## DIMENSIONNEMENT DE PETITS BARRAGES DANS LE NORDESTE BRESILIEN SEMI-ARIDE

Par

- E. CADIER
- F. MOLLE
- C. HENRIQUE CA VALCANTI DE ALBUQUERQUE
- F.R. DOHERTY
- M. MONTGAILLARD

#### DIMENSIONNEMENT DE PETITS BARRAGES DANS LE NORDESTE BRESILIEN SEMI-ARIDE

Par

Eric Cadier<sup>1</sup>, François Molle<sup>2</sup>, Carlos Henrique Cavalcanti de Albuquerque<sup>3</sup>, Frederico Roberto Doherty<sup>4</sup> et Marc Montgaillard<sup>1</sup>

RESUME -- Utilisant la méthode de classification hydrologique de petits bassins versants proposée par l'équipe de la SUDENE et de l'ORSTOM, et avec l'aide du modèle de simulation POMAC, les auteurs présentent une méthode de dimensionnement de petites retenues collinaires en fonction des caractéristiques physico-climatiques du bassin d'alimentation, du type d'utilisation prévue et du risque de défaillance tolérable. L'optimum du dimensionnement varie beaucoup en fonction de la finalité de l'ouvrage et du critère choisi. Pour un module de 1.000.000m<sup>3</sup>, l'une des solutions recommandée est la construction d'un réservoir de 300.000m<sup>3</sup> et l'implantation d'un périmètre de 10ha. Cette méthode sera utilisée dans un manuel de construction de petits barrages.

<sup>1</sup>Chercheur - SUDENE/ORSTOM 2Ingénieur - SUDENE/Coopération Française 3Analyste - SUDENE/CISAGRO 4Ingénieur - SUDENE/CISAGRO

#### DIMENSIONAMENTO DE PEQUENOS RESERVATARIOS SUPERFICIAIS DO NORDESTE SEMI-ARIDO

RESUMO - Utilizando o método de classificação hidrológica das pequenas bacias hidrográficas proposto pela équipe da SUDENE et do ORSTOM, com ajuda do Modelo de Simulação de Operação dos Pequenos Açudes - POMAC, os autores apresentam um método de dimensionamento para um pequeno reservatório, em função das suas características fisiográficas, do tipo de utilização previsto e do risco assumido do não fornecimento de água. Esta metodologia será utilizada para a redação de um manual de construção de pequenas barragens a ser elaborado pelo PRONI com a assessoria do BUREAU of RECLAMATION (USA).

### SIZE OPTIMIZATION OF SMALL DAMS IN THE NORTH EASTBRAZILIAN SEMI-ARID AREA

SUMARY -- Using a hydrological classification method of the small catchement basins put forward by SUDENE and ORSTOM's teams and the simulation model of the small dams management (POMAC), the authors present a dimensions optimization method for one small dam according to its: - physical characteristics - the kind of expected use - the accepted failure of the water supply. Then, they show the elaboration's details of the local dimensions optimization and management norms according to available datas and maps. Those norms will be used by PRONI and the BUREAU of RECLAMATION (USA) for the redaction of handbook of small dams building.

#### 1. INFORMATIONS NECESSAIRES.

#### 1.1 Cas général.

Le dimensionnement d'un barrage est une opération complexe qui s'effectue en fonction de trois principaux types d'information:

- a) Des informations sur la finalité de l'aménagement et le niveau de risque que l'on peut accepter ; ceci peut être ,par exemple, la protection d'une région contre les crues, la régularisation des débits d'étiage pour la navigation ou encore l'alimentation en eau d'une ville ou d'un périmètre d'irrigation .
- b) Des informations sur les ressources disponibles sur le site du barrage: hydrologie, climatologie, topographie, pédologie, population etc.
- c) Des informations sur l'impact écologique, économique et social de l'ouvrage projeté qui seront utilisées pour l'optimisation du dimensionnement et de la gestion du réservoir.

#### 1.2 Petits barrages destinés à l'irrigation.

Dans le cas particulier du dimensionnement de petits barrages destinés à l'irrigation dans les zones sèches, nous aurons plus précisément besoin d'évaluer :

- a) La quantité d'eau disponible: variations saisonnières et interannuelles des écoulements, crues, pluies, évaporations et autres paramètres climatiques.
- b) Les caractéristiques physiques et surtout topographiques du site du barrage qui permettront le calcul du volume maximum possible de la retenue, de la relation entre le volume d'eau stockée et le coût de l'ouvrage ainsi que de la surface maximum irrigable par gravité et/ou par pompage.
- c) Les scénarios possibles d'utilisation et les caractéristiques techniques et économiques de l'aménagement prévu qui sont fonction de la main d'oeuvre agricole disponible, du volume d'eau qu'il faudra réserver pour l'alimentation humaine et animale, du niveau de risque de défaillance que l'on peut accepter, du type et du coût de construction du barrage (terre,béton etc), du système d'irrigation (aspersion, goutte-à-goutte), du capital disponible etc..
- d) D'autres aspects, souvent plus difficilement quantifiables, tels que les impacts sociaux, économiques et l'incidence de l'ouvrage sur le milieu naturel; citons, par exemple, la modification des régimes hydrologiques ou la salinisation de la retenue et du périmètre d'irrigation.

Chacun de ces éléments peut être un éventuel facteur limitant. Ainsi , la dimension de l'aménagement est automatiquement limitée par la topographie du site , par la main d'oeuvre ou par le capital disponible.

Quand il n'y a pas, à priori, de limite claire à la taille de l'ouvrage, nous devrons nous appuyer sur un ou plusieurs critères d'optimisation pour dimensionner l'ouvrage et définir sa gestion.

Dans les exemples présentés, nous supposerons que la disponibilité des ressources en eau constitue le seul facteur limitant, ce qui veut dire que l'on peut implanter un açude ou un périmètre aussi grand que l'on veut. Nous montrerons donc comment effectuer le dimensionnement en nous basant sur des critères de rendement hydraulique et/ou économique du système.

