnalité  $K_c$  - appelé coefficient cultural - dépend bien sur du stade de développement du végétal; on a:

$$ETM = K_c \cdot ETP$$

De manière générale, les besoins en eau augmentent depuis la plantation jusqu'à la floraison et diminuent en fin de cycle.

Il est clair que les courbes donnant la variation de  $K_c$  ne seront valides que pour l'ETP de référence considérée. Dans le cas du Nordeste on a, on l'a vu, principalement l'ETP calculée par Hargreaves et les évaporations de BAC A. Les coefficients culturaux seront évidemment dépendants du choix de la donnée de référence mais on pourra passer de l'un à l'autre par le rapport qui les lie (soit  $K_{et}$ ).

Le coefficient  $K_c$  est donné, selon les cultures, d'une manière très variable. On peut avoir une courbe mathématique continue, éventuellement paramétrée, une fonction en escalier, ou la donnée du  $K_c$  en période critique, en milieu de cycle, voire une moyenne, globale ou à partir de la couverture totale. Les valeurs maximales sont utilisées quand on veut définir une dose d'irrigation de pointe et les valeurs moyennes pour des analyses économiques où le calcul de mains d'eau.

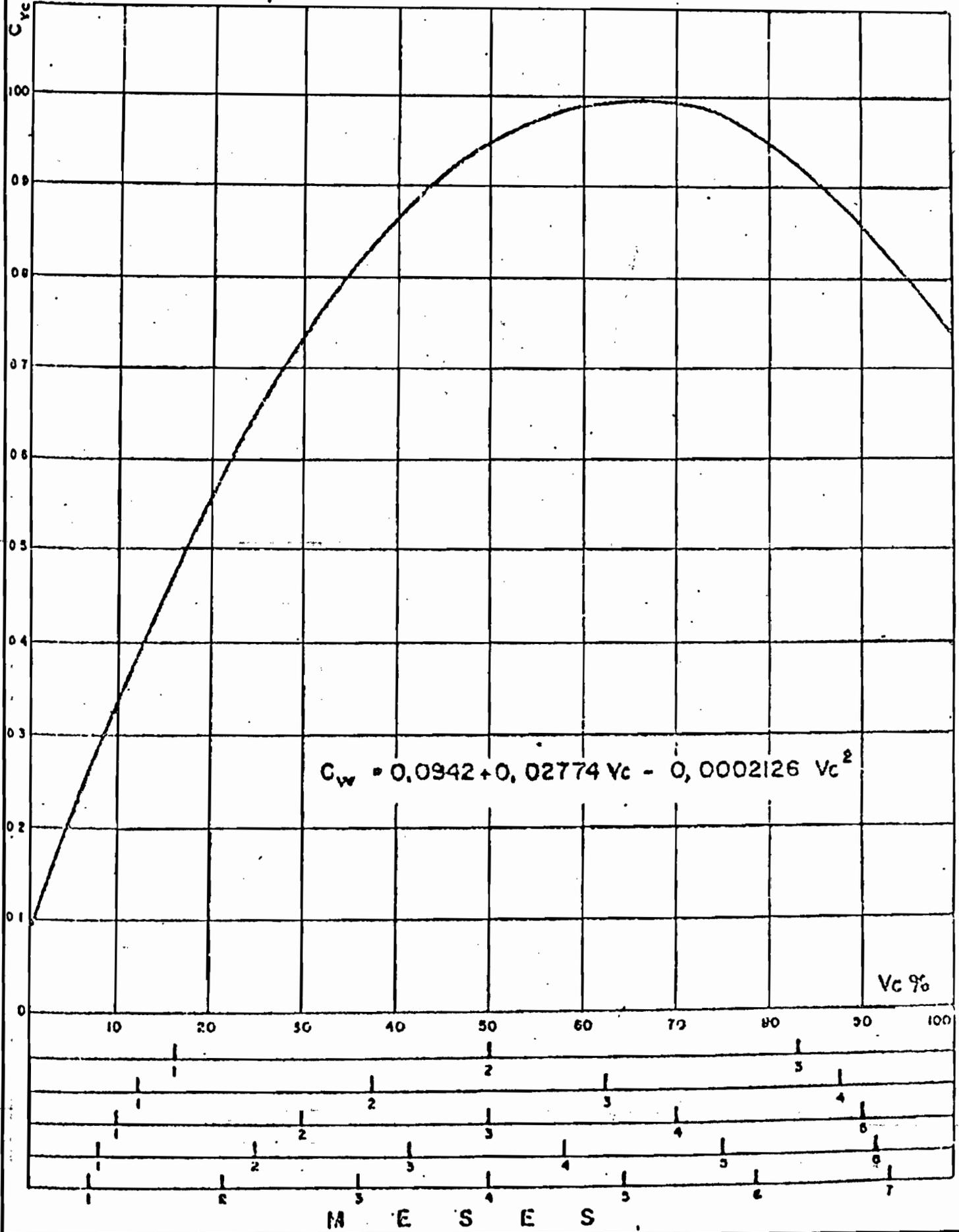
Une tentative originale mais souffrant des limitations de toute systématisation a été présentée par GRASSI et CHRISTIANSEN qui proposent une courbe adimensionnelle donnant  $\frac{K_c}{K_c \text{ maximum}}$  en fonction du pourcentage du cycle végétatif ( $V_c$ ).

L'équation en est  $\frac{K_c}{K_{cM}} = 0.0942 + 0.02774 V_c - 0.0002126 V_c^2$  et l'allure de la courbe est donnée par le graphique (5.10).

Le schéma (5.11) donne, lui, le rapport entre  $K_c$  et sa moyenne, soit  $\overline{K_c}$ , toujours en fonction du pourcentage du cycle.

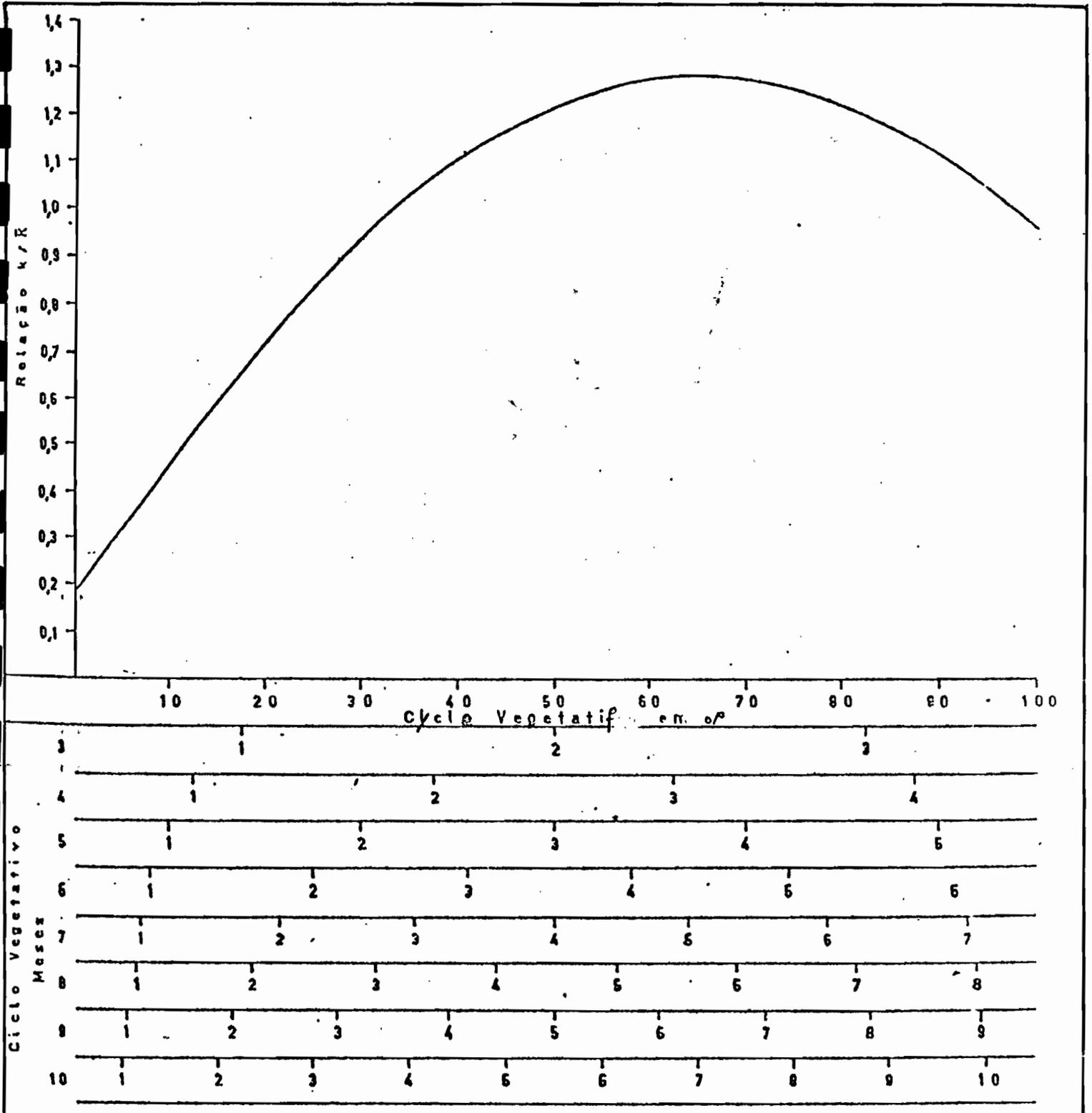
A ces deux courbes on peut alors ajouter le tableau donné par Hargreaves qui présente des valeurs de  $K_{cM}$  et  $\overline{K_c}$  pour quelques cultures (5.12).

$C_{vc}$ , FORMULA DE GRASSI - CHRISTIANSEN



GRAPHIQUE (5-10)

RELATION  $K_c/K_{cm}$  EN FONCTION DU POURCENTAGE DU CYCLE



GRAPHIQUE (5.11)

RELATION  $K_c / \bar{K}_c$  EN FONCTION DU POURCENTAGE DU CYCLE

CULTURE	$K_c M$	$\overline{K_c}$
Haricot, maïs, coton soja, pomme de terre, sorgo, cacahuète, tomate et blé	1.15	90
Agrumes	75	75
Fruits	90	70
Raisins		60
Fourrages et patures	1.35	1.00
Luzerne	1.00	1.00
Capim (herbe à éléphant)	1.00	1.00
Engrais vert	1.10	95
Canne à sucre	1.25	1.00
Culture en sec	1.15	0.85

(5.12)

Dans notre programme la courbe donnant chaque jour le coefficient cultural  $K_c$  est une ligne brisée passant par 6 points définis. Ces points sont les bornes des cinq phases constituant le cycle:  $K_c (NC, I)$   $I = 1$  à 6.

Dans le cas général nous adapterons ces points de manière à superposer notre courbe à la moyenne des courbes proposées.

Le tableau (5.13) donne les valeurs conseillées par Doorembos et Pruitt (FAO, 1976). On trouvera quelques données pour les cultures pérennes au tableau (5.12.A).

#### Consommation réelle (ETR)

Lorsque la réserve en eau du sol diminue, le potentiel matriciel du sol va en augmentant et exige ainsi un effort supplémentaire de la plante. Face à cette restriction, celle-ci va fermer partiellement ses stomates, réduisant ses échanges gazeux avec l'atmosphère, et va diminuer son activité photosynthétique. Il en résulte une diminution de la transpiration de la plante, donc de l'évapotranspiration, de même qu'une réduction de la production végétale, donc des rendements finaux.

Ce qu'il importe de connaître est la variation de ETR en fonction du stress hydrique: cette notion même de stress hydrique est mal définie

CULTURE	Stades de développement de la culture					Durée totale de la période végétative
	Initial	Développement	Mi-saison	Fin de saison	Récolte	
Bananiar tropical	0.4 -0.5	0.7 -0.85	1.0 -1.1	0.9 -1.0	0.75-0.85	0.7 -0.8
subtropical	0.5 -0.65	0.8 -0.9	1.0 -1.2	1.0 -1.15	1.0 -1.15	0.85-0.95
Haricot vert	0.3 -0.4	0.65-0.75	0.95-1.05	0.9 -0.95	0.85-0.95	0.85-0.9
sec	0.3 -0.4	0.7 -0.8	1.05-1.2	0.65-0.75	0.25-0.3	0.7 -0.8
Chou	0.4 -0.5	0.7 -0.8	0.95-1.1	0.9 -1.0	0.8 -0.95	0.7 -0.8
Coton	0.4 -0.5	0.7 -0.8	1.05-1.25	0.8 -0.9	0.65-0.7	0.8 -0.9
Raisin	0.35-0.55	0.6 -0.8	0.7 -0.9	0.6 -0.8	0.55-0.7	0.55-0.75
Arachide	0.4 -0.5	0.7 -0.8	0.95-1.1	0.75-0.85	0.55-0.6	0.75-0.8
Mais sucré	0.3 -0.5	0.7 -0.9	1.05-1.2	1.0 -1.15	0.95-1.1	0.8 -0.95
grain	0.3 -0.5*	0.7 -0.85*	1.05-1.2*	0.8 -0.95	0.55-0.6*	0.75-0.9*
Oignon sec	0.4 -0.6	0.7 -0.8	0.95-1.1	0.85-0.9	0.75-0.85	0.8 -0.9
vert	0.4 -0.6	0.6 -0.75	0.95-1.05	0.95-1.05	0.95-1.05	0.65-0.8
Pois, frais	0.4 -0.5	0.7 -0.85	1.05-1.2	1.0 -1.15	0.95-1.1	0.8 -0.95
Poivron, frais	0.3 -0.4	0.6 -0.75	0.95-1.1	0.85-1.0	0.8 -0.9	0.7 -0.8
Pomme de terre	0.4 -0.5	0.7 -0.8	1.05-1.2	0.85-0.95	0.7 -0.75	0.75-0.9
Riz	1.1 -1.15	1.1 -1.5	1.1 -1.3	0.95-1.05	0.95-1.05	1.05-1.2
Carthame	0.3 -0.4	0.7 -0.8	1.05-1.2	0.65-0.7	0.2 -0.25	0.65-0.7
Sorgho	0.3 -0.4	0.7 -0.75	1.0 -1.15	0.75-0.8	0.5 -0.55	0.75-0.85
Soja	0.3 -0.4	0.7 -0.8	1.0 -1.15	0.7 -0.8	0.4 -0.5	0.75-0.9
Betterave sucrière	0.4 -0.5	0.75-0.85	1.05-1.2	0.9 -1.0	0.6 -0.7	0.8 -0.9
Canne à sucre	0.4 -0.5	0.7 -1.0	1.0 -1.3	0.75-0.8	0.5 -0.6	0.85-1.05
Tournesol	0.3 -0.4	0.7 -0.8	1.05-1.2	0.7 -0.8	0.35-0.45	0.75-0.85
Tabac	0.3 -0.4	0.7 -0.8	1.0 -1.2	0.9 -1.0	0.75-0.85	0.85-0.95
Tomate	0.4 -0.5	0.7 -0.8	1.05-1.25	0.8 -0.95	0.6 -0.65	0.75-0.9
Pastèque	0.4 -0.5	0.7 -0.8	0.95-1.05	0.8 -0.9	0.65-0.75	0.75-0.85
Blé	0.3 -0.4	0.7 -0.8	1.05-1.2	0.65-0.75	0.2 -0.25	0.8 -0.9
Luzerne	0.3 -0.4				1.05-1.2	0.85-1.05
Agrumes sarclés sans sarclage						0.65-0.75 0.85-0.9
Olivier						0.4 -0.6

Premier chiffre: avec forte humidité (HIR min > 70%) et vent faible (U < 5 m/s).  
 Second chiffre: avec faible humidité (HIR min < 70%) et vent fort (> 5 m/s).  
 Voir carte des humidités en annexe.

ES	MESES COEF.	4 <sup>e</sup> ATÉ MESES	5 <sup>e</sup> a 8 <sup>e</sup> MÉS	9 <sup>e</sup> a 12 <sup>e</sup> MÉS	2 <sup>e</sup> ANO	(5-13)
		C	0,56	0,65	0,70	0,70
BANANE PACOVA	3 x 2	Kc	0,80	1,0	1,0	1,0
		C	0,40	0,55	0,60	0,60
AGRUMES	8 x 6	Kc	0,65	0,70	0,70	0,75
		C	0,16	0,25	0,33	0,35
POMME CANELLE	8 x 6	Kc	0,45	0,60	0,60	0,65
		C	0,16	0,25	0,31	0,33
COROSSOL	8 x 6	Kc	0,65	0,70	0,73	0,76
		C	0,16	0,25	0,33	0,33
GOYAVE	8 x 6	Kc	0,50	0,55	0,60	0,65
		C	0,16	0,25	0,33	0,33
PAPAYE	3 x 3	Kc	0,50	0,60	0,70	0,70
		C	0,28	0,40	0,45	0,50
PAPAYE	3 x 2	Kc	0,50	0,60	0,70	0,70
		C	0,35	0,50	0,60	0,60
RAISIN	3 x 2	Kc	0,50	0,60	0,65	0,70
		C*	0,32	0,37	0,45	0,50
FRUITS DE LA PASSION	3 x 3	Kc	0,60	0,80	0,80	0,80
		C	0,12	0,19	0,30	0,40
COCO ANÃO	8 x 8	Kc	0,60	0,80	0,80	0,80
		C	0,12	0,19	0,25	0,30
COCO HYBRIDE	9 x 9	Kc	0,60	0,80	0,80	0,80
		C	0,10	0,15	0,20	0,25

C: COUVERTURE %

(5-12<sup>o</sup>)

car on peut mesurer ce stress avec des variables très différentes: le rapport entre l'humidité actuelle du sol et l'humidité de la capacité au champ, le potentiel matriciel du sol, le potentiel de l'eau dans la plante, la température différentielle feuille-air, sont des variables que l'on peut tenter de relier à ETR.

Notons que le phénomène de la régulation stomatique est extrêmement complexe dans la mesure où il dépend d'un très grand nombre de variables. Des modélisations assez sophistiquées ont été élaborées et permettent d'évaluer les flux d'évapotranspiration.

A titre d'exemple, le dessin suivant donne une idée des variables qui doivent être pris en compte (MODELE SPAM, Lemon et al. 1971).

