

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

MINUTE INCOMPLETE

Septembre 1990

SOMMAIRE

IMENSIONNEMENT DE PETITS BARRAGES DANS LE NORDESTE SEMI-ARIDE

- 1 - PROBLEMATIQUE DU DIMENSIONNEMENT
- 2 - ETAPES DU DIMENSIONNEMENT DE PETITS BARRAGES
- 3 - INFORMATIONS NECESSAIRES
 - 3.1 - PRINCIPES ET LIMITES DE LA METHODE DE CLASSIFICATION HYDRO-PEDOLOGIQUE
 - 3.2 - DOCUMENTS NECESSAIRES
 - 3.3 - INFORMATIONS A RASSEMBLER SUR LE TERRAIN
- 4 - DESCRIPTION DETAILLEE DES ETAPES
 - 4.1 - EVALUATION DE LA SURFACE DU BASSIN D'ALIMENTATION
 - 4.2 - CLASSIFICATION HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT D'ALIMENTATION (BVA)
 - 4.2.1 - DETERMINATION DU L_{600} DE CHAQUE UNITE DE CARTOGRAPHIE PEDOLOGIQUE (U.C.) DU BVA
 - 4.2.1.1 - REGIMES HYDROLOGIQUES DES PETITS BASSINS VERSANTS
PRINCIPAUX REGIMES HYDROLOGIQUES DU NORDESTE SEMI-ARIDE
 - 4.2.1.2 - CHOIX DU SOL COMME FACTEUR PRINCIPAL DE CLASSIFICATION
 - 4.2.1.3 - CALCUL DE L_{600} POUR CHAQUE UNITE CARTOGRAPHIQUE DE SOL
 - 4.2.2 - CORRECTIONS DE L_{600}
 - 4.2.2.1 - INFLUENCE DE LA COUVERTURE VEGETALE
 - 4.2.2.2 - CORRECTION DUE A LA PRESENCE D'AUTRES AÇUDES EN AMONT DU SITE DE LA RETENUE
 - 4.2.2.3 - PRISE EN COMPTE D'AUTRES FACTEURS CORRECTIFS
 - 4.2.3 - CALCUL DE LA VALEUR DE L_{600} CORRIGEE DE CHAQUE UC
 - 4.3 - EVALUATION DU CLIMAT
 - 4.3.1 - DETERMINATION DU TOTAL ANNUEL MOYEN DES PRECIPITATIONS A PARTIR DE LA CARTE D'ISOHYETES
 - 4.3.2 - DETERMINATION DE LA ZONE CLIMATIQUE ET DU COEFFICIENT DE CORRECTION CLIMATIQUE C
 - 4.4 - CALCUL DE LA LAME ECOULEE L(P)
 - 4.5 - CALCUL DU VOLUME MOYEN ECOULE
EXEMPLE DE CALCUL:
 - 4.6 - UTILISATION PREVUE DU BARRAGE
 - 4.7 - DIMENSIONNEMENT DE L'AÇUDE
 - 4.7.1 - CRITERES DE DIMENSIONNEMENT
 - 4.7.2 - DIMENSIONNEMENT
 - 4.8 - CALCUL DE LA CRUE DE PROJET
 - 4.8.1 - ORIGINE DES FORTES CRUES
 - 4.8.1.1 - DEFINITIONS ET EXPLICATIONS GENERALES
 - 4.8.1.2 - PRECIPITATIONS : TOTAUX ET INTENSITES
 - 4.8.1.3 - VARIATIONS DU VOLUME ECOULE
 - 4.8.1.4 - VARIATIONS DES TEMPS D'ECOULEMENT DES CRUES
 - 4.8.2 - CALCUL DU DEBIT DE POINTE DE LA CRUE DE PROJET
 - 4.8.2.1 - DETERMINATION DE LA SURFACE DE BASSIN EFFECTIVE DE CONTRIBUTION DE CRUE SC (KM²)
 - 4.8.2.2 - DETERMINATION DU FACTEUR CORRECTIF FC
 - A) INFLUENCE DE LA FORME DU BVA (COEFFICIENT CORRECTIF C_{FORM})
 - B) INFLUENCE DE LA FORME DU RESEAU DE DRAINAGE: COEFFICIENT C_{DREN}
 - C) INFLUENCE DU RELIEF DU BVA: COEFFICIENT C_{REL}
 - D) INFLUENCE DES DEPRESSIONS ET DES LACS (COEFFICIENT CORRECTIF C_{LAG})
 - E) INFLUENCE DES ZONES DE SOLS COMPACTES OU TRONQUES (COEFFICIENT C_{DEGR})
 - F) CORRECTIONS CLIMATIQUES (COEFFICIENT C_{CLIM})

- G) CALCUL FINAL DU FACTEUR DE CORRECTION FC
- 4.8.3 - AUTRES CARACTERISTIQUES DES CRUES
- 4.9 - RISQUE DE RUPTURE DES BARRAGES SITUES EN AMONT
- 4.10 - AMORTISSEMENT DES CRUES DANS LA RETENUE
- 4.11 - DIMENSIONNEMENT DU DEVERSOIR

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

ANNEXE PEDOLOGIQUE

- 1 - REGROUPEMENTS DE SOLS PROPOSES
- 2 - CODES UTILISEES
- 3 - EXPLICATIONS ET DEFINITIONS

NOTES DE CALCUL HYDROLOGIQUE

- 1 - CALCULS DES ECOULEMENTS ANNUELS
- 1.1 - UTILISATION DES DONNEES ACQUISES SUR BASSINS REPRESENTATIFS
- 1.2 - UTILISATION DES DONNEES ACQUISES SUR LE RESEAU GENERAL
- 1.3 - IMPORTANCE DES CLASSES DE SOL
- 1.4 - ROLE DES FACTEURS PEDOLOGIQUE ET PLUVIOMETRIQUE DANS LE CALCUL DES ECOULEMENTS
- 1.5 - COMPARAISON AVEC LA FORMULE D'AGUIAR
- 2 - CALCUL DE LA CRUE DE PROJET
- 2.1 - CALCUL DU DEBIT MAXIMUM POUR DIVERSES SURFACES DE BASSIN
- 2.1.1 - SURFACES DE BASSIN COMPRISES ENTRE 5 ET 500 KM²
- 2.1.2 - SURFACES COMPRISES ENTRE 0,1 ET 5 KM²
- 2.1.3 - SURFACES SUPERIEURES A 500 KM²
- 2.2 - RELATION ENTRE LES TEMPS CARACTERISTIQUES DES HYDROGRAMMES
- 2.3 - ESTIMATION DU FACTEUR CORRECTIF DE CRUE FC
- 2.3.1 - DETERMINATION DU COEFFICIENT DE CORRECTION DE FORME (C_{FORM})
- 2.3.2 - DETERMINATION DU COEFFICIENT DE CORRECTION DE FORME DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE DE DRAINAGE C_{DREN}
- 2.3.3 - DETERMINATION DU COEFFICIENT DE CORRECTION PAR LE RELIEF C_{REL} ET PAR LA PRESENCE DE DEPRESSIONS ET LACS C_{LAG}
- 2.3.4 - DETERMINATION DU COEFFICIENT DE CORRECTION DE PELLICULE DE SURFACE SOL COMPACTE OU TRONQUE C_{DEGR, FACR}
- 2.3.5 - DETERMINATION DU COEFFICIENT DE CORRECTION CLIMATIQUE C_{CLIM}
- 2.4 - COMPARAISON DES FORMULES SUDENE ET AGUIAR

DIMENSIONNEMENT DE PETITS BARRAGES DANS LE NORDESTE SEMI-ARIDE

Ce document a été élaboré par le Groupe de Travail d'hydrométéorologie (GT.HME) de la SUDENE, dans le cadre d'une convention avec l'ORSTOM .

Equipe Technique:

- Dr. Benedito José Zelaquett Seraphim. SUDENE - Chef du GT.HME Coordination administrative
- ✓ - Eric Cadier. SUDENE / ORSTOM - Hydrologie/Dimensionnement Coordination technique
- Flávio Hugo Barreto Batista da Silva. EMBRAPA - Classification hydropédologique des bassins
- × - Jean Claude Leprun. EMBRAPA/ORSTOM - Classification hydropédologique des bassins
- Jacques Marie Herbaud. SUDENE/ACQUAPLAN - Hydrologie
- Frederico Roberto Doherty. SUDENE/IICA - Hydrologie/Modélisation
- Paulo Frassinete de Araújo Filho. SUDENE/CISAGRO - Hydrologie/Modélisation
- Nice Maria da Cunha Cavalcante. SUDENE/IICA - Hydrologie
- François Molle.SUDENE/COOPERATION MAE FRANCAIS- Dimensionnement/et gestion de l'eau
- Carlos Henrique Cavalcanti de Albuquerque. SUDENE/CISAGRO - Programation/Modélisation
- Paulo Henrique Paes Nascimento. SUDENE/CISAGRO - Programmation/Modélisation
- ✓ - Marc Montgaillard. SUDENE/ORSTOM - Programmation/Modélisation
- Rosana Alves Soares. SUDENE/IICA - Saisie
- Edilton Mendes des Mercês. SUDENE. Dessins

1 - PROBLEMATIQUE DU DIMENSIONNEMENT

Le dimensionnement d'un barrage ou d'un réservoir est une opération complexe dans laquelle il faut prendre en compte plusieurs types de paramètres; citons par exemple:

- a) La quantité d'eau disponible: (variation saisonnière et interannuelle des écoulements, des précipitations et autres caractéristiques climatiques).
- b) Les caractéristiques du site du barrage: volume maximal raisonnablement possible pour le barrage, en fonction de la topographie; relation entre le volume emmagasinable et le coût de l'ouvrage.
- c) La finalité et l'utilisation potentielle de l'ouvrage: par exemple: protection d'une région contre les crues, régularisation de débits, alimentation d'une ville, irrigation, etc.
 Dans le cas de l'irrigation, qui constitue la principale finalité de ce manuel, on devra évaluer: la surface maximale irrigable; la main d'oeuvre disponible; le volume qui devra être réservé pour l'alimentations humaine et animale; le niveau de risque de défaillance que l'on peut admettre etc...
- d) D'autres aspects, tels que les impacts sociaux, politiques et écologiques provoqués par l'ouvrage: comment l'ouvrage s'insère-t-il dans le contexte socio-économique régional? Quelles sont les modifications apportées aux régimes hydrologiques, ou quels seront les risques de salinisation de la retenue et du périmètre? etc...
- e) Aspects techniques et économiques: type et coût de la construction du barrage (terre ou maçonnerie) et de l'irrigation (aspersion, goutte-à-goutte ou système gravitaire), capital disponible, etc...

Chacun de ces éléments doit être considéré comme étant un éventuel facteur limitant. Ainsi, la taille de l'ouvrage sera automatiquement limitée par le volume maximum permis par la topographie du site du barrage et/ou par le capital disponible, etc...

Quand il n'y a pas, à priori, de limite évidente à la dimension de l'ouvrage, nous proposons une méthode de dimensionnement hydrologique qui présuppose, que les ressources hydriques constituent le principal facteur limitant.

En résumé, cette méthode fournit les limites supérieures des taille de barrage et de périmètre à ne pas dépasser, pour garantir une gestion rationnelle des ressources hydriques et financières disponibles. //

2 - ETAPES DU DIMENSIONNEMENT DE PETITS BARRAGES

Les principales étapes de la méthode proposée de dimensionnement de petits barrages et périmètres sont les suivantes:

A) DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES PHYSICO-CLIMATIQUES DU BASSIN

A.1 - CARACTERISTIQUES DU BASSIN VERSANT D'ALIMENTATION (BVA)

ETAPE 1

Calcul de la Surface(S), en km², du Bassin Versant d'Alimentation (BVA), avec une carte topographique.

ETAPE 2

Classification Hydro-Pédologique des Unités Cartographiques de sol du Bassin Versant d'Alimentation (BVA).

SOUS-ETAPE 2.1

Détermination, à l'aide du Tableau 1, de valeur de L_{600} (mm) de chaque Unité Cartographique de sol (U.C.) délimitée sur la carte pédologique. L_{600} est une lame écoulee fictive qui correspond à l'écoulement moyen de chaque U.C. dans les conditions climatiques "de référence".

SOUS-ETAPE 2.2

Intervention éventuelle de facteurs correctifs.

2.2.1 - Couverture végétale: coefficient CV qui varie entre 0,5 et 2

2.2.2 - Présence d'autres açudes: coefficient CA qui varie entre 0 et 1,5

2.2.3 - autres facteurs:

- Réseau hydrographique de drainage
- Relief
- Géologie, etc...

SOUS-ETAPE 2.3

Calcul de L_{600} corrigée du BVA.

$$L_{600} \text{ du BVA} = \frac{\sum (L_{600} \text{ corrigée de chaque UC} \times \text{Surface de chaque UC})}{\text{Surface du BVA}}$$

ETAPE 3:

Caractérisation du climat et de la pluviométrie.

SOUS-ETAPE 3.1

Estimation du total pluviométrique annuel: P(mm), avec une carte de isohyètes..

SOUS-ETAPE 3.2

Détermination de la zone climatique et du coefficient de correction climatique (C), avec la carte de la Figure 2.

B) DIMENSIONNEMENT DU VOLUME DU BARRAGE**ETAPE 4**

Calcul de L(p) - lame moyenne annuelle écoulée sur le bassin, à l'aide de l'abaque de la Figure 3 ou par la formule:

$$L(p) = C \times L_{600} \times e^{A(P-600)}$$

Dans le Sertão prendre C = 1 et A = 0,0033.

ETAPE 5

Calcul du volume moyen annuel écoulé, par la formule:

$$V_e(m^3) = 1000 \times S(km^2) \times L(p)(mm)$$

ETAPE 6

Correction éventuelle, en fonction de l'utilisation prévue du barrage et des caractéristiques géométriques de son site.

ETAPE 7

Résultat final: Détermination du volume du barrage en m³ et de sa profondeur en m.

C) DIMENSIONNEMENT DU DEVERSOIR

Le dimensionnement du déversoir requiert l'utilisation des résultats des Etapes 1 et 2.

ETAPE 8

Calcul du débit de la crue de projet Q_x en m^3/s , par les formules:

$$Q_x(m^3/s) = 25 Sc^{0,58} \times Fc \quad \text{pour } Sc > 5 \text{ km}^2$$

$$Q_x(m^3/s) = 17 Sx^{0,8} \times Fc \quad \text{pour } Sc < 5 \text{ km}^2$$

Sc est la surface de contribution de crue, calculée par la formule:

$$Sc = S(\text{sol classe 3 et 4}) + 0,5 \times S(\text{sol classe 2}) + 0,1 \times S(\text{sol classe 1})$$

Fc est un facteur de correction qui peut varier entre 0,5 à 1,2.

ETAPE 9

Evaluation éventuelle des risques et des conséquences de la rupture des açudes situés en amont.

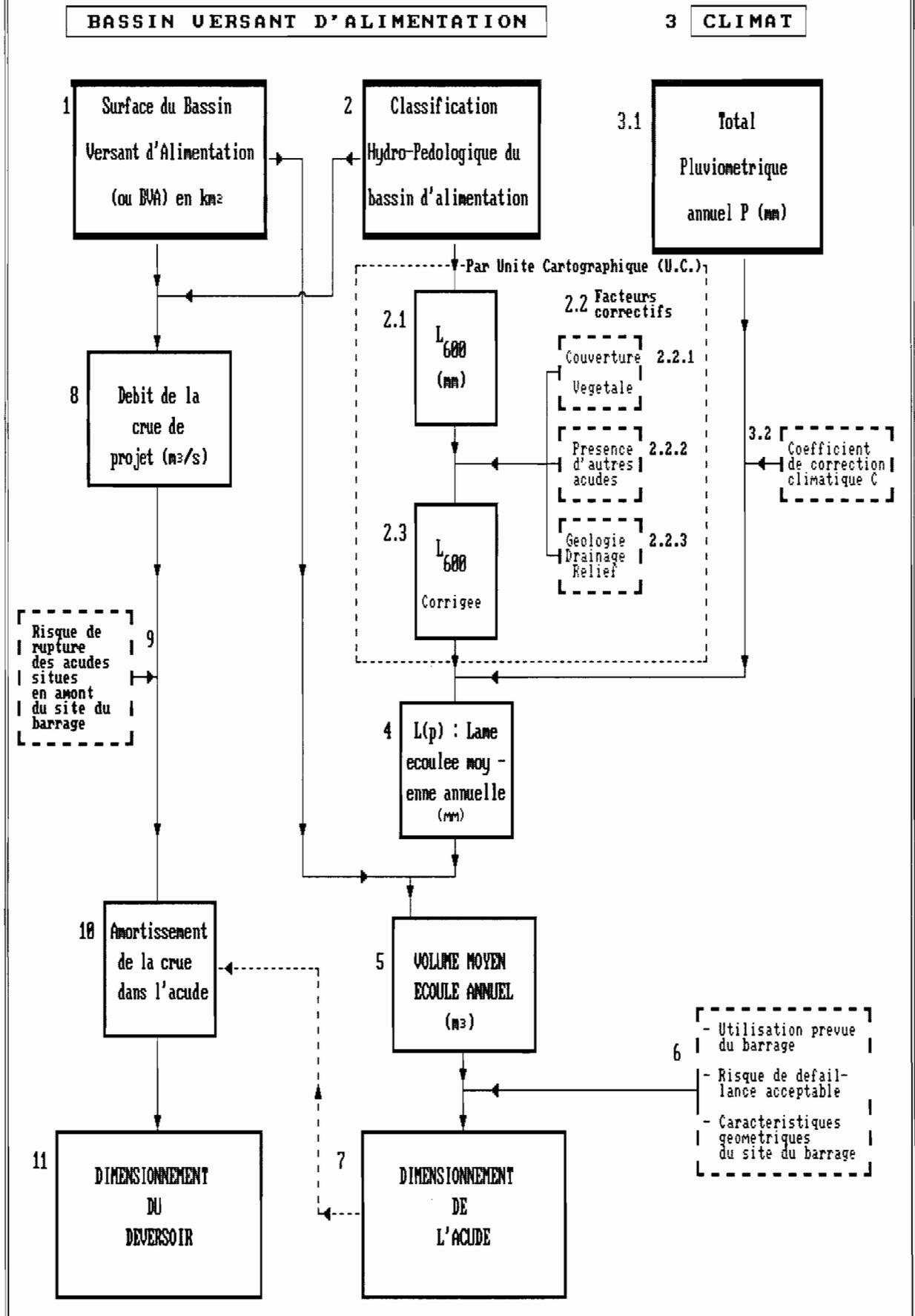
ETAPE 10

Amortissement de la crue dans la retenue.

ETAPE 11

Résultat final: Dimensionnement du déversoir.

Schema General de Dimensionnement d'Acudes dans le Semi-Aride



3 - INFORMATIONS NECESSAIRES

3.1 - PRINCIPES ET LIMITES DE LA METHODE DE CLASSIFICATION HYDRO-PEDOLOGIQUE

La méthode de classification hydrologique proposée permet de fournir, rapidement, une évaluation des ressources en eau des petits bassins versants, pour des surfaces inférieures à 1000 km², dans les zones du Nordeste brésilien et pour des précipitations annuelles moyennes inférieures à 800 mm. Son principe consiste à classer les unités de sol du bassin "dont on cherche à évaluer les ressources", par rapport à un ensemble de Bassins Versants Représentatifs (BVR) qui ont été étudiés depuis plusieurs années, dans le Nordeste Semi-Aride.

Cette classification est fondée sur la comparaison et la recherche d'analogies entre les caractéristiques physiographiques de ces bassins. Le climat, les sols, la végétation, le relief, la présence d'autres açudes et la géologie sont les principaux points de cette comparaison.

La précision des résultats fournis par cette méthode indirecte est, évidemment, inférieure à celle d'une étude hydrologique classique et complète du bassin; cependant, quand il s'agit d'un petit aménagement, le coût et le temps réclamé par une telle étude (dite classique) deviennent absolument prohibitifs.

Une partie de la caractérisation et des "recherches d'analogies" de la méthode simplifiée que nous proposons ici peut être réalisée au bureau, à l'aide de la documentation technique disponible. Cependant, une visite sur le terrain est absolument indispensable ; Ces quelques mesures et études "in situ" permettront de compléter, de confirmer et d'améliorer sensiblement la précision du dimensionnement préliminaire réalisé sur documents.