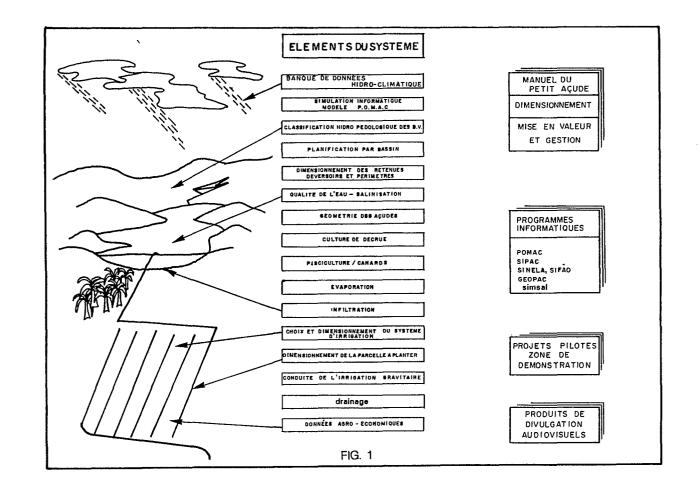
#### 1.3. Principaux facteurs incidents

La figure 1<sup>(1)</sup> présente les principaux facteurs à prendre en compte pour comprendre (et donc modéliser, gérer et dimensionner rationnellement) le fonctionnement du système Bassin versant + Açude<sup>(2)</sup> + Périmètre irrigué (et autres usages). Certains de ces facteurs correspondent directement à des caractéristiques physiques du système étudié (pluviométrie, géométrie des réservoirs, évaporation etc.), tandis que d'autres sont des critères calculés à partir d'hypothèses contenant une part d'arbitraire, comme la rentabilité économique ou le rendement hydraulique du système.

Ne pouvant analyser ici, de manière exhaustive, tous ces facteurs, nous nous limiterons, à titre d'exemple, à quelques considérations sur les facteurs suivants: la caractérisation hydrologique des bassins versants d'alimentation, la géométrie des réservoirs, le rôle de l'évaporation, de l'infiltration, et des problèmes liés à la qualité de l'eau.

<sup>(1)</sup>Dans la partie droite de la figure 1, nous avons résumé les principaux objectifs du Programme de mise en valeur des petites retenues collinaires du NORDESTE Brésilien, dans le cadre duquel s'inscrit ce travail.

<sup>(2)</sup>Les barrages de toutes tailles ainsi que leurs retenues sont appelés Açudes dans le NORDESTE Brésilien.



#### 1.3.1. Caractérisation hydrologique du bassin versant d'alimentation.

Il importe d'évaluer tout d'abord les ressources en eau disponibles.

L'évaluation des ressources pluviométriques et des autres caractéristiques climatiques ne présentent pas de difficulté particulière et peut être réalisée à l'aide d'une carte d'isoyètes et d'un annuaire climatologique.
L'évaluation des ressources en eau existantes dans le réseau hydrographique, sans

lesquelles le réservoir ne peut être rempli, est plus complexe.

Compte tenu de l'impossibilité économique de réaliser une étude hydrologique classique pour ce type de petit aménagement, nous avons été amenés à mettre au point, à partir de toute l'information existante, une méthode de classification hydrologique des petits bassins.

Cette méthode est basée sur un classement hydropédologique des unités de sols qui composent le bassin. Ce classement est spécifique pour cette partie du Brésil. Les valeurs des lames annuelles écoulées ont été calculées à l'aide des résultats obtenus sur un réseau de près de 40 petits bassins versants élémentaires et ensuite comparées aux écoulements observés sur les stations du réseau hydrométrique général. Des corrections doivent être ensuite être appliquées en fonction de la pluviométrie, de la couverture végétale, de la densité de réservoirs existants et d'autres facteurs correctifs.

A titre d'exemple, la lame écoulée annuelle du groupe de sol le plus fréquent (55% de la surface) est de 37 mm, sous l'isoyète de 600mm, mais les écoulements peuvent varier entre 0 et 125mm, selon la classe de sol. La correction pluviométrique conduit à multiplier les écoulements par 1,4 pour chaque 100mm de pluie supplémentaire.

Une deuxième partie de cette méthode permet le calcul, indispensable pour le dimensionnement des déversoirs, des volumes écoulés et des débits de pointe des crues.

#### 1,3.2. Géométrie des réservoirs.

La relation entre la profondeur (H), la superficie (S) et le volume (V) varie beaucoup avec la topographie et la géométrie naturelle du site du barrage. Nous avons choisi de la représenter par une fonction puissance de la forme  $V = K.H\alpha$  ( qui fournit, en dérivant:  $S = \alpha.K.H^{\alpha-1}$ ). Les ajustements de cette formule fournissent, en général, d'excellents résultats, moyennant quelques précautions quant à la détermination de K et de  $\alpha$ , couple de paramètres géométriques caractéristiques de l'açude. Ce couple (K,  $\alpha$ ) est déterminé à partir de relevés topographiques en ajustant une regression sur les couples (Log(H<sub>1</sub>), log(V<sub>1</sub>)), chaque point étant pondéré par V<sub>1</sub>. En général, on obtient de bons résultats, avec des écarts moyens de l'ordre de 1% après avoir éliminé les "points bas", c'est à dire les volumes inférieurs à 15% du volume maximum; cette partie de l'açude correspond souvent à un volume mort; on y observe fréquemment des "anomalies" du profil topographique provoqués, par exemple, par des surcreusement ou des remblaiements.

Le coefficient (K) est appelé coefficient d'ouverture, car il est fonction du caractère plus ou moins encaissé de la vallée où se situe l'açude. Il varie communément entre 500 et 1500, mais peut atteindre plusieurs dizaines de milliers pour des grands açudes.