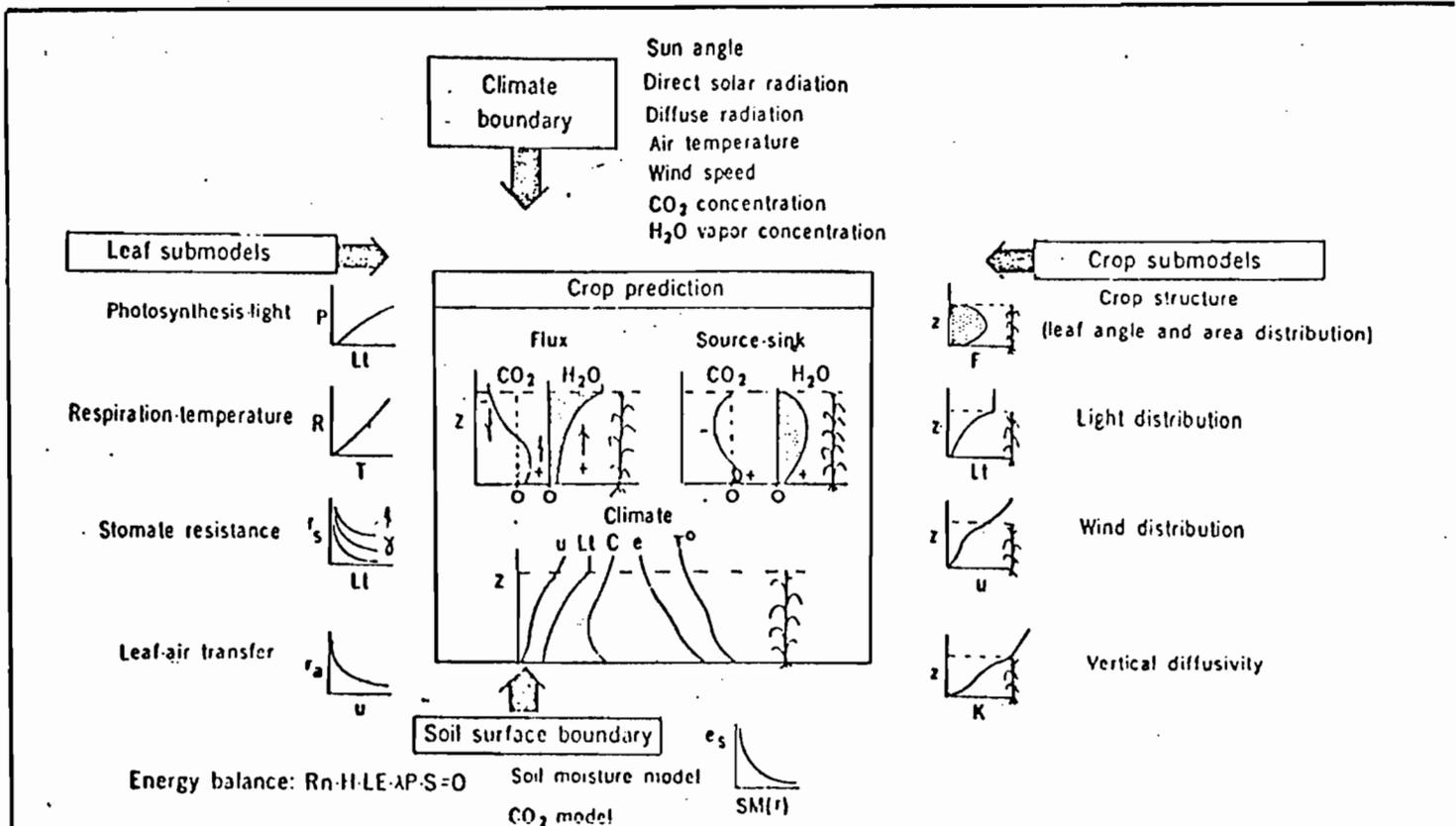


Figure 1. Schematic summary of a mathematical soil-plant-atmosphere model (SPAM) giving required inputs, submodels, and representative daytime predictions of climate and community activity (that is, water vapor and carbon dioxide exchange). Abbreviations: height ( $z$ ), wind ( $u$ ), light ( $Lt$ ), concentration of carbon dioxide ( $C$ ), water vapor ( $e$ ), air temperature ( $T$ ), surface vapor pressure ( $e_s$ ), surface soil water potential [ $SM(r)$ ], photosynthesis ( $P$ ), respiration ( $R$ ), leaf temperature ( $T$ ), stomate resistance ( $r_s$ ), minimum stomate resistance at high light intensities ( $\gamma$ ), gas diffusion resistance ( $r_a$ ), leaf surface area ( $F$ ), vertical diffusivity ( $K$ ), net radiation ( $R_n$ ), sensible heat ( $H$ ), latent heat ( $LE$ ), photochemical energy equivalent ( $AP$ ), and soil heat storage ( $S$ ).

Nous nous contenterons ici de résultats semi-empiriques visant à donner la variation de ETR en fonction de l'humidité du sol ou, plutôt, en fonction de  $R = \text{EAU DISPONIBLE} / \text{RRFU}$  où RRFU est le volume d'eau disponible maximal sur la profondeur racinaire.

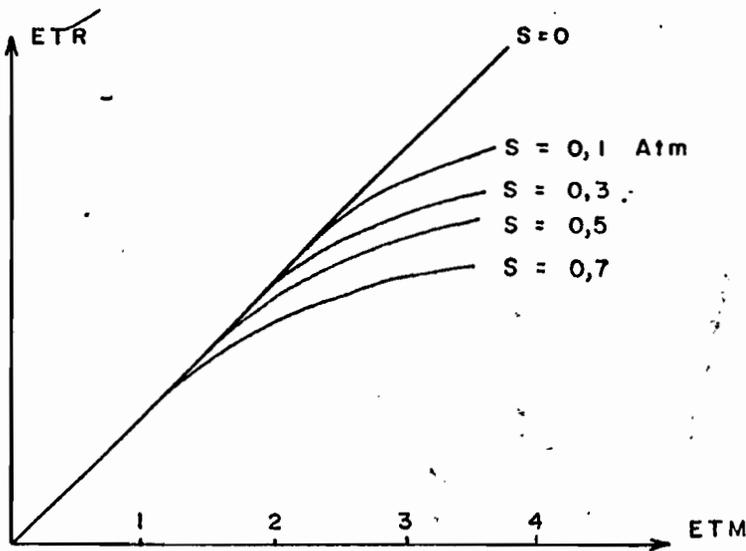
On considère généralement que la plante demeure à son niveau de consommation optimal,  $\text{ETR} = \text{ETM}$ , tant que la réserve en eau reste supérieure à une certaine proportion  $(1-p)$  de la réserve maximale, ou encore tant que la fraction  $(p)$  de la réserve n'a pas été consommée. Ce paramètre  $(p)$  dépend bien sûr de la plante et représente en quelque sorte la capacité du végétal à pomper l'eau du sol, Il est aussi d'une importance capitale en irrigation puisque très souvent on calculera la fréquence des doses de manière à rester à une humidité supérieure à ce palier, ce qui assure du même coup une récolte maximum.

On peut remarquer qu'à ce niveau il serait plus opportun de travailler avec la variable du potentiel matriciel du sol puisque c'est en définitive cette pression qui détermine l'effort de la plante; or on a vu que le passage de ce potentiel à la teneur en eau dépendait des caractéristiques du sol. Ceci implique que la valeur de  $(p)$  est en fait relative au sol considéré mais on conservera toutefois la variable  $R$  pour sa commodité puisqu'elle se calcule directement à partir du bilan hydrique. C'est peut-être cette faiblesse dans la définition du seuil  $(p)$  qui est à l'origine d'une certaine variabilité dans la littérature, comme on le verra un peu plus bas.

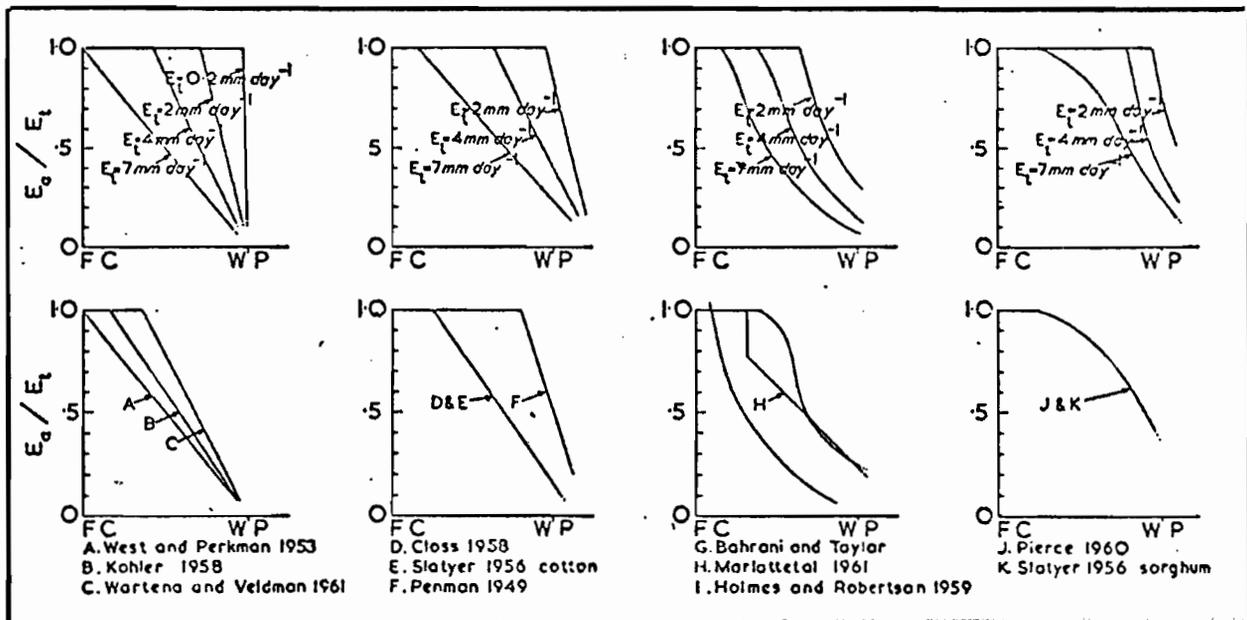
Au delà de  $(1-p)$ , ETR diminue pour atteindre une valeur proche de 0 au voisinage du point de flétrissement.

Ce palier  $(p)$ , ainsi que la courbe au delà, sont modifiés selon la valeur de ETM. Quand celle-ci sera forte on conçoit qu'il sera d'autant plus difficile à la plante de rester à ce niveau et le rapport  $\frac{\text{ETR}}{\text{ETM}}$  décroîtra donc plus vite.

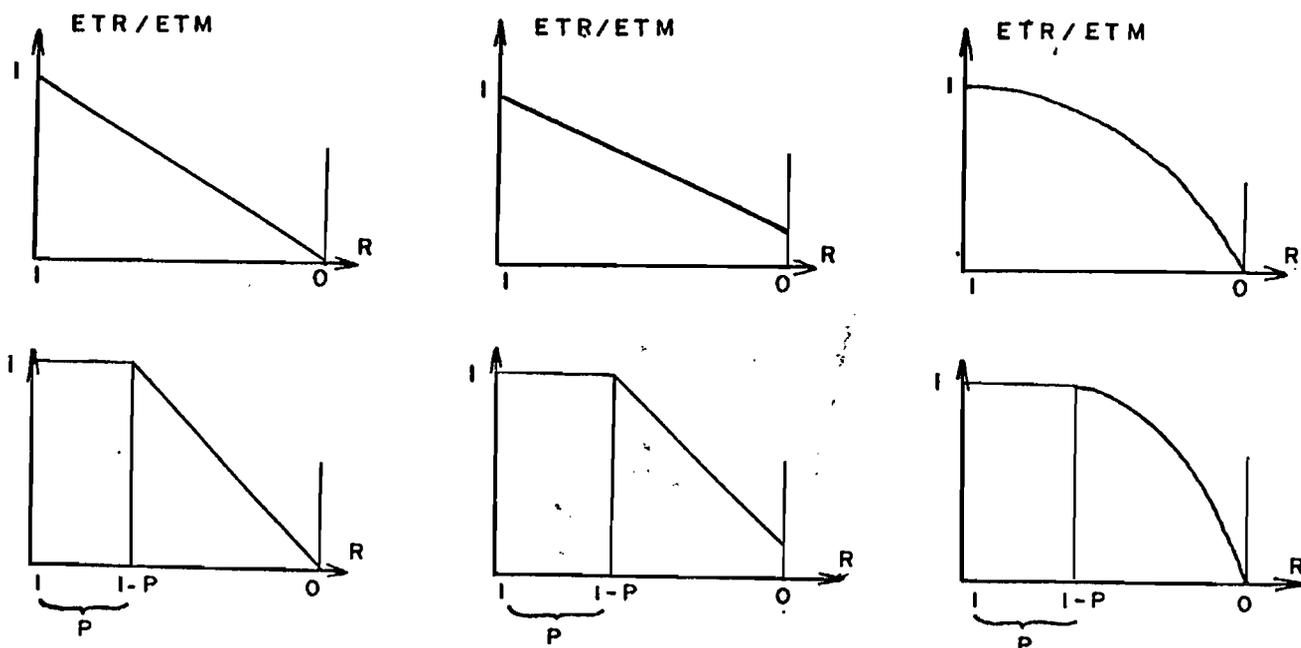
Dès 1956, Makkink et van Heemst donnaient une variation de ETR pour des valeurs de ETM inférieures à 4mm/j et différentes tensions dans le sol.



Le tableau suivant, donné par FLEMING (1964), montre la variété des courbes  $\frac{ETR}{ETM} = f(R)$ , ( $F_C$  est la capacité au champ CC et wp est le point de flétrissement PF).



Trois représentations simples nous semblent digne d'intérêt et pour ront être successivement testées dans notre modélisation pour voir la varia tion qu'elles entraînent dans le résultat final.



Chaque solution possède sa variante avec palier (p).

La troisième courbe correspond à l'équation utilisée par Pierce:

$$\frac{ETR}{ETM} = \frac{\text{Log} (RES + 1)}{\text{Log} (RRFU + 1)} \quad \text{où } RES \text{ est la réserve actuelle}$$

$$\frac{ETR}{ETM} = \frac{\text{Log} (RES/p + 1)}{\text{Log} (RRFU + 1)} \quad \text{si } RES < p \cdot RRFU \quad 1 \quad \text{si } RES \geq p \cdot RRFU$$

Un autre tentative intéressante est celle de EAGLEMAN (1976) qui relie  $\frac{ETR}{ETM}$  à ETP et R selon un polynôme du troisième degré calé expérimentalement: ( $R = RES/RRFU$ ).

$$\frac{ETR}{ETM} = (-0.5 + 0.75/etp) + (4.97 - 0.66ETP) R + (1.36 ETP - 8.57) R^2 + (4.4 - 0.88 ETP) R^3$$

avec  $\frac{ETR}{ETM} = 1$  si le calcul donne une valeur supérieure à 1.

Revenons à notre coefficient (p). Doorembos et Pruit (1976) classifient les cultures en 4 groupes pour chacun desquels ils donnent la valeur de (p) en fonction de ETM.

Les deux tableaux (5.14) et (5.15) reproduisent ces résultats. Dans un premier temps notre modèle considérera le (p) correspondant à une

ETM moyenne mais il sera aisé de l'indexer par la suite en fonction de ETM, donc de ETP.

Le tableau (5.16) reproduit quant à lui les valeurs conseillées par le CPATSA (boletim n° 4).

Il est aussi possible de calculer ETR en fonction du temps, quand il n'y a aucun apport.

Prenons, par exemple, la première représentation avec palier (p) (Rijtema et Aboukhaled, 1975)

$$\text{ETR} = \text{ETM} \quad \text{pour} \quad R \geq (1 - p)$$

$$(1) \quad \text{ETR} = \frac{\text{ETM}}{1-p} R = - \frac{d(R \cdot \text{RRFU})}{dt} \quad \text{pour} \quad R \leq (1-p)$$

Supposons que RRFU soit constant, c'est à dire que la profondeur racinaire soit PM.

L'équation (1) devient  $\frac{\text{ETM}}{(1-p)\text{RRFU}} dt = - \frac{dR}{R} = - \frac{d \text{ETR}}{\text{ETR}}$

$$\text{d'où} \quad \text{ETR} = \text{ETM} \exp \left| - \frac{\text{ETM} (t-t')}{(1-p)\text{RRFU}} \right| \quad t > t'$$

$$\text{où} \quad t' = \frac{\text{RRFU}}{\text{ETM}} \quad \text{si l'on part du sol à CC.}$$

Si l'on est en période de croissance racinaire  $t < T$

$$\text{PR} = 0,1 + (\text{PM} - 0,1) \frac{t}{T} = \text{PR}(t') + \frac{t-t'}{T} (\text{PM} - 0,1) \quad t > t'$$

$$\text{RRFU} = \text{RFU} \cdot \text{PR}$$

$$(1) \text{ devient} \quad \frac{\text{ETM}}{1-p} R = - \text{RFU} \left| 0,1 + (\text{PM} - 0,1) \frac{t}{T} \right| \frac{dR}{dt} + \frac{(\text{PM}-0,1) \text{RFU}}{T} \cdot R$$

Soit en posant  $A = \frac{\text{PM} - 0,1}{T}$   $B = \frac{\text{ETM}}{1-p} + A \cdot \text{RFU}$

$$\frac{-B dt}{0,1 + At} = + \frac{dR}{R} = + \frac{d \text{ETR}}{\text{ETR}}$$

$$\text{ETR} = \text{ETM} \left| \frac{0,1 + At'}{0,1 + At} \right|^{B/A} \quad t' < t < T$$

Tableau 19 – Groupes de cultures classées d'après le tarissement de l'eau du sol

Groupe	Cultures
1	oignon, poivron, pomme de terre
2	banane, chou, raisin, pois, tomate
3	luzerne, haricot, agrumes, arachide, ananas, tournesol, pastèque, blé
4	coton, maïs*, olivier, carthame, sorgho, soja, betterave sucrière, canne à sucre, tabac

(5.14)

Tableau 20 – Fraction (p) du tarissement de l'eau du sol pour les différents groupes de cultures et évapotranspiration maximum (ETm)

Groupe de cultures	ETm mm/jour								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,50	0,425	0,35	0,30	0,25	0,225	0,20	0,20	0,175
2	0,675	0,575	0,475	0,40	0,35	0,325	0,275	0,25	0,225
3	0,80	0,70	0,60	0,50	0,45	0,425	0,375	0,35	0,30
4	0,875	0,80	0,70	0,60	0,55	0,50	0,45	0,425	0,40*

(5.15)

CULTURE	(p)
Tomate, soja	0.3 - 0.4
Betterave, carotte	0.40 - 0,5
Cacahuète, petit pois, pomme de terre	0.3 - 0.35
Fraise, patate-douce, oignon, melon, salade, maïs, feijão	0.3
Coton, grains, paturages, raisin, arbres fruitiers	0.5

(5.16)

Ces formules permettent d'avoir une variation de ETR non plus en fonction de R mais du temps.

Dans notre modèle, nous faisons un bilan quotidien avec l'apport des pluies et nous nous contentons d'une discrétisation au pas de temps journalier pendant lequel ETR est supposé constant.

Certaines approches théorico-empiriques sont aussi possibles. Priestley et Taylor (1972) ont montré que l'évaporation pour 24 h d'une surface saturée est proportionnelle au terme radiatif de l'équation de Penman, c'est à dire  $\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G)$ .

ou  $\Delta$  est la pente de la courbe de saturation pression-température  
 $\gamma$  est la constante psychrométrique  
 $R_n$  est le flux de radiation net  
 $G$  flux radiatif du sol.

Dans certaines conditions (en particulier air humide) ce  $\alpha \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G)$  peut être considéré comme égal à ETM.

Davies et Allen (1973) ont cherché une relation non linéaire dans le cas où R n'est plus égal à un.

La relation trouvée est la suivante:

$$ETR = 1.26 \frac{S}{S + \gamma} (R_n - G) | 1 - \exp(-10.563.R) |$$

#### Evaluation de production

Une des parties les plus délicates de notre modélisation consiste à évoluer la production finale d'une culture en fonction des stress hydriques qu'elle a subis.

On comprend tout de suite qu'un même déficit hydrique n'aura pas le même effet selon la phase du cycle dans laquelle il intervient; les phases d'accroissement de masse végétale correspondent à un processus biologique de multiplication et de grandissement cellulaire. La vitesse de ces phénomènes, pour des besoins énergétiques satisfaits, dépend de la photosynthèse et donc de la satisfaction des besoins en eau. A ce niveau un déficit hydrique modéré, c'est à dire n'endommageant pas la plante de manière irréversible, affecte la culture dans la production de masse végétale. Il ne garde

que peu de "mémoire" de ce stress dans le sens où la suite de sa croissance en est relativement indépendante. Un manque d'eau survenant au moment de la foraison aura par contre en général une répercussion beaucoup plus grande dans la mesure où il affecte le nombre de fruits et leur capacité de développement futur.