3.2 - DOCUMENTS NECESSAIRES

Il faut réunir les documents suivants qui sont relatifs au Bassin Versant d'Alimentation (BVA) et au site du barrage:

- Carte topographique du BVA, à l'échelle de 1:100.000 ou plus précise, si cela existe;
- Carte, à l'échelle de 1:500.000, de l'inventaire hydrogéologique de base du Nordeste;
- Carte pédologique et géologique du BVA, à l'échelle la plus précise possible. Il existe, dans tous les Etats du Nordeste, des relevés pédologiques exploratoires, dont les échelles varient entre 1:1.000.000 et 1:400.000;
- Carte d'isohyètes du BVA, au 1:1.000.000 ou 1:2.500.000, selon la zone.
- Photographies aériennes ou images de satellites du BVA (indispensables, quand la taille du bassin est inférieure à 10 km²);
- Tout type de document, d'étude ou de carte, susceptible d'améliorer la connaissance physiographique du BVA;
- Relevé topographique (détaillé ou semi-détaillé) de la future retenue proprement dite;
- Analyse hydrochimique des sols à irriguer et de l'eau que l'on utilisera, pour évaluer les risques de salinisation.

Les cartes topographiques, pédologiques et une estimation du total annuel des précipitations sont absolument indispensables pour application de la présente méthode.

3.3 - INFORMATIONS A RASSEMBLER SUR LE TERRAIN

La reconnaissance de terrain est indispensable et sert à réunir plusieurs types d'informations, pour compléter, confirmer et/ou modifier les conclusions du travail réalisé au bureau. Détaillons en les principaux points:

- a) Confirmation, sur le terrain, du site prévu pour le barrage, qui avait été choisi sur carte ou sur photo.
- b) quand le bassin est très petit, sa délimitation sur cartes et photos doit être confirmée par une visite de terrain, pour diminuer l'erreur sur l'estimation de sa surface. Ceci est fondamental.
- c) Vérification des informations analysées au bureau, sur les sols, végétation, drainage, etc., pour déterminer les éventuels facteurs correctifs de la classification. La vérification, sur le terrain, de la cohérence des cartes de sol avec les sols effectivement présents est également de première importance; en effet, les sols du BVA constituent la base de la classification proposée.
- d) Inspection des açudes existants sur le bassin en amont du barrage prévu, estimation de leurs volumes et risques de rupture. Cette estimation est indispensable pour dimensionnement des déversoirs.
- e) Recueillir des informations sur le fonctionnement des açudes existants dans la Région: relation entre volume maximum du açude et la surface de leurs BVA, quelles sont les années où ils ont capté un écoulement ou déversé? Y-a-t-il eu des cas de rupture? si oui, quelles en furent les causes? etc...
- f) Réunir le maximum possible d'informations et d'observations relatives au site du futur barrage; s'informer sur le comportement du cours d'eau et le niveau maximum atteint par les crues historiques, recueillir des échantillons d'eau et de sol, etc.

Le voyage sur le terrain pourra être évidemment utilisé pour réaliser d'autres études préliminaires du projet, relatives, par exemple, à la construction et à la future utilisation du barrage.

4 - DESCRIPTION DETAILLEE DES ETAPES

4.1 - EVALUATION DE LA SURFACE DU BASSIN D'ALIMENTATION

ET A P E 1

a) Définir le site du barrage, déterminer la ligne de partage des eaux du Bassin Versant d'Alimentation et calculer sa surface (S).

- Pour des surfaces inférieures à 5 km², utiliser des photographies aériennes ou des cartes détaillées (échelle de 1:50.000 ou 1:25.000);

- entre 5 et 25 km², utiliser des cartes ou des photographies, selon la netteté du relief sur les documents disponibles;

- pour des surfaces de plus de 25 km², on peut utiliser des cartes topographiques à l'échelle du 1:100.000, dont la précision est en général suffisante, et qui existent dans la plus grande partie du NORDESTE.

Quand on a le choix entre plusieurs échelles de carte, il faut choisir celle qui correspond à une surface à mesurer comprise entre 20 et 100 cm², ce qui correspond à la plage de meilleure précision du planimètre .

Dans tous les cas, il est très risqué et illusoire de chercher à délimiter et à évaluer des surfaces de bassins qui correspondent, sur la carte, à une surface inférieure à 1 cm², même en utilisant une méthode de comptage de petits carreaux.

b) Localiser les açudes déjà existants à l'intérieur du bassin et évaluer leurs surfaces respectives de drainage. Calculer, ensuite, la surface active (SA) du bassin étudié qui correspond à la surface totale (S), diminuée de la surface contrôlée par tous ces açudes.

L'estimation de ces surfaces est fondamentale. Elle permettra, en effet, le calcul des volumes écoulés à partir des lames écoulées et le calcul du débit de pointe de la crue du projet.

4.2 - CLASSIFICATION HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT D'ALIMENTATION (BVA)

ET A P E 2

La classification hydrologique des bassins versants, l'estimation de la surface du bassin d'alimentation et celle des précipitations sont les trois éléments fondamentaux qui permettront le calcul des volumes d'eau disponibles et des débits de pointe des crues.

Pour cela, il faut tout d'abord faire une classification hydrogéologique de chaque unité de sol existante sur le BVA.

Cette classification permet d'estimer directement à partir d'un tableau la valeur centrale de L_{600} de chaque unité.

Le coefficient L_{600} correspond à une lame annuelle fictive qui s'écoulerait si le sol (ou l'Unité Cartographique étudiée) était située dans les conditions climatiques de référence que nous avons choisies: précipitation moyenne annuelle de 600 mm, dans la zone climatique de référence du Sertão.

Les valeurs centrales proposées pour les L_{600} de chaque sol, ont été déterminées en considérant, autant que possible, les conditions moyennes actuelles du Sertão, pour les principaux facteurs susceptibles d'influencer l'écoulement. Ces facteurs sont, par exemple, l'état de la couverture végétale, le nombre d'açudes, le relief ou la densité de drainage.

Quand un de ces facteurs atteint une valeur qui ne peut être considérée comme normale, il faut alors appliquer des corrections.

Cette "intervention de facteurs correctifs" constituera la sous-étape 2.2 et sera effectuée en fonction de critères d'appréciation plus subjectifs que dans la sous-étape 2.1. Ces corrections requerront la participation de spécialistes, possédant une certaine expérience de l'utilisation de la présente méthode.

4.2.1 - DETERMINATION DU L_{600} DE CHAQUE UNITE DE CARTOGRAPHIE PEDOLOGIQUE (U.C.) DU BVA

Sous-Etape 2.1

4.2.1.1 - REGIMES HYDROLOGIQUES DES PETITS BASSINS VERSANTS

PRINCIPAUX REGIMES HYDROLOGIQUES DU NORDESTE SEMI-ARIDE

En schématisant beaucoup, le Nordeste semi-aride peut être sous-divisé en trois grandes zones climatiques représentées sur la carte de la Figure 2.

- 1) Le **Sertão Nord**, caractérisé par une saison des pluies unique, centrée sur les mois de février à avril.
- 2) Le **Sertão Sud** de régime pluviométrique plus complexe où l'on observe, généralement, deux saisons des pluies: la première centrée sur mars-juillet et la seconde sur novembre-décembre. Dans ces deux zones, du Sertão Nord et Sud, les plus fortes précipitations sont, le plus souvent, d'origine convective, et sont caractérisées par de fortes intensités pour des durées relativement courtes.
- 3) Dans une **zone de transition** située entre la zone littorale atlantique Est et le sertão, les précipitations sont de deux types: certaines sont, comme dans le cas précédent du Sertão, d'origine convective, d'autres proviennent de fronts pluvieux océaniques atténués par la distance. Ce deuxième type de précipitation est caractérisé par de plus grandes durées de pluie et par de plus faibles intensités; elles surviennent entre avril et août; elles sont plus favorables pour agriculture mais provoquent, en moyenne, des écoulements plus faibles que les précipitations convectives de même importance.

La plus grande partie des bassins Versants utilisés pour l'élaboration de la méthode présentée sont situés dans le Sertão Nord qui constitue en fait la zone où la classification hydrologique a été réellement validée. L'utilisation de cette méthode dans les autres zones devra donc être faite de manière extrêmement prudente, dans l'attente d'études spécifiques pour ces régions.

En termes géologiques, il existe deux principaux ensembles:

1) Les zones d'origine **crystalline** dont le sous-sol est presque toujours imperméable et dépourvu d'aquifère généralisé. Dans ces zones, les cours d'eau sont toujours intermittents puisque, la partie principale de l'écoulement provient du ruissellement superficiel, les écoulements de base étant généralement de faible importance et limités à quelques jours après les fortes crues. Ces zones seront, naturellement, favorables à la construction d'açudes, d'abord parce qu'il n' existe pas d'autre forme d'emmagasiner de l'eau et ensuite à cause de l'extrême irrégularité des écoulements.

2) Les zones d'origine **sédimentaires**, plus hétérogènes, où l'on rencontre souvent des aquifères généralisés. Il existe deux principaux types de zones sédimentaires:

- les "chapadas", reliques de la couverture sédimentaire initiale du socle cristallin qui ont été épargnées par l'érosion. Ces formations tabulaires s'élèvent au dessus des zones cristallines. Les chapadas d'Araripe et d'Apodi sont un bon exemple de ce type de formation.

- Les formations sédimentaires existantes dans les zones où le socle n'a pas été surélevé; dans ces régions les sédiments couvrent de grandes surfaces et il existe des aquifères généralisés et de grande puissance. Ces zones sont pratiquement dépourvues d'açudes, car elles sont perméables (les açudes y perdent l'eau), les écoulements superficiels y sont faibles et les açudes souffrent de la concurrence des puits.

IRREGULARITES DES REGIMES

Les mécanismes de genèse des écoulements accentuent encore l'irrégularité des précipitations. Cette irrégularité constitue la principale caractéristique du régime des petits Bassins Versants du Nordeste Brésilien Semi-Aride, dont les cours d'eau sont quasi toujours intermittents:

- **Irrégularité Interannuelle** des écoulements. En exagérant à peine, on pourrait dire que, dans le Sertão, ou il y a manque ou il y a excès d'eau. Les écoulements moyens et intermédiaires, auxquels on pourrait raisonnablement s'attendre, sont finalement les plus rares.

Ainsi, le volume écoulé atteint un an sur trois est de l'ordre du quadruple du volume écoulé garanti deux ans sur trois. L'écoulement atteint une fois tous les dix ans est six fois supérieur à la valeur garantie une année sur deux et cent fois plus forte que la valeur garantie neuf ans sur dix. De plus, on observe trop souvent des périodes catastrophiques de plusieurs années déficitaires consécutives, qui provoquent les sécheresses qui frappent le Nordeste, avec une certaine périodicité .

- **Irrégularité saisonnière** des écoulements: les écoulements sont distribués d'une forme très irrégulière au cours de l'année. 80 à 90% du volume annuel s'écoule généralement en moins de quinze jours. Cette irrégularité s'accroît encore les années sèches, quand justement, le manque d'eau est le plus grave.

- **Irrégularité dans l'espace**: les écoulements sur les petits bassins dans le Semi-aride peuvent varier beaucoup en fonction des sols, de la végétation, de la géologie et du relief. Sans considérer les cas extrêmes, on peut observer fréquemment des écoulements qui varient dans un rapport de 1 à 5 entre les divers types de bassins. Cette irrégularité spatiale est plus grande, évidemment, pour les petits Bassins dont la petite taille ne favorise pas les compensations entre zones de perméabilités différentes et peut les rendre ainsi plus hétérogènes.

Cette "irrégularité" justifie évidemment la construction et l'utilisation d'açudes capables de stocker ces écoulements éphémères .

INFORMATIONS QUANTITATIVES

Indiquons quelques ordres de grandeur des principales caractéristiques des régimes hydrologiques.

les informations chiffrées que nous fournissons simplifient et schématisent évidemment beaucoup la réalité, puisqu'il est impossible résumer simplement et avec fidélité une zone si vaste.

Écoulements moyens annuels

Dans les zones cristallines, dans le Sertão et pour une pluviométrie annuelle de 600 mm, les lames écoulées annuelles de la moyenne des bassins varient entre 35 et 45 mm. Ceci correspond à un coefficient d'écoulement annuel de 6 à 8%. Cependant, cette valeur peut être multipliée ou divisée par un facteur de 2, 3 ou 4, en fonction des conditions physiographiques locales.

Cet écoulement varie en fonction du total pluviométrique annuel P suivant une fonction exponentielle du type $L(p) = L(600 \text{ mm}) \times e^{0,0033(P-600)}$, qui correspond à un accroissement (ou à une diminution) de 40% pour chaque 100 mm d'accroissement (ou de diminution) du total pluviométrique annuel P.

Dans les zones sédimentaires et dans les zones de transition, on observe des écoulements annuels plus faibles; leur moyenne est de l'ordre de grandeur de la moitié de ce que l'on observe dans les zones cristallines du Sertão.

Irrégularité des écoulements

Le tableau suivant illustre l'extrême irrégularité des écoulements annuels:

ÉCOULEMENTS ANNUELS (mm)							
MOYENNE	FREQUENCE AU DEPASSEMENT (F)					ANNEES SECHES CONSECUTIVES	
	0,1	0,33	0,5	0,67	0,9	L3AC	L5AC
18	31	10	5	0	0	2	3
37	97	32	16	8	2,3 a	1	4
74	230	76	38	19	5,4 à 2,3	7	13

Définitions:

- La **lame écoulée** est une lame d'eau fictive qui, si elle était répartie sur toute la Surface du Bassin Versant d'Alimentation, aurait le même volume que le volume écoulé à l'exutoire du bassin. Cette lame peut être comparée avec la lame précipitée.

- **fréquence au dépassement (F)**: la lame de fréquence au dépassement de $F = 0,1$ (ou $1/10$) correspond à la lame que est atteinte ou dépassée en moyenne une fois tous les dix ans. Idem pour $F = 0,33$ (ou $1/3$) mais une fois tous les trois ans, etc...

- Ecoulements sur des périodes d'années sèches consécutives: les valeurs du tableau précédent correspondent aux valeurs des écoulements annuels moyens observés au cours de périodes de 3 années sèches consécutives (L3AC) ou de 5 années sèches consécutives (L5AC) pour une période de retour approximative de 25 ans.

On peut noter que, l'écoulement médian ($F = 0,5$), c'est à dire, garanti un an sur deux est de l'ordre de grandeur de la moitié de la moyenne et que l'écoulement moyen annuel de la séquence de trois années sèches consécutives est de l'ordre de grandeur de 10% de cette moyenne.

Sur ces bassins le volume de la crue décennale peut être de l'ordre de grandeur de la lame moyenne annuelle.

4.2.1.2 - CHOIX DU SOL COMME FACTEUR PRINCIPAL DE CLASSIFICATION

Les sols et leurs caractéristiques hydrodynamiques ont été choisis comme facteur principal pour notre classification de BVA, pour les raisons suivantes:

- a) Dans les régions semi-arides, l'influence de la végétation et des premiers centimètres ou décimètres du sol, sont prépondérants sur la répartition des eaux de pluie, entre le ruissellement et l'infiltration (qui est très souvent récupérée par l'évapotranspiration).
- b) Le sol est formé par l'action des intempéries climatiques sur les roches géologiques. Pour cela, le sol intègre et se trouve donc fortement lié et dépendant des autres caractéristiques physiographiques, telles que la géologie, la pente, la végétation et le climat.
- c) Il existe, dans tous les Etats du Nordeste, des cartes pédologiques, dont les échelles varient entre 1:400.000 et 1:1.000.000. La liste du Tableau 1 reprend les unités cartographiques décrites dans les rapports accompagnant les cartes exploratoires pédologiques de chaque état du Nordeste.

Ces cartes, pourront être utilisées, faute de mieux, pour nos objectifs de classification hydropédologique, bien que leur imprécision soit grande, à cause de leur petite échelle et surtout parce que la légende n'a pas été conçue pour rendre compte des caractères hydrodynamiques de ses principaux sols.

4.2.13 - CALCUL DE L_{600} POUR CHAQUE UNITE CARTOGRAPHIQUE DE SOL

DEFINITION DE L'UNITE CARTOGRAPHIQUE PEDOLOGIQUE (U.C.)

Sur les cartes pédologiques existantes, les sols sont, généralement, représentés et cartographiés par Unité Cartographique. Une **Unité Cartographique** correspond à une surface dans laquelle on peut rencontrer un ou plusieurs types de sols associés en proportions diverses.

Ainsi, dans la légende de la carte pédologique de l'Etat du Ceara, l'U.C. NC15 est définie comme étant une association de:

- Bruns non Calciques Indiscriminés (NC ind.): phase pierreuse, relief faible ondulé et ondulé plus sols.
- Litoliques Eutrofixes (Re): texture sableuse et moyenne phase pierreuse et rocheuse, relief faible ondulé et ondulé sous-sol de gnaïsse et granite
- Planossol Solodique (PL ind.): texture sableuse/moyenne et argileuse phase relief plan et faible ondulé.
- Solonetz Soldisé (SS ind.): texture sableuse/moyenne et argileuse, phase pierreuse relief plan et faible ondulé, tous A faible phase caatinga hyperxérophile.

Les proportions de ces différents composants est de: (Voir les définitions dans l'annexe pédologique)

- 40% de NC ind.
- 25% de Re
- 20% de PL ind.
- 15% de SS ind.

CALCUL DE LA LAME L_{600}

Rappelons que le coefficient L_{600} correspond à une **lame annuelle fictive** qui s'écoulerait si le sol (ou l'Unité Cartographique étudiée) était située dans les conditions climatiques de référence que nous avons choisies: précipitation moyenne annuelle de 600 mm, dans la zone climatique de référence du Sertão.

La liste du Tableau 1 indique les L_{600} calculées pour toutes les unités cartographiques des diverses cartes des Etats (les légendes ne sont pas les mêmes pour tous les Etats).

Le Tableau 2 indique la classification, la hiérarchisation et les valeurs de L_{600} proposées pour chaque type de sol. Ce Tableau 2 et l'Annexe "Pédologique" fournissent des indications complémentaires sur la méthode utilisée pour calculer la valeur de L_{600} de chaque Unité Cartographique à partir de ses sols qui la composent. Ils permettront, si nécessaire, d'effectuer ou de reprendre le calcul direct de L_{600} quand on dispose de documents différents des cartes mentionnées. Ainsi, par exemple, si l'on sait que la proportion des sols du bassin de notre projet est différente des proportions définies à l'échelle régionale pour l'U.C. qui le contient, on pourra calculer directement la valeur de L_{600} du bassin à l'aide du Tableau 2, comme nous l'expliquons dans l'exemple de calcul présenté au paragraphe 4.5.

TABLEAU 1 (PROVISOIREMENT INCOMPLET)

Composition et valeurs de L_{600} des Unités cartographiques*
(début)

NOM DE L'ASSOCIATION DE SOL	COMPOSANT N°1	%	COMPOSANT N°2	%	COMPOSANT N°3	%	COMPOSANT N°4	%	L_{600}
Bahia									
AQd3	AQd	70%	LVd	30%					3.0mm
Ce10	Ce.med.arg.	30%	Ce.raso	50%	Ce.vert.	20%			28.0mm
LEe4	LEe.med.arg.	45%	Ce.med.arg.	35%	Ce.raso	20%			17.2mm
LVd12	LVd.med.arg.	100%							10.0mm
LVd16	LVd.med.arg.	50%	PE.med/arg.	30%	SIPd.med.arg.	20%			17.5mm
LVd10	LVd.med.arg.	60%	LVd.med.arg.	40%					10.0mm
LVd11	LVd.med.arg.	70%	PE.med/arg.	30%					14.5mm
LVd13	LVd.med.arg.	100%							10.0mm
LVd14	LVd.med.arg.	100%							10.0mm
LVd1	LVd.arg.	100%							15.0mm
LVd20	LVd.med.	55%	AQd	45%					2.8mm
LVd22	LVd.med.arg.	60%	PE.med/arg.	40%					16.0mm
LVd2	LVd.arg.	100%							15.0mm
LVd21	LVd.med.arg.	100%							10.0mm
LVd7	LVd.arg.	100%							15.0mm
PE12	PE.med/arg.	65%	LVd.med.arg.	20%	BV	15%			23.8mm
PE13	PE.med/arg.	50%	LVd.med.arg.	30%	AQd	20%			15.5mm
PE44	PE.plin.abr.	50%	PE.lat.aren/med	30%	LVd.pp.	20%			24.0mm
PLSe20	PE.abr.	40%	PLSe.ind.	60%					52.0mm
PLSe19	PE.abr.	30%	NC.plan.	20%	PLSe.ind.	50%			47.5mm
PLSe21	V	30%	SS.ind.	15%	PLSe.ind.	55%			64.7mm
Rd1	Rd	50%	AF	50%					63.5mm
Rd2	Rd	25%	AQd	25%	LVd.med.	25%	AF	25%	33.0mm
REed1	REed	50%	PLSe.ind.	30%	Re	20%			29.9mm
Zy	Ce	86%	LVe	14%					10.0mm

* Il s'agit des Unités Cartographiques mentionnées dans les légendes des cartes pédologiques des divers Etats.