Le coefficient (α) est lié à la concavité des berges de la retenue; on convient de l'appeler coefficient de forme. Sa moyenne régionale est de 2,70; il varie couramment entre 2,2 et 3,4.

L'influence de la géométrie sur le type d'utilisation n'est pas négligeable:

- -Pour garantir la sécurité d'un approvisionnement en eau, le facteur prépondérant est la profondeur, dont dépend la durée pendant laquelle la retenue restera en eau, les pertes par évaporation (qui peuvent s'exprimer directement en lame évaporée sur la retenue) ayant souvent un poids très important.
- Pour l'irrigation, c'est le volume disponible qui importe avant tout, le miroir d'eau devant être aussi réduit que possible.
- Pour la pisciculture et les cultures de décrue, le facteur important est la surface de la retenue. Dans le premier cas, il est souhaitable que la surface n'ait que peu de variation avec la profondeur, alors que dans le second c'est l'inverse, puisqu'il s'agit de libérer une surface maximum pour la culture de décrue.

Ces différences géométriques interviennent donc de manière significative dans le dimensionnement. La pérennité d'un açude ne dépend pas donc seulement de la relation entre son volume et le volume écoulé moyen, mais aussi, de sa profondeur.

#### 1.3.3. Evaporation, infiltration et qualité de l'eau.

La moyenne annuelle de l'évaporation mesurée sur bac de classe A est de l'ordre de trois mètres dans la zone semi-aride du Nordeste brésilien appelée Sertåo. Pour une même station, on observe des variations d'une année sur l'autre de plus ou moins 20%. Comme on pouvait s'y attendre, les années déficitaires sur le plan pluviométrique, correspondent souvent à des remplissages insuffisants de l'açude et sont aussi les années de plus forte évaporation.

Le rapport entre l'évapotranspiration potentielle (ETP) et l'évaporation du bac de classe A est de l'ordre de 0,70, tandis que l'évaporation de l'açude peut-être estimée par EVA = 0,83\*EVT. Ce dernier coefficient varie en fait entre 1,0 et 0,70 en fonction de la taille de l'açude.

Pour les plus petits açudes, il faudra tenir compte des infiltrations, qui représentent, par exemple et en moyenne, 23% du rabaissement naturel total d'un échantillon de près de 190 petits açudes. Ce rabaissement moyen est de l'ordre de 1cm par jour en saison sèche.

La qualité de l'eau d'irrigation doit toujours être contrôlée. Elle dépend tout d'abord des caractéristiques physico-chimiques des sols du bassin d'alimentation qui charge l'eau en sels, puis de phénomènes de reconcentration par évaporation dans la retenue. Cette reconcentration dépend de sa forme: surface, volume et profondeur qui conditionnent la fréquence des déversements, des volumes évaporés. Elle dépend aussi des volumes retirés par les utilisateurs.

#### 2. RESULTATE OBTENUS SUR UN EXEMPLE CONCRET.

Nous allons montrer, sur un exemple concret, comment dimensionner un barrage et de son périmètre d'irrigation en fonction de divers critères ou de risque de défaillance. Nous traiterons le cas d'une petite rivière intermittente située dans la partie semi-aride du NORDESTE Brésilien et caractérisée par un écoulement moyen interannuel de 1.000.000 de m<sup>3</sup>.

Parmi les outils de dimensionnement<sup>(3)</sup> qui sont à notre disposition, nous choisirons le modèle de simulation POMAC (POtencial e Manejo de ACudes, ou, en français potentiel et gestion de petits réservoirs). Ce modèle, conçu pour simuler de manière déterministe le fonctionnement du système complexe composé par un périmètre d'irrigation, son réservoir et son bassin versant d'alimentation, nous permettra, en fait, de faire varier à notre guise les paramètre de ce système dont nous avons parlé ci-dessus. Nous montrerons donc les diverses solutions possibles dans le cas d'une rivière d'un module donné. Les normes régionales de dimensionnement seront ensuite obtenues en étudiant de la même facon le cas de rivières de modules différents.

#### 2.1 Caractéristiques de l'exemple choisi

#### 2.1.1 Ressources en eau disponibles

a) Surface du bassin d'alimentation: 11,8 Km<sup>2</sup>.

b) Précipitation moyenne annuelle: 670 mm/an

Pluviomètre de référence: Aracati-açu (Etat du Ceara).

c) Zone climatique : Sertão, station climatologique de Aracati-acu:

Evaporation annuelle:

2578 mm/an

Evapotranspiration annuelle: 1805 mm/an

d) Classe hydrologique du bassin versant d'alimentation:

Nous avons choisi un bassin de classe 3,5 dans le système de classification hydrologique proposé par les équipes SUDENE/ORSTOM, plus exactement un bassin du type de l'Açude MOQUEM (MOQUEM est un des Bassins Versants Représentatifs étudiés par la SUDENE, dont le régime hydrologique est bien connu et a été modélisé).

<sup>(3)</sup>Nous disposons par exemple du modèle SIPAC (SImulação de Pequeno ACude ou, èn Français, simulation de petit réservoir) qui permet, à l'aide d'un calcul itératif, lé dimensionnement rapide des surfaces à planter, en fonction du taux de remplissage du réservoir, du type de culture, des autres utilisateurs et de la date calendaire.