On distingue deux sortes de modèles donnant une estimation du rendement réel PR rapporté à sa valeur  $P_M$  en conditions optimales. Les premiers supposent que la production est directement reliée à ETR alors que les seconds ne prennent en compte que la composante transpiration.

L'accessibilité d'ETR rend les premiers plus faciles à utiliser.

#### Modèles d'évapotranspiration

Stewart et Al. considèrent une relation linéaire entre le déficit de production  $(1 - \frac{PR}{P_M})$  et le déficit des évapotranspirations cumulées  $(1 - \frac{ETR}{ETM})$ .

$$\text{on a } \frac{PR}{P_M} = 1 - K_y \left(1 - \frac{ETR}{ETM}\right) \quad (2)$$

Cette équation admet une variante qui entend prendre en compte la variabilité de la sensibilité au stress et donne plus de poids aux périodes critiques.

$$\text{on a } \frac{PR}{P_M} = 1 - \sum_i K_y^i \left(1 - \frac{ETR_i}{ETM_i}\right) \quad (3)$$

Doorembos et Kassan (1980) ont déterminé à partir d'une considérable revue bibliographique les coefficients  $K_y$  pour l'ensemble du cycle ainsi que les  $K_y^i$  donnant  $(1 - \frac{PR}{P_M})$  pour un déficit survenant dans un des 5 stades suivants: installation, végétation, floraison, formation du produit, mûrissement.

Signalons enfin des relations polynomiales (Hargreaves et Christiansen 1973),  $y = f(x)$  ou  $y = \frac{PR}{P_M}$  et  $x = \frac{ETR}{ETM}$

$y = 3x^2 - 2x^3$  et  $y = 0.8x + 1.3x^2 - 1.1x^3$  en sont des exemples.

Ces fonctions ont bien sûr leur maximum,  $(dy/dx = 0)$ , au point (1,1) et leur représentation analytique permet en particulier de déterminer le point de pente 1  $(dy/dx = 1)$  au delà duquel un accroissement de x donnera un ac

croissement de  $y$  plus faible. Ces fonctions de production sont très intéressantes pour toute analyse économique.

### Modèles de transpiration

De Witt (1958) montre que dans des zones semi-arides où l'irrigation était pratiquée, le rendement était directement proportionnel au cumul de l'eau transpirée par la plante durant son cycle:

$$PR = M \frac{TR}{E_0} \quad (4)$$

où  $E_0$  est l'évaporation d'une surface d'eau libre  
et  $M$  un facteur de la culture  
 $TR$  transpiration réelle.

Pour  $M$  et  $E_0$  donnés on a donc la relation

$$\frac{PR}{PM} = \frac{TR}{TM} \quad (5)$$

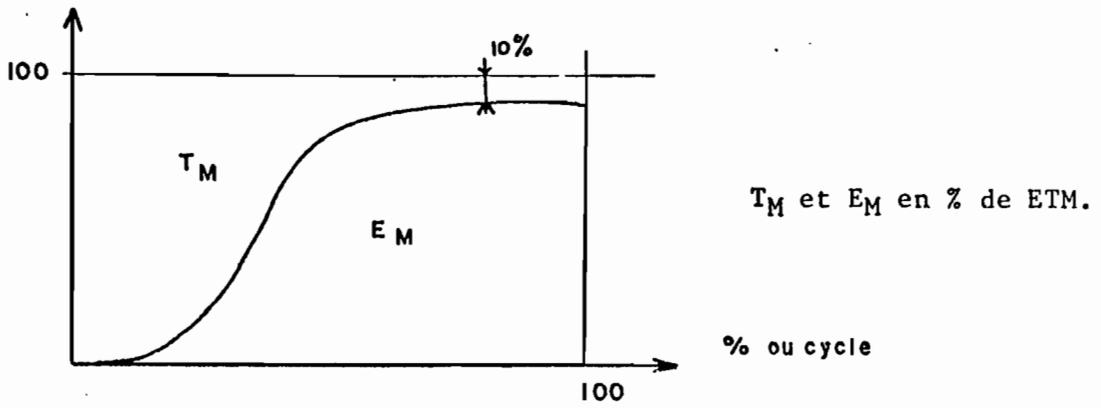
Cette équation s'applique presque parfaitement à la production de matière sèche et Jensen (1968) a tenté de l'améliorer pour une céréale en donnant un poids différents à chacune des 5 phases composant le cycle complet.

$$\frac{PR}{PM} = \prod_{i=1}^5 \left( \frac{TR_i}{TM_i} \right)^{\lambda_i} \quad (6)$$

Cette relation a été ensuite améliorée en ajoutant un facteur FDP rendant compte des variations provenant d'un retard dans la plantation et un facteur FS représentant les phases éventuelles d'asphyxie du sol.

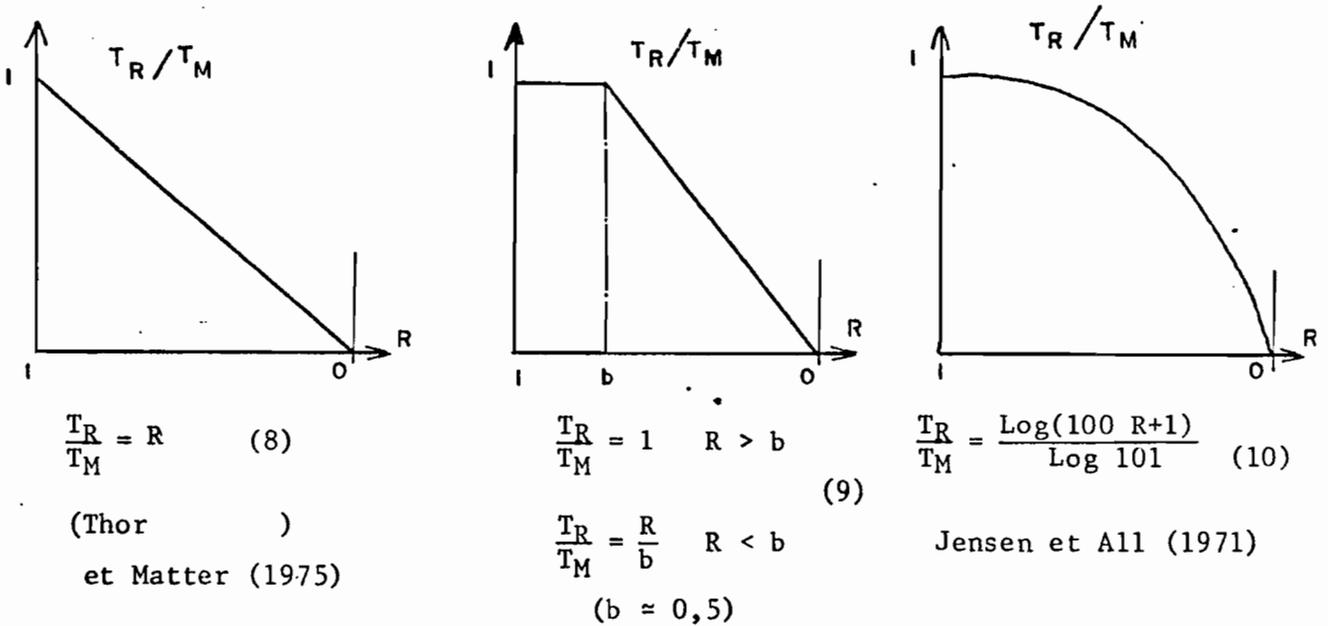
$$\frac{PR}{PM} = \prod_{i=1}^5 \left( \frac{TR_i}{TM_i} \right)^{\lambda_i} \cdot FDP \cdot FS \quad (7)$$

Le majeur obstacle à l'utilisation de ces modèles est la difficulté d'obtention de la variable  $TR$  puisqu'elle n'est en général appréhendée que comme composante de ETR. De manière qualitative la part relative de  $TM$  et  $EM$  est celle figurée cidessous (adapté de Hanks (1977)).



On retombe alors sur le même problème que pour ETR: Il nous faut déterminer  $T_M$  et  $E_M$  ainsi que leur variation  $T_R$  et  $E_R$  quand la réserve en eau du sol diminue.

Hanks propose le modèle simple suivant: on choisit une courbe parmi les variations possibles de  $T_R$  schématisées ci-dessous:



$T_M$  est alors pris égal à  $(E_o - E_M)$  où  $E_M$  est l'évaporation maximale, dépendant de la culture. ( $E_o$  est l'évaporation d'une surface d'eau libre) Si  $E_M$  n'est pas disponible on fera le raisonnement inverse en estimant la part relative de  $T_M$  dans  $ET_M$  (voir graphique plus haut) et on déduira

$$E_M = E_o - T_M$$

La variation de  $E_R$  est déduite de la relation empirique

$$(11) \quad E_R = E_M \left( \frac{t_M}{t} \right)^{1/2} \quad \text{où } t_M \text{ est le temps au}$$

bout duquel la couche de sol superficielle s'est pratiquement asséchée ( $\bar{a}$ )

$E_R = E_M$ ). Cette relation est parfois utilisée sous la forme  $E_R = E_M/t^{1/2}$ , où  $t$  est le temps en jour depuis que le sol était humide pour la dernière fois.

Kanemasu et al (1976, 1979) ont proposé un modèle semi-climatique où la transpiration est déduite du terme radiatif du bilan de Penman.

L'albedo dépend de l'indice foliaire I.F par la fonction

$$\zeta = \exp \left| -0.389 \text{ IF} + 0.15 \right|$$

on a les deux équations (12) et (13) suivantes;  $\alpha$  est un paramètre de la culture et  $R_S$  le rayonnement solaire.

$$T_M = 1.74 (1 - \zeta) \left| \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (0.86 R_S - 103.9) / 590 \right| \quad (12)$$

pour  $\text{IF} < 3$

$T_R$  est évalué par une équation du type (9) avec  $b \approx 0,35$ .

Une variante des équations (12) et (13) est proposée par RITCHIE (1972) qui considère une équation de Penman complète.

$$(16) \quad T_M = \left| \frac{\Delta}{\gamma} R_{ns} + 0.262 (1 + 0.0061v) (C_1 - C_2) \right| / \left( \frac{\Delta}{\gamma} + 1 \right)$$

$v$  vitesse du vent à 2m du sol

$C_1 - C_2$  déficit de pression de vapeur

$R$  rayonnement net au sol.

Quand le développement foliaire augmente, la vitesse du vent et le déficit de pression de vapeur diminuent de telle manière qu'il devient légitime de négliger le deuxième terme de l'équation de Penman appliquée à la surface du sol.  $E_M$  dépend donc de l'indice foliaire selon l'équation suivante donc la validité sera faible en début de cycle où ces approximations sont peu valables:

$$(14) \quad E_M = \zeta (\text{IF}) \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{R_n}{590}$$

Quand l'eau n'arrive pas assez vite à la surface pour satisfaire la demande climatique, c'est à dire après l'assèchement relatif de la couche supérieure,  $E_R$  diminue en fonction de la transmissibilité hydraulique du sol dont dépend  $C$ .

$$E_R = | C t^{1/2} - C (t - 1)^{1/2} | \quad (15)$$

Notons que cette formule vient du fait que l'expérience montre que l'évaporation cumulée d'un sol nu est  $\Sigma E_R = C t^{1/2}$  (dans les conditions données ci-dessus).

C'est d'ici que viennent, par dérivation, les formules utilisées plus haut où  $E_R$  variait en  $t^{-1/2}$ .

En pratique, la question du seuil de validité des équations (14) et (15) est résolue en déterminant une limite  $R = R_0$  en dessous de laquelle on passe de la première à la seconde. En régime irrigué on définit une valeur  $v$  dépendant du sol et on utilise l'équation climatique tant que la dernière pluie ou la dernière irrigation sont supérieures à cette limite.

Ces données  $E_R$ ,  $E_M$ ,  $T_R$ ,  $T_M$  peuvent ensuite s'appliquer à un modèle de production quelconque: celui utilisé par Kanemasu est assez complexe et fait intervenir des fonctions annexes.

#### Bilan de l'eau et Modèles dynamiques

On a vu que le calcul de ETR se faisait à partir de l'état de la réserve est estimée chaque jour à l'aide du bilan suivant

$$RES (n+1) = RES(n) + PLUIE + DOSE + REM - PERCO - ETR$$

La pluie est la pluie efficace et REM représente les remontées d'eau des couches profondes (nappe ou remontées capillaires). La contrainte  $RES \leq RRFU$  entraîne que la différence éventuelle ( $RRFU - RES$ ) sera considérée comme perdue par ruissellement superficiel ou par percolation.

Le terme (REM-PERCO), nous l'avons déjà dit en (A), est en général négligé non tant pour sa faible importance que pour la difficulté à l'estimer.

Des modèles plus sophistiqués permettent de prendre en compte la dynamique de l'eau dans le sol en fonction de la distribution de son potentiel, c'est à dire, son potentiel matriciel  $\Psi$  plus son potentiel gravitaire:  $(\Psi - z)$  (Feddes et Al. 1978).  $\Psi$  dépend de  $\theta$ , ainsi que  $K$ , conductibilité hydraulique.

$$(\theta \text{ volume d'eau / volume unité de sol})$$

On utilise la loi de Darcy  $q = -K \frac{\partial}{\partial z} (\Psi - z)$  (17)

et la loi de conservation  $\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial z} - S$  (18)

$S$  est la fonction d'extraction de la plante.

Si on introduit la fonction auxiliaire  $C(\Psi) = \frac{d\theta}{d\Psi}$

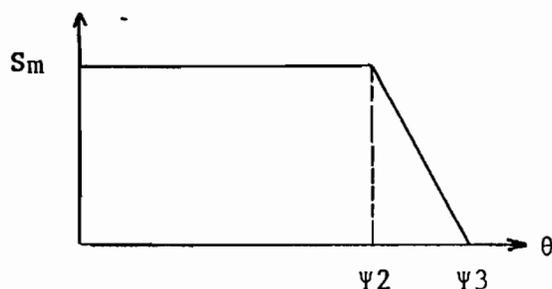
La combinaison de ces deux équations donne:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{\lambda}{C(\Psi)} \frac{\partial}{\partial z} K(\Psi) \left( \frac{\partial \Psi}{\partial z} - 1 \right) - \frac{S(\Psi)}{C(\Psi)} \quad (19)$$

La fonction  $S(\Psi)$  se relie à la transpiration  $T_R$  de la plante par une intégration sur la profondeur racinaire  $P_R$ .

$$T_R = \int_{z=0}^{P_R} S(\Psi) dz$$

on prend en général  $S(\Psi)$  de la forme représentée ci dessous:



$$\alpha(\Psi) = \frac{S(\Psi)}{S_m} = \frac{\Psi - \Psi_3}{\Psi_2 - \Psi_3}$$

on a donc  $T_R = S_m \int_0^{P_R} \alpha(\Psi) dz$

$$T_M = S_m \int_0^{P_R} dz = S_m \cdot P_R$$

$S_m$  se détermine donc à l'aide de  $T_M$  lui même tiré de  $T_M = ET_M - E_M$  où  $ET_M$  peut, par exemple, s'estimer avec la formule de Priestly-Taylor

$$(ET_M = \alpha \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_n) \quad \text{et}$$

$E_M$  par Ritchie  $(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}) R_n \exp(-0.39 IF)$

formules déjà vues plus haut.

A l'équation (19) on joint alors des conditions aux limites et on la résoud par les éléments finis.

Ce permet d'évaluer avec une bonne précision les termes  $ETR$  et  $|REM - PERCO|$ .

Les remontées capillaires peuvent être très importantes: dans une expérience sur la tomate Millar et Al. (1978) ont montré qu'elles pouvaient

constituer 33% de l'eau consommée par la plante.

A ce niveau il convient de signaler que certains modèles utilisent des fonctions de densité racinaire dont la croissance dépend de l'humidité du sol.

Les modèles distinguant plusieurs couches de sols permettent de décrire plus précisément l'évolution du sol en fonction de la pluie que survient (AUDRY, 1981).

#### Choix d'une fonction de production

Les coefficients  $K_y^i$  donnés par Doorembos et Kassam, (tableau 5.17), s'appliquent aux cinq phases constituant le cycle total. Le problème est de relier les déficits de production virtuels  $K_y^i (1 - \frac{ETR_i}{ETM})$  à un déficit final, lorsque ceux-ci sont tous différents. On est tenté d'utiliser soit une formule additive soit une formule multiplicative. La première ne peut convenir que pour une production de masse où la "mémoire" des déficits peut être nulle. La deuxième est très pénalisante car les déficits se répercutent intégralement. La formule (6) nous pousse à considérer une relation du type

$$(A) \quad \frac{P_R}{P_M} = \prod_{i=1}^5 (1 - K_y^i (1 - \frac{ETR_i}{ETM}))^{\lambda_i}$$

ou  $\overline{ETR_i}$  est la moyenne de ETR sur la phase i.

Les exposants  $\lambda_i$  peuvent être déterminés expérimentalement mais dans le cas général nous n'avons pas de renseignements sur le poids respectif qu'ils donnent à chaque facteur.

Nous avons cependant une contrainte qui va nous permettre de les évaluer: en effet, si le déficit est le même sur chaque phase on devrait retrouver un déficit de production proche de celui estimé avec le  $K_y$  global.

Soit D ce déficit  $(1 - \frac{ETR_i}{ETM})$  on a alors:

$$(B) \quad \prod_{i=1}^5 (1 - K_y^i D)^{\lambda_i} = 1 - K_y D$$

rappelons que ces coefficients sont valables pour  $D > 0,5$ .

TABLEAU (5-17) - Coefficient de réponse du rendement (ky)

Culture	période végétative (1)			Période de floraison (2)	Formation du produit (3)	Mûrissement (4)	Croissance totale
	début (1a)	fin (1b)	Total				
Luzerne			0,7-1,1				0,7-1,1
Panancier							1,2-1,35
Haricot			0,2	1,1	0,75	0,2	1,15
Chou	0,2				0,45	0,6	0,95
Agurmes							0,8-1,1
Coton			0,2	0,5		0,25	0,85
Raisin							0,85
Arachide			0,2	0,8	0,6	0,2	0,7
Mais			0,4	1,5*	0,5	0,2	1,25*
Oignon			0,45		0,8	0,3	1,1
Pois	0,2			0,9	0,7	0,2	1,15
Poivron							1,1
Pomme de terre	0,45	0,8			0,7	0,2	1,1
Carthame		0,3		0,55	0,6		0,8
Sorgho			0,2	0,55	0,45	0,2	0,9
Soja			0,2	0,8	1,0		0,85
Betterave sucrière betterave sucre							0,6-1,0 0,7-1,1
Canne à sucre			0,75		0,5	0,1	1,2
Tournesol	0,25	0,5		1,0	0,8		0,95
Tabac	0,2	1,0				0,5	0,9
Tomate			0,4	1,1	0,8	0,4	1,05
Pastèque	0,45	0,7		0,8	0,8	0,3	1,1
Blé hiver			0,2	0,6	0,5		1,0
printemps			0,2	0,65	0,55		1,15

Nous avons encore une forte indétermination sur les  $\lambda_i$ . Nous allons poser  $D = 0,25$  puis  $D = 0,5$  et nous considérerons 3 hypothèses:

- 1)  $\lambda_i = \lambda, \forall i$  on donne le même poids à chaque facteur
- 2)  $\lambda_i K_y^i = \lambda, \forall i$  on donne moins de poids aux phases sensibles (de  $K_y^i$  grand)
- 3)  $\frac{\lambda_i}{K_y^i} = \lambda, \forall i$  on donne plus de poids aux phases sensibles (de  $K_y^i$  grand).