TABLEAU 1 (PROVISOIREMENT INCOMPLET)
Composition et valeurs de L₆₀₀ des Unités cartographiques*

(suite)

NOM DE L'ASSOCIATION DE SOL	COMPOSANT N°1	%	COMPOSANT N°2	%	COMPOSANT N°3	%	COMPOSANT N°4	%	L ₆₀₀
Ceará									
Ae3	PL.ind.	33%	SH.ind.	33%	Ae.ind.	34%			72.9mm
AQd4	AQd	30%	PE.plin.abr.	25%	PE.med.	25%	AQd	20%	13.0mm
BV1	BV.trun.	55%	Re	25%	PE.arg.	20%			49.7mm
BV2	PE.arg.	20%	Re	35%	BV.trun.	45%			47.4mm
BV3	Re	20%	NC.arg.	30%	BV.trun.	50%			48.5mm
NC11	Re	25%	NC.arg.	35%	NC.vert.	40%			32.2mm
NC14	Re	30%	NC.ind.	50%	PL.ind.	20%			43.6mm
NC15	NC.ind.	40%	Re	25%	PL.ind.	20%	SS.ind.	15%	56.8mm
NC3	Re	15%	NC.arg.	50%	PL.ind.	20%	SS.ind.	15%	56.8mm
NC7	Re	35%	NC.arg.	40%	NC.vert.arg.	25%			34.0mm
NC9	Re	20%	NC.vert.arg.	50%	PL.ind.	30%			40.9mm
PE10	PE.arg.	40%	PE.abr.	30%	PE.lat.arg.	30%			33.4mm
PE11	PE.arg.	45%	TRe.podz.arg.	30%	Re.med.arg.	25%			30.4mm
PE13	PE.arg.	65%	LEe.podz.	35%					25.8mm
PE16	TRe.podz.arg.	25%	PE.arg.	40%	PE.raso.arg.	35%			31.5mm
PE17	PE.arg.	50%	Re	20%	NC.arg.	30%			37.0mm
PE20	PE.arg.	45%	Re	40%	PE.raso.arg.	15%			37.0mm
PE22	PE.arg.	50%	Re	30%	NC.ind.	20%			37.0mm
PE23	PE.arg.	50%	PE.raso.arg.	30%	Re	20%			37.0mm
PE26	PE.arg.	40%	Re	35%	NC.arg.	25%			37.0mm
PE27	PE.arg.	45%	Re	20%	NC.arg.	35%			37.0mm
PE29	PE.abr.	55%	Re	25%	NC.vert.arg.	20%			28.0mm
PE30	PE.abr.	50%	PE.arg.	20%	Re	30%			31.0mm
PE32	PE.plin.abr.	40%	PE.arg.	25%	PL.ind.	20%	LHd.arg.	15%	56.8mm
PE36	PE.plin.abr.	45%	LVe.podz.med.	35%	PE.arg.	20%			25.8mm
PE38	PE.raso	35%	Re	30%	PE.arg.	20%	NC.med.	15%	37.0mm
PE39	PE.abr.	25%	PE.raso.abr.	40%	Re	35%			34.0mm

* Il s'agit des Unités Cartographiques mentionnées dans les légendes des cartes pédologiques des divers Etats.

TABLEAU 1 (PROVISOIREMENT INCOMPLET)

Composition et valeurs de L_{600} des Unités cartographiques*

(suite)

NOM DE L'ASSOCIATION DE SOL	COMPOSANT N°1	%	COMPOSANT N°2	%	COMPOSANT N°3	%	COMPOSANT N°4	%	L_{600}
PE4	PE.arg.	55%	PE.arg.	25%	Re	20%			37.0mm
PE42	PE.raso.abr.	70%	REe.frag.	30%					27.4mm
PE6	PE.arg.	40%	PE.arg.	30%	Re.med.arg.	15%	AF	15%	45.0mm
PE8	PE.arg.	45%	PE.arg.	35%	Re	20%			37.0mm
PE9	PE.arg.	45%	Re	35%	BV.trun.	20%			41.6mm
PL1	PE.raso.abr.	15%	PL.ind.	50%	SS.ind.	35%			84.3mm
PL3	PL.ind.	50%	SS.ind.	30%	AF	20%			90.5mm
PL4	Re	20%	PL.ind.	50%	SS.ind.	30%			79.9mm
PL6	Re	20%	PL.ind.	45%	SS.ind.	35%			82.6mm
Re11	Re	45%	Re	40%	PE.arg.	15%			37.0mm
Re18	Re	35%	NC.ind.	30%	PL.ind.	20%	SS.ind.	15%	56.8mm
Re19	Re	55%	NC.ind.	30%	PL.ind.	15%			41.9mm
Re23	Re	60%	PE.arg.	25%	AF	15%			45.0mm
Re25	Re	60%	PE.arg.	25%	AF	15%			45.0mm
Re26	Re	50%	AF	50%					63.5mm
Re5	Re	60%	PE.arg.	40%					37.0mm
Re6	Re	65%	PE.raso.arg.	35%					37.0mm
Re8	Re	45%	NC.arg.	30%	AF	25%			50.3mm
Re9	Re	40%	Re	30%	PE.arg.	30%			37.0mm
Red10	Red	45%	AF	35%	SS.ind.	20%			73.2mm
REd1	REd.frag.	100%							5.0mm
Red11	Red	45%	NC.arg.	35%	PL.ind.	20%			43.6mm
REd2	REd.frag.	55%	SS.aren.med.	25%	AF	20%			52.0mm
Red5	Red	50%	PE.arg.	20%	NC.ind.	30%			37.0mm
Red9	Red	65%	NC.arg.	20%	SS.ind.	15%			50.2mm
REe3	REe	80%	AF	20%					20.4mm
Paraíba									
Ce1	Re.arg.	40%	Ce.lat.med.	60%					17.8mm
Ce2	Re	25%	PE.orto	25%	Ce.lat.med.	50%			21.0mm
NC1	Re	40%	NC	60%					37.0mm
PE2	PE.orto	100%							37.0mm
PE3	PE.orto	55%	Re	45%					37.0mm
PE6	PE.med.	55%	Re	30%	AF	15%			32.9mm
Re1	Re.med.	100%							37.0mm
Re18	Re	50%	AF	50%					63.5mm
Re2	Re.med.	100%							37.0mm
Re5	Re	85%	AF	15%					45.0mm

* Il s'agit des Unités Cartographiques mentionnées dans les légendes des cartes pédologiques des divers Etats.

TABLEAU 1 (PROVISOIREMENT INCOMPLET)

Composition et valeurs de L_{600} des Unités cartographiques*

(suite)

NOM DE L'ASSOCIATION DE SOL	COMPOSANT N°1	%	COMPOSANT N°2	%	COMPOSANT N°3	%	COMPOSANT N°4	%	L_{600}
Pernambuco									
AQd1	AQd	100%							0.0mm
Ce2	Re	25%	PE.orto	25%	Ce.lat.med.	50%			21.0mm
LVd12	LVd.ind.hum.	100%							15.0mm
LVe2	LVe.med.	60%	PE.orto	40%					17.8mm
NC ₂	Re	35%	NC	40%	NC.vert.	25%			34.0mm
NC6	NC.plan.	55%	BV	45%					30.4mm
NC7	NC.plan.	70%	V	30%					25.0mm
NC8	Re	20%	NC	30%	NC.vert.	50%			31.0mm
PE1	PE.orto	100%							37.0mm
PE10	PE.med.	100%							15.0mm
PE11	Re	30%	AF	20%	PE.med.	50%			36.6mm
PE14	PE.arg.	55%	Re.med.	25%	AF	20%			47.6mm
PE17	PE.arg.	60%	Re.med.	40%					37.0mm
PE19	LVe.med.	25%	SC.ind.	25%	PE.med.	50%			12.5mm
PE3	PE.orto	50%	PE.arg.	35%	NC.plan.	15%			35.2mm
PE5	PE.orto	60%	Re	20%	REe.frag.	20%			30.6mm
PE6	PE.abr.arg.	70%	Re	30%					37.0mm
PE7	PE.plin.abr.	100%							37.0mm
PE9	PE.med.	60%	PE.arg.	40%					23.8mm
PL1	PL	100%							70.0mm
PL10	Re	35%	AF	20%	PL	45%			62.5mm
PL2	Re	40%	AF	15%	PL	45%			59.8mm
PL3	NC.vert.	35%	PL	65%					54.3mm
PL4	Re	20%	NC	30%	PL	50%			53.5mm
PL7	Re	25%	NC.vert.	30%	PL	45%			48.2mm
PV3	PE.orto	100%							37.0mm
Rd1	Rd.aren.	100%							37.0mm
Rd2	Rd.aren.	50%	AQd	50%					18.5mm
Re10	Re	50%	AF	50%					63.5mm
Re4	Re	40%	REe.frag.	35%	PL	25%			34.1mm
Re5	Re	40%	AF	30%	PE.med.	30%			46.3mm
Re7	Re	40%	AF	25%	PL	35%			61.8mm
Re9	Re	50%	AF	50%					63.5mm
REe1	REe.frag.	100%							5.0mm
REe2	Re	30%	AF	20%	REe.frag.	50%			31.6mm
REe3	REe.frag.	35%	PE.med.	35%	Re	30%			18.1mm
REe5	REe.frag.	40%	AF	30%	SS.ind.	30%			66.5mm

* Il s'agit des Unités Cartographiques mentionnées dans les légendes des cartes pédologiques des divers Etats.

TABLEAU 1 (PROVISOIREMENT INCOMPLET)

Composition et valeurs de L_{600} des Unités cartographiques*

(suite)

NOM DE L'ASSOCIATION DE SOL	COMPOSANT N°1	%	COMPOSANT N°2	%	COMPOSANT N°3	%	COMPOSANT N°4	%	L_{600}
REe8	Re	25%	REe.frag.	55%	SS.ind.	20%			37.0mm
SS2	Re	25%	NC.vert.	35%	SS.ind.	40%			68.0mm
V1	V	100%							25.0mm
V2	V	100%							25.0mm
Rio Grande do Norte									
Ae4	SH.ind.	30%	Ae.ind.	70%					55.0mm
Ce1	Ce.arg.	70%	Re.med.arg.	30%					37.0mm
Ce4	Ce.arg.	55%	LVe.arg.	30%	Re.med.arg.	15%			30.4mm
LVd1	LVd.arg.	100%							15.0mm
LVd3	LVd.med.	100%							5.0mm
LVe2	LVe.podz.med.	40%	AQd	30%	PE.lat.med.	30%			6.5mm
NC1	Re	30%	NC	70%					37.0mm
NC2	PE.med.	35%	Re	20%	NC	45%			29.3mm
NC3	PE.med.	25%	Re	35%	NC	40%			31.5mm
NC4	PE.raso.med.	35%	Re	25%	NC	40%			37.0mm
PE1	LVe.cam.arg.	15%	PE.orto	60%	Re	25%			33.7mm
PE2	PE.med.	60%	PE.raso.med.	40%					23.8mm
PE3	Re	30%	PE.med.	40%	NC	30%			28.2mm
PE4	PE.med.	45%	PE.raso.med.	30%	NC	25%			27.1mm
PE5	PE.raso.med.	30%	Re	20%	REe.frag.	25%	NC	25%	29.0mm
PE6	PE.abr.med.	50%	LVe.podz.med.	30%	AQd	20%			9.0mm
Re13	Re	50%	NC.vert.	30%	V	20%			31.0mm
Re15	PE.raso.med.	35%	Re	50%	AF	15%			45.0mm
Re16	Re	50%	AF	50%					63.5mm
Re4	Re.med.	60%	NC	40%					37.0mm
Re6	Re	60%	NC.vert.	40%					32.2mm
REe2	PE.raso.med.	30%	Re	20%	REe.frag.	50%			21.0mm
SS1	SS.ind.	100%							125.0mm

* Il s'agit des Unités Cartographiques mentionnées dans les légendes des cartes pédologiques des divers Etats.

TABLEAU 2 - RESUME DE LA CLASSIFICATION HYDRO-PEDOLOGIQUE
(début)

GROUPE 1; SOLS SABLEUX PROFONDS DONT L'ECOULEMENT EST PRESQUE NUL

SOUS-GROUPE 1.1: $L_{600} = 0$ mm	SOUS-GROUPE 1.2: $L_{600} = 3$ mm
- (AQ) - AQd - AQe	- (RE) - REe - REed
- (AMd) - (AM) - (D)	

GROUPE 2 - SOLS EPAIS

SOUS-GROUPE 2.1: $L_{600} = 5$ mm	SOUS-GROUPE 2.2: $L_{600} = 10$ mm
- Ce.lat.med. - REd.frag.	- C_d - (LVa)
- (LR) - REe.frag.	- Ce - LVd
- LEe.podz. - LVd.pp.	- (LA) - (LVdp)
- (LEH) - LVe.med.	- (LE) - LVd.med.arg.
- LVd.med. - LVe.podz.med.	- (LEa) - LVed.med.arg.
- LVd.pp.med.	- LEe.med.arg.- LVe
	- (LV)

SOUS-GROUPE 2.3: $L_{600} = 15$ mm	SOUS-GROUPE 2.4: $L_{600} = 15$ mm
- LEe.arg. - TRe.arg.	- (Ca)
- (LU) - (TR)	- Ce.med.arg.
- LVd.hum.arg. - (TRd)	- PE.abr.med.
- LVd.ind.hum. - TRe.podz.arg.	- PE.lat.med.
- LVd.arg. - PE.lat.aren/med	- PE.med.
- LVe.arg.	- SC.ind.
- LVe.cam.arg.	- (PVc)

	SOUS-GROUPE 2.5: $L_{600} = 25$ mm
- Ae. ind. - PE. med./arg.	- PE. Abr. - SIPd. med.arg.

GROUPE 3 - SOLS QUI FOURNISSENT UN ECOULEMENT "NORMAL"

Litoliques

SOUS-GROUPE 3.1: $L_{600} = 37$ mm

- (R) - Re.med.
- (Ra) - Re
- Rd - Red.ind.
- Rd.aren. - Red. med. arg.
- Red

Podzoliques peu épais

SOUS-GROUPE 3.2: $L_{600} = 37$ mm

- PE. raso
- PE.raso.abr.
- PE.raso.med.

Brunizen

SOUS-GROUPE 3.3: $L_{600} = 37$ mm

- BV

Brun Non Calcique

SOUS-GROUPE 3.4: $L_{600} = 37$ mm

- NC - NC med.
- NC. ind.

TABLEAU 2 - RESUME DE LA CLASSIFICATION HYDRO-PEDOLOGIQUE

(fin)

Cambissolos et Rendzines peu épaisses	Sols argileux
SOUS-GROUPE 3.5: $L_{600} = 37\text{mm}$	SOUS-GROUPE 3.6: $L_{600} = 37\text{mm}$
- Ce. raso	- Ce. arg. - PE.orto
- (RZ)	- NC. arg. - PE.raso.arg.
	- (PA) - PE.orto
	- PE.arg. - (PVa)
	- PE.abr.arg. - (PVd)
	- PE.lat.arg. - PVA. orto
	- PE.plint.arg.- Re. arg.

GRUPE 4 - SOLS DONT LE COMPORTEMENT HYDRODYNAMIQUE EST SPECIAL, FOURNISSANT UN ECOULEMENT MOYEN OU ELEVE

Vertiques	Planossolique
SOUS-GROUPE 4.1: $L_{600} = 25\text{ mm}$	SOUS-GROUPE 4.2: $L_{600} = 25\text{ mm}$
- Ce.vert. - NC. vert. arg.	- NC. plan.
- NC.vert. - V	
Tronqué	Planossols
SOUS-GROUPE 4.3: $L_{600} = 60\text{mm}$	SOUS-GROUPE 4.4: $L_{600} = 70\text{mm}$
- BV.trun.	- PL - (PLe)
	- PL.ind. - PLSe. ind.
Halomorfes et Plintiques	Affleurements
SOUS-GROUPE 4.5: $L_{600} = 125\text{mm}$	SOUS-GROUPE 4.6: $L_{600} = 90\text{mm}$
- LHd. arg. - (PTc)	- AF
- LHd.med.arg. - SS.aren.med.	
- SH.ind. - SS.ind.	
- (PT) - (SK)	

OBS: Voir définition des abréviations dans l'annexe pédologique. Les sols dont les noms sont entre parenthèses dans la liste ci-dessus correspondent à des sols qui existent dans le NORDESTE, mais que l'on n'a pas rencontrés sur les bassins qui ont servi à établir cette classification. Ces valeurs ne sont donc qu'une première estimation.

4.2.2 - CORRECTIONS DE L_{600}

Sous-Etape 2.2

On ne devra réaliser les corrections de L_{600} que lorsque l'on détectera des anomalies de certaines caractéristiques ou facteurs susceptibles de modifier les valeurs de L_{600} de référence qui ont été, jusqu'à présent, déterminées uniquement à partir des cartes de sol. On les appellera facteurs correctifs. Ces corrections seront effectuées en fonction de critères d'appréciation plus subjectifs que dans l'étape antérieure et seront fondés sur une visite de terrain et sur une nécessaire expérience de la méthode, afin d'évaluer et de corriger l'importance qu'il faut attribuer aux anomalies de chaque facteur correctif.

4.2.2.1 - INFLUENCE DE LA COUVERTURE VEGETALE

Sous-Etape 2.2.1

CONDITIONS DE REFERENCE ACTUELLES DE LA COUVERTURE VEGETALE

Les valeurs de L_{600} proposées dans le paragraphe antérieur correspondent à des situations moyennes (ou centrales) de la couverture végétale, dans les conditions actuelles de cette partie semi-aride du Nordeste, qui sont intermédiaires entre une couverture vierge, non défrichée et une mise en culture totale.

INFORMATIONS QUANTITATIVES DISPONIBLES AU SUJET DE L'INFLUENCE DE LA COUVERTURE VEGETALE SUR L'ECOULEMENT

On dispose en réalité, de très peu d'informations sur l'influence quantitative de la végétation sur l'écoulement.

Au niveau de petites parcelles et de microbassins (surfaces comprises entre 100 m² et 1 ha), Silva et alii (1989) ont montré que, pour des couvertures pédologiques de Regosol (RE) et de sol Brun Non Calcique (NC), les écoulements peuvent s'accroître de près de cinq fois, quand la couverture végétale passe d'une caatinga native, bien conservée (qui assure au sol une protection maximale) à une mise en culture totale (sol découvert).

Sur le bassin Expérimental de Sumé (PB), en étudiant le comportement de 4 microbassins couverts de sols Brun Non Calciques Vertiques, les équipes de la SUDENE, de l'UFPB et de l'ORSTOM, ont mis en évidence un accroissement de l'écoulement dans un rapport de sept. L_{600} , en effet, passe de 9 mm à 65 mm, à la suite d'une mise en culture de deux des microbassins. Plus tard, après avoir soumis ces mêmes microbassins à trois ans d'érosion intensive qui a décapé les couches supérieures des sols, la valeur de L_{600} a bondi vers 180 mm, ce qui signifie que les valeurs initiales ont été multipliées par un facteur de 20. Rappelons que la L_{600} de référence proposée, dans l'annexe pédologique N°2, pour le sol Brun Non Calcique Vertique, est de 25 mm.

Sur le bassin Versant Expérimental de Taua (CE), les équipes de la SUDENE, de l'UFCE et de l'ORSTOM ont mis en évidence des variations de L_{600} de l'ordre de 40% à 50% pour les bassins plus grands (de surfaces de 1 à 10 km²), en fonction de variations de la couverture végétale. Cette fois, les bassins avaient été modifiés par les paysans, sans intervention des équipes de recherche et donc dans des conditions plus proches des variations que l'on observe normalement dans le Nordeste.