#### Ces hypothèses permettent le calcul des caractéristiques hydrologiques suivantes:

Volume écoulé moyen annuel:	$1.000 \times 1000  \text{m}_{3}^{3}/\text{an}$
Volume écoulé triennal humide:	$1.189 \times 1000  \text{m}_3^3 / \text{an}$
Volume écoulé médian:	892 x 1000 m <sup>3</sup> /an
Volume écoulé triennal sec:	396 x 1000 m <sup>3</sup> /an
Volume écoulé quinquennal sec:	$150 \times 1000  \text{m}_{2}^{3}/\text{an}$
Volume écoulé quinquennal sec: Volume écoulé décennal sec:	16 x 1000 m <sup>3</sup> /ap
Vol.écoulé accumulé mini en 3 ans secs	consec.: 300 x 1000 m <sup>3</sup>
Vol.écoulé accumulé mini en 5 ans secs	consec.: 870 x 1000 m <sup>3</sup>
Volume de la crue décennale:	$1.660 \times 1000 \text{ m}^3/\text{jour}$
Débit de pointe de la crue décennale:	

#### e) distribution saisonnière de ces caractéristiques:

		M A								
- Pluje (mm) 61 - EVP* (mm) 254	102 1	82 172	91	21	11	2	1	1	12	12
- EVP* (mm) 254	220 1	199 176	164	167	173	204	233	257	257	274
- ETP (mm) 178 -ECOUL.x1000m <sup>3</sup> 36	154 1	139 123	115	117	121	143	163	180	180	192
-ECOUL.x1000m <sup>3</sup> 36	103 2	285 394	159	17	0	0	0	0,1	6	0,3

Bac d'évaporation de classe A

#### 2.1.2 Caractéristiques de l'acude et du périmètre.

a) Caractéristiques du barrage:

⇒ Pour l'étude présentée plus loin, nous avons admis la relation suivante entre la profondeur H et le volume V du barrage: V = 1500 H<sup>2</sup>,

- ⇒ Evaporation de l'açude = 0,83 x EVP.
- ⇒ On suppose, dans un premier temps, qu'il n'y a pas de consommation d'eau humaine ou animale.
- ⇒ On s'interdit l'utilisation d'un volume mort équivalent aux derniers 15% du volume de l'açude.
- b) Caractéristiques agronomiques du périmètre d'irrigation
- Evapotranspiration: 0,70 x EVP 0,50
- Efficience de l'irrigation:

- Type de culture de saison sèche, totalement irriguée:

tomate

- Durée du cycle végétatif:

120 jours

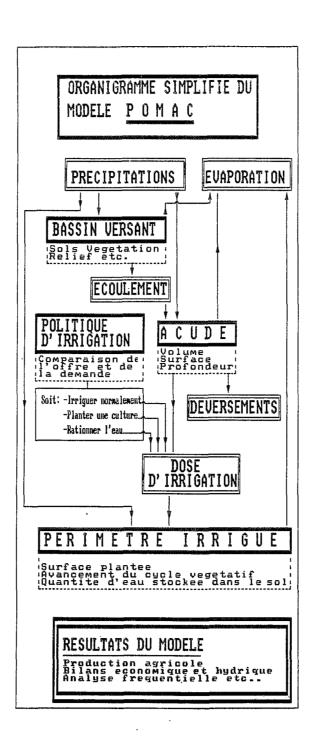
- Valeurs de KC(ETM/ETP):

0,4 a 1,0

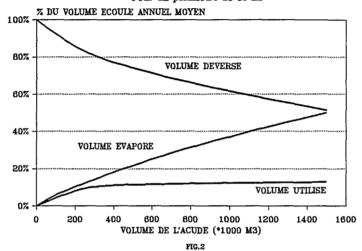
29 tonnes/hectare

Rendement maximum:

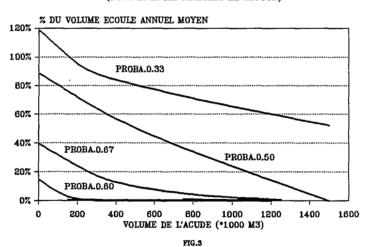
- Type de culture pluviale de saison des pluies avec irrigation de complément: mais et haricot



#### VARIATION DES TERMES DU BILAN HYDRIQUE DE L'ACUDE EN FONCTION DE SON VOLUME Pour un périmètre de 10 ha



## VOLUME DEVERSE EN FONCTION DU VOLUME DE L'ACUDE (POUR DIVERSES PERIODES DE RETOUR)



#### c) Paramètres économiques:

- Açude:

- Relation entre le volume de terre de la digue et le volume d'eau :  $V_t = 5.02 * V_x 0.029 * V_x$ .

  - Prix du barrage : Prix = 2.18 \* Vt (en US\$).

- Périmètre:

- Coût à l'hectare du périmètre de 2000 US\$.
  Prix de la tomate: 120 US\$ la tonne.

#### 2.2. Analyse du fonctionnement du système.

Pour ne pas rendre cette présentation trop complexe, nous étudierons le fonctionnement du système en supposant, sauf indication contraire, que la surface installée du périmètre d'irrigation est de 10ha. Cette valeur (ou surface de référence) de 10ha est, nous le verrons, proche de la surface du dimensionnement optimal que nous recommenderons finalement.

#### 2.2 1.Utilisation des ressources en eau.

#### 2.2.1.1. Bilan hydrique du réservoir.

La figure 2 montre l'évolution des principaux termes du bilan de la retenue en fonction de son volume maximum (Vx), pour la surface installée du périmètre irrigué de référence de 10ha. Nous y avons reporté les pourcentages volumétriques moyens annuels (par rapport au volume écoulé) de:

- -l'eau DEVERSEE: c'est l'eau qui sera encore disponible en aval du système.
- -l'eau UTILISEE pour l'irrigation.
- -l'eau PERDUE par évaporation.

Ces courbes ont été tracées pour des volumes Vx du barrage variant entre 0 et 1.500.000 m<sup>3</sup>; 1.500.000 m<sup>3</sup> correspond à un barrage d'une profondeur maximum de 12.92 m.

#### Nous sommes amenés à faire les commentaires suivants :

-La courbe du pourcentage d'eau utilisée atteint un palier de l'ordre de 12%, qui montre que ce périmètre de 10ha sera alimenté de manière totalement satisfaisante dès que le volume du réservoir sera supérieur à 400.000 ou 500.000m<sup>3</sup>. Voici donc déjà une première approche du dimensionnement!