Le tableau suivant résume les jeux de coefficients  $\lambda_i$  obtenus pour 3 cultures.  $\lambda_1$  vaut pour les deux premières phases confondues.

CULTURE	Hyp	$\lambda$ D=0,25	$\lambda$ D=0,5	$\bar{\lambda}$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$
Feijão	1)	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	2)	0,33	0,37	0,35	1,75	0,32	0,47	1,75
	3)	0,32	0,4	0,36	0,07	0,4	0,27	0,07
Maïs	1)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	2)	0,33	0,38	0,35	0,89	0,24	0,7	1,75
	3)							
Tomate	1)	0,45	0,46	0,455	0,45	0,45	0,45	0,45
	2)	0,29	0,32	0,3	1,2	0,43	0,53	1,2
	3)							

(\*)  $\lambda$  est donné par les formules suivantes:

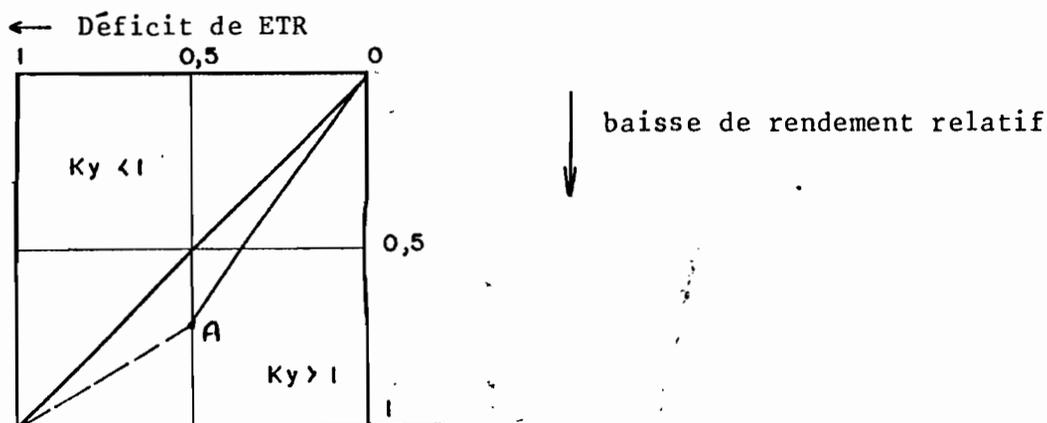
$$(1) \lambda = \frac{\text{Log}(1 - K_y D)}{\sum \text{Log}(1 - K_y^i D)}$$

$$(2) \lambda = \frac{\text{Log}(1 - K_y D)}{\sum \frac{1}{K_y^i} \text{Log}(1 - K_y^i D)}$$

$$(3) \lambda = \frac{\text{Log}(1 - K_y D)}{\sum K_y^i (1 - K_y^i D)}$$

Dans un premier temps nous garderons les résultats de l'hypothèse (1) mais les autres jeux de paramètres pourront être testés.

La relation  $(1 - \frac{P_R}{P_M}) = K_y^i (1 - \frac{\overline{ETR}_i}{ETM})$  n'est valable que pour un déficit hydrique < 50% soit, graphiquement:



On considèrera, arbitrairement et en l'absence de résultats à ce sujet, que la courbe se continue du point A vers l'origine; la relation de vient alors:

$$\frac{P_R}{P_M} = (2 - K_y^i) \frac{\overline{ETR}_i}{ETM} \quad \text{déficit} > 50\%$$

Le facteur correspondant de (A) est alors modifié.

Avec une telle formulation on voit que la production ne peut être nulle que si ETR est nul sur une phase ce qui est impossible de par la relation  $ETR = f(R)$  elle même.

On introduit alors une valeur de  $ETR_0$ , correspondant à un état du sol  $R_0$ , et l'on dira que la production est nulle si ETR reste en dessous de  $ETR_0$  plus de NNUL(NC) jours, nombre qui dépend de la culture (NC). On introduit pareillement un nombre de jours NMOR(NC) au delà duquel on considère que la culture est morte.

Cette distinction entre NCUL(NC) et NMOR(NC) vient du fait que certaines cultures peuvent donner une production nulle sans pour autant mourir; c'est le cas en particulier de certains arbres perennes comme l'arbre de la pinha (pomme canelle) qui peut rester plusieurs années sèches sans produire et sans mourir.

Données locales

Nous disposons des résultats d'expériences, menées principalement par le CPATSA à Petrolina et le DNOCS, visant à évaluer les déficits de production sous certaines conditions restrictives. (Tomate (Millar (1978), Choudhury (1978-1979), Feijão (Magalhães (1978), Pinheiro et Al.), Coton (Monteiro da Silva, Marinato (1981), da Silva et Al.), Maïs (Monteiro da Silva), Oignon (Tânia A. dos Santos Abreu (1980), et....)

Feijão: les études de Magalhães permettent une certaine approximation des coefficients  $K_y^i$  du Feijão. Son cycle est, selon la variété, compris entre 80 et 110 jours.

Considérons une durée totale de 90 jours répartie ainsi:

- installation	10 jours	NDI(1,F) = 10
- végétation	20	NDI(2,F) = 30
- floraison	16 jours	NDI(3,F) = 46
- formation du produit	14 jours	NDI(4,F) = 60
- mûrissement	30 jours	NDI(5,F) = 90
ceuillette		

Le tableau suivant résume les résultats des expériences: chacune d'elle consistait à stopper l'irrigation pendant un laps de temps donné, à noter le déficit final (potentiel) et le déficit de production qui en résultait. En dehors de la période choisie l'irrigation était optimale.

<u>Période de restriction (jours)</u>	<u>Potentiel atteint</u>	R	$\epsilon$	<u>Déficit de production</u>
8 - 18	- 1,05	0.19	0.83	4.84 %
18 - 27	- 4	0.1	0.76	6.1 %
22 - 32	- 7	0.04	0.66	20.5 %
32 - 41	- 5	0.06	0.7	36.8 %
36 - 46	- 4	0.1	0.76	33.6 %
46 - 55	- 2,7	0.14	0.79	24 %
50 - 60	- 3,2	0.12	0.78	2 %
55 - 90	-10	0.02	0.6	0.8 %

R est le rapport RES/RFU calculé à partir du potentiel et des courbes  $\Psi(R)$  du sol correspondant (oxisol 37 BB). Il s'agit ensuite de

calculer les différents ETR à chaque jour de la période déficitaire. De la représentation linéaire avec palier (ici  $p=0,3$ ) il ressort que ETR au  $n^{\text{ème}}$  jour de déficit est de la forme  $ETR(n) = \epsilon \cdot ETR(n-1) = \epsilon^{(n-3)} \text{ETM}$ .

(Le  $(n-3)$  vient du fait que l'on considère que  $ETR = \text{ETM}$  pendant trois jours.  $\epsilon$  est inférieur à 1).

$$\text{De } ETR(10) = \frac{\text{ETM}}{0.7} R \quad \text{où } R \text{ correspond au potentiel du } 10^{\text{ème}} \text{ jour}$$

$$\text{on tire } \epsilon = (R/0.7)^{1/7}$$

$$\text{Sur les 10 jours de déficit on a donc } \sum_{10} ETR = \text{ETM} \left( 3 + \sum_{1}^7 \epsilon^n \right)$$

Prenons, par exemple, le déficit (46-55) qui s'inclut dans la phase 4 'formation du produit' (14 jours).

$$\text{On aura } \epsilon \text{ ETR} = \text{ETM} \left( 7 + \sum_{1}^7 \epsilon^n \right) \\ \text{phase 4}$$

$$\text{soit, pour } \epsilon = 0.79, \quad ETR = 10 \text{ ETM}$$

On a donc un déficit de 4 ETM soit un déficit relatif de 29%.

Le déficit de production étant de 24% on en déduit que  $K_y^4 = 0.83$ .

La valeur correspondante par Doorembos est de 0.75 (haricot sec).

Pour la période 3 on trouve un coefficient supérieur à l'unité c'est à dire plus du double de la valeur proposée par Doorembos. La méthode ci dessus est délicate car elle repose sur la précision de la valeur  $R$  correspondant au potentiel final. Les courbes  $\Psi(R)$  sont peu précises aux bas potentiels et cette incertitude se repercute sur  $\epsilon$  et donc sur  $K_y$ .

#### Fiches des cultures

Pour plus de commodité on peut représenter l'ensemble des paramètres d'une culture sur une fiche caractéristique qui permette de les visualiser. La Fiche (5.18) rassemble, par exemple, les données relatives au Maïs.

Le tableau suivant présente plus succinctement les coefficients affectés aux cultures les plus courantes (5.19).

( 5.18 )

FICHE CARACTERISTIQUE		MAIS		
levée		particules	soie	
Installation (0) 15 - 25 jours	Végétation (1) 25 - 40 jours	Floraison (2) 15 - 20 jours	Formation du produit (3) 35-45 jours	Mûris- sement (4) 10-15 jours
20	30	20	40	10
Kc			1	
0.3	0.4	0.8		0.4
Ky		14		0.2
0,4	0,4		0.5	
				0.2
COR				
Profondeur racinaire	PM = 90 cm			
	POUR = 50 %			
Point de fletrissement	PMUR =			
	NNUL =			
	PROD =			
	VALEUR COMMERCIALE			

CULTURE	DUREE DES STADES (Jours)					VALEURS LIMITE DE KC							COEFFICIENTS DE SENSIBILITE $K_v$					PM	POUR	PMU	NNUL	PROD t/ha	VAL 100Cr/kg	COR
	20	30	20	40	10	0.3	0.5	0.8	1.1	0.8	0.5	0.4	0.4	1.5	0.5	0.2								
MAÏS	20	30	20	40	10	0.3	0.5	0.8	1.1	0.8	0.5	0.4	0.4	1.5	0.5	0.2	100	30	0.1		2.5	0.75		
FEIJÃO	10	20	20	25	30	0.3	0.6	0.8	1.1	0.7	0.4	0.2	0.2	1.1	0.75	0.5	60	35	0.1		1.5	1		
TOMATE	30	20	25	25	20	0.4	0.7	1	1.2	0.8	0.6	0.4	0.4	1.1	0.8	0.4	50	35	0.1		50	1.2		
COTON	20	30	70	40	20	0.4	0.5	0.9	1.2	0.8	0.6	0.2	0.2	0.5	(0.3)	0.25	100	50	0.1		2	2		
POMME DE TERRE	15	35	10	50	10	0.4	0.6	0.8	0.8	1	0.75	0.45	0.8	0	0.7	0.2	60	30	0.1		10			
SORGHO	15	25	15	35	15	0.3	0.4	0.7	1*	0.7	0.5	0.2	0.2	0.55	0.45	0.2	120	55	0.1		30			
PASTEQUE	10	20	20	25	15	0.4	0.5	0.7	1	0.9	0.7	0.45	0.7	0.8	0.8	0.3	120	50	0.1		25			
OIGNON	25	25	0	50	20	0.4	0.6	0.8	0.8	1	0.8	0.45	0.45	0	0.8	0.3	40	30	0.1		25			
BANANA	0	0	0	0	365	0.8	0	0	0	0	0.8	0	0	0	0	1.25	70	30	0.1		60	2.5		

TABLEAU (5.19)

F) MODULE DE POLITIQUEDéfinition:

La politique d'irrigation est le module qui définit les doses à apporter aux plantes ainsi que la date et l'importance des plantations. Elle est définie tous les cinq jours ou chaque fois qu'il advient un pluie de plus de 5 mm. Ces critères sont bien sûr arbitraires et modifiables.

La politique se définit en fonction d'un paramètre appelé PREV qui représente en fait un bilan sur les ressources en eau.

Au jour considéré, on calcule tout d'abord le volume d'eau, VNEC, nécessaire pour irriguer les cultures jusqu'à la fin de leurs cycles respectifs compte tenu des espérances mathématiques des pluies sur le périmètre pendant la même période. Ceci se fait à l'aide d'une subroutine (INICON) qui donne, pour un jour quelconque du cycle de la plante NC, la consommation jusqu'à la fin de cycle. La même subroutine calcule les espérances mathématiques des pluies et des écoulements sur la même période. On a donc une estimation des apports que l'on va ajouter au volume de l'açude au jour du calcul et dont on retranchera une évaporation moyenne. Ceci nous fournira une évaluation du volume disponible, VDISP, que l'on confrontera au volume nécessaire VNEC.

Une difficulté surgit quand on veut faire ce bilan pour plusieurs cultures à des stades de développement différents. Le VNEC se calculera par simple addition mais il nous faudra définir sur quelle durée seront pris en compte les espérances des ruissellements. Soit  $d(NC, KNC) = NDI(5, NC) - ESTAG(NC, KNC)$  le nombre de jours séparant la culture (NC, KNC) de la récolte. La durée considérée sera la moyenne des  $d(NC, KNC)$  pondérés par l'importance de leur surface plantée, soit  $\frac{\sum d(NC, KNC) \cdot SPP1(NC, KNC)}{\sum SPP1(NC, KNC)}$ .

Cette évaluation pourrait être améliorée par un bilan mois par mois mais nous nous satisferons de cette approximation considérant que l'on peut se permettre une certaine incertitude sur une prévision fondée sur des espérances mathématiques. Ceci apparaîtra plus clairement par la suite.

On définit donc notre paramètre PREV en faisant le rapport  $\frac{VDISP}{VNEC}$  dont la variation autour de 1 donnera une indication sur l'état des réserves et des apports prévus face à la demande.

Ici interviennent des critères de politique, modifiables, qui se dé

finissent comme suit (entre crochets une valeur numérique possible):

$$|0,8| \text{ CRT (2)} \leq \text{PREV} \leq \text{CRT (3)} |1,2|$$

On a équilibre entre les deux volumes.

On fournit les doses normales définies par les données agronomiques.

$$|0,5| \text{ CRT (1)} \leq \text{PREV} \leq \text{CRT (2)} |0,8|$$

Les apports des derniers jours ont été inférieurs aux espérances. Le volume de l'açude baisse et VDISP diminue.

Une réduction des doses fournies s'impose.

$$\text{PREV} \leq \text{CRT (1)} |0,5|$$

Le déséquilibre augmente. On doit cesser d'irriguer une partie du périmètre.

$$\text{PREV} \geq \text{CRT (3)} |1,2|$$

Les apports dépassent les espérances. On a de l'eau en trop. Une sous-parcelle est plantée si certaines conditions de minimum sont respectées.

Si l'on ne se trouve pas dans la première situation (normalité), le programme définit quantitativement les modifications apportées.

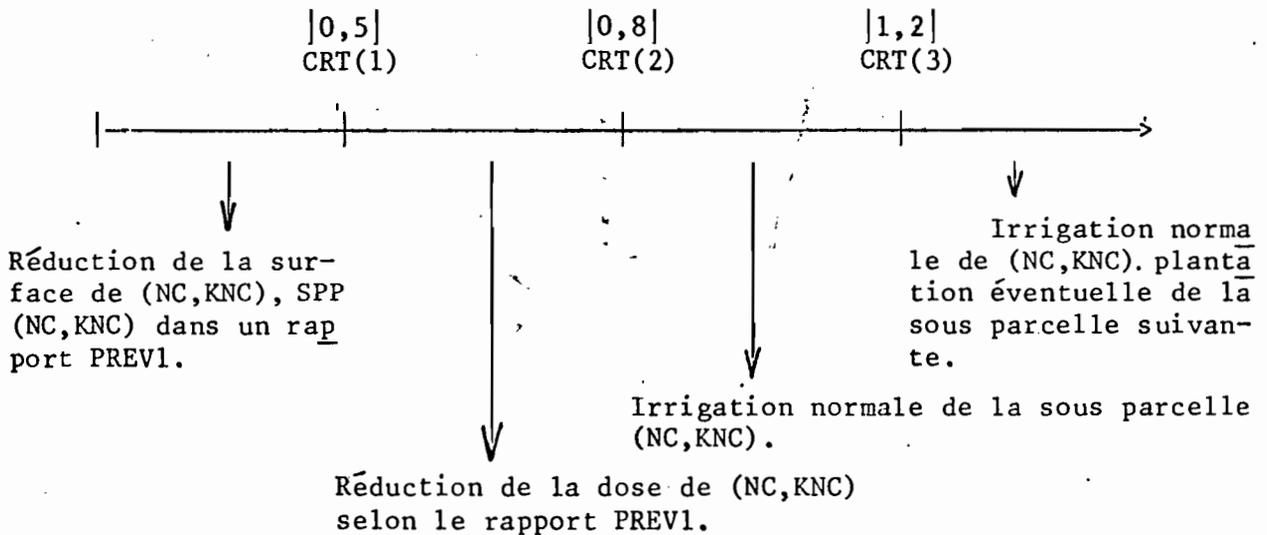
Il calcule tout d'abord pour toutes les sous-parcelles, successivement, un coefficient similaire  $\text{PREV } 1 \text{ (NC, KNC)} = \frac{\text{VDISP } 1}{\text{VNEC } 1}$ .

Au début  $\text{VDISP1} = \text{VDISP}$  puis, à chaque sous-parcelle considérée, on retranche à  $\text{VDISP1}$  ce qui est alloué à la culture.  $\text{VNEC1}$  est le volume nécessaire par la sous-parcelle.

En fonction de la place de  $\text{PREV1}$  (NC, KNC) par rapport aux critères fixés plus haut on définit la politique relative au lot (NC, KNC); tant que  $\text{PREV1} \geq \text{CRT(3)}$ ,  $|1,2|$ , on arrose normalement et on soumet la parcelle suivante, (NC, KNC + 1) ou (NC + 1, 1) si KNC=3, au test de plantation décrit plus bas.  $\text{VDISP1}$  diminuant,  $\text{PREV1}$  pourra tomber en dessous de  $\text{CRT(3)}$ ,  $|1,2|$ , auquel cas on continuera à irriguer jusqu'à ce que l'on passe à une parcelle pour laquelle  $\text{PREV1} \leq \text{CRT(2)}$   $|0,8|$ . On réduira la dose |resp. la superficie, si  $\text{PREV1} \leq \text{CRT(1)}$   $|0,5|$  dans un rapport donné par PREV.

On aura donc la nouvelle dose  $d = \text{dose normale} \times \text{PREV}$  [resp. superficie effectivement irriguée =  $\text{SPPI}(\text{NC}, \text{KNC}) \cdot \text{PREV}$ ].

Le dessin suivant résume les décisions prises, successivement, pour chaque sous-parcelle selon la valeur de  $\text{PREV1}(\text{NC}, \text{KNC})$



#### Test de la plantation

En cas de surabondance, c'est à dire  $\text{PREV1} > \text{CRT}(3)$ , la sous-parcelle suivant la dernière parcelle occupée sera éventuellement plantée. (Ce test intervient de la même manière si l'on se retrouve un jour avec un périmètre sans culture). Cette sous-parcelle est encore virtuelle car sa superficie n'est pas encore définie. Si, par exemple, nous n'avons qu'une seule culture  $(\text{NC}, \text{KNC}) = (1, 1)$ , la superficie  $\text{SPPI}(1, 2)$  sera choisie pour, au plus, compléter la partie du périmètre réservée à cette culture  $\text{NC} = 1$  | ceci s'écrit  $0 \leq \text{SPPI}(1, 2) \leq \text{PERC}(1) \cdot \text{SURP} - \text{SPP}(1, 1)$  |.

On vérifie en fait que l'eau disponible en surplus permet d'irriguer, pendant tout son cycle, 25% de la superficie réservée à  $\text{NC}$  ( $\text{PERC}(\text{NC}) \cdot \text{SURP}, 0, 25$ ). Cette contrainte permet d'éviter des sous-parcelles de taille ridicule.