Ces nombres montrent l'influence très forte que peut avoir la couverture végétale sur l'écoulement. Cependant, il faut souligner que, mis à part le cas de Taua, ces variations correspondent à des expériences qui impliquent une mise en culture totale, rarement observée sur les bassins qui nous intéressent.

COEFFICIENT CORRECTIF CV PROPOSE

Dans le cas d'une petit bassin et pour les groupes de sols 1, 3, 4.1 et 4.2, nous proposons de multiplier le valeur de L_{600} de référence par un facteur de correction CV, qui pourra varier entre 0,5 et 2, selon le degré de conservation ou de détérioration de la végétation. En général, nous recommandons de ne pas utiliser de valeurs de CV inférieures à 0,75 ou supérieures à 1,5, sauf dans les cas extrêmes.

Nous n'avons encore que très peu d'informations précises sur l'influence de la couverture végétale sur les sols des groupes 1, 2 et 4.3 à 4.6. Cependant, nous pouvons supposer qu'elle sera moins importante. On peut proposer, sous toute réserve, pour ces cas, des valeurs de CV entre 0,75 et 1,5.

RESUME DE LA CORRECTION DUE AUX ANOMALIES DE LA COUVERTURE VEGETALE

Formule de correction: $L_{600} \text{ corrigée} = CV \times L_{600}$
VALEURS DU COEFFICIENT DE CORRECTION CV

Groupe ou Sous-groupe de Sol	Etat de la couverture Végétale*	Extrême-ment Conservée	Bien servée	Occupation normale	Très dégradée	Extrêmement dégradée
3, 4.1 et 4.2		0,5	0,75	1	1,5	2
1,2 et 4.3 à 4.6		(0,75)	(0,88)	1	(1,25)	(1,5)

* On doit surtout considérer le degré de protection du sol et d'interception des précipitations assuré par la végétation. Ainsi, un pâturage en bon état, c'est à dire dans lequel les plantes créent une couche continue et dense qui protège totalement le sol, peut être mis dans la classe "végétation bien (ou extrêmement bien) conservée", puisqu'il est équivalent, en termes d'interception de précipitation, à une caatinga native (CV = 0,5 ou 0,75). Les zones de sol nu, sans couverture végétale et au sol compacté, doivent, elles, être considérées comme "extrêmement dégradées" (CV = 2).

4.2.2.2 - CORRECTION DUE A LA PRESENCE D'AUTRES AÇUDES EN AMONT DU SITE DE LA RETENUE

SOUS-ETAPE 2.2.2

DENSITE D'AÇUDES DANS LES CONDITIONS DE REFERENCE

Les valeurs de L_{600} proposées on été établies pour les conditions actuelles régnant dans un certain nombre de grands bassins situés dans le Nordeste semi-aride. Dans ces bassins, on peut estimer que les açudes existants contrôlent, en moyenne, 30 à 50% des surfaces, avec un volume total d'emmagasinement de l'ordre de 25 à 50% du volume naturel moyen écoulé. Quand les volumes et surfaces contrôlés par les açudes du BVA du projet sont proches des valeurs de références indiquées ci-dessus, il n'y a pas lieu d'effectuer de correction.

INFORMATIONS QUANTITATIVES EXISTANTES

Des études réalisées par la SUDENE, l'UFCE et l'ORSTOM sur le bassin Versant Expérimental de Taua (CE), met en évidence une diminution de plus de 50% des écoulements, entre les bassins versants élémentaires qui ne contiennent aucun açude et le bassin le plus grand d'une surface de 180 km², qui contient 30 açudes.

Girard (1968) et Dubreuil (1971) ont estimé que, sur le bassin du Jaguaribe, le volume total des açudes équivalait à une lame de 18 mm, c'est à dire à près de 40% de l'écoulement moyen annuel.

Ces chercheurs ont également mis en évidence, sur un bassin test de 2.000 km², une diminution de 32% de l'écoulement moyen, provoqué par la construction de nombreux réservoirs susceptibles d'emmagasiner une lame totale de 37 mm, soit 42% de l'écoulement moyen. Un simple calcul montre que cette diminution de 32% correspond à un coefficient de correction CA de 1,47.

COEFFICIENT CORRECTIF (CA) PROPOSE

Comme pour la végétation, nous définirons un facteur correctif d'açude CA, qui dépendra des caractéristiques des açudes déjà existants dans le bassin d'alimentation.

Ce coefficient varie, normalement, entre 1 et 1,5, mais peut être exceptionnellement inférieur à 1, quand le nombre et le volume des açudes situés en amont sont extrêmement élevés. Dans ce cas, on recommande la réalisation d'une étude spécifique plus détaillée.

RESUME DE LA CORRECTION DUE A LA PRESENCE D'ACUDE

Formule de correction: $L_{600} \text{ corrigée} = CA \times L_{600}$
Valeurs du coefficient de correction CA

Densité d'Açudes	Très forte: supérieure à 0,5 ac/km ² * ou présence de très grand açude	Normale**	Null e
Coefficient de Correction CA	< 1	1	1,5

* Nécessité de réaliser une étude spécifique,

** Volume total des açudes de l'ordre de 40% de l'écoulement annuel; densité entre 0,25 et 0,5 açude par km².

Soulignons la nécessité de multiplier par 1,5 les lames L_p et les volumes écoulés calculés pour de petits bassins, quand ils sont totalement dépourvus d'açudes.

4.2.2.3 - PRISE EN COMPTE D'AUTRES FACTEURS CORRECTIFS

SOUS-ETAPE 2.2.3

Comme nous l'avons expliqué, la classification basée sur la pédologie que nous proposons, dépend de certains facteurs et en intègre d'autres, tout comme le sol : nature géologique du sous-sol, influence du climat, du relief, etc...

Cependant, un pédologue ou un hydrologue possédant déjà une bonne expérience de notre méthode peut détecter d'autres anomalies dans le comportement hydrodynamique d'un ou plusieurs sols du bassin, et cela par rapport au comportement médian que l'on devrait attendre de ce sol.

Ces corrections ne devront être réalisées que dans le cas d'anomalies visibles comme, par exemple:

- La présence de dépressions ou de bancs de sable susceptibles de retenir une partie de l'écoulement, surtout quand ils sont situés dans la partie inférieure des toposéquences ou des cours d'eau.

- Densité de drainage ou reliefs anormaux qui peuvent modifier l'écoulement par rapport avec ce que l'on pourrait attendre du type de sol identifié.

Le pédologue ou l'hydrologue expérimenté pourra aussi, apporter des corrections aux valeurs de L_{600} qui sont, pour certains sols, mal définies ou susceptibles de fortes variations.

Ainsi, la L_{600} des alluvions, dont la valeur centrale a été fixée à 25 mm, peut varier, en réalité, entre 0, dans le cas d'alluvions sableuse, à plus de 100 mm, dans le cas d'alluvions argileuse.

La valeur centrale de L_{600} des Planosols qui a été fixée à 70 mm, peut diminuer considérablement quand l'horizon A, sableux devient très épais. Cette diminution est aggravée par le fait de que les Planosols plus épais et susceptibles d'une plus grande interception d'eau, se trouvent en général dans la partie basse de la topo-séquence.

La valeur de L_{600} des affleurements de roche a été fixée à 90mm; mais elle peut, elle aussi, varier beaucoup, en fonction de la perméabilité et de l'épaisseur du sol situé en dessous des affleurements et de la surface effectivement couverte par ces affleurements.

Soulignons, encore une fois, que cette étape relative à l'application "d'autre facteurs correctifs" peut être, en général, évitée et qu'elle ne peut être réalisée que par des pédologues et hydrologues possédant déjà une bonne maîtrise de la méthode de classification hydropédologique proposée.

4.2.3 -CALCUL DE LA VALEUR DE L_{600} CORRIGEE DE CHAQUE UC

La valeur de la lame L_{600} corrigée de chaque UC est obtenue en multipliant la valeur de L_{600} initiale définie dans le tableau 1 du paragraphe 4.2.1.3. par tous les coefficients correctifs définis dans le paragraphe 4.2.2.

████

4.3 - EVALUATION DU CLIMAT

ETAPE 3

4.3.1 - DETERMINATION DU TOTAL ANNUEL MOYEN DES PRECIPITATIONS A PARTIR DE LA CARTE D'ISOHYETES

Sous-Etape 3.1.

A) ESTIMATION DES TOTAUX ANNUELS

L'évaluation de P ,total annuel moyen des précipitations sur le bassin, doit être effectuée à l'aide d'une carte d'isohyètes (La SUDENE est en train de publier avec l'UFPE une carte d'isohyètes homogénéisées du NORDESTE).

Quand la reconnaissance de terrain laisse présumer de conditions orographiques locales exceptionnelles, non prises en compte ou "lissées" par le tracé d'isohyètes régionales, il peut être nécessaire d'évaluer directement la précipitation moyenne sur le bassin, en utilisant toute l'information pluviométrique disponible: celle des pluviomètres de bonne qualité et de longue durée, installés dans la région, mais aussi, (avec toutes les précautions requises...), celles de pluviomètres installés pour des périodes plus courtes par des organismes divers, qui n'ont pas pu être pris en compte dans le tracé des isohyètes. Cette estimation directe représente un travail supplémentaire qui ne sera justifiée que lorsque la précision du carte d'isohyètes se montre visiblement insuffisante, comme par exemple, dans les zones de fort gradient pluviométrique.

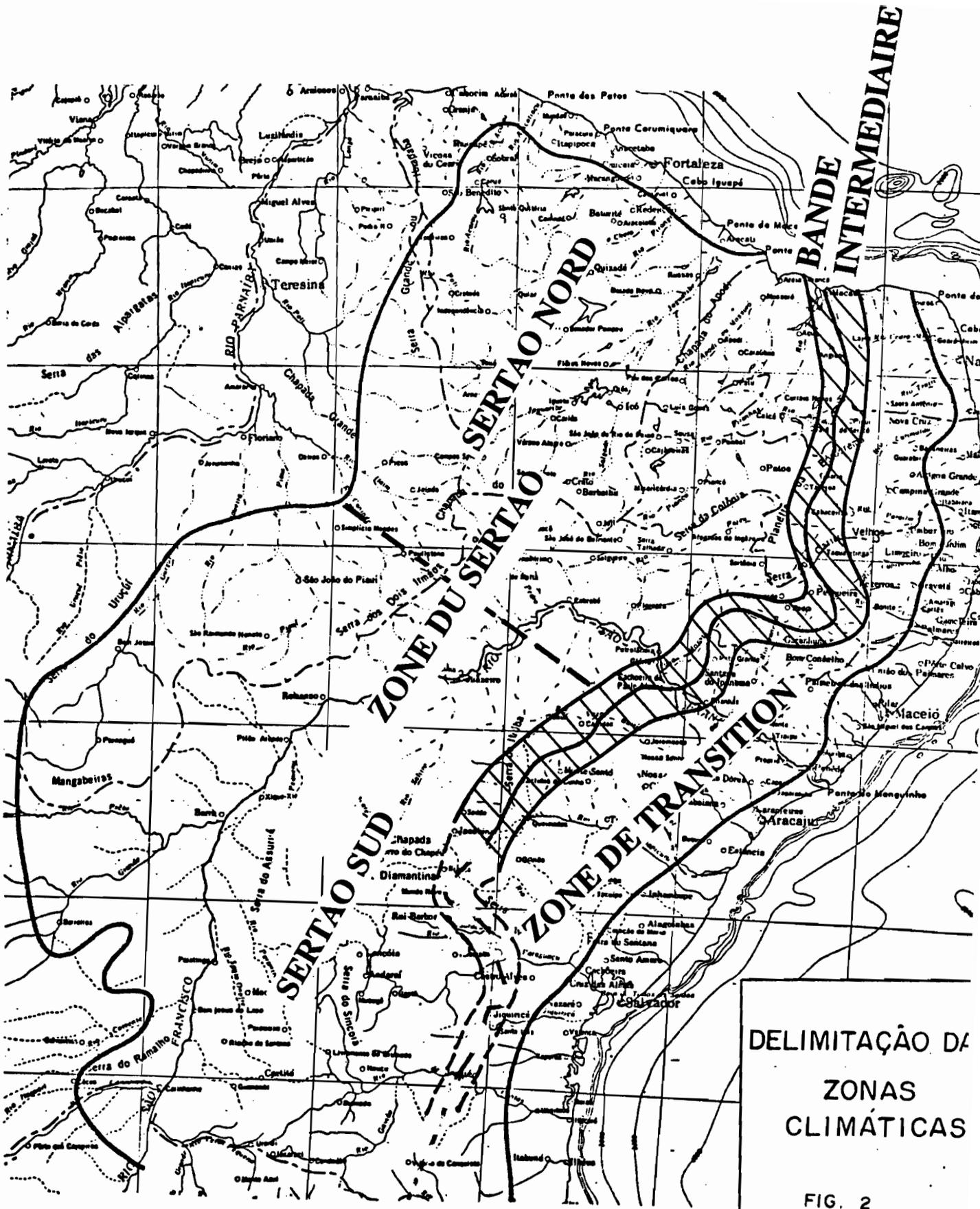
B) ESTIMATION DE LA PLUVIOMETRIE MOYENNE SUR TOUT LE BASSIN:

Lorsque le bassin est petit et les gradients pluviométriques faibles, on peut admettre que toutes les unités de sol du bassin recevront le même total pluviométrique annuel P.

Sinon, il faudra tracer les isohyètes qui couvrent le BVA. Le calcul de la pluviométrie moyenne devra être effectué, pour chaque Unité Cartographique de sol (UC), soit par planimétrie, soit en appliquant la formule:

$$P_i = \frac{P_{\max i} + P_{\min i}}{2}$$

Quand la différence entre Pmax et Pmin est supérieure à 300 mm, l'UC doit être sous-divisée en deux parties, par l'isohyète moyenne. Les calculs de la précipitation moyenne devront alors être réalisés séparément pour chacune des parties.



DELIMITATION DES ZONES CLIMATIQUES

4.3.2 - DETERMINATION DE LA ZONE CLIMATIQUE ET DU COEFFICIENT DE CORRECTION CLIMATIQUE C

Sous-Etape 3.2

La délimitation des zones climatiques sur la figure 2 correspond à des zones globalement homogènes par rapport à la distribution statistique des fortes précipitations en 24 h. Ainsi, pour une même fréquence, les fortes précipitations en 24 h seront plus élevées dans la zone "SERTÃO", que dans la zone "TRANSITION". Ceci induira, naturellement, un comportement hydrologique différent.

Le coefficient climatique C vaut 1 dans le centre de la zone "SERTÃO" et 0,4 dans le centre de la zone "TRANSITION".

On admet que le coefficient C varie progressivement de 1 jusqu'à 0,4, quand on passe d'une zone à l'autre. Cette "bande" intermédiaire d'une largeur de approximative de 50 km a été représentée sur le graphique 2; on y admettra une variation continue et linéaire de C.

4.4 - CALCUL DE LA LAME ECOULEE L(P)

ETAPE 4

$L_i(P_i)$, qui est la lame partielle de chaque Unité Cartographique de sol U_i peut être calculée à partir de L_{600} corrigée, de la précipitation moyenne P_i et du coefficient climatique C. La surface S_i est occupée par l'unité de sol U_i ; S est la surface totale du BVA.

Le calcul utilise l'abaque de la Figure 3 ou la formule suivante:

$$l_i = L_{600} \text{ corrigée} \times C \times e^{A(P_i - 600)}$$

A vaut normalement 0,0033

VALEURS DU COEFFICIENT A		
CAS GENERAL	ZONE DE TRANSITION OU BASSIN TRES HETEROGENE	BASSIN AVEC $L_{600} > 100\text{mm}$
0,0033	0,0040	0,0025

La lame écoulee $L(p)$, de tout le bassin, peut être ensuite calculée en additionnant des lames partielles $l_i(P_i)$ de toutes les UC.

$$L(p) = \left(\sum_{i=1}^n (S_i \cdot l_i(P_i)) \right) / S$$

4.5 - CALCUL DU VOLUME MOYEN ECOULE

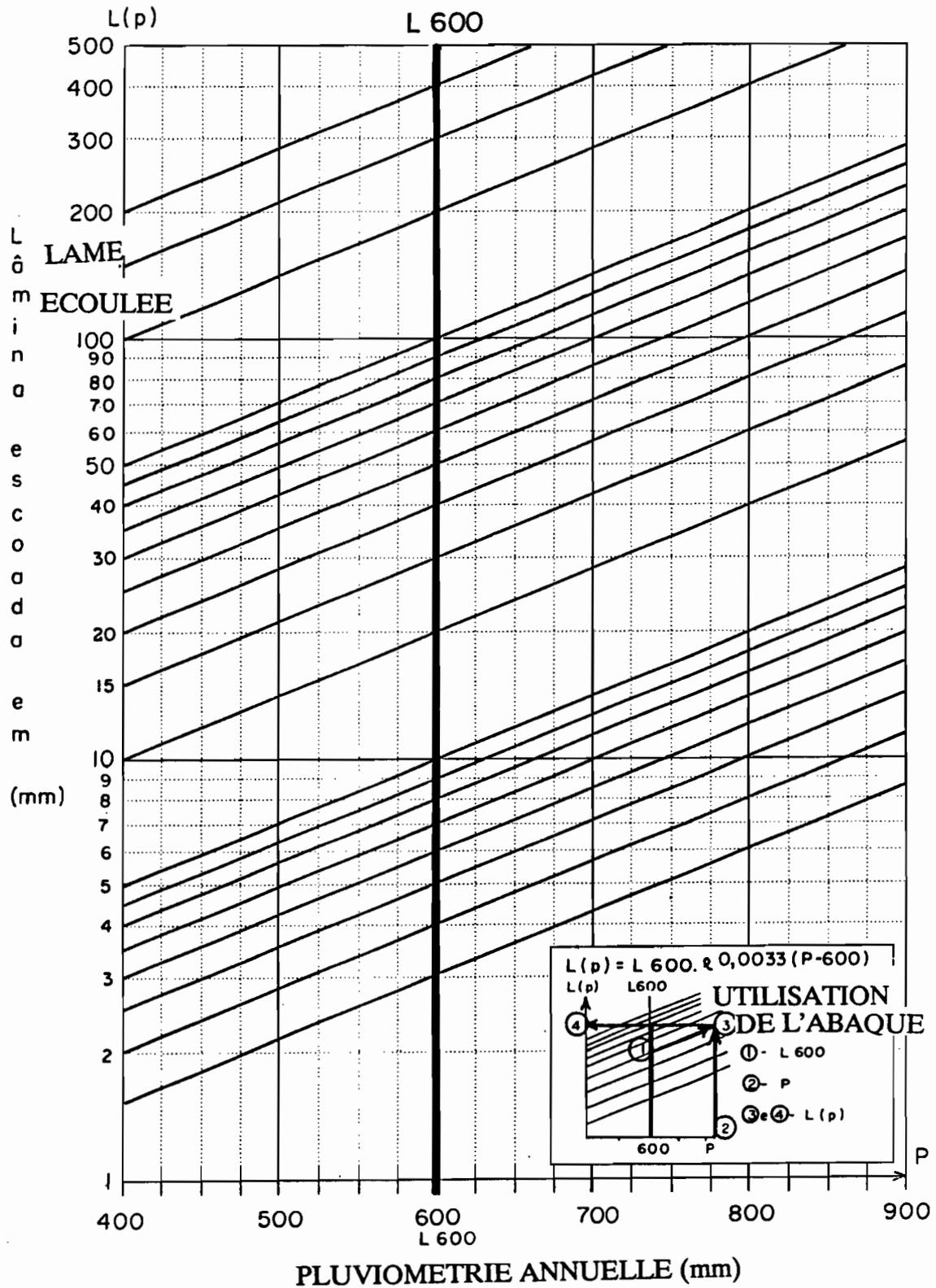
ETAPE 5

Le volume écoulé moyen annuel V_e (en m^3) est calculé par la formule:

$$V_e = S \times L(p) \times 1000$$

où: S est la surface du Bassin Versant d'Alimentation en km^2
 $L(p)$ est la lame écoulee moyenne en mm.