-Les proportions d'eau DEVERSEE, EVAPOREE ou UTILISEE varient de manière logique en fonction de la taille des réservoirs.

-Des graphiques analogues, non présentés, montrent que si l'on fait varier la taille du périmètre installé, les paliers de production seront atteints pour des tailles de réservoir d'autant plus faibles que le périmètre sera petit. Ainsi ce palier est atteint dès 100.000m3 pour 2ha, mais ne le sera que vers 1.000.000m3 pour 30ha.

-Les courbes moyennes présentées ici peuvent être trompeuses; en effet la moyenne lisse et compense toujours les variations. Ceci est surtout vrai pour les volumes déversés, dont la distribution est très irrégulière. Il faudra aussi analyser en termes fréquentiels la distribution des productions agricoles annuelles. Nous avons choisi pour cela, deux période de retour caractéristiques: la triennale sèche pour représenter les performances du système lors de la majorité des années et la fréquence quinquennale ou décennale sèche pour analyser son comportement en année de sécheresse.

#### 2.2.1.2. Analyse fréquentielle des déversements .

Les volumes déversés correspondent à l'eau qui sera encore disponible en aval du système. En les déduisant des volumes qui entrent dans la retenue on peut donc quantifier la modification du régime hydrologique induite par le barrage et son périmètre.

Les volumes déversés présentés sur la figure 2 sont la moyenne d'une série de valeurs annuelles très hétérogène ; ainsi , une seule année excédentaire comme 1974 ou 1985 peut représenter cinq à dix fois la moyenne interannuelle ; pour cette raison il est plus logique d'étudier les volumes déversés en termes fréquentiels .

Nous présentons donc sur la figure 3 les variations des volumes déversés pour les fréquences triennales humides, médianes, triennales et quinqennales sèches. Ces variations sont toujours comparées aux dimensions du barrage, qui irrigue un périmètre de 10ha; elles sont exprimées en pourcentage du module de la rivière qui est, rappelons-le, de 1.000.000m<sup>3</sup>.

Il est intéressant de noter les variations des fréquences de non-déversement qui correspondront à une absence totale d'eau pour les riverains situés en aval. On constate, par exemple, qu'un açude de 150.000m² déversera quatre années sur cinq, qu'un açude de 750.000m³ déversera encore deux années sur trois et qu'un açude de 1.4400.000m³ ne déversera qu'une année sur deux. Ces déversements sont nettement favorisés par le fait qu'on s'interdit d'utiliser un volume mort correspondant aux 15% inférieurs du volume du barrage, ce qui fait qu'il ne s'asséchera en général pas, d'une année sur l'autre.

Le volume de l'açude à une influence relative plus importante au cours des années déficitaires. Ainsi, pour un açude de  $100.000 \, \mathrm{m}^3$  le volume déversé quinquennal sec sera de  $4.900 \, \mathrm{m}^3$ , soit 33% du volume naturel écoulé pour cette fréquence, alors que pour le même açude, le volume déversé triennal humide (F=0,33) sera de  $107.000 \, \mathrm{m}^3$ , soit 90% du volume naturel. Pour cette même fréquence (F=0,33), un açude de  $1.500.000 \, \mathrm{m}^3$  déversera 50% du volume naturel écoulé.

Des résultats non publiés montrent que l'influence de la taille du périmètre d'irrigation sur les déversements est plus faible que celle de l'açude. Ceci est normal, si l'on considère la forte irrégularité des régimes hydrologiques qui concentrent d'une manière non prévisible les crues, les écoulements et donc les déversements sur de courtes périodes, alors que la politique de gestion du réservoir consiste justement à conserver le plus souvent possible un volume de réserve, qui correspondra à une marge de sécurité quasi-constante, pour parer aux aléas climatiques.

#### 2.2.2. Production et Rentabilité du périmètre irrigué.

Nous avons reporté sur les figure 4 et 5 les accroissements de revenus provoqués par le fonctionnement du périmètre. Cet accroissement est exprimé en dollars US et correspond à la différence entre le revenu de la surface irriguée et celui de la même surface cultivée sans irrigation. Les calculs sont réalisés pour différentes surfaces du périmètre et volumes de l'açude.

Nous présentons sur les figures 4 et 5 les résultats correspondants à deux situations ou fréquences caractéristiques :

-La production garantie deux années sur trois ,qui correspond à une

fréquence au non-dépassement de F=0,667.

-La production moyenne, calculée sur la période 1912-1985.

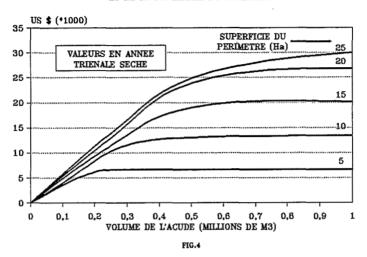
Nous pouvons faire les commentaires suivants :

2.2.2.1. Production garantie deux années sur trois (F=0,667) (fig 4)

-Toutes les courbes de production atteignent un palier à partir d'une certaine valeur du volume maximum de l'açude Vx.

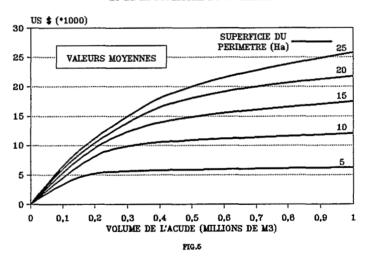
#### ACCROISSEMENT DU REVENU NET

EN FONCTION DU VOLUME DE L'ACUDE ET DE LA SUPERFICIE DU PERIMETRE



## ACCROISSEMENT DU REVENU NET EN FONCTION DU VOLUME DE L'ACUDE

ET DE LA SUPERFICIE DU PERIMETRE



-Ce palier sera plus long à atteindre pour les fortes valeurs de la surface du périmètre SUP:

 $\Rightarrow$  Ainsi, pour un périmètre de cinq hectares, on observe en dessous de  $V_x = 150.000 \mathrm{m}^3$ , un accroissement rapide et pratiquement linéaire de la courbe liant la production à  $V_x$ , alors que, au dessus de  $V_x = 220.000 \mathrm{m}^3$ , les variations de la production deviennent très faibles : on peut considerer que l'on a atteint le palier.