La superficie plantée est alors déterminée comme celle correspondant exactement au volume "disponible"; si la valeur calculée dépasse l'aire encore inocuée dans la parcelle  $\text{NC}$ , on la réduira d'autant.

Application de la politique

PREV1 (NC,KNC) définit pour chaque sous-parcelle une politique dont se déduit directement la dose d'irrigation qui lui sera appliquée. En régime normal cette dose est égale aux besoins de la plante au jour considéré moins les pluies du jour.

Ceci s'écrit

$$\begin{aligned} \text{Dose} &= \text{ETP} \cdot \text{KC}(\text{jour}) - \text{Pluie}(\text{jour}) \\ &= \text{ETM} - \text{PLUIE}(\text{jour}) \end{aligned}$$

En cas de réduction de dose, pour  $\text{CRT}(1) < \text{PREV1}(\text{NC},\text{KNC}) < \text{CRT}(2)$ , on a vu que celle-ci se fait dans un rapport donnée par  $\text{PREV1}(\text{NC},\text{KNC})$ , soit  $\text{dose} = \text{dose normale} \times \text{PREV1}(\text{NC},\text{KNC})$ .

Pour  $\text{PREV1}(\text{NC},\text{KNC}) < \text{CRT}(1)$ , la réduction de surface se fait dans la même proportion. La dose apportée sur la surface réduite prise en compte est alors la dose normale.

Le bilan dans le sol de la sous-parcelle (NC,KNC) est le suivant:

$$R = \frac{\text{RES1}(\text{NC},\text{KNC})}{\text{RRFU}} \quad (\text{Etat de la reserva en } \%)$$

$$\text{ETR} = f(\text{ETM},\text{RR}) \quad (\text{Calcul de la consommation réelle})$$

$$\text{RES1}(\text{NC},\text{KNC}) = \text{RES1}(\text{NC},\text{KNC}) + \text{PLUIE} + \text{DOSE} - \text{ETR}$$

On constate que pour un régime où  $\text{ETR} = \text{ETM} = \text{DOSE} + \text{PLUIE}$  la réserve du jour est égale à la réserve du jour précédent. Dans le cas où les pluies sont très importantes et dépassent la capacité du sol, on a  $\text{DOSE} = 0$  et:

$$\text{VOLUME PERDU} = \text{PLUIE} - |\text{RRFU} - \text{RES1}(\text{NC},\text{KNC})|$$

Variantes de la politique

La politique présentée ci-dessous est la plus simple dans la mesure ou elle consiste, en régime normal, à apporter chaque jour la quantité d'eau dont la plante a besoin. Cette politique 0 peut être modifiée par souci de mieux cadrer avec la réalité d'un périmètre d'irrigation. Quatre politiques d'irrigation sont prévues dans le modèle:

Politique 1: Elle consiste en une modification de l'option 0. Les doses quotidiennes et leur réduction sont calculées de la même manière sauf quand on passe d'une période de restriction à une période normale: en effet, dans l'option précédente, une réduction de dose peut conduire le sol à un très faible taux d'humidité; si un apport important nous permet des conditions normales d'irrigation, l'application de la dose ETM ne pourra ramener le sol à une humidité proche de CC qu'au bout de quelques jours. Aussi prévoit-on ici, dans ce cas, d'appliquer au moment du retour à la normale, la dose permettant de compléter la réserve jusqu'à la capacité au champ. Cette mesure réduira la durée du déficit hydrique.

Politique 2: On peut introduire un intervalle de temps fixe entre les irrigations (en jours). La dose est alors celle qui permet de ramener le sol jusqu'à la capacité au champ.

Politique 3: Pour le même intervalle de temps fixé, on irriguera avec un dose fixe ou plutôt déterminée à l'avance (par exemple, n fois l'ETM du jour, si n est le nombre de jours entre deux irrigations).

Politique 4: On se fixe un taux d'humidité minimum et quand celui-ci est atteint ou dépassé on complète à la CC. Ce taux peut être pris égal à  $POUR(NC)$  c'est à dire la valeur inférieure des humidités pour lesquelles  $ETR = ETM$ . La séquence des intervalles entre deux irrigations successives peut alors nous permettre de définir un intervalle fixe optimum entre deux tours d'eau. Une telle irrigation est optimum parce qu'elle minimise le nombre d'irrigations, tire un parti maximum des pluies tout en assurant le niveau de la récolte.

Notons que l'introduction de ces politiques à pas de temps variable pose un problème en cas de déficit. Il faut alors en effet n'irriguer qu'à la date où les économies ( $ETM-ETR$ ) réalisées chaque jour correspondent à la réduction d'eau souhaitée.

#### Améliorations de la politique

L'ordre des indices 1, 2, 3, correspondant au trois cultures ainsi qu'à leur subdivision, induit de fait une priorité. La culture 1 est prioritaire puisqu'elle sera plantée en premier et que, lors des réductions de do

se, ce seront les cultures 3 puis 2 qui seront d'abord affectées. Il conviendra donc de classer les cultures en fonction de l'importance qu'on leur accorde.

Dans un deuxième temps, le modèle peut être amélioré de la façon suivante: on peut d'abord choisir de réduire les doses ou les surfaces concernant la sous-parcelle la plus jeune pour ne pas porter préjudice aux autres qui ont déjà valorisé l'eau qu'on leur a fournie. Il est beaucoup plus judicieux encore de réduire ces doses sur la sous-parcelle qui se trouve dans un stade de développement présentant la moindre sensibilité au stress hydrique, c'est à dire de moindre  $K_y$ .

On a introduit une politique d'abandon dans le cas où l'indice PREV pousse le pessimisme au delà du critère CRT(1), pour tenter de reproduire l'attitude du paysan dans un cas pire que celui où il doit réduire son irrigation. Cette décision devra être modulée en fonction du passé, le cultivateur ne cessant d'irriguer qu'après avoir réduit les doses pendant un certain temps et préférant diminuer l'irrigation sur plusieurs parcelles que d'en abandonner une au profit de l'autre.

G) FLUXOGRAMME GENERAL

Après cette revue des différents modules du programme, nous allons tenter de les résumer et de les présenter dans un fluxogramme simplifié.

Données d'entrée: Le premier dessin (5.18) souligne que l'ensemble de la modélisation relie les paramètres des éléments rencontrés par l'eau dans son trajet depuis le nuage jusqu'à la plante.

Nous avons, successivement, les paramètres climatiques (pluies journalières, ETP, vent, évaporation, humidité...), les paramètres donnant les écoulements journaliers après classification du bassin, les lois géométriques de l'açude, et l'ensemble des caractéristiques du sol, des cultures et du système d'irrigation utilisé.

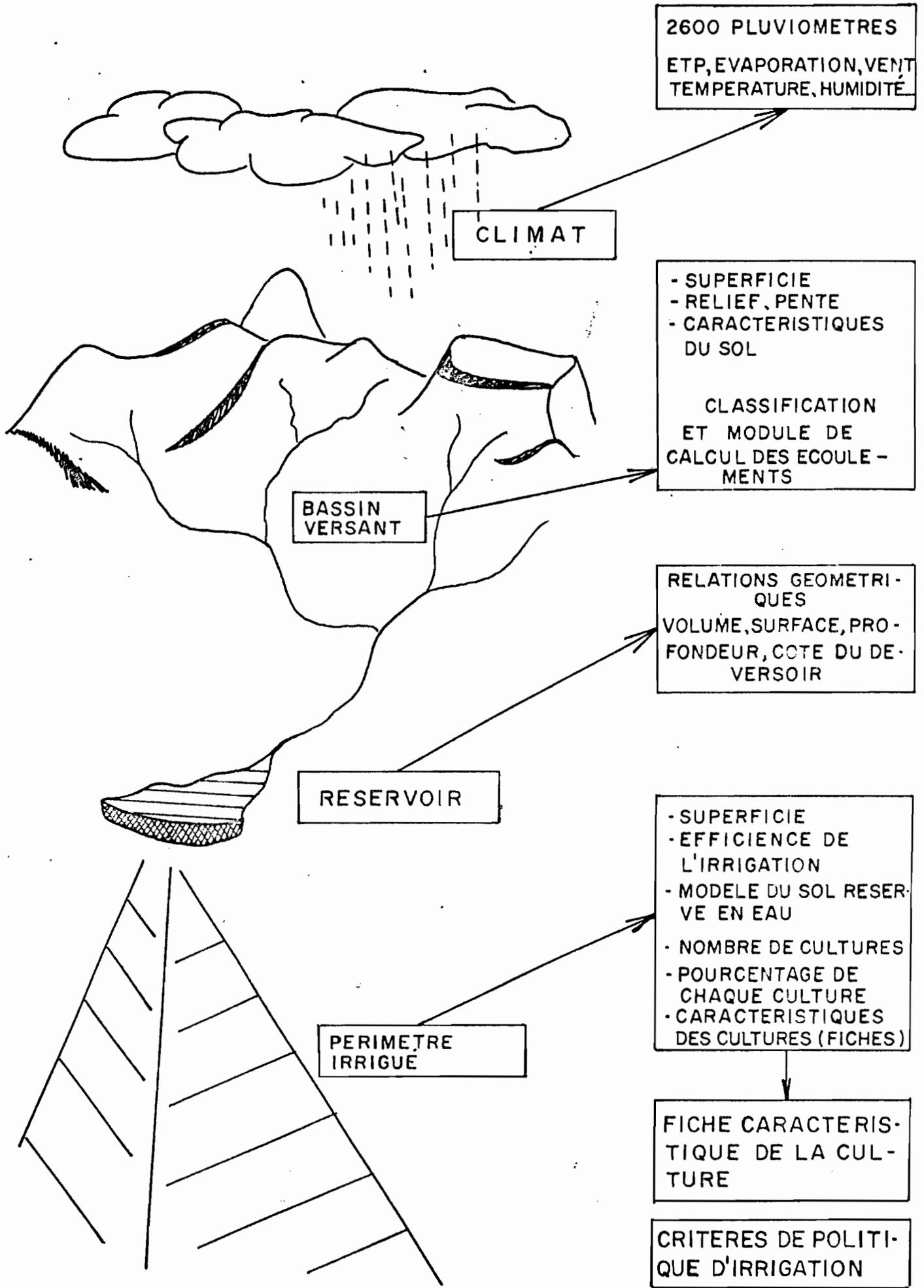
Les paramètres de chaque culture sont synthétisés dans la fiche définie au paragraphe (E).

Calcul journalier: Le schéma (5.19) résume le bilan journalier. Une partie calcule l'état des ressources, c'est à dire de l'açude, compte tenu des pluies, des écoulements, de l'évaporation et une autre établit les doses, l'état du sol, et enregistre la séquence des déficits hydriques éventuels.

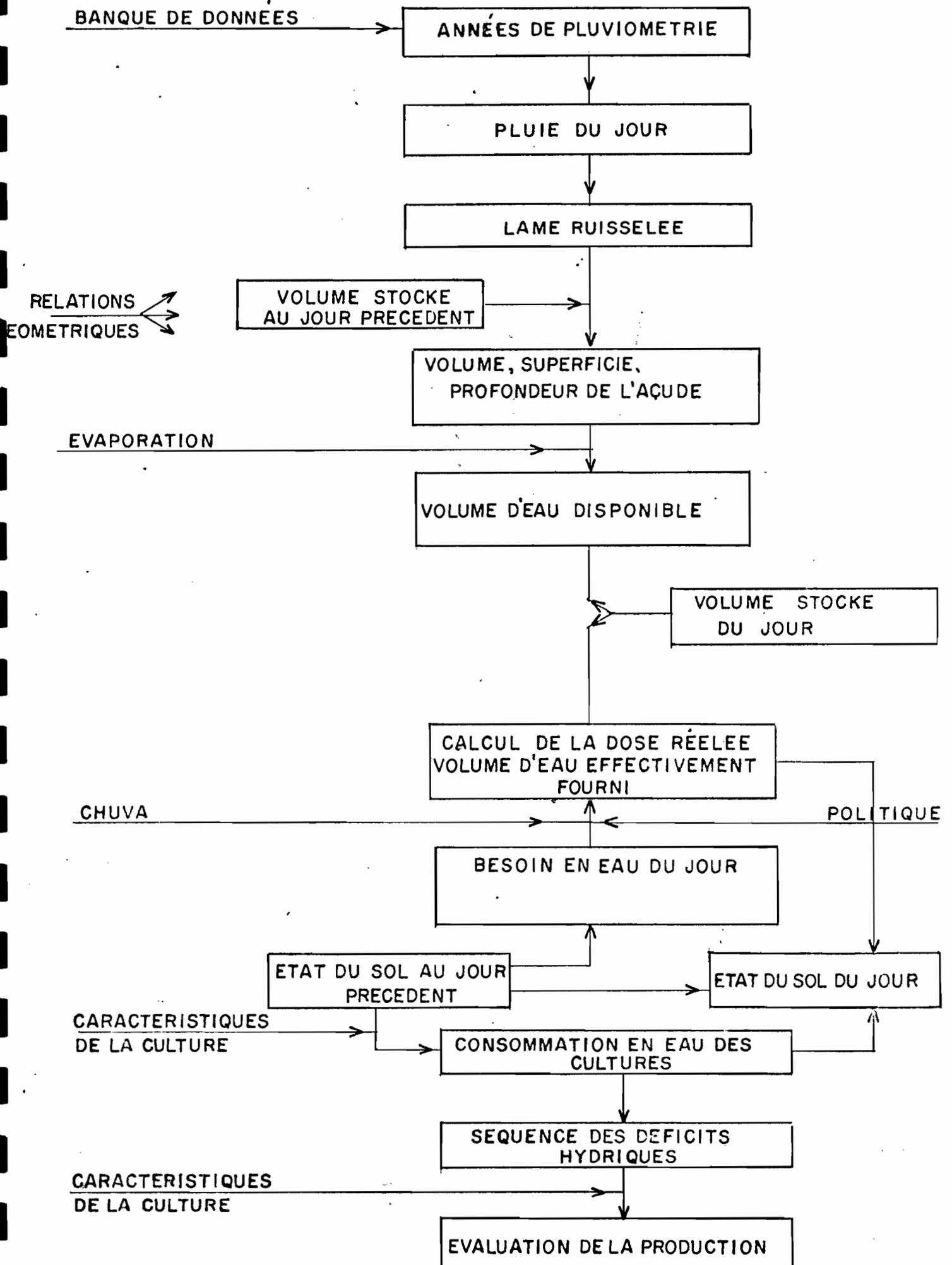
Ce calcul de la dose est modifié par un feed-back de la politique.

Prévision et politique: Le diagramme (5.20) rappelle comment se fait le calcul de la variable PREV et comment s'en déduit la politique d'irrigation.

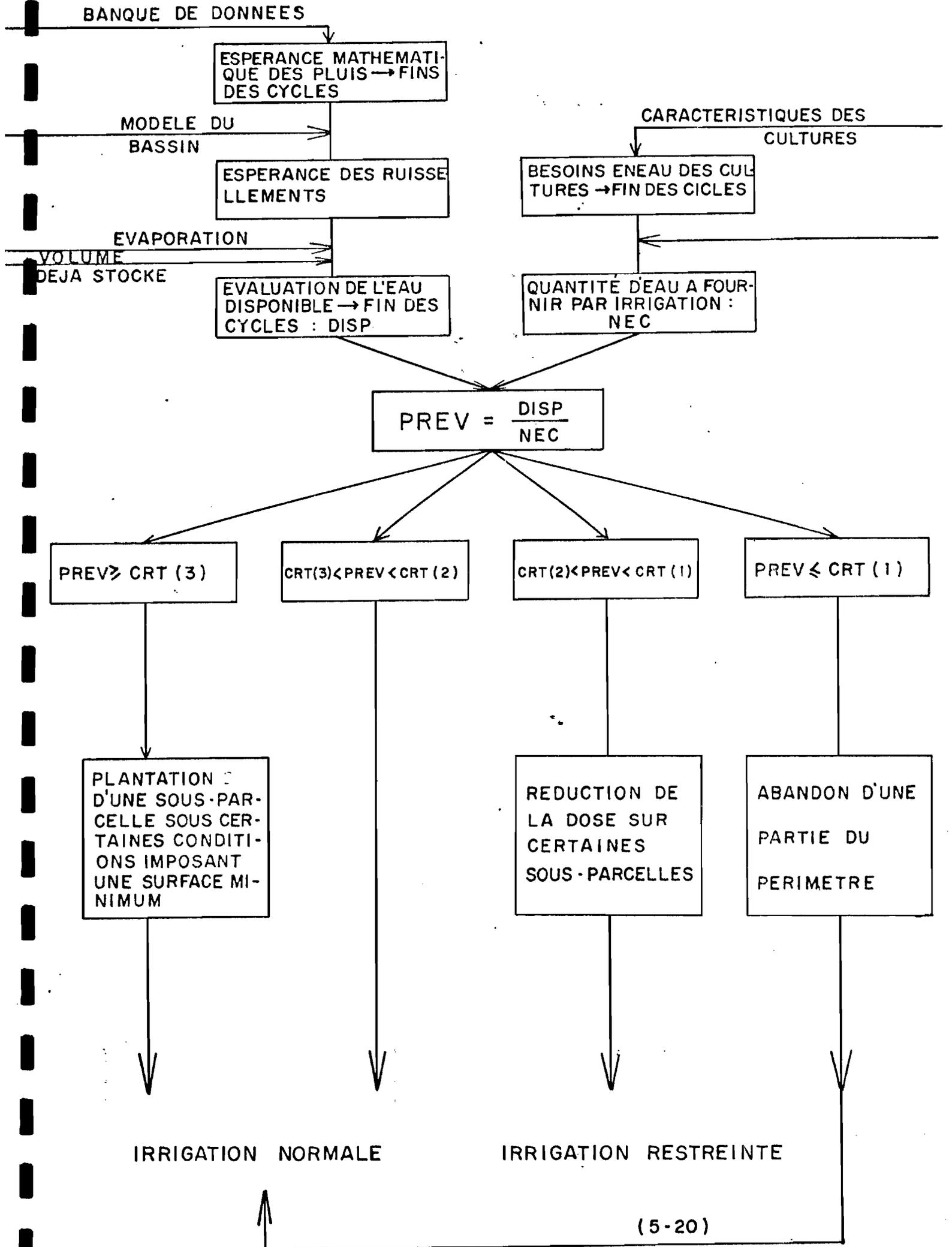
# DONNÉES



## CALCUL JOURNALIER



PREVISION ET POLITIQUE



2) SORTIES DU MODELE

De manière générale il est possible d'obtenir les valeurs d'une variable quelconque sur l'ensemble des années générées par la banque de données. En pratique on se contentera des moyennes (M) (ou des sommes (S)) mensuelles et annuelles.

Parmi les variables qu'il semble intéressant d'étudier on aura par exemple:

- 1) Précipitations (S)
- 2) Lame ruisselée (S)
- 3) Volume de l'açude (M)
- 4) Superficie de l'açude (M)
- 5) Volume d'eau évaporé dans l'açude (S)
- 6) Volume perdu dans le déversoir (S)
- 7) Volume utilisé pour l'irrigation (S)
- 8) Volume évapotranspiré (S)
- 9) Volume perdu (percolation et ruissellement) (S)

et pour chacune des cultures

- 10) La superficie irriguée (M)
- 11) La superficie plantée (S)
- 12) La superficie abandonnée (S)
- 13) Les superficies récoltées (S)
- 14) Les rendements (M)
- 15) Les valeurs économiques des productions (S).

Pour chaque variable on dispose aussi d'un classement des moyennes (ou sommes) annuelles.

De ce classement est déduit un petit tableau statistique simple où apparaissent les quantiles et la moyenne de chacune des variables désirées.

Il est possible, enfin, d'obtenir des graphiques, de chercher des corrélations entre les variables, etc...