FIG. 3. **CALCUL DE LA LAME ECOULEE ANNUELLE**



EXEMPLE DE CALCUL:**CARACTERISTIQUES PEDOLOGIQUES ET PLUVIOMETRIQUES DU BASSIN**

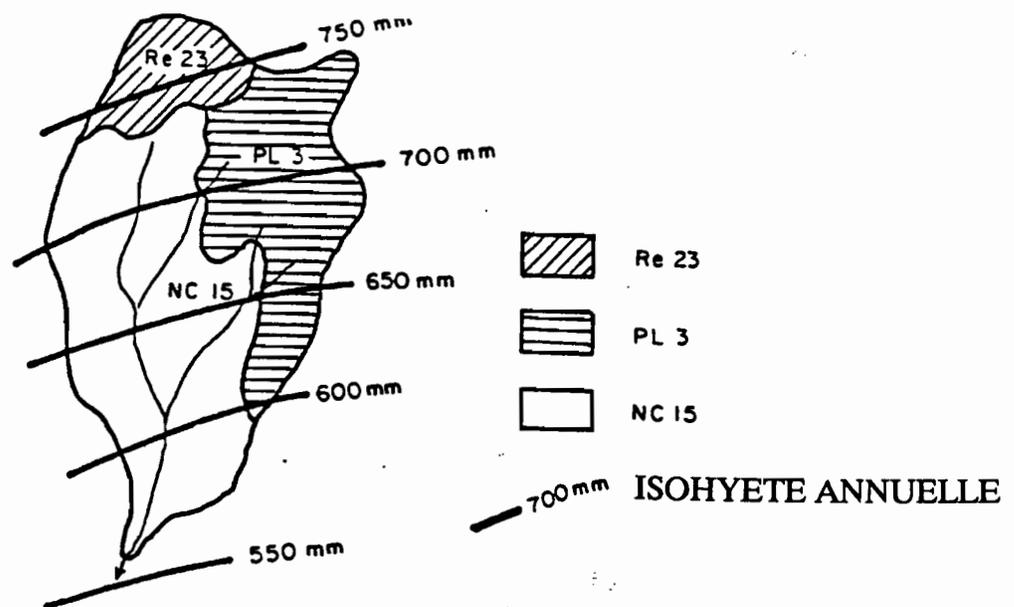
Prenons l'exemple d'un petit bassin de 48 km², situé dans le Ceara et constitué des unités cartographiques pédologiques suivantes:

Couverture pédologique du bassin pris comme exemple

Surface de l'UC	Unité Cartographique (UC)	Composition en %	précipitation (mm)
32 km ²	NC 15	NC.ind-40% Re-25% PL.ind 20% SS.ind-15%	650
10 km ²	PL 3	Pl.ind-50% SS.ind-30% Af-20%	700
6 km ²	Re 23	Re-60% PE.Arg.-25% Af-15%	750

NC 15, PL 3 et Re 23 sont les noms des associations de sol de chaque Unité Cartographiques. Ces noms proviennent de la légende de la carte pédologique du Ceara. NC 15, par exemple, est constituée de 40% de NC.ind, de 25% de Re, 20% de PL et 15% de SS. Dans le bassin choisi comme exemple, le total pluviométrique annuel moyen dans l'unité NC 15 a été estimé à 650 mm à partir des isohyètes.

FIG. 4

EXEMPLE D'UNITES CARTOGRAPHIQUES DE SOLS (UC) ET D'ISOHYETES DANS UN BVA

CALCUL DE L(p)

Le Tableau 1 du paragraphe 4.2.1.3, fournit les valeurs suivantes de L_{600} pour les diverses unités cartographiques du bassin:

$$\begin{aligned} L_{600}(\text{NC 15}) &= 56,8 \text{ mm} \\ L_{600}(\text{PL3}) &= 90,5 \text{ mm} \\ L_{600}(\text{Re 23}) &= 45,0 \text{ mm} \end{aligned}$$

$L(p)(\text{NC 15})$, lame corrigée pour une pluviométrie moyenne P de 650 mm de l'Unité Cartographique, est calculée à l'aide de la formule suivante, en admettant un coefficient A de 0,0033:

$$L(p)(\text{NC 15}) = L_{600} \times e^{A(P-600)} = 75,5 \times e^{0,0033(650-600)} = 66,9 \text{ mm}$$

Des calculs analogues nous donnent:

$$\begin{aligned} L(p)(\text{PL3}) &= L_{600}(\text{PL3}) \times e^{0,0033 \times (700-600)} = 126 \text{ mm} \\ L(p)(\text{Re23}) &= L_{600}(\text{Re23}) \times e^{0,0033 \times (750 - 600)} = 73,8 \text{ mm} \end{aligned}$$

CALCUL DE L(p) MOYEN ET DU VOLUME ECOULE

$$L(p) = \frac{66,9 \text{ mm} \times 32 \text{ km}^2}{48 \text{ km}^2} + \frac{126 \text{ mm} \times 10 \text{ km}^2}{48 \text{ km}^2} + \frac{73,8 \text{ mm} \times 6 \text{ km}^2}{48 \text{ km}^2} = 80 \text{ mm}$$

$$\text{Volume moyen annuel écoulé} = 80 \text{ mm} \times 48 \text{ km}^2 \times 1000 = 3.840.000 \text{ m}^3$$

CALCUL (EVENTUEL) DIRECT DU L_{600}

Profitons de cet exemple pour montrer comment a été déterminé les valeurs de L_{600} de chaque Unité Cartographique du tableau 1 à partir des valeurs de L_{600} fournies pour chaque sol dans le Tableau 2. Le Tableau 21 du paragraphe 4.2.1.3., fournit, par exemple, pour l'unité NC 15 les proportions de sol suivantes:

$$\begin{array}{ll} \text{NC. ind: } L_{600} = 37 \text{ mm} & \text{Pl. ind: } L_{600} = 70 \text{ mm} \\ \text{Re: } L_{600} = 37 \text{ mm} & \text{SS. ind: } L_{600} = 125 \text{ mm} \end{array}$$

La valeur de L_{600} de l'unité de sol NC 15 a été calculée par la formule suivante:

$$L_{600} = \frac{37 \times 40\% + 37 \times 25\% + 70 \times 20\% + 125 \times 15\%}{100} = 56,8 \text{ mm}$$

(Les valeurs de L_{600} de chaque sol: 37 mm, 37 mm, 70 mm et 125 mm sont extraites du Tableau 1 de l'annexe pédologique).

Des calculs analogues fournissent pour les unités PL3 et Re 23:

$$\begin{aligned} L_{600}(\text{PL3}) &= (70 \text{ mm} \times 50\% + 125 \times 30\% + 90 \times 20\%)/100 = 90,5 \text{ mm} \\ L_{600}(\text{Re23}) &= (37 \text{ mm} \times 60\% + 37 \times 25\% + 90 \times 15\%)/100 = 45,0 \text{ mm} \end{aligned}$$

Il sera nécessaire d'effectuer ce calcul direct de L_{600} , chaque fois que la proportion des sols du bassin d'alimentation du projet sera différente des proportions définies à l'échelle régionale pour chaque Etat et reportées dans le Tableau 1.

4.6 - UTILISATION PREVUE DU BARRAGE

ETAPE 6 REDACTION PROVISoire ET INCOMPLETE

Le problème du dimensionnement d'un açude dépend beaucoup de sa taille et de l'utilisation prévue. On peut tenter d'établir une définition des cas caractéristiques suivants:

a) **Le petit açude:** le petit açude, qui est sans doute le plus répandu, est un point d'eau dont le volume varie approximativement entre 10.000 et 100.000 m³; avec une profondeur maximale type de 3 à 5 mètres. Cet açude n'offre pas de garantie face à des sécheresses prolongées (rappelons qu'une année déficitaire sur le plan pluviométrique ne présente pas en général d'écoulement, ce qui signifie pour un açude une période d'au moins 18 mois sans recevoir d'eau), cependant, ce type d'açude est d'une grande utilité, les années normales, pour assurer la jonction entre deux saisons des pluies successives.

On distingue un premier cas dans lequel cet açude pourra être intensivement et intégralement utilisé pour l'irrigation, juste après la saison des pluies, pour éviter de trop grandes pertes par évaporation et infiltration (rappelons que 54% du volume total de l'açude, est en moyenne, stocké dans la couche supérieure, qui correspond au premier quart de la profondeur).

Ce cas n'est envisageable que lorsque l'alimentation est assurée par une autre source (citerne, puits, autre açude plus grand, rio pérenne, etc.).

Dans le second cas, l'açude est la base normale de l'alimentation, bien que sa taille rende quand même nécessaire la présence d'autres sources d'alimentation plus distantes ou moins pratiques pour les périodes de sécheresse. Bien que ceci implique de grandes pertes (en terme de volume), il faudra pratiquement restreindre son utilisation à des cultures de décrue, de la pisciculture, en plus de l'alimentation.

b) **L'açude moyen:** De plus grande taille, de 100.000 à 500.000m³, avec une profondeur de l'ordre de 5 à 10 mètres), l'açude moyen a une probabilité de s'assécher suffisamment faible pour pouvoir être, en règle générale, considéré comme un recours contre la plus grande partie des sécheresses.

Dans ce cas, son utilisation pour l'irrigation devra être limitée pour ne pas risquer de porter tort à la sécurité de l'alimentation (utilisation lorsque l'açude est plein, pour diminuer le rabaissement provoqué par l'irrigation).

Quand l'açude peut être totalement libéré pour l'irrigation, sa taille devra être plus grande et celle du périmètre dépendra de la nécessité éventuelle de garantir des cultures pérennes.

c) **Le grand açude:** Le grand açude a une capacité suffisante pour rester en eau, même en cas de sécheresse exceptionnelle. Un périmètre peut bien sûr lui être adjoint, et sera dimensionné en fonction de la sécurité souhaitée pour l'alimentation.

4.7 - DIMENSIONNEMENT DE L'AÇUDE

ETAPE 7 REDACTION PROVISOIRE ET INCOMPLETE

4.7.1 - CRITERES DE DIMENSIONNEMENT

Divers critères doivent être pris en considération pour déterminer la dimension de l'açude:

- Fréquence de déversement.
- Comportement en années sèches consécutives.
- Fréquence d'assèchement.
- Accroissement des revenus (par rapport à la situation initiale sans irrigation).
- Taux interne de retour T.I.R.(période de 10 ans).
- Niveau minimum atteint.
- Rendement hydraulique (volume utilisé/volume évaporé).
- Evolution de la salinité dans l'açude.

Les calculs ont été faits sur les bases suivantes:

- La relation entre la profondeur H et le volume V est donnée par la formule: $V = K \cdot H^{2.70}$ avec $K = V_x^{0.63}$, où V_x est le volume maximum de l'açude.
- Relation entre le volume de terre du barrage et le volume d'eau du réservoir:
 $V_{\text{terre}} = 5.02 V_x^{0.629}$
- Coût du barrage = $2.18 V_{\text{terre}}$ (US \$) (Y compris un surcoût de 30% pour le déversoir).
- périmètre: US\$ 2.000/hectare
- Calendrier des cultures:
 - . Irrigation de complément (maïs et haricot) en saison des pluies.
 - . Cycle supplémentaire de tomate dans la période sèche:

Rendement:	29 t/ha
Dépenses fixes:	120 US\$/ha/an
Investissent:	2500 US\$/ha
Cycle végétatif:	120 jours
- Efficience de l'irrigation: 50%

4.7.2 - DIMENSIONNEMENT

En prenant en considération les critères mentionnés ci-dessus, on trouve un volume de l'açude optimal théorique de l'ordre de **50% du volume écoulé annuel moyen**.

On peut, selon ces calculs, prévoir une surface de un hectare de périmètre irrigué pour chaque 50.000 m^3 d'écoulement moyen annuel.

A titre d'exemple, pour un volume écoulé annuel moyen de 1 million de m^3 , l'optimum économique trouvé a été de ($V_{\text{açude}} = 600.000 \text{ m}^3$, $S_{\text{périmètre}} = 20 \text{ ha}$) avec un Taux Interne de Retour (T.I.R.) de l'ordre de 25% (ce taux est très variable en fonction des paramètres économiques).

La paire ($V_{\text{açude}} = 300.000 \text{ m}^3$, $S_{\text{périmètre}} = 10 \text{ ha}$) fournit un T.I.R. peu inférieur (23%) et a été considéré comme un compromis acceptable, puisque notre modélisation suppose une gestion parfaite du périmètre, rarement atteint dans la pratique.

Ces valeurs devront être modifiées, si l'açude doit aussi servir de réserve pour l'alimentation.

Afin d'assurer l'alimentation neuf années sur dix, en garantissant un niveau minimum de 2 mètres dans l'açude, on peut soit réduire le périmètre soit augmenter l'açude.

- La réduction du périmètre devra être de 50%. Ceci entraînera une diminution de la rentabilité économique et du T.I.R. (qui passera, dans notre exemple, à 18%, pour un périmètre de 5 ha).

- La capacité de l'açude devra être augmentée jusqu'à 60% - 70% du volume annuel moyen écoulé.

Dans ce cas, le volume déversé annuel moyen passe de 75% à 60% du volume écoulé annuel moyen mais, surtout, l'irrégularité des déversements (qui représente le volume qui sera encore disponible en aval) augmente (l'açude ne déverse plus qu'un an sur deux, valeur qui peut varier en fonction de l'irrégularité du régime pluviométrique local).

Notons encore que:

- Un açude de volume égal (ou supérieur) au volume annuel écoulé moyen pourra irriguer un périmètre doublé (20 ha, dans notre exemple) sans réduire beaucoup la sécurité de l'alimentation.
- Pour un tel açude, seulement 50% des écoulements seront transmis en aval par le déversoir. L'irrégularité des déversements augmentera beaucoup, puisque l'on n'observe des déversements que 4 années sur 10.
- Pour un açude de volume égal au double du volume écoulé annuel moyen, seulement 30% des écoulements seront transmis, les déversements ne survenant que 2(ou3) années sur 10. Dans ce cas, les conditions sont propices à une concentration par évaporation des sels dans l'açude.
- Le volume d'alimentation humaine ou animale considéré est, généralement, petit par rapport au volume de l'açude ($20 \text{ m}^3/\text{jour}$, dans notre exemple avec $V_x = 300.000 \text{ m}^3$, ce qui correspond à peu près à 2 camions citerne et à l'alimentation du bétail local). Pour des açudes intensivement utilisés pour l'alimentation (par exemple, d'une ville) une étude particulière est indispensable qui pourra conduire à augmenter le volume de l'açude.
- Le choix entre la réduction du périmètre et l'augmentation de l'açude dépend beaucoup de la géométrie et de la topographie du site, qui, par exemple, risque de ne pas permettre l'augmentation de l'açude.
- Les calculs et les normes indiquées ci-dessus peuvent varier pour des açudes de forme anormale, soit très ouverts (coefficients K élevés et donc peu profonds), soit, au contraire, encaissés et très profonds. Pour des volumes identiques, le second cas est beaucoup plus avantageux, puisqu'il permet une réduction des volumes évaporés (garantissant ainsi un meilleur rendement hydraulique et une plus grande sécurité.).

4.8 - CALCUL DE LA CRUE DE PROJET

ETAPE 8

4.8.1 - ORIGINE DES FORTES CRUES

4.8.1.1 - DEFINITIONS ET EXPLICATIONS GENERALES

PRECIPITATIONS:

La précipitation qui tombe sur un petit Bassin Versant d'Alimentation (BVA) peut être caractérisée par plusieurs paramètres. Nous pouvons citer, par exemple:

- La lame moyenne totale précipitée (en mm)
- Le volume total précipité (en m³) qui correspond au produit de la lame précipitée en m par la surface du BVA en m².
- Les intensités (ou les hauteurs) maximums de précipitations pour divers intervalles de temps en mm/h (ou en mm).
- La répartition spatiale des précipitations dans le BVA.

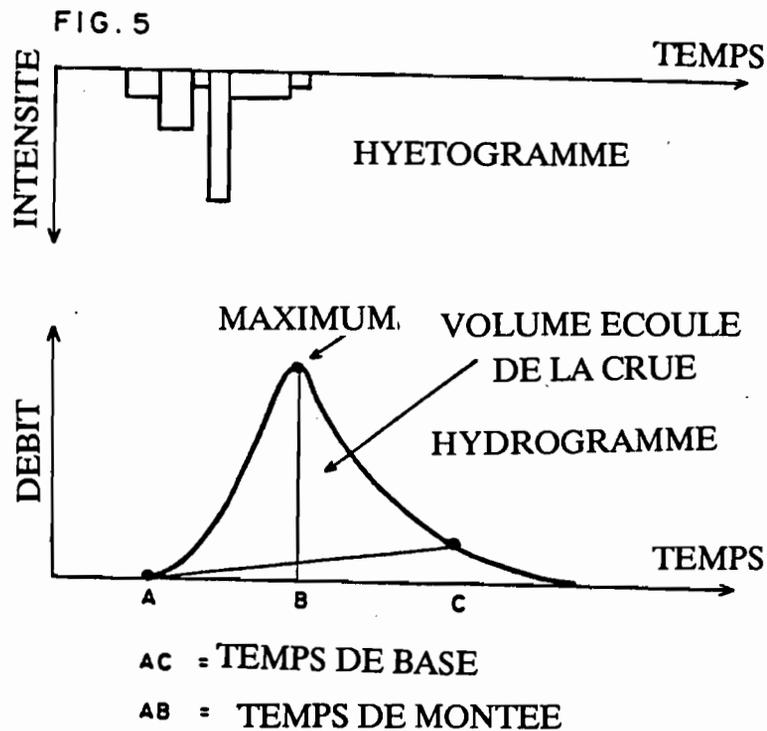
CRUES:

Les fortes crues ont deux caractéristiques principales:

- a) Les volumes et lames écoulés.
- b) Le temps durant lequel le volume de la crue s'écoule.

Ces deux caractéristiques permettront le calcul du débit maxima appelé **débit de pointe** dont la connaissance est primordiale pour l'élaboration de tout projet. C'est ce débit de pointe qui est le plus souvent responsable des catastrophes et dégats causés par les crues (inondations, ruptures d'açudes ou de ponts); son contrôle exige souvent de fortes dépenses.

En schématisant beaucoup la réalité, on peut dire que le débit de pointe sera approximativement proportionnel au volume total écoulé et inversement proportionnel au temps de base de la crue.



On appelle **temps de base** le temps compris entre le début et le fin de l'écoulement superficiel. Le temps de base caractérise le temps durant lequel la crue s'écoule, et temps de montée le temps entre le début et le maximum de la crue. Le temps de montée sera utilisé pour le calcul de l'amortissement de la crue dans la retenue.

Le **volume écoulé** de la crue est calculé par l'intégration du débit instantané:

$$V_e = \int_A^C Q(t) dt$$

(Q = débit en m^3/s ; V_e = volume écoulé en m^3).

On appelle **lame écoulée** (L_e) une lame d'eau fictive qui, répartie sur toute la surface du BVA aurait un volume égal au volume écoulé. La lame écoulée peut être directement comparée avec la lame précipitée.

On appelle **coefficient d'écoulement** le rapport entre le volume (ou la lame) écoulé et précipité.

PERIODE DE RETOUR

La plus grande partie des paramètres antérieurs, qui servent à caractériser les crues, peuvent être analysés en termes statistiques et fréquentiels pour déterminer les caractéristiques de crues de fréquence ou de période de retour déterminée.

Ainsi, par exemple, la valeur de la **période de retour décennale** du volume, du débit de pointe d'une crue ou de l'intensité de précipitation en 10 minutes sera la valeur du paramètre en question qui sera égale ou dépassée en moyenne une fois chaque dix ans (ou soit, par exemple 10 fois en cent ans, etc...).

Les paramètres des crues décennales des petits Bassins Versants représentatifs étudiés par la SUDENE ont été systématiquement étudiés et sont relativement bien connus.

CRUE DE PROJET

Le dimensionnement des ouvrages de protection contre les crues doivent être fait pour une fréquence bien supérieure à dix ans. En effet, on ne peut pas admettre de construire des açudes ou des ponts qui s'effondreraient tous les dix ans!

Nous choisirons, arbitrairement, pour les **crues de projet** des valeurs de débit de pointe et de volume écoulé correspondant au double des valeurs décennales. La période de retour théorique de ces valeurs oscille, selon nos estimations, entre 100 et 150 ans, ce qui correspond à une norme acceptable pour de petits aménagements. Si l'on veut dimensionner les ouvrages pour des périodes de retour différentes, il suffira de majorer ou de minorer les valeurs que nous proposons d'un certain pourcentage correctif ; ainsi, par définition les valeurs décennales seront obtenues en les multipliant par 0,5 etc.