⇒ Pour SUP=10ha ces deux valeurs sont pratiquement de 200.000 et de 300.000m<sup>3</sup>.

⇒ Et pour 20ha de 400.000 et 600.000m<sup>3</sup>.

#### 2.2.2.2. Palier de production en fonction du périmètre installé (fig 4).

Pour les petites et moyennes valeurs de la surface du périmètre installé (SUP), les paliers de production s'accroissent proportionnellement à SUP. Mais, au-dessus d'une valeur de la surface du périmètre que nous appellerons "surface critique", les accroissements de production ne sont plus proportionnels aux accroissements de surface. Dans notre exemple, cette valeur critique est de l'ordre de 20ha.

#### 2.2.2.3. Production garantie neuf années sur dix (F=0,90)

Des graphiques non publiés montrent que, par rapport à la production garantie deux années sur trois (F=0,667), les paliers de production et les surfaces critiques seront beaucoup plus faibles, tandis que les volumes des açudes à construire seront plus élevés .

Ceci nous confirme qu'il faudra prévoir des açudes plus grands et des périmètres plus petits pour pouvoir garantir une sécurité plus grande en cas de sécheresse.

#### 2.2.2.4. Production moyenne (fig 5)

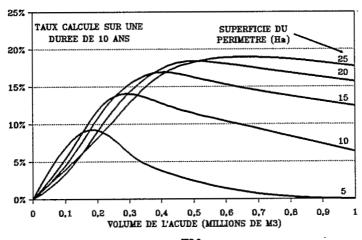
Sur les courbes de production moyenne , les paliers sont moins nets et plus tardifs. Ceci est principalement du au fait que les courbes de production sont "tirées" vers le haut par quelques années très excédentaires . Cette mauvaise définition du palier , alliée au fait que l'on ne peut pas baser un dimensionnement sur quelques rares années excédentaires nous feront préférer les valeurs fréquentielles ( $F=0,667,\,F=0,90$  etc) pour les calculs d'optimisation.

#### 2.2.2.5. Taux interne de rentabilité (TIR - Fig 6)

On peut définir le taux interne de rentabilité ou TIR d'un investissement comme étant le taux d'intérêt auquel il faudrait placer le capital investi pour en retirer des bénéfices équivalents. La figure 6 nous montre que le maximum du TIR sera de l'ordre de 18 à 19% et sera atteint pour des périmètres de 20 à 25ha et des volumes d'açudes respectifs de 470.000 et 650.000m<sup>3</sup>.

Notons, sur cette même figure, que l'accroissement du TIR est très rapide au début, mais se tasse dès que l'on dépasse 10ha, surface pour laquelle le TIR a déjà atteint 14% pour un volume de 280.000m³ et devient très faible au delà de 15ha (TIR de 17% pour 370.000m³).

## TAUX INTERNE DE RENTABILITE EN FONCTION DU VOLUME DE L'ACUDE ET DE LA SUPERFICIE DU PERIMETRE



#### 2,3. Dimensionnement du volume de l'açude et de la surface du périmètre.

#### 2.3.1. Choix des critères de dimensionnement.

Le dimensionnement du système doit s'effectuer en fonction de plusieurs types de critères:

a) Des critères rendant compte de la façon dont le système utilise les ressources hydriques disponibles.

Nous avons déjà présenté au paragraphe 2.2.2.1. la proportion du module qui est utilisée, déversée ou perdue par évaporation.

Nous allons définir ici un nouveau critère, qui intègre les précédents et que nous appellerons <u>"rendement hydraulique"</u> du système. Le rendement hydraulique est le rapport entre l'eau effectivement utilisée pour l'irrigation et l'eau définitivement perdue par évaporation (cette évaporation contribuant également à la salinisation de la retenue).

- b) Des critères représentant l'eau qui sera encore disponible, dans la rivière, en aval de la retenue. Nous pouvons reprendre pour cela les critères d'analyse fréquentielle des déversements exposés au paragraphe 2.2.2.2. Dans une optique d'aménagement régional, le contrôle des déversements est fondamental, puisqu'il permet de prévoir, à l'échelle de la région, l'impact d'un très grand nombre de petites retenues sur les régimes hydrologiques.
- c) Des critères représentant la production et la rentabilité économique du système. Nous avons exposé au paragraphe 2.2.2. les courbes de variation de la production et du TIR du système. Les paramètres choisis rendent compte de manière relativement satisfaisante de cet aspect du problème.
- c) D'autres critères, prenant en compte d'autres aspects tels que, par exemple, la minimisation de la salinité de l'açude, la maximisation des volumes minimum annuels de l'açude ou encore la minimisation de l'investissement total.
- d) L'étude du fonctionnement du système pendant les périodes sèches critique, correspondant soit à de faibles période de retour soit à des périodes de plusieurs années sèches consécutives.

Le modèle POMAC nous permet l'analyse des variations des critères précédents pour des périodes de retour quinquennales ou décennales et pour des périodes de 3,4 ou 5 années sèches consécutives de diverses périodes de retour.

#### 2.3.2. Prise en compte de ces critères de dimensionnement.

La prise en compte de l'ensemble de ces critères met en jeu des contraintes souvent contradictoires et ne semble pas avoir de solution générale objective et indiscutable.