VI - EXPLOITATION ET APPLICATIONS

1) Potentialités

Ce modèle III peut être utilisé à des fins diverses dont un certain nombre ont déjà été évoquées au chapitre précédent.

Une première utilisation pourrait être le dimensionnement des açudes mais nous nous intéressons prioritairement aux açudes déjà existants.

L'étude du comportement du périmètre d'irrigation permet en premier lieu de déterminer sa superficie, ceci en fonction des cultures proposées et en fonction du niveau de risque admis.

Les statistiques obtenues sur les productions permettent de définir des probabilités de niveau de production.

Le choix d'une politique d'irrigation peut être optimisé et il en résulte une définition des doses et des fréquences d'irrigation.

Le comportement du périmètre d'irrigation soumis à une sécheresse de durée et d'intensité quelconque peut être étudié.

Ces résultats qui concernent des cas particuliers peuvent donner lieu à la définition de normes donnant, par exemple, la superficie à équiper en fonction des caractéristiques du climat, de la classe du bassin versant et de la géométrie de l'açude.

D'un point de vue théorique, intéressant la recherche, tous les tests de sensibilité des différents paramètres et des différentes modélisations envisagées pourront être faits sans difficulté. Ceci débouchera sur la mise en évidence des points sensibles et la définition de priorités pour la recherche.

En fin un bilan économique, indiquant la viabilité du système d'irrigation utilisé, peut être déduit des résultats sur les productions du périmètre.

2) Applications

Nous nous proposons ici d'appliquer notre modèle à quelques cas concrets. Nous avons pour cela choisi des açudes de la région de Catolé do Rocha, située au Nord-Ouest de l'état de la Paraíba. Cette région présente un intérêt exceptionnel dans la mesure où l'on dispose d'informations complètes à son sujet: les açudes dont la géométrie a été étudiée au premier chapitre, à partir de relevés topographiques, proviennent de cette région et nous emprunterons trois d'entre eux.

Nous disposons aussi de photosaériennes au 25.000<sup>ème</sup> qui nous permettront de déterminer la superficie des bassins versants.

Cette région est de plus très représentative du Nordeste. On y trouvait en 1979, pour 3.000 km<sup>2</sup>, près d'un millier d'açudes, dont la moitié de capacité inférieure à 100.000 m<sup>3</sup> (voir annexe).

Un projet de développement concernant cette région à déjà reçu un financement et les modèles ci-dessus pourraient être calés et utilisés à cette occasion.

A	<u>Açude NOEL VERAS</u>	$\alpha = 2,3$	HX = 3,20 m
		K = 2411	SX = 25.000 m <sup>2</sup>
			<u>VX = 35.000 m<sup>3</sup></u>

Superficie du bassin hydrologique: 115 ha.

Classe 4.

B	<u>Açude MANUEL ARRUDA</u>	$\alpha = 2,3$	HX = 3,75 m
		K = 4620	SX = 59.000 m <sup>2</sup>
			<u>VX = 96.000 m<sup>3</sup></u>

Superficie du bassin hydrologique: 2.9 km<sup>2</sup>.

Classe 3 +

C	<u>Açude PIO SUASSUNA</u>	$\alpha = 2,4$	HX = 3,75 m
		K = 10 729	SX = 164.000 m <sup>2</sup>
			<u>VX = 256.000 m<sup>3</sup></u>

Superficie du bassin hydrologique: 36 km<sup>2</sup>

Classe 3 +

Nous présentons ici quelques résultats numériques: à l'heure présente tout le détail des calculs n'a pu être vérifié. Certaines modifications fines n'ont point encore été introduites et ces résultats doivent être considérés comme des exemples indicatifs.

- La politique est la politique 0 c'est à dire celle qui correspond à un arrosage quotidien.
- Un ajustement est nécessaire pour ce qui concerne le bassin hydrographique de l'exemple C). Celui-ci a été planimétré à  $36 \text{ km}^2$  ce qui donne des apports disproportionnés. Une étude plus fine devrait déterminer la part revenant aux petits açudes inclus dans ce bassin. De manière générale, pour les grands bassins, il sera nécessaire de caler le modèle hydrologique en observant par exemple la montée du niveau d'eau dans l'açude au moment des pluies. Notre exemple concernant cet açude lui confère arbitrairement un bassin réduit à  $15 \text{ km}^2$ .
- Les superficies sont en hectares, les rendements sont des valeurs non cumulatives donc ici sans grande signification, les productions sont en milliers de cruzeiros c'est à dire pratiquement en francs.
- Aucun facteur d'efficience de l'irrigation n'a été introduit et les superficies doivent donc être multipliées par l'efficience que l'on voudra considérer. Pour les résultats provenant du modèle II l'efficience est 0.6.
- Les évaporations du modèle II ont été majorées de 40% pour prendre en compte les infiltrations. Dans tous les cas les résultats sont obtenus pour une côte minimale admissible d'un mètre.

Les tableaux suivants présentent les moyennes et les quantiles des variables principales sur une durée de 64 ans.

A Il s'agit d'un açude de faible volume ( $35.000 \text{ m}^3$ ) mais bien alimenté par un bassin assez rocheux et accidenté, bien que de taille modeste.

Il est proposé un périmètre de tomate de 10 hectares. Les moyennes mensuelles des superficies plantées sont les suivantes:

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0.27	1.09	3.08	4.28	4.47	3.61	1.66	0.46	0.13	0.04	0.00	0.08

avec une moyenne annuelle de 1.6 ha.

On voit qu'en dehors de la saison des pluies les superficies irriguées ont été très faibles.

Le tableau I donne les résultats de la simulation. Les SPP sont les moyennes des superficies des sous-parcelles.

Si on applique le modèle II à cet açude pour le calendrier cultural présentant feijão, tomate et coton (voir IV), on obtient les résultats suivants:

SUPERFICIE OPTIMALE DONT L IRRIGATION EST ASSUREE 1 ANNEES SUR 10	2.52
SUPERFICIE OPTIMALE DONT L IRRIGATION EST ASSUREE 2 ANNEES SUR 10	1.95
SUPERFICIE OPTIMALE DONT L IRRIGATION EST ASSUREE 3 ANNEES SUR 10	1.74
SUPERFICIE OPTIMALE DONT L IRRIGATION EST ASSUREE 4 ANNEES SUR 10	1.50
SUPERFICIE OPTIMALE DONT L IRRIGATION EST ASSUREE 5 ANNEES SUR 10	1.33
SUPERFICIE OPTIMALE DONT L IRRIGATION EST ASSUREE 6 ANNEES SUR 10	1.22
SUPERFICIE OPTIMALE DONT L IRRIGATION EST ASSUREE 7 ANNEES SUR 10	0.99
SUPERFICIE OPTIMALE DONT L IRRIGATION EST ASSUREE 8 ANNEES SUR 10	0.00
SUPERFICIE OPTIMALE DONT L IRRIGATION EST ASSUREE 9 ANNEES SUR 10	0.00
SUPERFICIE OPTIMALE DONT L IRRIGATION EST ASSUREE 10 ANNEES SUR 10	0.00

- B Cet açude est très représentatif de la classe des petits açudes permettant une irrigation à l'échelle du petit producteur.

Les tableaux II et III donnent les sorties de la simulation pour une culture (tomate) et pour 3 cultures (tomate, coton, feijão), (10 ha).

Dans le premier cas les moyennes mensuelles des superficies furent les suivantes:

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0.71	2.05	4.53	5.89	6.45	6.2	5.09	4.01	3.1	1.79	0.5	0.38

Dans le tableau III les valeurs de la production 3 doivent être multipliées par 10. SPLANTADA est la superficie plantée, au sens actif. Les valeurs caractéristiques sont rappelées au tableau IV.

Il est intéressant de comparer les résultats précédents à ceux obtenus avec le modèle II pour le calendrier cultural comprenant les 3 mêmes cultures:

SUPERFICIE OPTIMALE DONT L IRRIGATION EST ASSUREE 1 ANNEES SUR 10	7.30
SUPERFICIE OPTIMALE DONT L IRRIGATION EST ASSUREE 2 ANNEES SUR 10	8.24
SUPERFICIE OPTIMALE DONT L IRRIGATION EST ASSUREE 3 ANNEES SUR 10	8.99
SUPERFICIE OPTIMALE DONT L IRRIGATION EST ASSUREE 4 ANNEES SUR 10	9.82
SUPERFICIE OPTIMALE DONT L IRRIGATION EST ASSUREE 5 ANNEES SUR 10	9.84
SUPERFICIE OPTIMALE DONT L IRRIGATION EST ASSUREE 6 ANNEES SUR 10	1.02
SUPERFICIE OPTIMALE DONT L IRRIGATION EST ASSUREE 7 ANNEES SUR 10	0.00
SUPERFICIE OPTIMALE DONT L IRRIGATION EST ASSUREE 8 ANNEES SUR 10	0.00
SUPERFICIE OPTIMALE DONT L IRRIGATION EST ASSUREE 9 ANNEES SUR 10	0.00
SUPERFICIE OPTIMALE DONT L IRRIGATION EST ASSUREE 10 ANNEES SUR 10	0.00

On voit que, avec un effcience 0.6, la moyenne mensuelle la plus grande est de l'ordre 4 hectares (modèle III) ce qui correspond ci-dessus à une irrigation pratiquement médiane.

- C La détermination de la proportion active du bassin de cet aqude demanderait des informations supplémentaires.

Pour 25 ha d'une culture (tomate) on obtient le tableau V en considérant un bassin de 15 km<sup>2</sup>.

Les moyennes des superficies cultivées sont:

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2.57	6.96	12.9	15.7	17	16.8	14	11.8	9.15	4.6	1.7	1.43

Le modèle II, toujours pour nos trois cultures, donne:

SUPERFICIE OPTIMALE DONT L IRRIGATION EST ASSUREE 1 ANNEES SUR 10	29.00
SUPERFICIE OPTIMALE DONT L IRRIGATION EST ASSUREE 2 ANNEES SUR 10	25.64
SUPERFICIE OPTIMALE DONT L IRRIGATION EST ASSUREE 3 ANNEES SUR 10	20.70
SUPERFICIE OPTIMALE DONT L IRRIGATION EST ASSUREE 4 ANNEES SUR 10	17.94
SUPERFICIE OPTIMALE DONT L IRRIGATION EST ASSUREE 5 ANNEES SUR 10	16.08
SUPERFICIE OPTIMALE DONT L IRRIGATION EST ASSUREE 6 ANNEES SUR 10	16.08
SUPERFICIE OPTIMALE DONT L IRRIGATION EST ASSUREE 7 ANNEES SUR 10	15.78
SUPERFICIE OPTIMALE DONT L IRRIGATION EST ASSUREE 8 ANNEES SUR 10	0.00
SUPERFICIE OPTIMALE DONT L IRRIGATION EST ASSUREE 9 ANNEES SUR 10	0.00
SUPERFICIE OPTIMALE DONT L IRRIGATION EST ASSUREE 10 ANNEES SUR 10	0.00

N. PLUVIO- 3834556 NO. S. CIA- PERIODO PLUVIO- 1955 - 1956 C. I. - JUNTA 1955 500.0

SUPERFICIE PACIA \*\*\* 1.255272 \*\*\*

CARACTERISTICAS ACUJE \*\*\* HX 1.20 \*\* SX 7.15.55. \*\* V. K 15000. \*\* ALTA 21.00 \*\* V. 77.55+77.55 \*\*\*

CARACTERITICAS PERIMETRO \*\*\* SUPERFICIE 10.00 IV \*\* EFICIENCIA. 1 \*\* 1 CULTIVO 5.5 - 10.00. 1 \*\*\*

PRECIPITACION 535. \*\* EVAPOTRANSPIRACION 200.1. IVANI \*\*\*

\*\*\* CARACTERISTICAS LOS CULTIVO \*\*\*

* NOME *	TOMATE														
* PEFICIENTAG. *	1.00														
* PERIODOS CICLO VLSPT. *	1	30	50	75	100	120	1	-1	385	105	305	355	1	-1	385
* VALORES DE KC *	40	70	100	100	80	50	100	100	100	100	100	100	150	150	100
* VALORES DE KY *	40	40	40	40	40	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
* ALCANCE DAS RAISES *	50						30						100		
* VALOR CRITICO DE EF *	01						0						0		
* NDA PRODUCAO NULA *	30						0						30		
* NDA QUE PRIV. MORT *	-						0						0		
* RENDIMENTO MAXIMIA *	25						2.50						1.00		
* VALOR COMMERCIAL CULT *	1200						*****						*****		

\*\*\* RESULTADOS \*\*\*

VALORES CARACTERISTICOS	MAXIMA	0.00	0.30	0.5007	0.667	0.800	MI. 1.14	MI. 0.1
CHUVAS	1377.6	1056.1	759.6	638.7	532.2	371.5	164.4	...
VOLUME ESCADAJ	512132.6	335701.7	187924.7	79584.1	50795.2	2770.2	1984.4	...
VCL. EVAPORACAO NO ACUJE	50276.6	46474.1	37795.1	29435.4	21984.5	18510.3	5175.5	...
VOLUME SANGRIA	473554.7	234710.2	98414.6	37522.2	10605.7	0.0	3.0	...
VOLUME EVAPOTRANSPIRACAO	51578.5	45107.2	24955.9	73477.0	17156.5	0.0	0.0	...
VCL. PERDIDO NO PERIM	59534.5	37224.3	17771.2	11004.4	5337.4	0.0	0.0	...
VOLUME DE IRRIGACAO	33787.4	31595.2	14034.0	14564.5	10156.6	0.0	0.0	...
DEFICIT ABAST. POPULACAO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	...
DEFICIT ABAST. DO SAO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	...
CHIAS MAXIMAS	*****	*****	*****	*****	*****	*****	0.0	...
SUP. PLANT. MEDIA CULT I	4.1	1.2	2.2	1.7	1.1	0.0	0.0	...
SUP. QUE MORREU CULT. I	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	...
RENDIMENTO DO CULTIVO I	0.7	0.4	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0	...
PRODUCAO DO CULTIVO I	37172.0	29400.0	13514.2	15561.3	11466.9	0.0	0.0	14361.0
SPPI 1,1E	4.1	1.1	1.5	1.4	1.1	0.0	0.0	...
SPPI 1,2E	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	...
SPPI 1,3E	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	...
SPLANT	12.6	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	...
VOLUME DO ACUJE	22536.5	11017.6	13017.5	12014.3	4054.2	2945.1	375.7	1175.0
SUPERFICIE DO ACUJE	10604.5	17357.2	14507.2	12231.1	6446.2	4359.4	1175.9	1154.0

TABLEAU I

N. PLUVIO- 34-516 T. BACIA- 377055 PLUVI. MET. 7- 227 ALTA- 10000 BACIA- 100000 500.0 35 34 3 - 31 17

SUPERFICIE BACIA \*\*\* 21.000-00-00 \*\*\*

CARACTERISTICAS ACUDE \*\*\* 10.75 \*\*\* 34.5 10.0. 34.73 10.000. \*\*\* ALFA 2.50 \*\*\* V4 11000.00 \*\*\*

CARACTERISTICAS PERIMETRO \*\*\* SUPERFICIE 10.0000 \*\*\* PERIMETRO. 1. \*\*\* 1 CULTIVOS \*\*\* PERIMETRO \*\*\*

PRECIPITACAO 505. \*\*\* CAPACIDADE 1000.0 7000 \*\*\*

\*\*\* CAPACIDADES E PERIODOS DE PERIODO \*\*\*

* NOME	TERRA															
* PERCENTUAL	1.00 0.00 0.00															
* PERIODO CICLO VEGET.	1	50	50	75	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
* VALORES DE K0	40	70	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
* VALORES DE K1	40	40	110	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
* ALCANCE DAS RAIZES	50															
* VALOR CRITICO DE RR	01															
* INDIA PRODUCAO NULA	30															
* INDIA QUE PRODUZ MORTE	-															
* RENDIMENTO MAXIMO	25															
* VALOR COMERCIAL CULT	1200															

\*\*\* T. S. JULTA 1975 \*\*\*

VALORES CARACTERISTICOS	MAXIMA	0.100	0.500	0.500	0.667	0.500	MINIMA	0.100
CHUVAS	1397.6	1056.1	769.8	618.4	533.2	571.5	184.8	104.1
VOLUME ESCOZDO	325626.0	535311.7	137146.9	141557.7	1105767.7	3583.6	0.0	210540.1
VOL. EVAPORACAO NO ACUDE	124653.8	151757.7	36345.7	75243.2	64750.7	21588.0	3270.5	6771.7
VOLUME SANGRIA	323348.6	416152.1	40751.3	75846.3	0.0	0.0	0.0	127251.7
VOLUME EVAPOTRANSPIRACAO	117612.2	37242.0	70059.7	60284.7	42151.7	0.0	0.0	31791.1
VOL. PERDIDO NO PERIM	71971.9	45551.1	26353.2	17705.5	11937.1	0.0	0.0	21.1
VOLUME DE IRRIGACAO	41274.0	52364.4	52432.0	48406.1	15544.0	0.0	0.0	91.1
DEFICIT ABAST. POPULACAO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DEFICIT ABAST. DE GADO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CHIEIS MAXIMAS	*****	*****	*****	*****	*****	*****	0.0	0.0
SUP. PLANT. MEDIA CULT 1	7.0	0.0	1.6	3.4	2.7	0.0	0.0	0.0
SUP. QUE MORREU CULT. 1	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
RENDIMENTO DO CULTIVO 1	1.0	0.0	0.4	0.4	0.4	0.0	0.0	0.0
PRODUTOS DO CULTIVO 1	37934.8	47301.9	4310.7	32055.0	24064.7	0.0	0.0	3779.1
SPPI%1,10	6.9	5.5	4.3	3.3	2.5	0.0	0.0	3.2
SPPI%1,20	1.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
SPPI%1,30	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
SPLANT	21.8	17.1	13.7	19.3	3.4	0.0	0.0	10.7
VOLUME DO ACUDE	67745.5	53294.8	45513.4	37934.2	12523.5	5358.4	375.7	35210.1
SUPERFICIE DO ACUDE	46483.7	39504.7	13078.5	30424.1	77091.7	7770.2	1530.0	21697.1

TABLEAU II

1258



## CARACTERÍSTICAS DO PERÍMETRO DE IRRIGAÇÃO

SUPERFÍCIE PERÍMETRO DE IRRIGAÇÃO - 10.0 HA	
RESERVA D'ÁGUA DO SOLO -	100.0
EFICIÊNCIA DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO -	1.0
COEFICIENTE DE COBERTURA -	1.0

## CARACTERÍSTICAS DO RESERVAÇÃO

COTA DE SANGRAMENTO -	2.75
VOLUME MÁXIMO -	96600.00
SUPERFÍCIE MÁXIMA -	59243.00
COEF. DE FORMA REPRESSA -	2.30
VOLUME PARA 4 M -	112000.00

## CULTIVO 1. - 1 TOMATE

PERCENTAGEM DO PERÍMETRO PLANTADO -	0.2
CINCO CARACTERÍSTICAS DO CULTIVO -	30 50 75 100 120
SEIS VALORES DE KC -	40 70 100 100 80 40
CINCO VALORES DE KY -	40 40 110 60 40
PROFUNDIDADE MÁXIMA DAS RAÍZES	- 0.50
VALOR CRÍTICO DE RR & ENCHIMENTO DO SOLO -	0.55
NÚMERO DE DIAS QUE PROVÓCA PRODUÇÃO NULA -	50
NÚMERO DE DIAS QUE PROVÓCA MORTE NA CULTURA -	50
RENDIMENTO MÁXIMO - (T/HA) -	15.00
VALOR DO CULTIVO - (10000) -	1200.00