4.8.1.2 - PRECIPITATIONS : TOTAUX ET INTENSITES

Les plus fortes crues des petits bassins du Semi-aride, sont généralement provoquées par de fortes précipitations d'origine convective.

Or on constate d'une part qu'il ne survient que très rarement plus d'une forte précipitation convective par période de 24 h, d'autre part que la **distribution statistique de ces fortes précipitations**, qui ont souvent, la même origine climatique, est assez **homogène** dans tout le Nordeste Semi-aride.

HAUTEURS DE PLUIE EN FONCTION DE LA FREQUENCE

Fréquence	Durée					
	24 h	2h	1h	30'	10'	5'
Biennale (1 fois tous les 2 ans)	63 à 80mm	60mm	45	32	16	10
Décennale (1 fois tous les 10 ans)	100 à 115mm	80	60	41	20	13
Centennale (1 fois tous les 100 ans)	140 à 165mm	110	80	52	27	17

On observe que 56% du total en 24 h tombe en moins de 1 heure et 75% en moins de 2 heures.

4.8.1.3 - VARIATIONS DU VOLUME ECOULE

La plus grande partie des sols, à l'exception des ceux qui sont très perméables, ont un comportement relativement homogène face aux précipitations exceptionnelles. En effet, une fois le sol saturé, toute précipitation supplémentaire devra obligatoirement s'écouler. En schématisant, on peut dire que les écoulements provoqués par les fortes précipitations seront égaux au volume de la précipitation diminué d'une quantité fixe qui correspond à l'eau retenue dans le sol.

Comme nous l'avons vu, les intensités des fortes précipitations sont, elles aussi, relativement homogènes dans tout le Nordeste Semi-aride. On peut, donc déduire que la lame écoulée des fortes crues présenteront une variation relativement faible dans la plus grande partie du Nordeste, en tous les cas sur les petits bassins de perméabilité moyenne à basse.

Par conséquent les volumes écoulés des fortes crues seront principalement fonction de la surface du BVA.

4.8.1.4 - VARIATIONS DES TEMPS D'ECOULEMENT DES CRUES

Les temps d'écoulement des crues (**temps de base et temps de montée**) dépendront du temps que mettront les pluies pour s'écouler jusqu'à l'exutoire du bassin.

Ces temps dépendront principalement de:

- a) La **dimension** du BVA (Surface et forme).
- b) La **vitesse et les temps de transfert** des écoulements dans les lits des cours d'eau qui seront fonction du relief, de la pente et des obstacles dans les lits: courbes, méandres, pierres, végétation etc.
- c) La **forme du réseau hydrographique** de drainage du bassin versant d'alimentation. Ainsi, par exemple, les petites rivières sont beaucoup plus dangereuses quand elles convergent simultanément vers l'exutoire du bassin, au lieu d'être réparties le long du cours d'eau principal.

4.8.2 - CALCUL DU DEBIT DE POINTE DE LA CRUE DE PROJET

La débit de pointe de la crue de projet est calculé par les formules:

$$Q_x = 25 * (S_c)^{0,58} * F_c \quad \text{pour } S_c > 5 \text{ km}^2$$

$$Q_x = 17 (S_c)^{0,8} * F_c \quad \text{pour } S_c < 5 \text{ km}^2$$

Où: Q_x (m^3/s) est la débit de pointe de la crue de projet.

S_c (km^2) est la surface de bassin effective de contribution de crue.

F_c est le facteur de correction de crue.

Débit maximums en fonction de la surface (sans correction)
(Calculés à l'aide des formules précédentes)

$S(\text{km}^2)$	0,1	0,5	1	2	5	10	20	50	100	200	500
$Q(\text{m}^3/\text{s})$	2,7	9,8	17	30	62	95	142	242	361	540	920

4.8.2.1 - DETERMINATION DE LA SURFACE DE BASSIN EFFECTIVE DE CONTRIBUTION DE CRUE SC (KM²)

- Calculer la surface S3 couverte de sols des groupes 3 et 4 (ce sont les plus dangereux).
- Calculer la surface S2 couverte de sols du groupe 2.
- Calculer la surface S1 couverte de sols du groupe 1.

Sc est ensuite calculé par la formule $Sc = 0,1 S1 + 0,5 S2 + S3$

Remarquons que si le bassin ne contient que des sols des groupes 3 et 4, Sc sera égal à la surface totale du bassin

4.8.2.2 - DETERMINATION DU FACTEUR CORRECTIF FC

En conditions normales, tous les coefficients présentés dans ce chapitre ont la valeur 1. Il ne faudra effectuer une correction que lorsque le BVA présente des caractéristiques spéciales.

Fc est un facteur de correction qui peut varier entre 0,5 et 1,2 qui intègre corrections provenant des facteurs suivants:

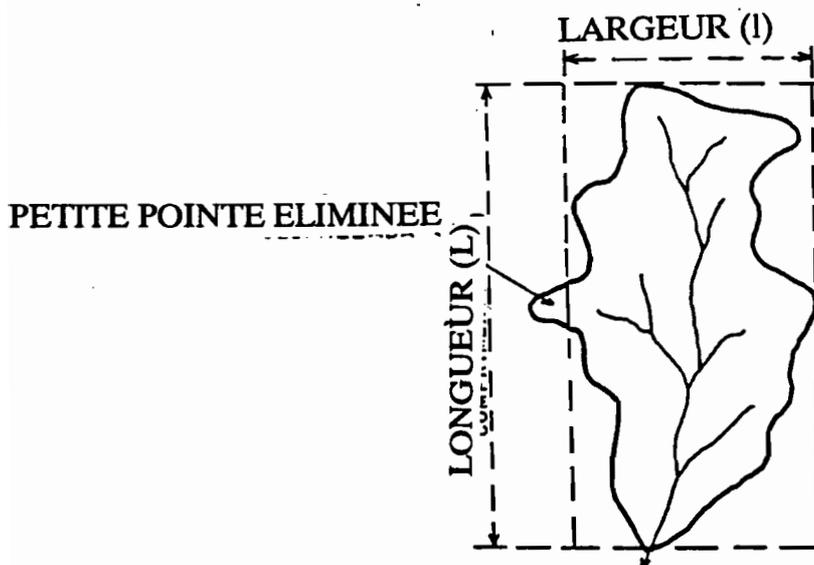
- forme et contours du Bassin Versant d'Alimentation (Coefficient C_{form});
- forme du réseau de drainage (Coefficient C_{dren});
- relief (Coefficient C_{rel});
- existence de dépressions ou de lacs (Coefficient C_{lag});
- existence de zones particulièrement dégradées, susceptibles de présenter des sols compactés et presque imperméables (Coefficient C_{degr});
- conditions climatiques spéciales BVA (Coefficient C_{clim}).

Fc est calculé par la formule:

$$F_c = C_{form} \times C_{dren} \times C_{rel} \times C_{lag} \times C_{degr} \times C_{clim}$$

a) INFLUENCE DE LA FORME DU BVA (COEFFICIENT CORRECTIF C_{form})

FIG. 6 FORME DU BASSIN D'ALIMENTATION (BVA)



On doit déterminer sur la carte la longueur et la largeur maxima du BVA L et l, en négligeant éventuellement les petites excroissances du contour qui pourraient altérer beaucoup les résultats. Nous avons choisi le rapport L/l pour représenter simplement la compacité du bassin.

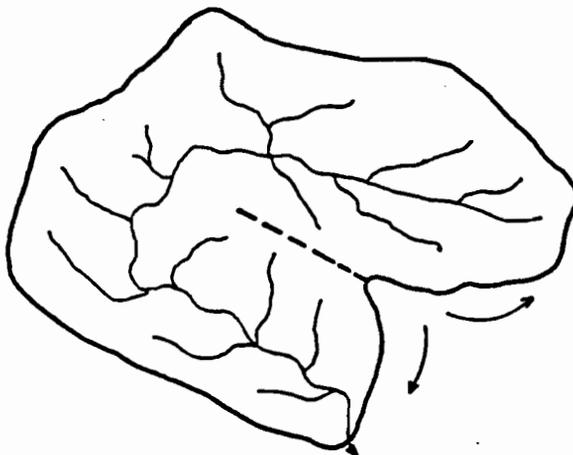
Le Tableau suivant fournit les valeurs du coefficient C_{form} qui doivent être appliquées. Indiquons aussi, à titre informatif, les valeurs du coefficient de forme de "Gravelius" (de forme plus compliquée, mais plus utilisée et familière des hydrologues).

		Coefficient C_{form}						
L	l	1	2	3	4	5	6	7
C_{form}		1	1	0,85	0,75	0,70	0,65	0,63
Coefficient de Gravelius		1,12	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7

OBS: Il faudra traiter de manière spéciale le cas particulier de bassin dont le cours d'eau principal est "replié sur lui-même" comme le montre la figure 7.

Dans ce cas L et l devront être évalués "dédoublant" ou en rectifiant fictivement le bassin. On sera ainsi amené à considérer des valeurs de L et l, respectivement bien plus grandes et bien plus petites, que les L et l initiaux.

FIG. 7 BASSIN REPLIE SUR LUI-MEME

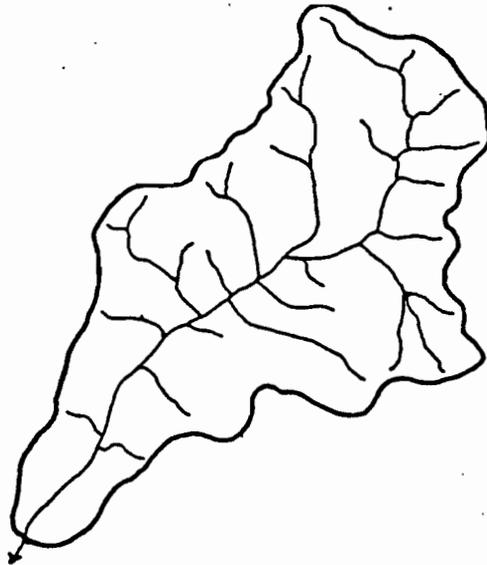


b) INFLUENCE DE LA FORME DU RESEAU DE DRAINAGE: COEFFICIENT C_{dren}

On peut signaler deux configuration spéciales du réseau de drainage susceptibles d'altérer la forme des crues et qui impliqueront donc des valeurs du coefficient C_{dren} différentes de 1:

- 1) Réseau de drainage en "arête de poisson". Lorsque le talweg principal occupe une position centrale avec plusieurs affluents d'importance secondaire des deux cotés.
Les crues de ce type de bassin sont moins dangereuses. C_{dren} peut être diminué, au maximum de 25%, il variera donc, dans le cas du réseau en arête de poisson, entre 0,75 et 1,0.

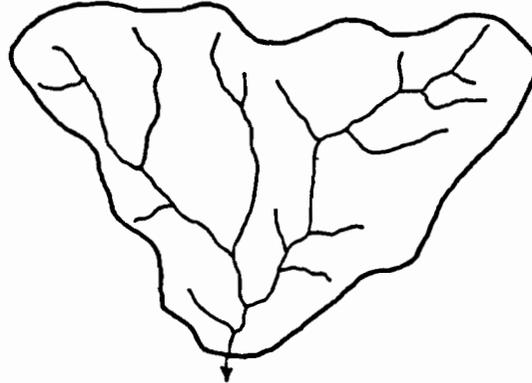
FIG. 8

RESEAU DE DRAINAGE EN ARETE DE POISSON

2) Réseau de drainage "radial". Lorsqu'un talweg principal est formé par la convergence de deux ou plusieurs cours d'eau d'égale importance qui se réunissent dans la sa partie en aval. Les crues de ce type de bassin seront plus dangereuses. C_{dren} peut être augmenté au maximum de 15%, il variera donc, dans le cas du réseau radial, entre 1 et 1,15.

FIG. 9

RESEAU DE DRAINAGE RADIAL

Valeurs du coefficient C_{dren}

Aspects du Réseau de drainage	Valeurs du coefficient C_{dren}
Normal	1
Arête de poisson	0,75 à 1
Radial	1 à 1,20

c) INFLUENCE DU RELIEF DU BVA: COEFFICIENT C_{rel}

Le coefficient C_{rel} peut varier entre 0,6 et 1,1. Le relief de référence correspond à un relief ondulé à fort avec pentes transversales de l'ordre de 10 à 15% et longitudinales de 0,5 à 2%.

Quand le relief est beaucoup plus fort (c'est à dire, montagneux ou escarpé selon la classification brésilienne), C_{rel} pourra s'élever jusqu'à 1,10 ou exceptionnellement jusqu'à 1,20 lorsque le lit des rivières sera lisse et dépourvu de végétation (ce qui induira de faibles coefficients de MANNING et permettra ainsi une évacuation rapide des crues).

Valeurs du coefficient C_{rel}

RELIEF	Montagneux et Escarpé	Fort à Ondulé	Ondulé	Faible à Ondulé	Plan
PENTES	> 25%	15 à 25%	15 - 8%	3 - 8%	0 - 3%
C_{rel}	1,1 à 1,2	1	1	0,8	0,6

d) INFLUENCE DES DEPRESSIONS ET DES LACS (COEFFICIENT CORRECTIF C_{lag})

Les lacs et les dépressions peuvent diminuer sensiblement les débits de pointe, spécialement lorsque ils sont situés dans la partie aval du bassin.

Ainsi, par exemple, RIBSTEIN (1985) évalue à 20 à 30% la diminution du débit de pointe provoquée par une dépression, couvrant 5% de la surface totale du bassin et située dans sa partie aval.

e) INFLUENCE DES ZONES DE SOLS COMPACTES OU TRONQUÉS (COEFFICIENT C_{degr})

Les zones dont la végétation a été dégradée et/ou les sols tronqués ou compactés, généralement par l'action de l'homme, peuvent accroître sensiblement le volume écoulé et le débit de pointe.

Ces zones très imperméables peuvent être constituées de croûtes ("pellicules de surface"), de zones compactées par l'homme ou de zones de sols "tronqués", c'est à dire, dont les premières couches ont été déblayées par l'érosion.

Nous recommandons l'application d'une correction $Facr$ de 50% pour les unités de sol des groupes 3 et 4. Pour les unités de sol du groupe 1 et 2, cette correction vaut 100%.

La correction doit être proportionnelle à la partie du bassin réellement dégradée.

Ainsi, par exemple, dans le cas d'un bassin composé de sols du groupe 3 et présentant des dégradations importantes sur une proportion $Sdegr = 20\%$ de sa surface, aura un coefficient C_{degr} de 1,10, calculé de la manière suivante :

$$C_{degr} = 1 + Facr \times Sdegr = 1 + 0,5 \times 0,20 = 1,10$$

$$\text{Si les sols du bassin avaient été du groupe 2, la correction serait: } C_{degr} = 1 + 1,00 \times 0,20 = 1,20$$

Soulignons que cette correction C_{degr} ne devra être réalisée que lorsque une partie importante du BVA (supérieure, dans tous les cas à 10 et 15%) est effectivement dégradée. Ainsi, il ne faut pas prendre en compte des dégradations localisées et de petite surface: routes, terrain de football etc.).

f) Corrections CLIMATIQUES (COEFFICIENT C_{clim})

Malgré la relative homogénéité, dans le Nordeste Semi-aride, des caractéristiques des intensités et des fortes précipitations en 24 h, il faut, dans certains cas appliquer une correction climatique.

Ainsi, dans la zone de transition on évalue le coefficient C_{clim} aux alentours de 0,75 à 0,80. On peut aussi rencontrer des microclimats qui correspondront à des valeurs de C_{clim} supérieures à 1, pouvant atteindre 1,1 à 1,2. En attendant une étude et une délimitation systématique de ces zones, on peut appliquer de manière provisoire un coefficient de 1,1 à 1,2, lorsque une analyse statistique des précipitations en 24 h, montre des valeurs nettement supérieures à celles présentées dans le Tableau du paragraphe 4.8.1.2.

g) CALCUL FINAL DU FACTEUR DE CORRECTION F_c

F_c est calculé par la formule:

$$F_c = C_{form} \times C_{dren} \times C_{rel} \times C_{larg} \times C_{degr} \times C_{clim}$$

F_c ne peut être inférieur à $0,5 * C_{clim}$. Dans ce cas adopter l'équation: $F_c = 0,5 * C_{clim}$.

F_c ne peut être supérieur à $1,2 * C_{clim}$. Dans ce cas on admet l'équation: $F_c = 1,2 * C_{clim}$.

Rappelons que F_c est utilisé pour calculer le débit maxima de la crue de projet à l'aide des formules:

$$Q_x = 25 * (S_c)^{0,58} * F_c \quad \text{pour } S_c > 5 \text{ km}^2$$

$$Q_x = 17 (S_c)^{0,8} * F_c \quad \text{pour } S_c < 5 \text{ km}^2$$

4.8.3 - AUTRES CARACTERISTIQUES DES CRUES

Les volumes écoulés et les lames écoulées des crues de projet peuvent être calculées par les équations suivantes: (valides pour $S > 5 \text{ km}^2$).

$$V_e (\text{m}^3) = 102.000 S^{0,85}$$

$$L_e (\text{mm}) = 102 S^{-0,15}$$

Les Figures 10 et 11 et le Tableau suivant montrent la relation du temps de base (T_{bmed}) des fortes crues en fonction de la surface.

Temps de base moyen des crues en fonction de la surface

Surface (km^2)	5 km^2	10	20	50	100	200	500	1000
Temps de base	7	8h30'	10	13,5	16	18	22	25

Le temps de montée moyen T_{smed} varie entre:

$$T_{smed} = 0,1 T_{bmed}$$

$$\text{et } T_{smed} = 0,2 T_{bmed}$$

Le temps de montée est utilisé pour le calcul de l'amortissement de la crue dans la retenue.