Nous avons vu, par exemple, que si l'on voulait maximiser le rendement économique du système, il fallait installer un périmètre de 20 à 25ha et construire un açude de près de  $600.000 \, \mathrm{m}^3$ . Cette solution diminuera évidement fortement les volumes disponibles en aval et aggravera les problèmes de salinisation de la retenue. Ces deux critères exigent, en effet, des açudes et donc des périmètres les plus petits possibles. Quant à la sécurité en année sèche, elle exigera, au contraire des açudes les plus grands possible mais de petits périmètres.

Nous rechercherons un moyen terme à ces positions contradictoires, en nous basant sur les hypothèses et principes suivants:

#### a)Surface de référence du périmètre:

Puisque, apparemment, l'optimisation simultanée du volume de l'açude et de la surface de son périmètre semble insoluble, nous considèrerons l'optimisation du volume de l'açude comme prioritaire. Pour cela, nous fixerons, arbitrairement, la surface du périmètre à 10ha. Cette valeur de 10ha n'est pas prise au hasard; elle correspond à peu près à la moitié de la su face maxima optimale, sur le plan économique; il semble donc raisonnable de ne prendre que la moitié de la surface maximum théorique, dans une région notoirement sous-équipée en périmètres irrigués (mais qui est par contre sur-équipée en petits barrages). Nous avions par ailleurs constaté sur la figure 6 et au paragraphe 2.2.2.5. que l'on observait, au dessus de 10ha, un certain tassement de l'accroissement du TIR en fonction de la surface du périmètre.

#### b)Prise en compte des différents critères.

Nous avons reporté sur la figure 7 les plages de variation de 6 critères en fonction du volume de la retenue.

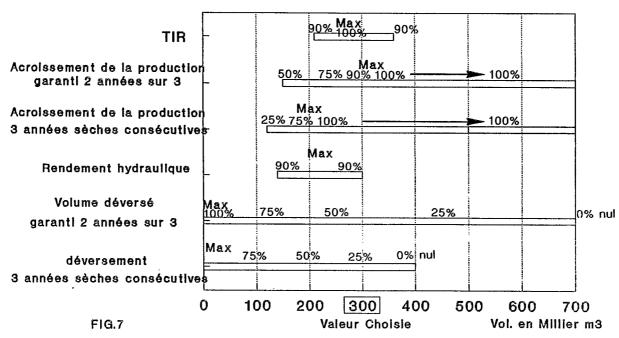
Nous constatons sur ce graphique qu'un volume de 300.000m<sup>3</sup>, est très proche du maximum trouvé selon le critère du TIR (275.000m<sup>3</sup>, pour un TIR maxi de 14%). Cette valeur de 300.000m<sup>3</sup> permet aux quatre premiers critères d'être à plus de 90% de leur valeur maximum.

Seuls les critères des volumes déversés garantis deux années sur trois et pour trois années sèches consécutives n'atteindront respectivement que 45 et 25% de leur maximum. Mais il est impossible de construire un barrage qui ne diminue pas fortement les déversements en année déficitaire!

Ce couple de valeur de 300.000m<sup>3</sup> pour le Volume et de 10ha pour le périmètre sera pris comme situation de référence dans le chapitre suivant. Ces valeurs de référence correspondent au dimensionnement que l'on pourrait recommander normalement.

# Variations des differents critères en fonction du volume de l'acude.

#### Critères utilisés



#### 2.4. Prise en compte de l'approvisionnement en eau: comment augmenter la sécurité.

Le cas étudié précédemment considère une utilisation constituée d'un seul périmètre irrigué, en dehors de toute autre contrainte. Il est évident qu'une demande supplémentaire visant à satisfaire un approvisionnement en eau modifiera le dimensionnement, dans la mesure où elle exigera en général une plus grande sécurité (et ceci bien que les volumes correspondants à cette demande solent en général très

Nous pouvons donc, à titre d'exemple reconsidérer la situation de référence définie plus haut en lui adjoignant une demande d'approvisionnement de 10 m<sup>3</sup> par jour en saison des pluies et de 30 m<sup>3</sup> par jour en saison sèche. Situation de référence:

-Volume écoulé annuel moyen Vec = 1.000.000 m<sup>3</sup> -Volume maximum de l'açude Vx = 300.000 m<sup>3</sup> -Surface installée du périmètre irrigué:SUP= 10ha

Pour augmenter la sécurité de cet approvisionnement, nous pouvons modifier de deux façons notre situation de référence: la première consiste à diminuer le périmètre irrigué (et donc les besoins en eau) tandis que la deuxième revient à augmenter la taille de l'açude (et donc sa régularisation interannuelle).

La répercussion de chacune de ces deux méthodes sur les principaux critères du dimensionnement fait l'objet des figures doubles 8 à 11. On y a reporté, à partir de la situation de référence, la variation de chacun des paramètres pour une diminution de la surface irriguée SUP (à gauche) et une augmentation du volume Vx (à droite).

- Sur la figure 8 on observe tout d'abord une forte dégradation du TIR

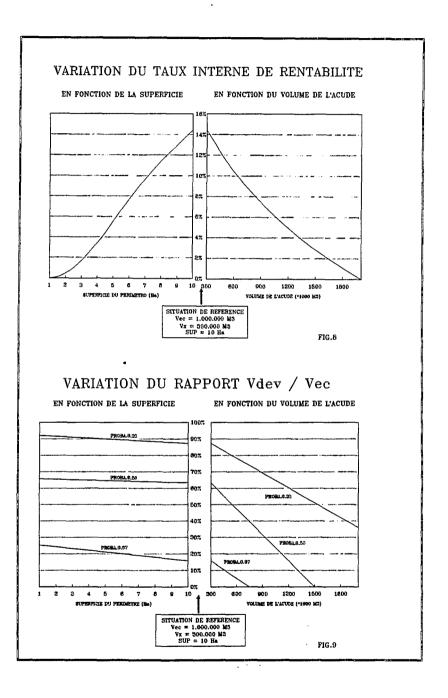
dans les deux cas: la sécurité coûte cher!