## CULTIVO 2. - 2 FEIJÃO

PERCENTAGEM DO PERÍMETRO PLANTADO -	0.4
CINCO CARACTERÍSTICAS DO CULTIVO -	30 40 45 70 90
SEIS VALORES DE KC -	40 60 60 60 70 50
CINCO VALORES DE KY -	20 20 110 75 20
PROFUNDIDADE MÁXIMA DAS RAÍZES	- 0.60
VALOR CRÍTICO DE RR & ENCHIMENTO DO SOLO -	0.65
NÚMERO DE DIAS QUE PROVÓCA PRODUÇÃO NULA -	50
NÚMERO DE DIAS QUE PROVÓCA MORTE NA CULTURA -	50
RENDIMENTO MÁXIMO - (T/HA) -	2.50
VALOR DO CULTIVO - (10000) -	1080.00

## CULTIVO 3. - 3 ALGODOÃO

PERCENTAGEM DO PERÍMETRO PLANTADO -	0.4
CINCO CARACTERÍSTICAS DO CULTIVO -	20 30 120 160 180
SEIS VALORES DE KC -	30 40 60 60 70 50
CINCO VALORES DE KY -	20 20 50 20 25
PROFUNDIDADE MÁXIMA DAS RAÍZES	- 1.00
VALOR CRÍTICO DE RR & ENCHIMENTO DO SOLO -	0.50
NÚMERO DE DIAS QUE PROVÓCA PRODUÇÃO NULA -	50
NÚMERO DE DIAS QUE PROVÓCA MORTE NA CULTURA -	50
RENDIMENTO MÁXIMO - (T/HA) -	2.00
VALOR DO CULTIVO - (10000) -	2000.00

TABLEAU IV

TABLEAU V

N. PLUVIO- 5884588 NO. SACTA- 2719050 PLUVIOMETRO - POMBAL SACTA FUNDEN COO.0 59 ANOS A PARTIR D  
 SUPEFFICIE SACTA \*\*\* 15.0000KM2 \*\*\*  
 CARACTERISTICAS ACUJE \*\*\* HX# 3.75 \*\* SX# 135840. \*\* VX# 258000. \*\* ALFA#2.40 \*\* V4# 298889.H3 \*\*\*  
 CARACTERITICAS PERIMETRO \*\*\* SUPERFICIE 25.00HA \*\* EFFICIENCIA. 1 \*\*\* 1 CULTIVOS \*\* RFUI00.MM \*\*\*  
 PRECIPITATION 588. \*\* EVAPOTRANSPIRATION 2206.MM/ANO \*\*\*

\*\*\* R E S U L T A D O S \*\*\*

VALORES CARACTERISTICOS	MAXIMA	0.100	0.500	0.500	0.667	0.900	MINIMA	MEDIA
CHUVAS	1357.6	1056.1	789.8	638.4	533.2	371.5	164.9	634.3
VOLUME ESCOLADO	4737726.0	2745353.0	1033073.4	732731.5	544110.4	44320.5	0.0	1046008.0
VEL. EVAPORACION NO ACUJE	349306.5	252714.2	246740.7	228644.4	192443.6	59178.7	10513.1	206208.1
VOLUME SANGRIA	4522031.0	2445561.0	751866.7	427307.1	241000.9	0.0	0.0	342350.6
VOLUME EVAPORACION INSPIRACION	525735.7	257391.8	195531.7	161445.7	126324.2	0.0	0.0	143638.2
VEL. PERDIDA AL PERIM	124852.2	116336.2	75309.7	51440.5	40316.7	0.0	0.0	59909.3
VOLUME DE IRRIGACION	243557.5	153457.2	141070.2	150921.3	107231.6	0.0	0.0	112076.5
DEFICIT ABAST. POPULACION	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DEFICIT ABAST. DO SACO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CHEIAS MAXIMAS	*****	*****	*****	*****	*****	*****	0.0	47212.4
SJP. PLANT. MEDIA CULT 1	19.3	14.9	12.2	10.5	8.1	0.0	0.0	9.5
SJP. QUE MORREU CULT.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
RENDIMENTO DO CULTIVO 1	0.6	0.4	0.4	0.4	0.4	0.0	0.0	0.5
PRODUCAO DO CULTIVO 1	17771.4	13667.5	110249.9	95090.4	78500.0	0.0	0.0	35227.7
SPPI#1,1E	0.3	14.9	11.9	10.4	8.1	0.0	0.0	9.4
SPPI#1,2E	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
SPPI#1,3E	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
SPLANT	0.0	0.0	15.4	21.7	19.0	0.0	0.0	29.2
VOLUME DO ACUJE	17771.4	14773.6	124246.1	112094.2	77913.5	17926.0	911.0	101375.7
SUPERFICIE DO ACUJE	1357.6	113712.0	93300.7	69371.7	77111.0	1477.5	5947.5	31137.3
CH. NO AC.	23121.2	133773.9	92137.6	65949.1	42000.7	11474.2	2320.9	72059.7
IH	0.0	312.2	233.8	203.2	168.0	709.7	42.6	203.7

## VII - LIMITATIONS ET PROLONGEMENTS

Il est clair que ce modèle, comme tout autre modèle, ne prétend pas prendre en compte tous les aspects de la réalité ou des problèmes inhérents à l'utilisation d'une ressource en eau. Tous les problèmes sociaux (structure foncière, disponibilité de la main d'oeuvre, accès au crédit rural et les problèmes d'organisation (stabilité des prix, écoulement des productions, disponibilité des intrants de production...), qui sont un aspect essentiel de la réussite du développement agricole, ne sont pas directement pris en considération. Il en va de même de certaines contraintes agronomiques (qualité de l'eau et sa linisation, épuisement des sols...) ainsi que des problèmes phytosanitaires.

Ces constatations nous amènent à envisager plusieurs extensions de notre étude:

### Problèmes de salinisation

La manière la plus triviale de considérer ces problèmes consiste à majorer la demande en eau pour inclure ainsi des lavages de sol périodiques.

On pourra aussi se référer à Leprun (1983) qui a mené une étude sur la qualité moyenne des eaux selon les conditions géologiques et pédologiques des bassins. Ceci nous fournit un indicateur des risques de salinisation avant toute étude chimique.

En second lieu il serait possible d'adapter un modèle calé en Tunisie (Rieu, 1981) et déjà présenté à l'équipe de l'université de Campina Grande, qui détermine les risques et les taux de salinité en fonction des caractéristiques du sol et de l'eau et de tous les flux hydriques.

### Système d'irrigation et bilan économique

Il serait très simple d'associer un module d'analyse économique qui ferait un bilan entre les coûts (intrants, main d'oeuvre supplémentaire éventuelle, système d'irrigation...) et les recettes de production.

Les différents systèmes d'irrigation, de coûts et d'efficience divers, pourraient être testés à priori. L'option la plus économique con

siste, quand cela est possible, à irriguer la zone directement en aval de la retenue; on peut alors utiliser un système gravitaire peu onéreux avec, par exemple, l'aide de siphons. Cette zone basse est très souvent sensible aux problèmes de salinité et des techniques simples de drainage sont indispensables. On peut aussi imaginer conduire cette eau vers des terrains plus favorables comme cela se pratique couramment en Asie à l'aide de petits canaux rudimentaires.

En ce qui concerne des systèmes sous-pression, la disponibilité de l'énergie électrique sera la critère essentiel: on considère généralement que pour les petits projets individuels une distance de plus de 500 mètres par rapport au réseau de distribution est rédhibitoire.

#### Gestion de nappe

Il ressort de la structure logique du programme qu'il est possible de substituer l'açude par une autre source d'eau. L'idée la plus séduisante serait d'adapter un modèle de nappe phréatique qui permettrait de déterminer les potentialités des zones alluviales. Ceci à l'heure où ces ressources sont exploitées de manière discoordonnée.

#### Géométrie des açudes

Des études plus approfondies devront relier les caractéristiques des açudes à des paramètres topographiques plus adéquats.

#### Usage multiple

Il est très simple de considérer une utilisation multiple de l'açude en otant du bilan journalier des besoins en eau éventuels concernant un autre usage: on peut ainsi considérer un açude de moyenne importance utilisé pour l'approvisionnement en eau d'une petite ville. Au niveau individuel, dans le cas des petits açudes, on pourra déduire les besoins en eau - souvent négligeables - résultant d'un usage domestique. - on utilisera alors les normes suivantes:

.Consomateur	rural	25 l/jour
	urbain	200 l/jour
Cheval		35 l/jour
Vache laitière		45 l/jour

Vache + entretien étable	100 l/jour
Ovins	8 l/jour
Porcs	15 l/jour

#### Açudes emboîtés

On constate très souvent que l'on a plusieurs açudes "emboîtés" sur un même bassin hydrologique. Pour chacun de ces açudes successifs il convient alors de définir son aire de drainage propre et les apports éventuels des autres açudes (volumes provenant des déversoirs). Une adaptation du modèle est nécessaire.

#### Repos de la terre

Une contrainte est introduite interdisant la re-plantation d'une parcelle qui vient d'être cultivée dans un délai arbitrairement fixé à un mois. Ceci donne plus de flexibilité à l'exécution des travaux culturaux. On peut envisager des périodes plus longues, correspondant à un repos de la terre.

#### Sécheresse verte

Le problème de la sécheresse verte, évoqué en introduction, peut être représenté par un indice correspondant à un nombre de jours d'anaérobiose. Au delà d'un certain stade, variable selon la culture, la mort de celle-ci sera décrétée.

Beaucoup d'améliorations possibles ont été évoquées tout au long du chapitre V. Notons enfin que la modélisation d'une culture de vazante n'a pas été envisagée mais qu'elle est tout à fait possible.

## CONCLUSION

Peut-être convient-il, en conclusion, de revenir sur deux points qui ont été évoqués à plusieurs reprises et qui, bien que parfois sous-jacents, ont déterminé la structure de ce travail.

Les potentialités hydro-agricoles d'un açude sont, comme il a pu l'apparaître, dépendantes d'un grand nombre de paramètres caractéristiques mais, surtout, de la manière dont on a choisie d'utiliser l'açude dans le temps et des contraintes éventuellement imposées. Associer une surface irrigable à un réservoir de volume donné ne saurait être plus qu'une approximation grossière.

En second lieu, c'est la grande irrégularité climatique du Nordeste qui constitue le problème fondamental de toute tentative de prévision et de dimensionnement. On a vu que l'utilisation des moyennes représentait une illusion entachée à l'occasion d'erreurs considérables. C'est ce qui a conduit en définitive à l'élaboration d'un modèle complexe, fonctionnant à un pas de temps journalier et débouchant sur des résultats statistiques.

Faire plus simple conduit au Modèle I, qui néglige les apports sur une période commençant avec la saison sèche, ou au Modèle II, fondé sur une approche hydrologique par quantile, d'ailleurs ajustée à l'aide du Modèle III.

Ces modèles constituent des outils prêts à être utilisés mais susceptibles de grandes améliorations. C'est le cas du dernier d'entre eux dont les potentialités multiformes demandent un travail plus approfondi.

Leur application concrète sur le terrain doit permettre de les caler, de les affiner et de déboucher sur des manuels d'utilisation pratiques et simples.

Eventuellement adaptés aux puits et à la gestion des nappes phréatiques, comme elles l'ont été pour les açudes, ces méthodes pourraient être la base du développement de l'irrigation individuelle, pris en charge par les Etats et contrepartie nécessaire des périmètres d'irrigation collectifs.

A N N E X E S

49. PRIESTLY, C.H.B., and R. J. TAYLOR 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporating using large-scale parameters Man. wea. ref. 100 81-82
50. PROVÁRZEAS NACIONAL - Informação técnica nº 2. 200 p. 1981
51. RIBEIRO, R. T. Manejo de água no Nordeste Semi-Árido IV Sim<sup>o</sup> pó<sup>o</sup>sio brasileiro de hidrologia e recursos hídricos 1981 - 29 pág.
52. RIEU, M (1983), Simulation des flux hydriques et prédiction de la salinité des sols, ORSTOM, Paris.
53. RITCHIE J.T. Model for predicting evaporation from a tow crop with incomplete cover. Water resources research vol.S., no 5 1972. p.1204.
54. SERETE. Projeto Sertanejo - Volume C-1 - Hidrologia - junho - 1980.
55. SOLASSIER BERNARDO. A Computerized model to predict supplemental irrigation in tropical and subtropical climate( Utha state univ. 1975).
56. SUDENE/MINTER. Nordeste em Dados- 1984.
57. SUDENE/MINTER. Projeto Nordeste. Utilização de recursos hídricos (1983).
58. SUDENE/MINTER . Uso atual e potencial dos solos do Nordeste . Vol. 6 - 1984. 134 p.
59. SUDENE- Plano de Aproveitamento integrado dos recursos hídricos do Nordeste do Brasil - Fase I - 1980. 13 volumes.

60. TISDALL, A. L. Chemical control of Evaporation in Australia.  
Journal of soil and water conservation USA 1959.
  
61. UNIVERSIDADE DE CAMPINA GRANDE . Estudo da disponibilidade de  
água nos pequenos açudes et aluviões para aplicação em  
irrigação. (outubro 1982).

## BIBLIOGRAFIA

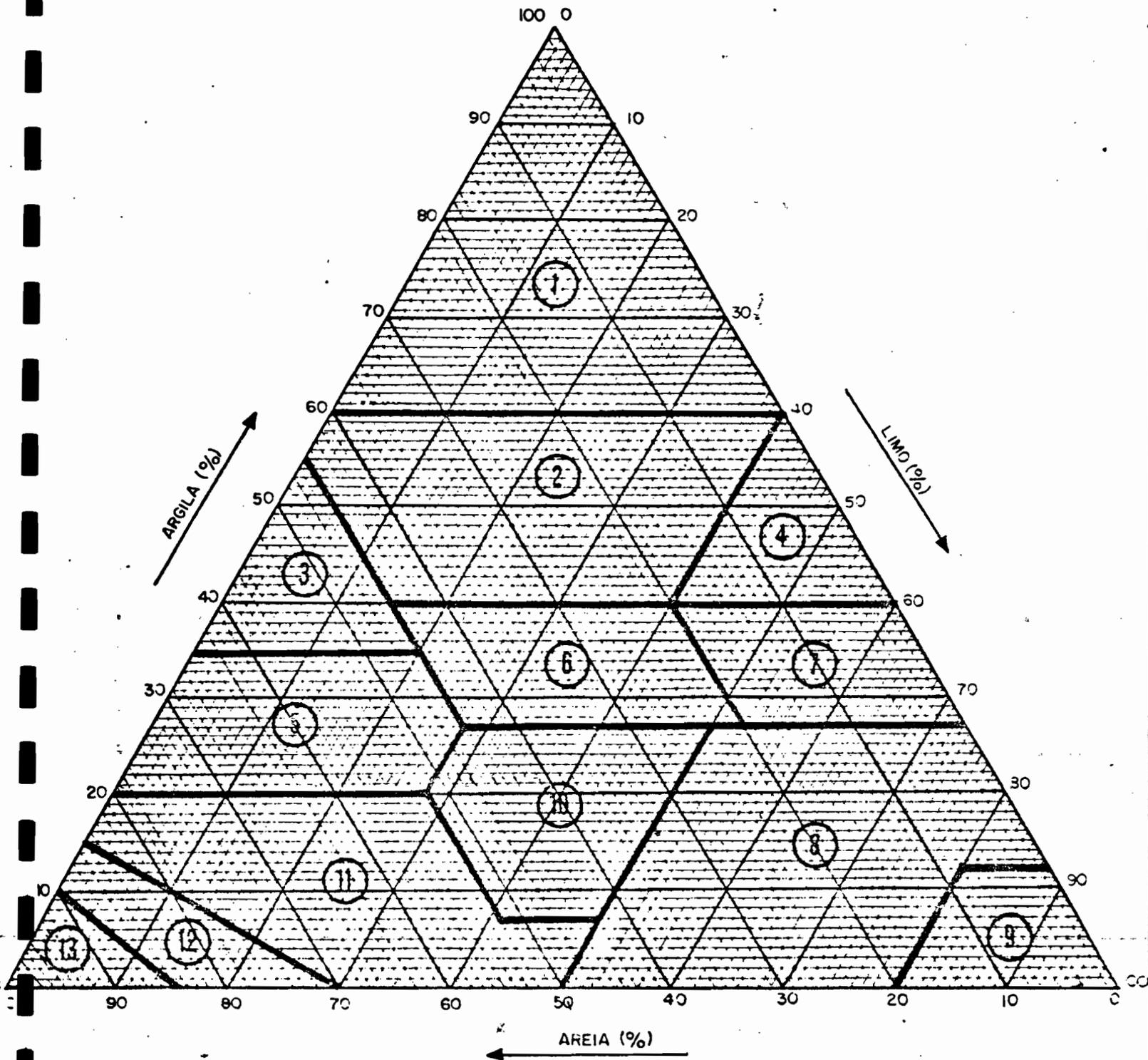
1. ABREU TÂNIA A. DOS SANTOS et AL. Análise da produção de cebola sob diferentes regimes de irrigação (abr. 1980).
2. AUDRY, P., e SILVA, Z.A. (1981). "Modelo agro-pedo-climatológico e avaliação frequencial das potencialidades agrícolas em regiões secas". Anais da Sociedade brasileira de agrometeorologia segundo C.B. AM, julho, páginas 21-24,
3. AZEVEDO H.M.DE . Projeto Agronômico SDR Recife - 1984/48 p.
4. BAKER ALBERTO . Irrigação e drenagem - Volume III-543 p.
5. BEZERRA DE OLIVEIRA LUIZ E ELIANE NOQUEIRA DE QUEIROZ- Curvas características de retenção de umidade de solos do Nordeste brasileiro - Pesq. Agropec.Bras.Serv.Agron.10/69-75. (1975).
6. BRADY N.C. Natureza e propriedade dos solos.B.V. Freitas Bastos 1983. 647 p.
7. CADIER,E. et CAMPELLO S. Avaliação dos recursos hídricos de pequenas bacias do Nordeste. Semi-Árido (17 pág.)
8. CADIER,E. (1984) Avaliação dos escoamentos nas pequenas bacias do semi-árido, SUDENE-DRN, 75 páginas (Brasil. SUDENE, Hidrologia 21). Convênio SUDENE/ORSTOM,Recife.
9. CADIER,E., FREITAS, B.J. e LEPRUN, J.C.(1983), Bacia Experimental de Sumé, SUDENE-DRN, 87 páginas,(Brasil-SUDENE,Hidrologia,16). Convênio SUDENE/ORSTOM,Recife.
10. CAMPELLO,S. Modélisation de l'écoulement sur des petits cours d'eau du Nordeste (Thèse de docteur ingénieur-1979 Paris - 120 pages).