4.9 - RISQUE DE RUPTURE DES BARRAGES SITUES EN AMONT
(en élaboration)

E T A P E 9

4.10 - AMORTISSEMENT DES CRUES DANS LA RETENUE
(en élaboration)

E T A P E 10

4.11 - DIMENSIONNEMENT DU DEVERSOIR
(en élaboration)

E T A P E 11

FIG. 10 **CARACTERISTIQUES DES CRUES**
 TEMPS DE BASE MOYEN EN FONCTION DE LA SURFACE DU BVA
 BASSINS DES ZONES CRISTALLINES

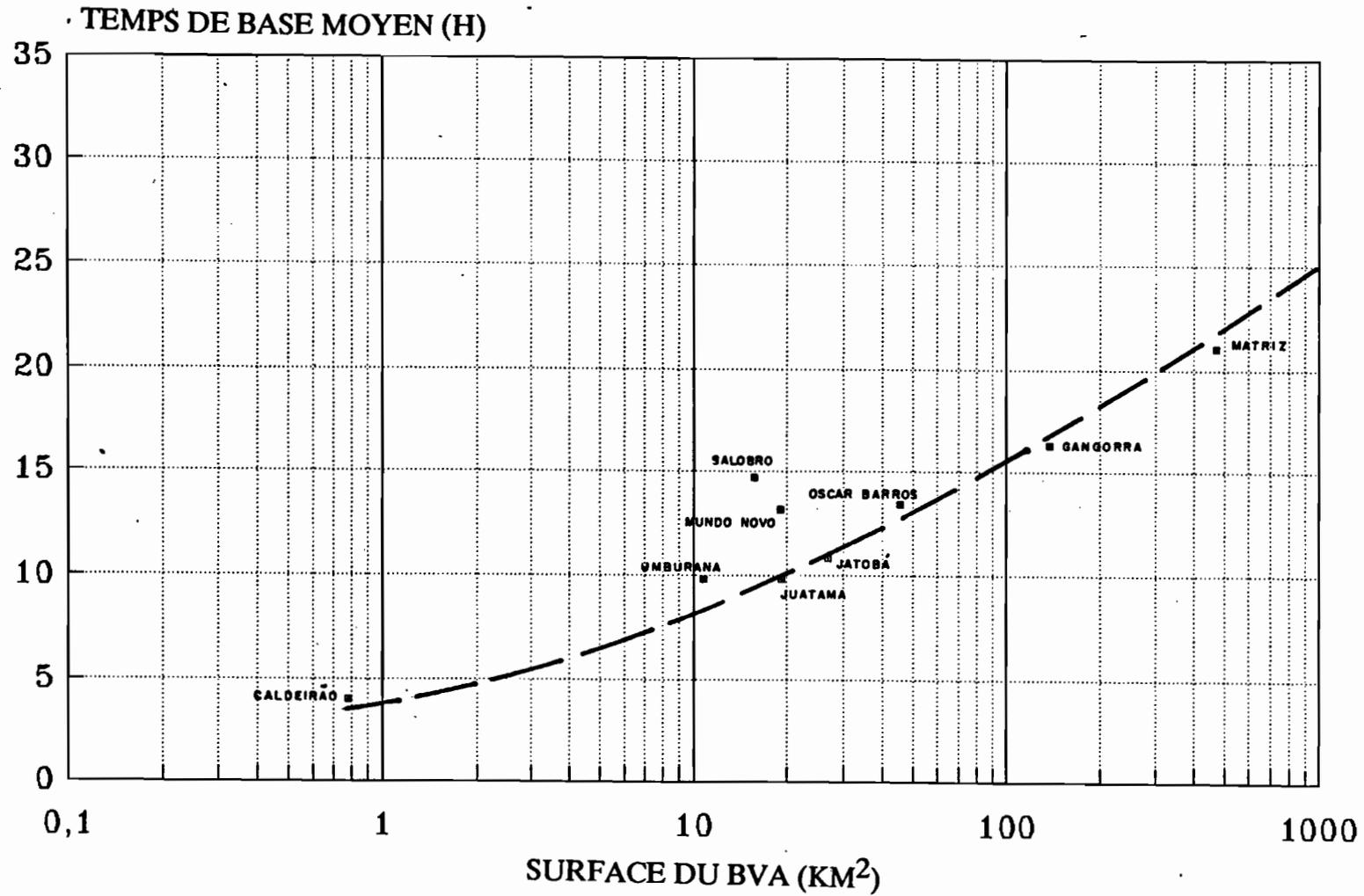
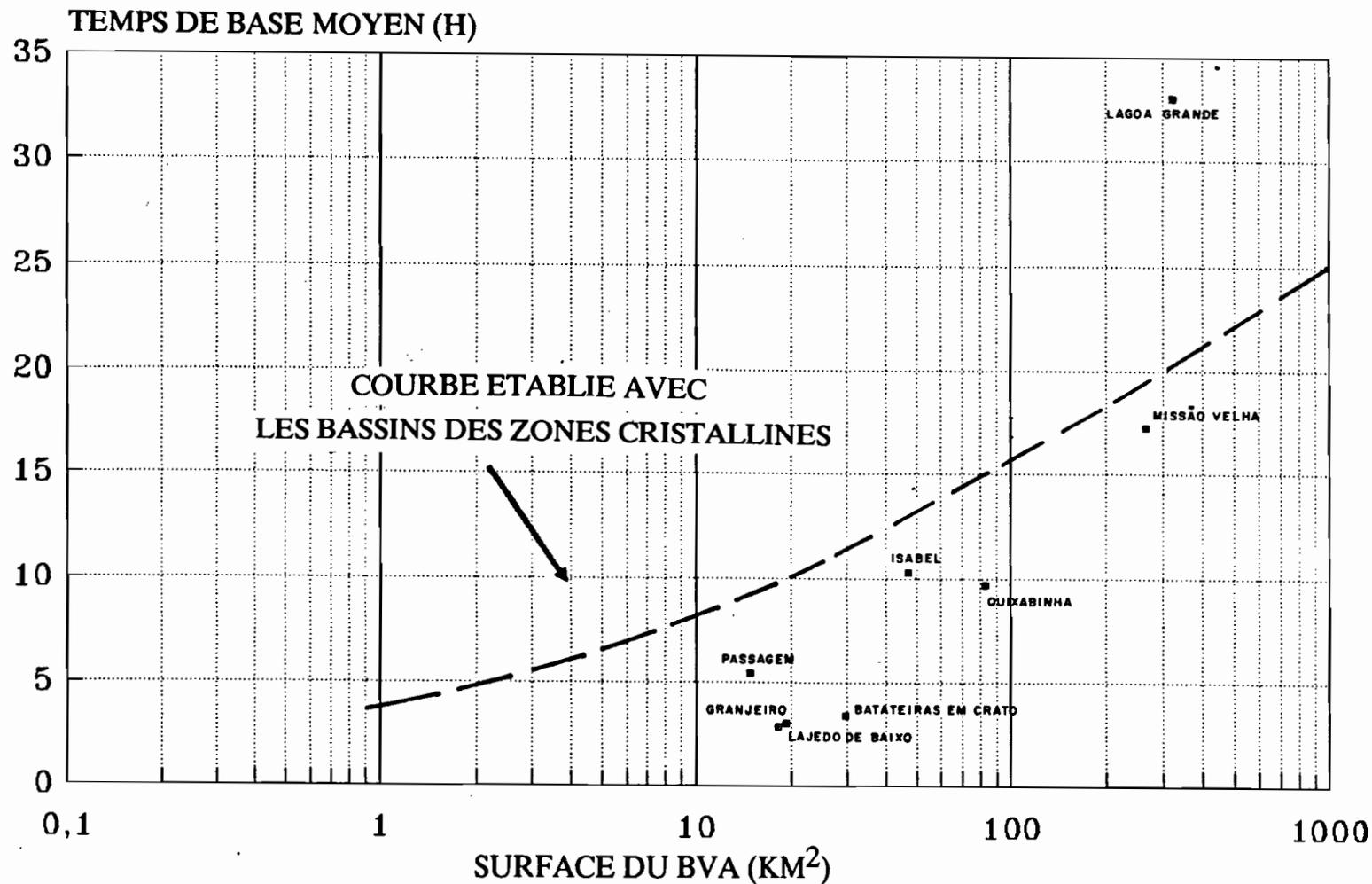


FIG. 11

CARACTERISTIQUES DES CRUES

TEMPS DE BASE MOYEN EN FONCTION DE LA SURFACE DU BVA
BASSINS DES ZONES SEDIMENTAIRES



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AGUIAR, F.G. de - Estudo hidrométrico do Nordeste Brasileiro. IFOCS.B., Rio de Janeiro, jan/mar, 1940. V. 13, n. 1.
- ASSUNÇÃO, M.S. de; LEPRUN, J.C.; CADIER, E. Avaliação dos recursos hídricos das pequenas bacias do Nordeste semi-árido: Açú, Batateiras, Missão Velha e Quixabinha; características físico-climáticas. (Síntese dos resultados). Recife, SUDENE-DRN-HME, 1984. 52p.il. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 22). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- BARRETO, F.H.; LEPRUN, J.C.; CADIER, E.; Cavalcante N. Ma. da C; HERBAUD. J. J. M. Classificação hidrológica de pequenas bacias hidrográficas no Nordeste semi-árido. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, VIII. ABID, Foz do Iguaçu, 1989. Anais do..., V.1, p. 666-676. S. Paulo, 1989.
- BERTON, S. La maîtrise des crues dans les bas-fonds. Petits microbarrages en Afrigue de l'ouest. Paris, 1988. 474 p. il. Dossier no 12. GRET (Groupe de Recherche et d'échanges Technologiques).
- BORGES, M.C. de A. Estudo hidro-agronômico de 47 açudes no Nordeste Brasileiro. Recursos Naturais, Meio ambiente e poluição. Rio de Janeiro, SUPREN, IBGE, 1977. v. 1. p. 123-40.
- Brasil.MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. Levantamento exploratório - reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco. Recife, 1973, 359 p. (Boletim Técnico, 26, v.1.)/(1972, 354 p. Boletim Técnico, 26, v.2).
- Brasil.MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. Levantamento exploratório - reconhecimento de solos do Estado do Ceará. Recife, 1973, 301 p. (Boletim Técnico, 28, v.1.)/(1973, 502 p. Boletim Técnico, 28, v.2).
- Brasil.SUDENE. Plano de Aproveitamento Integrado dos Recursos Hídricos do Nordeste do Brasil. Recife, 1980. Fase I, 13 volumes.
- Brasil.SUDENE.Divisão de Hidrogeologia. Mapa hidrogeológico do Nordeste (folha 9). Recife, 1968.
- Brasil.SUDENE.CISAGRO.COOPERAÇÃO FRANCESA/ORSTOM - Estudo da Pequena Açudagem na Região do Alto Pajéu/PE. Recife, SUDENE. 1988. 118p.
- Brasil.SUDENE.GEVJ. Estudo Geral de Base do Vale do Jaguaribe. Recife, 1967. SUDENE/ASMIC, V.5, Monografia Hidrológica, Bibliografia.
- CADIER, E. Método de avaliação dos escoamentos nas pequenas bacias do Semi-árido. Recife, SUDENE-DRN-HME, 1984. 75 p. il. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 21). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- CADIER, E; ALBUQUERQUE, C.H.C de; ARAJO FILHO, P.F.; NASCIMENTO. P.H. de A.; MONTGAILLARD, M. Dimensionamento de pequenos reservatórios superficiais do Nordeste semi-árido. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, VIII. ABID, Foz do Iguaçu, 1989. Anais do..., V. 1, p. 202-225 S. Paulo, 1989.
- CADIER, E.; COCHONNEAU, G.; GUSMÃO, A.C.S. Estudo estatístico das precipitações diárias no Estado de Pernambuco. In: Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, IV. Fortaleza, 1981. Anais do... ABRH. v.1. p. 414-22.
- CADIER, E.; FREITAS, R.J. Bacia Representativa de Sumé. Primeira estimativa dos recursos de água. Campanhas 73/80. Recife, SUDENE-DRN, 1983. 180 p. il. (Brasil. SUDENE.Hidrologia, 14). "Convênio SUDENE/ORSTOM".

- CADIER, E.; FREITAS, R.J. LEPRUN, J.C. Bacia Experimental de Sumé-PB; instalação e primeiros resultados. In: Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, V. Blumenau, 1983. Anais do... Blumenau, ABRH, 1983. v. 1. p. 69-90.
- CADIER, E.; LANNA, A.E.; MENEZES, M. et al. - Avaliação dos estudos referentes aos Recursos Hídricos das pequenas Bacias do Nordeste Brasileiro. In: Simpósio Brasileiro de Hidrologia e de Recursos Hídricos, VII. Anais do.... ABID, Salvador, 1984.
- CAMPELLO, S. Modélisation de l'écoulement sur des petits cours d'eau du Nordeste (Brésil). Paris, ORSTOM, 1979. 121 p.il. Bibliografia, Tese.
- CAMPELLO, S.; et al. Planificação, instalação e operação de uma rede de bacias representativas em fase de rotina: experiência da SUDENE. In: Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, V. Blumenau, 1983. Anais do... Blumenau, ABRH, 1983. v.1. p. 25-38.
- CASENAVE, A.; VALENTIM, C. Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. Paris, 1989. Editions de l'ORSTOM. 229 p.
- CIEH - Département Hydrologie. Etude des pluies journalières de fréquence rare dans les états membres du CIEH. Rapport de synthèse. CIH, Ouagadougou, 1985.
- DNAEE (Departamento Nacional de águas e Energia Elétrica). Mapa de disponibilidade hídrica do Brasil. Recife, 1984.
- DUBREUIL, P. Le rôle des paramètres caractéristiques du milieu physique dans la synthèse et l'extrapolation des données hydrologiques recueillies sur bassins représentatifs. In: Symposium sur les Résultats de Recherches sur Bassins Représentatifs et Expérimentaux. Wellington. AISH-Publication, 96. 1970.
- EMBRAPA. Seleção de áreas e Construção de Barreiros para Uso de Irrigações de Salvação no Trópico Semi-árido. Circular Técnica 3. Petrolina, 1981.
- ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. Agricultural Research Service. Soil and water conservation Research Division. Field manual for research in agricultural hydrology. Washington D.C., 1986, 214 p. (Agriculture Handbook, 224).
- ESTADOS UNIDOS. Bureau of Reclamation Publications. Design of Small Dams. 856 p. Third edition 1987. 2 maps cloth Bound.
- France.Ministère de l'Agriculture.Groupe de travail permanent pour les barrages en aménagement rural. Techniques des barrages en aménagement rural. Paris, 1977. 325 p.
- HARGREAVES, G. Monthly precipitation probabilities for Northeast Brazil. S.L. University Utah State, Departement of Agricultural and Irrigation Engineering, 1973. 423 p.
- HERBAUD, J.J.M.; MAGALHÃES, F.X. de; CADIER, E.; et al. Bacia Representativa de Juatama. Relatório Final. Recife, SUDENE-DPG-PRN-HME, 1989. 153 p. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 24). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- HERBBAUD, J.J.M.; LINS, M.J.A; ASSUNÇÃO, M.S. de; et al. Bacia Hidrográfica Representativa de Ibipecta. Relatório Final. Recife, SUDENE-DPG-PRN-HME, 1989. 219 p. (Brasil.SUDENE. Hidrologia, 27). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- HIEZ, G. Processamento dos dados pluviométricos do Nordeste. 2a Parte - A. Homogeneização dos dados. Método do Vetor Regional. Recife, SUDENE-DRN-HME, 1978. "Convênio SUDENE/ORSTOM".

- LARAQUE, A. SIMSAL: Um modelo de previsão da salinização dos açudes do Nordeste brasileiro. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, VIII. ABID, Foz do Iguaçu, 1989. Anais do..., Salvador, 1989.
- LARAQUE, Alain; Estudo e previsão da qualidade da água dos açudes do Nordeste semi-árido Brasileiro. Recife, SUDENE-DPG-PRN-HME, 1989. 91 p. il. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 26). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- LEPRUN, J.C. Primeira avaliação das águas superficiais do Nordeste Relatório de fim de convênio de manejo e conservação do solo do Nordeste brasileiro. Recife, SUDENE-DRN, 1983. 91 - 141p. "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- LEPRUN, J.C.; ASSUNÇÃO, M.S.; CADIER, E. Avaliação dos recursos hídricos das pequenas bacias do Nordeste semi-árido. Características físico-climáticas. (Primeira síntese dos resultados obtidos). Recife, SUDENE-DRN-HME, 1983. 71 p. il. mapas. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 15). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- MOLLE, F. Perdas por evaporação e infiltração em pequenos açudes. Recife, SUDENE-DPG-PRN-GT.HME, 1989. 172p. (Brasil. SUDENE. Hidrologia, 25). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- MOLINIER, M. Homogeneização e zoneamento da pluviometria anual no Nordeste. Recife, SUDENE-DRN, 1989. (Em elaboração). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- NOUVELOT, J.F. Planificação da implantação de Bacias Representativas. Aplicação à área da SUDENE. Recife, SUDENE-DRN, 1974. 91 p. ilustr. Bibliografia original: Planification d'implantation de bassins versants représentatifs. "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- NOUVELOT, J.F.; FERREIRA, P.A.S.; CADIER, E. Bacia Representativa do Riacho do Navio. Relatório Final. Recife, SUDENE-DRN-HME, 1979. 193 p. il. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 6). Bibliografia. "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- PPAFSTETTER, O. Chuvas intensas no Brasil. Departamento Nacional de Obras de Saneamento, 1957.
- PUECH, C.; CHABI-GONNI, D. Méthode de calcul des débits de crue décennale pour les petits et moyens bassins versants en Afrique de l'Ouest et Centrale (2e édition). CIEH, Ouagadougou, 1984. 91 p.
- PUNGS, J.P.; CADIER, E. Manual de Utilização dos Sistemas BAC e DHM. Banco de Dados Hidrometeorológicos da SUDENE. Recife, SUDENE-DRN-HME, 1985. 139 p. il. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 23). "Convênio SUDENE/ORSTOM".
- RIBSTEIN, P. Modèles de crues et petits bassins versants au sahel. Montpellier, 1990. 317 p. Université des Sciences et Techniques du Languedoc (These de Doctorat).
- RODIER, J.A., RIBSTEIN, P. Estimation des caractéristiques de la crue décennale pour les bassins versants du SAHEL couvrant 1 à 10 km². Montpellier, 1988. ORSTOM. 133 p.
- RODIER, J.A. La transposition des résultats des bassins représentatifs et ses problèmes. Cahiers ORSTOM, série Hydrologie. Paris, 1982. 19(2), p. 115-27.
- RODIER, J.A. Evaluation de l'écoulement annuel dans le Sabel tropical africain. Paris, ORSTOM, 1975. 121 p. il. (Travaux et Documents de l'ORSTOM, 46). Bibliografia.
- RODIER, J.A.; AUVRAY, C. Estimation des débits des crues décennales pour les Bassins Versants de superficies inférieures à 200 km². Paris, ORSTOM-CIEH, 1965. 30 p. il.
- RODIER, J.A. - Ecoulement de surface dans les bassins perméables du Sahel. Comparaison avec d'autres bassins perméables tropicaux. Hydrologie continentale. Vol. 4, no 2. Paris, 1990. ORSTOM. p. 123 - 138.

S.C.S. (Soil Conservation Service). Urban Hydrology for small watersheds technical Release 55. Department of agriculture, U.S.A., 1975.

THORNTON, C. W.; MATHER, J.C. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and water balance. Centertan, 1957. Drexel Institut of Technology (Publications in Climatology, 3).

TOEBES, C.; OURIVAEV, V. Representative and experimental bassins, an international Guide for research and Praticce. Paris, UNESCO, 1970.

VIEIRA et al. Descrição da Rede de Bacias Representativas e Experimentais do Nordeste brasileiro. In: Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, V. ABRH, Blumenau, 1983. Anais do... Fortaleza, 1983. v. 1, p. 39-66.

OBS: Cette liste bibliographique n'est absolument pas complète. Il manque en particulier les références de presque toutes les cartes pédologiques et hydrogéologiques ainsi que d'autres références que pourront nous suggérer J.C. LEPRUN, S.CAMPELLO, le BUREC et le DNOCS.

DIMENSIONNEMENT DE PETITS BARRAGES DANS LE NORDESTE BRESILIEN SEMI-ARIDE

ANNEXES

MINUTE INCOMPLETE

Septembre 1990

1. ANNEXE PEDOLOGIQUE

2. NOTES DE CALCUL HYDROLOGIQUE

ANNEXE PEDOLOGIQUE
(PROVISOIRE ET INCOMPLETE)

**1 - REGROUPEMENTS DE SOLS
PROPOSES**

2 - CODES UTILISEES

3 - EXPLICATIONS ET DEFINITIONS

1 - REGROUPEMENTS DE SOLS PROPOSES

Les sols ont été rassemblés en 4 groupes, selon le mécanisme de leurs fonctionnements hydrodynamiques.

Pour chaque groupe décrit, nous fournirons les informations suivantes:

- a) Caractéristiques et fonctionnement hydrodynamique qui ont justifié le regroupement;
- b) Définition de sous-groupes et valeur de L_{600} du sous-groupe (L_{600} est utilisé pour le calcul des lames écoulées);
- c) Liste des sols de chaque groupe et sous-groupe, en conformité avec les légendes des cartes pédologiques.

GROUPE 1:

Sols épais, de texture sableuse, excessivement drainés et caractérisés par un écoulement nul ou très faible.

. SOUS-GROUPE 1.1 - Valeur de $L_{600} = 0$ mm

Sables Quartzeux eutrophiques et dystrophiques - (AQd, AQe et AQa), Sables Quartzeux marins dystrophiques (Amd) et Dunes (D).

Liste des sols du sous-groupe 1.1:

- | | |
|-------|---------|
| - AQ | - (Amd) |
| - AQd | - (AM) |
| - AQe | - (D) |

. SOUS-GROUPE 1.2 - Valeur de $L_{600} = 3$ mm

Regosols eutrophiques et dystrophiques (REe et REd). Seulement quand ces sols n'ont pas d'horizon "fragipan" à une profondeur inférieure à 120 cm.

Liste des sols du sous-groupe 1.2:

- RE
- REe
- REed

GROUPE 2:

Sols profonds, de texture moyenne à argileuse, très bien à bien drainés et qui présentent un écoulement faible à moyen.

. SOUS-GROUPE 2.1 - Valeur de $L_{600} = 5$ mm

Latosol Ras, Cambisols eutrophiques et dystrophiques (Ce et C_d), les Latosols Rouge-Jaune et Rouge-Sombre (LV et LE) eutrophiques et dystrophiques (LVe, LVd, LEe), tous de texture moyenne, et, les Regosols eutrophiques et dystrophiques avec fragipan (le fragipan devra survenir à une profondeur de 80 à 120 cm).

Observation: lorsque le fragipan survient à de plus faibles profondeurs, ce sol devra être classé dans un groupe qui ait un L_{600} supérieur à 5 mm.