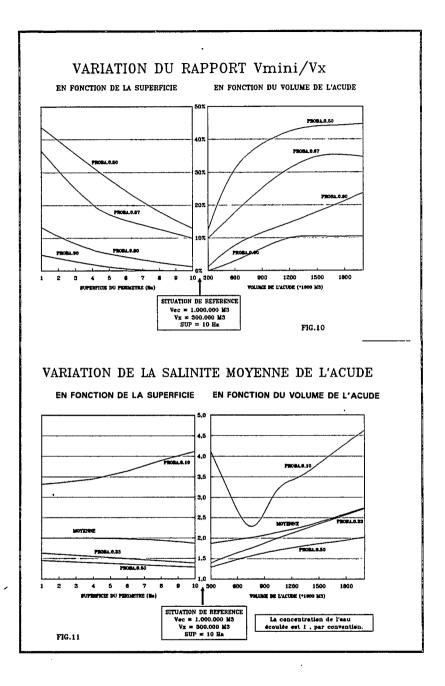
- La figure 9 met en évidence le peu d'influence de la diminution du périmètre sur les volumes déversés (Vdev), alors, qu'au contraire, une augmentation du volume Vx se traduira rapidement par une diminution et une plus grande irrégularité des débits en aval.

La figure 10 montre le gain de sécurité exprimé par la variation de

Vmini, qui est le plus petit volume atteint dans l'année.

- La figure 11 met en garde contre un sur-dimensionnement excessif en montrant comment croît la salinité annuelle moyenne de l'açude. Les salinités sont exprimées en valeurs relatives par rapport aux concentrations en sel affluentes entrant dans l'açude (qui ont par définition la valeur 1. On a de plus supposé, pour simplifier, qu'il n'y avait aucun de phénomène de précipitation chimique susceptible de modifier la concentration évaporatoire volumétrique).





Cette figure 11 nous montre que la reconcentration en sels provoqué par un açude normalement géré et alimentant un périmètre d'irrigation de taille normale est de l'ordre de 50%. Quand le périmètre est petit ou que le volume de l'açude est trop grand, l'accroissement de la salinité moyenne peut atteindre 100%. Des valeurs plus fortes ne seront observées qu'à l'occasion de périodes sèches exceptionnelles ou pour des ouvrages très mal dimensionnés et peu utilisés.

#### 2.5. Gestion du périmètre: le modèle SIPAC.

Des instruments et des programmes spécifiques permettent de gérer les périmètres installés en fonction des disponibilités hydriques disponibles chaque année.

Le calendrier agricole choisi dans l'exemple présenté comporte une culture vivrière pluviale, en irrigation de complément, suivi d'une deuxième culture de rapport intégralement irriguée. Naturellement, la surface à planter en saison sèche doit être ajustée au volume effectivement disponible dans l'açude, lequel dépend principalement des apports de la saison des pluies précédente et des volumes déjà utilisés par l'irrigation de complément. Le programme SIPAC (SImulacao de Pequeno ACude ou; en Français, simulation de petit réservoir) établit un abaque qui fournit la surface à planter en fonction du niveau d'eau dans le réservoir et de la culture choisie. La figure 12 présente cet abaque pour les valeurs de  $\alpha$  de 2,70, de K de 1000, un taux d'infiltration de 34%, un volume d'approvisionnement nul et une efficience d'irrigation de 0,50.

# ABAQUE DE DETERMINATION DE LA SUPERFICIE A PLANTER

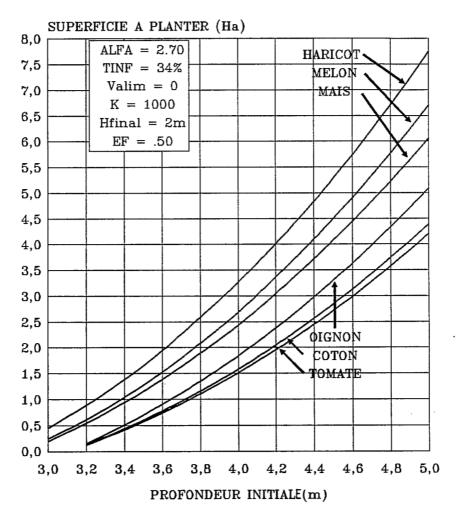


Fig.12

#### 3. CONCLUSIONS.

Nous avons montré, sur un exemple concret, comment utiliser le modèle POMAC pour analyser et quantifier le rôle de chacun des éléments d'un système d'irrigation alimenté par une retenue collinaire. Ce rôle peut être mis en évidence de plusieurs façons: proportion des ressources en eau effectivement utilisées par le système, production du périmètre irrigué ou encore rentabilité des investissements réalisés etc.

Il n'existe pas de solution unique pour le dimensionnement des ouvrages et pour la définition de la politique d'irrigation. Les optimum varient beaucoup en fonction des critères choisis et des objectifs recherchés: maximiser l'utilisation des ressources hydriques, garantir un minimum d'eau dans le réseau hydrographique en aval, améliorer la production moyenne, garantir un minimum de production au cours des années sèches minimiser ou rentabiliser le capital investi etc.

L'exemple présenté est relatif aux réservoirs, petits et moyens. Le cas, plus complexe, des grands réservoirs capables de régularisation interannuelle et de subvenir aux besoins de cultures pérennes est en cours de traitement. Nous savons que les normes s'appliquant à ce type de barrage seront sensiblement différentes.

L'étude de l'impact de la construction d'une ou plusieurs retenues sur les régimes hydrologiques des rivières situées en aval est également en cours. Cette question est d'importance, quand on sait que, actuellement, dans certaines parties du NORDESTE la densité d'açudes dépasse déjà un barrage par km2. Nous prendrons en compte ces critères pour l'établissement de normes de dimensionnement qui feront partie d'un manuel de construction de barrages élaboré par le Ministère Brésilien de l'Irrigation en association avec la SUDENE et le "BUREAU of

RECLAMATION" des USA .`