11. CHOUDHURY, E.N, MILLAR, A.A.-Características de retenção e movimento de água de dois oxisolos irrigados. 17º Congresso Brasileiro de Ciência do solo (Manaus 1979-29p.)
12. CHOUDHURY, E.N.,MILLAR, A.A.- Efeito do deficit fenológico de água sobre a produção e características industriais do tomate.(IV Congresso de irrigação e drenagem 1978 16 p).
13. COELHO, J. As secas e as industriais das secas.
14. COMPESA. Plano Diretor de recursos hídricos da região metropolitana do Recife-Volume II - Texto e anexo I 1982.
15. DA SILVA, MARIA JOSÉ. Estudo do período crítico do algodoeiro a deficiência hídrica (14 p).
16. DAVIES, J.A. and C.D. ALLEN. Equilibrium, potential and actual evaporation from cropped surfaces in southern ontario. S. appl. meteorol, 1973. 12,14
17. DOOREMBOS et PRUITT. Besoin en eau des cultures. FAO irrigation et drainage nº 24. 1975.
18. DOOREMBOS, J.e KASSAM, A.A (1980)."Reponse des rendements à l'eau, Bulletin FAO d'irrigation et de drainage,33, FAO , Roma, 230 p.
19. DOS SANTOS ABREU T.A., MILLAR,A.A., E.N e M.M. CHOUDHURY. Análise da produção de cebola sob diferentes regimes de irrigação. 1980. 4 p.
- 19A. EAGLEMAN, R., An Experimentally derived model for actual evapotranspiration, Agric-meteorol. 8(4-5) páginas 385.
20. EMBRAPA-Boletim de pesquisa nº 4.Pesquisa em irrigação no trópico semi-árido. Solo, água, planta.(1981-85 p).
21. EMBRAPA-Circular técnica nº 3. Seleção de áreas e construção de barreiros para uso de irrigações de salvação no trópico semi-árido (1981-43p).

- 22 . FEDDES , KOWALIK P.J. et H. ZARADNY. Simulation of field water use and crop yield. Wageningen-Centre for Agricultura Publishing and Documentation 1978 (189 p).
23. FLEMIN P.M.A. water budgeting method to predict plant response and irrigation requirements for sidely varying evaporation canditon. Congres international de genie rural II - p.66 76 1964.
24. FRANQUIN, P. Les analyses fréquentielles du déficit hydrique des pluies pour l'irrigation de complément, Agronomie Tropicale , vol. 28(9) , pages 853
25. GARAIA CARLOS. "O que é Nordeste Brasileiro". Editora Brasileira 94 p. 1984
26. GARDNER and HILLEL. The relation of external evaporation conditions to the drying of soils. T. Geophys res.67, 4319 - 4325, 1962.
27. GASPARY e REBOUÇAS. "Les eaux souterraines et le problème de l'eau dans le Nordeste":
28. GOVERNO DO ESTADO DA PARAÍBA - Dossiê sobre a operacionalização do PRO PSI- Programa de pequenos sistemas de irrigação da MRH.89. Catolé do Rocha
29. HANKS R.J. Model for predicting plant yield as influenced by water use. Agronomy jornal, Vol. 66. sept. oct.1974
30. HARGREAVES, G. (1974). Precipitation dependability and potentials for agricultural production in Northeast Brazil , Utha University Logan Utah. 122 p.

31. HARGREAVES G. H. Manual de requerimento de água para culturas irrigadas e agricultura seca. Trad. Ricardo Brito. togar. Utha State University 1975. 41 p.
32. HARGREAVES G. H. e J.E. CHRISTIANSEN. Production as a function of moisture availability (1973).
33. HILLEL D. The field water balance and use efficiency- N Y.A C press. 1971.
34. LEINBOCK A. Evaporação dos espelhos d'água na bacia do Rio Acarau - Ceará- 57 p. Agosto 1971.
- 34/A- LEMON E. R., D. W. STEWART , R.W. SHAWCROFT and S.E. JENSEN- Experiments in predicting evapotranspiration with a soil - plant atmosphere model (SPAM) 1971
35. LEPRUN, J.C. (1983). Relatório de fim de Convênio de manejo e conservação do solo do Nordeste brasileiro(1982-83), 290 p Convênio SUDENE/ORSTOM, Recife.
36. MAGALHÃES A.A., MILLAR. A.A. , E.N. CHOUDHURY- Efeito do deficit fenológico de água sobre a produção de feijão(1978).
37. MAKKINK G.F. and DHY YAR HEEMST - The actual evapotranspiration as a function of the ETM and soil moisture tension. T.Agric. Sci. 4(4). 67-72-1956
38. MANFREDO LÁSSIO DE AGUIAR BORGES - Disponibilidade hídrica para irrigação dos principais açudes do Nordeste Brasileiro. III Seminário Nacional de Irrigação e Drenagem. Anais Volume IV p.170-185
39. MARINATO ROQUE. Estimativa da ETP do algodão herbáceo com base a formulas empíricas. Proj. algodão. relat.78/79.

40. MILLAR A.A., CHOUDHURY E.N., T.A. DOS SANTOS ABREU- Determinação da evapotranspiração em tomate industrial através do balanço completo de água sob diferentes regimes de irrigação (set. 1978 20p).
41. MINISTÈRE DE AL COOPERTION FRANÇAISE - Evaluation de quantités d'eau , nécessaires aux irrigations..
42. MOLINIER M. CADIER E. e GUSMÃO A. As secas do Nordeste - 1985 14 p.
43. MONTEIRO DA SILVA RAIMUNDO . Estudo da irrigação do algodão submetido a diferentes esforços de umidade do solo. V.Congresso nacional de irrigação e drenagem. Vol. 2 p.411-427.
- 43.A/NILSON A VILLA NOVA et AL. Considerações sobre o método da transferência da massa estimativa da evaporação. III Seminário Nacional de Irrigação e Drenagem. ANAIS volume IV
44. NIMAH M.N. et HAINKS R. J. Model for estimating soil water , plant, and atmospheric interrelations. I et II Soil Amer plant, Vol. 37. 1973. p-522-527 and p. 528-532
45. NOUVELOT et Al. Bacia Representativa do Riacho do Navio.Relatório Final - DRN- Série Hidrologia nº 6. 193 p.
46. NOUVELOT J.F. Planificação da implantação de bacias representativas (SUDENE/ORSTOM) 1974-91 pág. 6 cartes.
47. PIAGET R. Ressources en EAU du Nord. Est du Brasil - FAO-Recife 1964/184 p.
48. PINHEIRO DM et AL. Efeito da irrigação no feijão macaçar(p.393-402). Efeito da irrigação no milho (p. 403-410).V.Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem.



- 1 MUITO ARGILOSA
- 2 ARGILOSA
- 3 ARGILO ARENOSA
- 4 ARGILO-LIMOSA
- 5 FRANCO-ARGILO-ARENOSA
- 6 FRANCO-ARGILOSA
- 7 FRANCO-ARGILO-LIMOSA

- 8 FRANCO LIMOSA
- 9 LIMOSA
- 10 FRANCA
- 11 FRANCO-ARENOSA
- 12 AREIA-FRANCA
- 13 ARENOSA

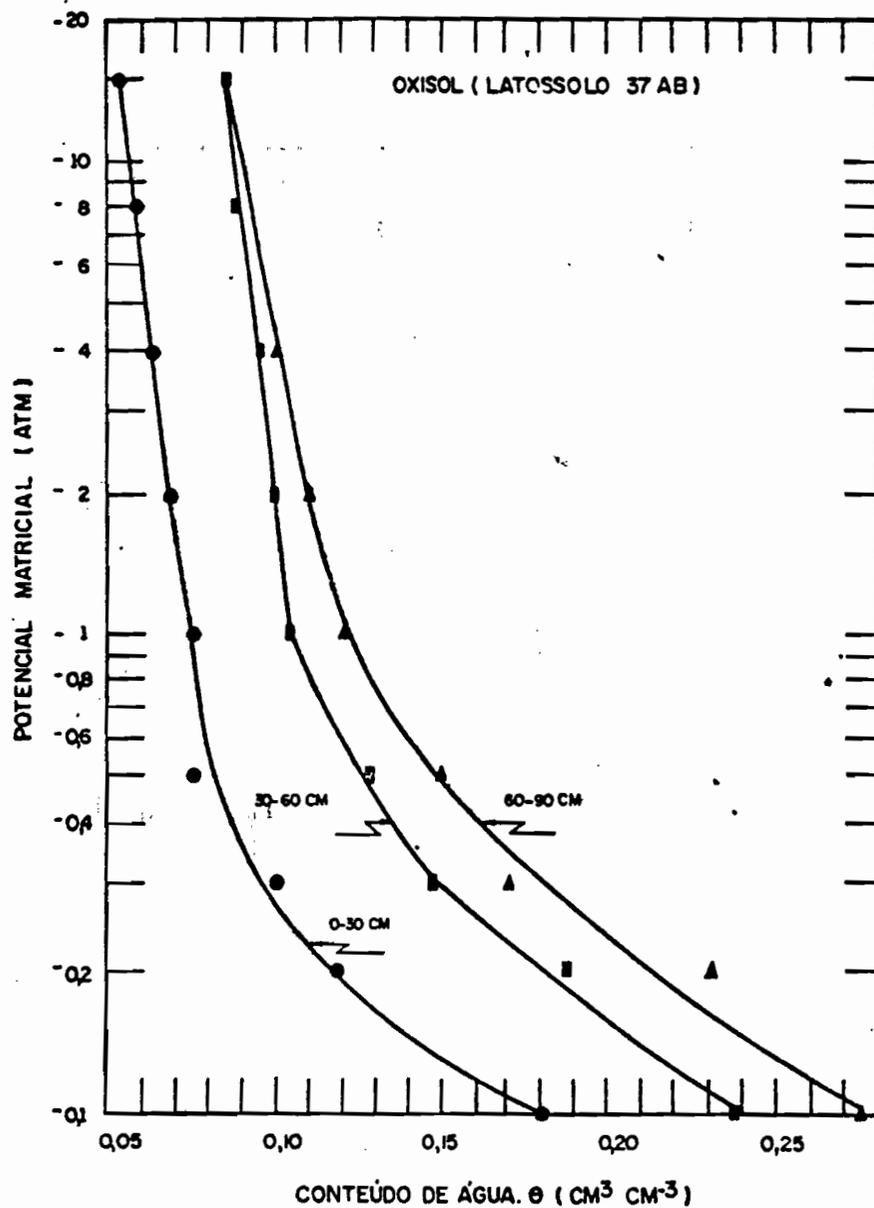


Fig 2 Curva de retenção de água do solo da Unidade 37 AB

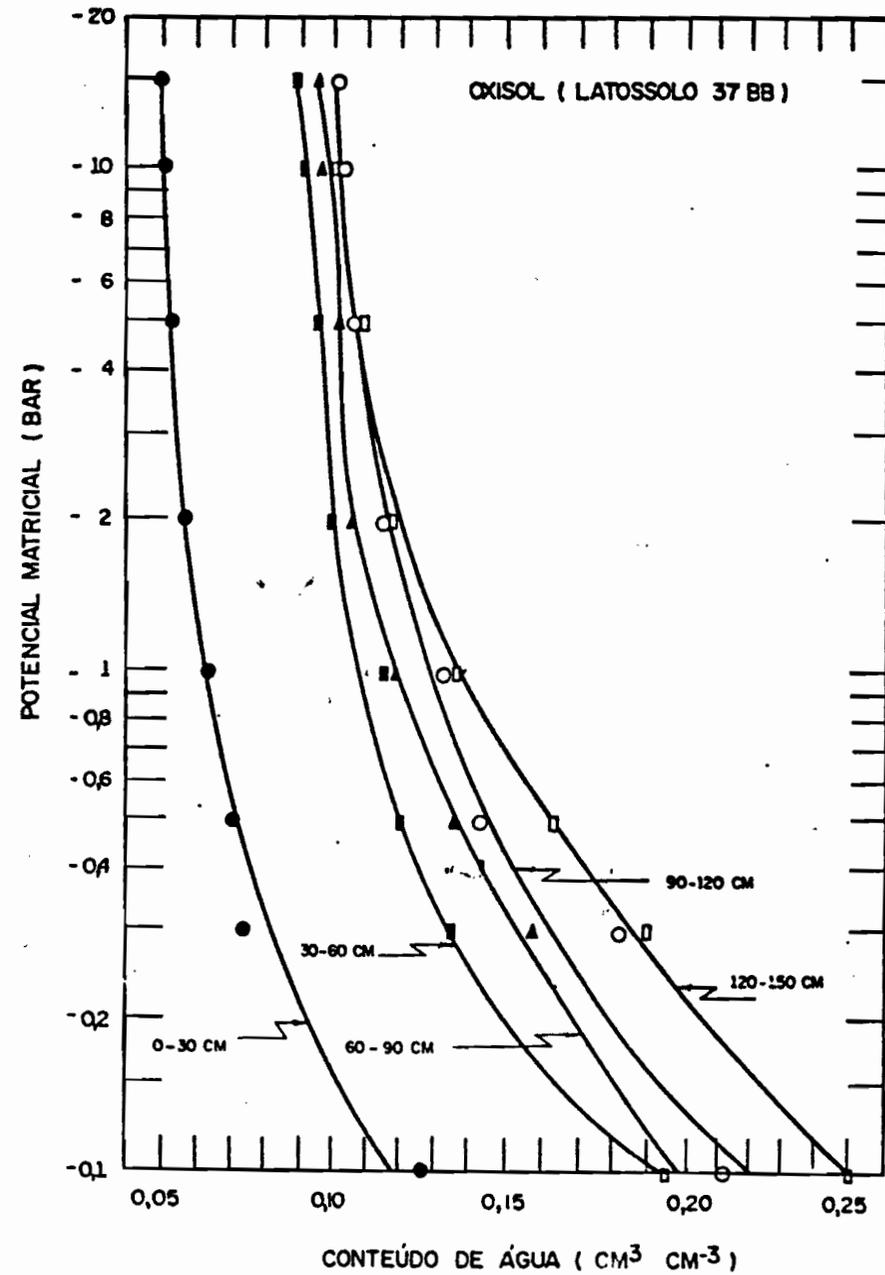
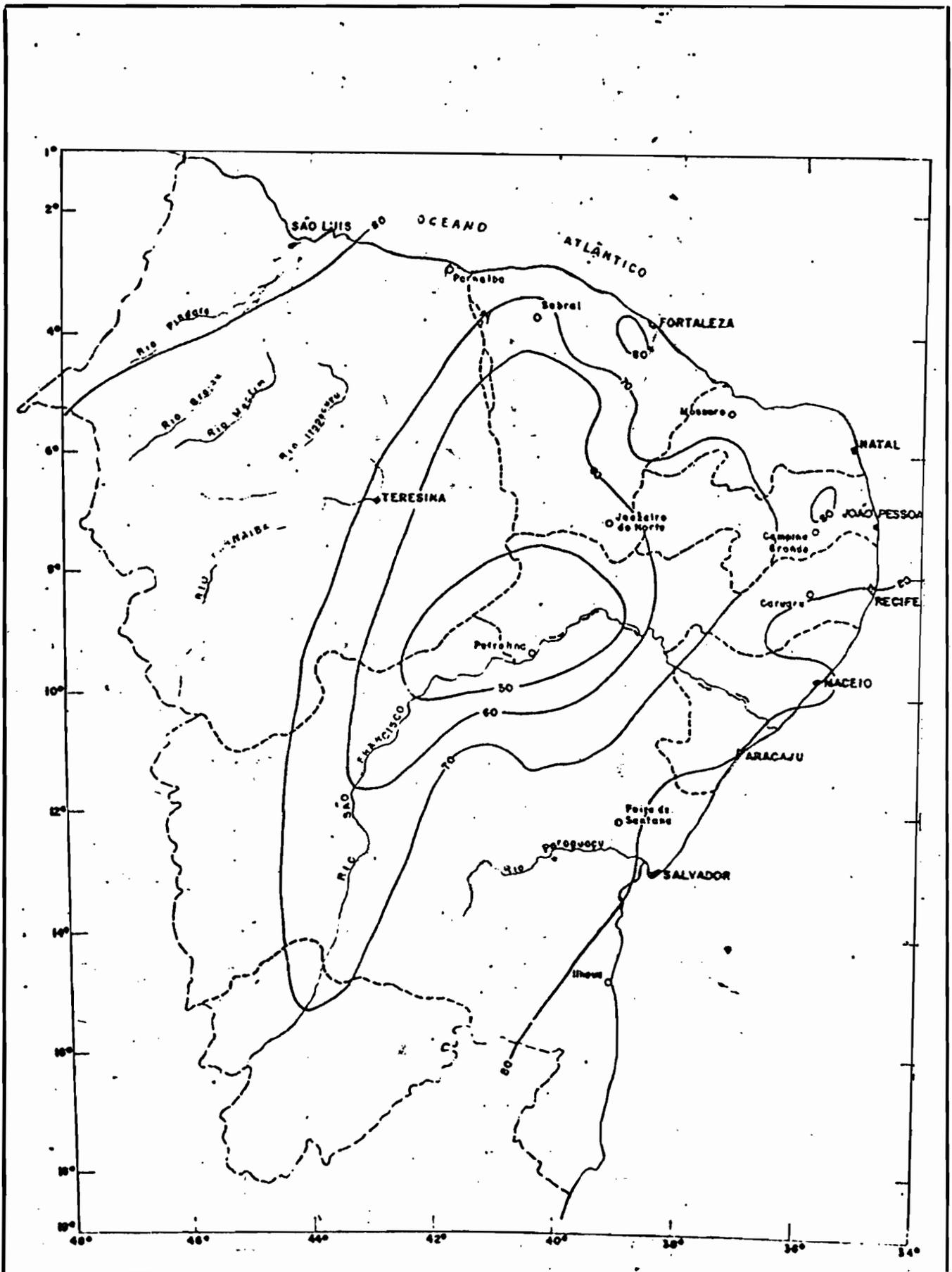


Fig 3 Curva de retenção de água do solo da Unidade 37 BB



MOYENNE ANNUELLE DES HUMIDITES

## BIBLIOGRAFIA

1. ABREU TÂNIA A. DOS SANTOS et AL. Análise da produção de cebola sob diferentes regimes de irrigação (abr. 1980).
2. AUDRY, P., e SILVA, Z.A. (1981). "Modelo agro-pedo-climatológico e avaliação frequencial das potencialidades agrícolas em regiões secas". Anais da Sociedade brasileira de agrometeorologia segundo C.B. AM, julho, páginas 21-24,
3. AZEVEDO H.M.DE. Projeto Agronômico SDR Recife - 1984/48 p.
4. BAKER ALBERTO. Irrigação e drenagem - Volume III-543 p.
5. BEZERRA DE OLIVEIRA LUIZ E ELIANE NOQUEIRA DE QUEIROZ- Curvas características de retenção de umidade de solos do Nordeste brasileiro - Pesq. Agropec.Bras.Serv.Agron.10/69-75. (1975).
6. BRADY N.C. Natureza e propriedade dos solos. B.V. Freitas Bastos 1983. 647 p.
7. CADIÉ, E. et CAMPELLO S. Avaliação dos recursos hídricos de pequenas bacias do Nordeste. Semi-Árido (17 pág.)
8. CADIÉ, E. (1984) Avaliação dos escoamentos nas pequenas bacias do semi-árido, SUDENE-DRN, 75 páginas (Brasil. SUDENE, Hidrologia 21). Convênio SUDENE/ORSTOM, Recife.
9. CADIÉ, E., FREITAS, B.J. e LEPRUN, J.C. (1983), Bacia Experimental de Sumé, SUDENE-DRN, 87 páginas, (Brasil-SUDENE, Hidrologia, 16). Convênio SUDENE/ORSTOM, Recife.
10. CAMPELLO, S. Modélisation de l'écoulement sur des petits cours d'eau du Nordeste (Thèse de docteur ingénieur-1979 Paris - 120 pages).

## AÇUDES EXISTANT DANS LA MICROREGION DE CATOLÉ DO ROCHA

1979

MUNICIPALITE	AÇUDE Nº	VOLUME M <sup>3</sup>	
		≤ 100.000	> 100.000
- Belém do Brejo do Cruz	203	71	132
- Brejo do Cruz	217	115	102
- Bom Sucesso	8	1	7
- Brejo dos Santos	29	14	10
- Catolé do Rocha	262	163	99
- Jericó	36	10	26
- Riacho dos Cavalos	120	44	76
- São Bento	82	46	36
TOTAL	952	464	488

FONTE: Pequena Irrigação a Nivel de Propriedade, 1977.