Liste des sols du sous-groupe 2.1:

- Ce.lat.med.
- (LEH)
- LEe.podz.
- (LR)
- LVd.med.
- LVd.pp.
- LVd.pp.med.
- LVe.med.
- LVe.podz.med.
- REd.frag.
- REe.frag.

. SOUS-GROUPE 2.2 - Valeur de $L_{600} = 10$ mm

Cambisols Eutrophiques, Latosols Rouge-Jaune et Rouge Sombre Eutrophique et Dystrophique, tous de texture moyenne à argileuse (LVe, LEe et LVd).

Liste des sols du sous-groupe 2.2:

- (C_d)
- Ce
- (LA)
- (LE)
- (LEa)
- LEe.med.arg.
- (LV)
- (LVa)
- LVd
- LVd.med.arg.
- (LVdp)
- LVe
- LVed.med.arg.

. SOUS-GROUPE 2.3 - Valeur de $L_{600} = 15$ mm

Latosols et la Terra Roxa, tous de texture argileuse et les Podzoliques Eutrophiques de texture sableuse/moyenne. (LVd, LVe, LEE, TRe et PE).

Liste des sols du sous-groupe 2.3:

- LEE.arg.
- (LV)
- LVd.arg.
- LVd.hum.arg.
- LVd.ind.hum.
- LVe.arg.
- LVe.cam.arg.
- PE.lat.aren/med
- (TR)
- (TRd)
- TRe.arg.
- TRe.podz.arg.
- (TRSa)
- (TRSe)

. SOUS-GROUPE 2.4 - Valeur de $L_{600} = 15$ mm

Cambisols, Podzoliques Eutrophiques et Sols Concrétionnaires Indiscriminés, tous de texture moyenne.

Liste des sols du sous-groupe 2.4:

- (Ca)
- Ce.med.arg.
- PE.abr.med.
- PE.lat.med.
- PE.med.
- (Pvc)
- SC.ind.

. SOUS-GROUPE 2.5 - Valeur de $L_{600} = 25$ mm

Sols Alluviaux indiscriminés, quelques Podzoliques Abrupts (sableux/moyen), Podzolique de texture moyenne/argileuse et Sols Indiscriminés Pierreux Distrophiques de texture moyenne/argileuse.

Liste des sols du sous-groupe 2.5:

- (A)
- (Ad)
- (Ade)
- Ae. ind.
- PE. abr.
- PE. med/arg.
- SIPd. med. arg.

GROUPE 3;

Sols qui présentent un écoulement moyen. Ils ont généralement les caractères suivants: texture argileuse, peu épais à moyennement profonds, modérément drainés, etc.

. SOUS-GROUPE 3.1 - Valeur de $L_{600} = 37$ mm

Nous avons réuni tous les Sols Litoliques Eutrophiques et Distrophiques (Re et Rd) de texture sableuse à moyenne et moyenne à argileuse.

Liste des sols du sous-groupe 3.1:

- (R)
- (Ra)
- Rd
- Rd.aren.
- Red. ind
- Red.
- Red. med. arg.
- Re
- Re. med.

. SOUS-GROUPE 3.2 - Valeur de $L_{600} = 37$ mm

Nous avons réuni tous les Podzoliques Eutrophiques peu épais, abrupts (sableux/argileux) ou de texture moyenne.

Liste des sols du sous-groupe 3.2:

- PE. peu épais
 - PE. peu épais.abr.
 - PE. peu épais. med.
- . SOUS-GROUPE 3.3 - Valeur de $L_{600} = 37$ mm

Ce groupe est représenté par le Brunizem Avertmelhado (rougi).

Liste des sols du sous-groupe 3.3:

- BV

. SOUS-GROUPE 3.4 - Valeur de $L_{600} = 37$ mm

Ce sous-groupe est représenté par les Brun Non Calcique (NC) de texture moyenne.

Liste des sols du sous-groupe 3.4:

- NC
- NC. ind.
- NC. med.

. SOUS-GROUPE 3.5 - Valeur de $L_{600} = 37$ mm

Ce groupe est représenté par les sols du type Cambisol Eutrophique peu épais (Ce) de texture moyenne et des Rendzines (RZ).

Liste des sols du sous-groupe 3.5:

- Ce. peu épais
- (RZ)

. SOUS-GROUPE 3.6 - Valeur de $L_{600} = 37$ mm

Ce groupe est représenté par les Cambisols Eutrophiques (Ce), Podzoliques Eutrophiques (PE), Podzoliques Distrophiques (PVA), Litoliques (Re), et Brun Non Calcique (NC) de texture argileuse à très argileuse.

Liste des sols du sous-groupe 3.6:

- Ce. arg.
- NC. arg.
- (PA)
- PE. abr. arg.
- PE. arg.
- PE. lat. arg.
- PE. plin. arg.
- PE. peu épais. arg.
- PE orto
- (PA)

- (PVa)
- (PVd)
- PVA. orto.
- Re. arg.

GROUPE 4:

Sols qui présentent un écoulement moyen à fort et dont certaines caractéristiques anormales (hétérogénéités, discontinuités) influencent leur fonctionnement hydrodynamique et empêchent leur classification dans les catégories antérieures.

. SOUS-GROUPE 4.1 - Valeur de $L_{600} = 25$ mm

Nous avons réuni les sols qui présentent des caractères nettement vertiques (fentes de retrait). On retrouve, évidemment, les Vertisols dans cette catégorie. Ces derniers doivent encore être sous-classés quand la quantité et la largeur des fentes devient très grande (supérieure, par exemple, à 6 cm de largeur).

Liste des sols du sous-groupe 4.1:

- Ce. vert.
- NC. vert.
- NC. vert. arg.
- V

. SOUS-GROUPE 4.2 - Valeur de $L_{600} = 25$ mm

Ce groupe ne contient que le Brun Non Calcique planossolique.

Liste des sols du sous-groupe 4.2:

- NC. plan.

. SOUS-GROUPE 4.3 - Valeur de $L_{600} = 60$ mm

Nous avons réuni dans ce groupe les sols tronqués (sols dont l'horizon superficiel a été décapé).

Liste des sols du sous-groupe 4.3:

- BV. trun.

. SOUS-GROUPE 4.4 - Valeur de $L_{600} = 70$ mm

Nous avons réuni dans ce groupe les Planosols.

Liste des sols du sous-groupe 4.4:

- PL
- (PLe)
- PL. ind.
- PLSe ind.

. SOUS-GROUPE 4.5 - Valeur de $L_{600} = 125$ mm

Nous avons réuni dans ce groupe les sols solodiques, caractérisés par une perméabilité réduite, tels que les Latérites Hydromorphiques (Plintosols - LHd et PT), de texture sableuse à moyenne et argileuse, les Solonetz Solodisés et les sols Halomorphiques.

Liste des sols du sous-groupe 4.5:

- LHd. arg.
- LHd. med. arg.
- (PT)
- (PTc)
- SH. ind.
- SS. aren. med.
- SS. ind.
- SK

. SOUS-GROUPE 4.6 - Valeur de $L_{600} = 90$ mm

Ce groupe réunit les sols qui présentent des affleurements rocheux. Il est bien évident que la valeur de L_{600} de ce groupe peut varier beaucoup autour de la valeur moyenne de 90mm. Ces variations dépendront, principalement, de la perméabilité du sol situé en aval des affleurements et du pourcentage effectivement couvert par ces affleurements.

Liste du sol du groupe 4.6:

- AF

OBS: les sols qui sont reportés entre parenthèses dans la liste des sous-groupes précédente, sont des sols qui existent dans le Nordeste, mais qui n'existaient pas dans les Bassins Versants qui ont servi à établir cette classification. La valeur de L_{600} proposée pour ces sols a donc été établie indirectement, en comparant leurs caractères hydrodynamiques avec celles d'autres sols déjà classés.

2 - LISTE DES ABREVIATIONS

(debut)

Re	- Solo Litólico Eutrófico
Rd	- Solo Litólico Distrófico
Red	- Solo Litólico Eutrófico e Distrófico
PL	- Planossolo Solódico
SS	- Solonetz Solodizado
BV	- Brunizem Avermelhado
PE	- Podzólico Vermelho-Amarelo Equivalente Eutrófico
NC	- Bruno Não Cálcico
LEe	- Latossolo Vermelho Escuro Eutrófico
AF	- Afloramento de rocha
TRe	- Terra Roxa Estruturada Similar Eutrófica
REd	- Regossolo Distrófico
REe	- Regossolo Eutrófico
REed	- Regossolo Eutrófico e Distrófico
LVd	- Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico
LHd	- Laterita Hidromórfica Distrófica
LVe	- Latossolo Vermelho-Amarelo Eutrófico
V	- Vertissolo
Ae	- Aluvião Eutrófico
SH	- Solo Hidromórfico
Lved.	- Latossolo Vermelho-Amarelo Eutrófico e Distrófico
AQd	- Areia Quartzosa Distrófica
SC	- Solo Concrecionário Indiscriminado
PVA	- Podzólico Vermelho-Amarelo Distrófico
Ce	- Cambissolo Eutrófico
SIPd	- Solos Indiscriminados Pedregosos Distróficos
PLSe	- Planossolo Solódico Eutrófico
LA	- Latossolo Amarelo
LV	- Latossolo Vermelho Amarelo
LE	- Latossolo Vermelho Escuro
LEH	- Latossolo Vermelho Escuro húmico
LR	- Latossolo Roxo
TR	- Terra Roxa
PT	- Plintossolo
PA	- Podzólico Acinzentado
PVc	- Podzólico Vermelho Amarelo Concrecionário
SK	- Solonchak
(SM)	- Solos indiscriminados de Mangue

LISTE DES ABBREVIATIONS

(suite)

(G)	- Gleissolo
A	- Solo Aluvial (Aluvião)
AM	- Areias Quartzosas marinhas
RE	- Regossolo
R	- Solo Litólico (Litossolo)
D	- Dunas
AQ	- Areias Quartzosas
AMd	- Areias Quartzosas Marinhas Distróficas
(HOe)	- Solos Orgânicos Eutróficos
(HGe)	- Glei Húmico Eutrófico
RZ	- Rendzina
HP	- Podzol Hidromórfico
TRd	- Terra Roxa Distrófica
(HG)	- Glei Húmico
(P)	- Podzol
(HGPd)	- Glei pouco Húmico Distrófico
(HOd)	- Solos Orgânicos Distróficos
Ade	- Solo Aluvial Distrófico e Eutrófico
Ad	- Solo Aluvial Distrófico
PLe	- Planossolo Eutrófico
(HGed)	- Glei Húmico e Pouco Húmido Eutrófico e Distrófico
LEd	- Latossolo Vermelho Escuro Distrófico
Cd	- Cambissolo Distrófico
LU	- Latossolo Variação Una
LVdp	- Latossolo Vermelho Distrófico Pálido
(HQd)	- Areias Quartzosas Hidromórficas
LVa	- Latossolo Vermelho Amarelo álico
LEa	- Latossolo Vermelho Escuro álico
PVa	- Podzólico Vermelho Amarelo álico
PVd	- Podzólico Vermelho Amarelo Distrófico
TRSa	- Terra Roxa Similar álica
TRSe	- Terra Roxa Similar Eutrófica
Ca	- Cambissolo álico
(HGPa)	- Glei Húmico e Pouco Húmido álico
Ra	- Solo Litólico álico
AQa	- Areia Quartzosa álica
PVc	- Podzólico Vermelho Amarelo Concrecionário

LISTE DES ABBREVIATIONS

(fin)

PTc	- Plintossolo Concrecionário
podz	- podzólico (Intermediário entre uma classe e outra de solo)
vert.	- vértico (Intermediário entre uma classe e outra de solo)
lat.	- latossólico (Intermediário entre uma classe e outra de solo)
plan.	- Planossólico
Cam	- Câmbico
ind.	- Indiscriminado (textura arenosa, média e argilosa)
Arg.	- Argilosa (textura)
Aren.	- Arenosa (textura)
med.	- média (textura)
med/arg.	- Horizonte superficial de textura média, sob um horizonte argiloso (textura)
Orto	- Argilosa (textura)
Aren/med.	- Horizonte superficial arenoso, sob um horizonte de textura média.
raso	- profundidade do solo, inferior a 50 cm
p p.	- pouco profundo
trun	- Truncado (Horizonte superficial decaptado)
abr.	- abrúptico (transição entre horizonte do solo)
frag.	- com fragipan
hum.	- húmico (teor alto em matéria orgânica) outra de solo)
plin.	- plíntico

OBS: Cette codification est celle des associations de sols des unités cartographiques des cartes de sols existantes dans chaque Etat du Nordeste.

3 - EXPLICATIONS ET DEFINITIONS

Nous présentons ci-après les définitions de quelques caractères qui servent à distinguer et à classer les sols. Ces caractéristiques se réfèrent souvent à leurs fonctionnements hydrodynamiques .

Ces définitions et explications sont incomplètes et leur traduction n'a pas été revue par un pédologue compétent.

- HYDROMORPHISME:

le drainage naturel dans le profil du sol est une caractéristique qui permet d'indiquer la capacité d'écoulement superficiel du terrain, en fonction de la perméabilité du sol et de la profondeur de la nappe phréatique.

Quand on examine le profil, la meilleure indication d'hydromorphisme est donnée par la coloration de ses horizons. Le mauvais drainage, à la suite d'une accumulation excessive d'eau dans le sol et de la réduction consécutive de son "arejemento", est indiquée par l'accumulation excessive de matière organique (tufs), ou par une couleur cendre qui indique une "gleisation", avec souvent de petites taches jaune pâle ou rouge-sang/rouille.

- CARACTERE ABRUPT:

il s'agit d'un changement brusque de texture dans le profil du sol, avec une augmentation considérable du taux d'argile (qui double au minimum), dans une très petite distance verticale, dans la zone de contact entre l'horizon A et l'horizon sous-jacent.

Le caractère abrupt indique des sols qui ont une potentialité très élevée pour l'écoulement superficiel, qui est due à un brusque changement de perméabilité entre les horizons superficiels et sous-jacents. Il est donc très important d'identifier ce caractère sur document ou sur le terrain.

- CARACTERE VERTIQUE:

Ce caractère est propre aux sols qui possèdent une forte teneur en argiles expansives de haute activité, comme les argiles du type 2:1 (Moutmorilomite, Vermiculite, etc...). Ces argiles sont sujettes à d'importants mouvements de contraction et d'expansion en fonction de leur teneur en eau. Ces mouvements provoqueront, à leur tour, de fortes variations de volume.

Ces sols seront donc sujet à une grande variation de volume. Ils se contracteront et se fendront quand ils seront secs, et se dilateront en devenant plastiques et collants quand ils seront humides. Ces mouvements du sol sont propices à la formation de micro-relief typique ("gilgai" ou petites ondulations dans la surface du sol) et d'agrégats structuraux cuneiformes.

On admet qu'un sol est vertique lorsqu'il possède plus de 30% d'argile et présente un fendillement intensif, avec fentes de retrait de plus de 4 cm de largeur en surface, en saison sèche. L'analyse du sol devra également montrer, dans sa couche sub-superficielle, une capacité d'échange de cations plus grande que 24 meq/100 g d'argile, après correction par le carbone.

Lorsque les Sols Vertiques sont saturés, ses fentes sont bouchées et l'on y observe un écoulement très fort. Mais son comportement est totalement différent au cours des premières précipitations, puisque ses fentes emmagasinent un très grand volume d'eau, empêchant pratiquement tout écoulement superficiel.

- CARACTERE DISTROPHIQUE ET EUTROPHIQUE:

les spécifications distrophique et eutrophique permettent de distinguer deux modalités de la même classe de sols (sauf, bien sur, lorsque, par définition, le type de sol ne contient que des sols distrophiques ou eutrophiques). Ainsi les sols Bruns non Calciques, les Vertisols, les Planosols, les Solonetz Solidisés et les Podzolique Rouge-Jaune Equivalent Eutrophique sont toujours eutrophiques, tandis que les Podzolique Rouge-Jaune (PV) sont toujours distrophiques.

Les sols Eutrophiques sont riches en bases avec une valeur de saturation de bases (V) supérieure ou égale à 50%. Les sols Distrophiques sont des sols pauvres en bases et présentent une valeur de saturation de bases inférieure à 50%.

Ces caractéristiques peuvent servir, par exemple à prévoir que pour des surfaces couvertes du même sol, lorsque ce dernier sera Distrophique, il aura probablement une couverture végétale moins fournie que dans s'il était Eutrophique, et aura donc tendance à fournir un écoulement superficiel un peu plus grand.

Ainsi, les sols Litoliques Distrophiques (Rd) ont un écoulement superficiel un peu plus grand que celui des sols Litoliques Eutrophiques (Re).

- AUTRES CARACTERES:

. **Solodique:** caractère utilisé pour les sols du type Planosol. Il indique que les sols sont saturés en sodium ($100.Na+/T$) entre 6 et 15% dans la partie sub-superficielle.

Le sodium tend à disperser les argiles, formant ainsi l'horizon "notrique". Cet horizon est le principal responsable de la diminution de la perméabilité du sol et provoquera un très fort écoulement, surtout lorsqu'il est proche de la surface du sol.

. **Avec fragipan:** utilisé pour sub-diviser la classe des Regosols Eutrophiques et Distrophiques. Indique que la classe de sols comporte un fragipan.

Moins profond sera le sol, plus faible sera sa capacité de rétention d'eau. Ainsi, les sols peu épais se satureront plus rapidement que les sols profonds, exception faite des sols très argileux de haute activité qui présentent déjà, à partir de la surface, une teneur très forte d'argile, qui empêche donc l'infiltration. Ces sols même quand ils sont profonds se comportent comme s'ils étaient peu épais, en termes d'écoulement superficiel.

. **Peu épais:** caractère utilisé pour la classe de sol Podzolique Rouge-Jaune Equivalent Eutrophique (PE). Il signale les sols de cette classe qui ont une profondeur égale ou inférieure à 50 cm.

- AFFLEUREMENTS DE ROCHE

Cette Unité Cartographique ne correspond pas à un sol, mais plutôt à un type de terrain, caractérisé par des affleurements différents types de roches, "brandas" ou dures, nues ou associées avec des zones couvertes de matériaux détritiques grossiers qui ne peuvent pas être tout à fait considérés comme des sols, à cause de la faible ou de l'absence de différenciation des horizons, qui correspondent plutôt à des accumulations hétérogènes, de mélange de matériel terreux et de fragments directement originaires de la désagrégation des roches locales.

Le relief associé à ces affleurements de roche est très variable. On peut les rencontrer sur des surfaces faiblement ondulées, mais surtout sur pentes ou les lignes de crête des reliefs dans des zones nettement plus accidentées (relief fortement ondulé à montagneux).

Sur les Affleurements de roche de plus grande envergure, comme les inselbergs, les "cristaux et les penhascos", on rencontre une végétation de faible hauteur qui constitue une formation rupestre, de caractère xérophile, où prédominent des espèces basses des familles des Cactacées, Bromeliacées, Apocynacées et Bleloziacées.

- FRAGIPAN

Le "fragipan", qui peut intéresser un ou plusieurs horizons, est caractérisé par son aspect compact, sa consistance dure à extrêmement dure, non plastique et qui ne colle pas. Ces caractères font que la perméabilité apparente qui a pu être rapide dans les horizons supérieurs, quand la texture est sableuse, est soumise à un barrage dans l'horizon qui contient le fragipan, et favorise ainsi l'écoulement superficiel lorsque le fragipan est proche de la surface.

- HUMIQUE

Indique que le sol a un horizon superficiel très épais, de couleur sombre, ce qui indique une forte teneur en matière organique et au moins 1% de carbone, jusqu'à une profondeur d'au moins un mètre. Tout ceci favorise l'infiltration de l'eau et empêche pratiquement tout écoulement superficiel.

- FORMATIONS SUPERFICIELLES: CROUTES ET PELLICULES

Ce phénomène correspond à la formation d'une couche fine à la surface du sol. La formation de cette couche est souvent la conséquence d'une mise en culture sol ou de teneurs en silt très élevées (rapport silt/argile plus grand que 2).

Le silt remplit les pores du sol, empêchant ainsi l'infiltration de l'eau, et augmentant l'écoulement superficiel. Des rapports silt/argile élevés montrent que les sols jeunes seront facilement sujets à ce phénomène.

On peut ainsi, dresser la liste des sols qui seront particulièrement exposés aux phénomènes d'encroûtement et de formation de pellicules de surface: Podzoliques, Cambisols Eutrophiques, Bruns Non Calcique, Sols Halomorphiques, Alluvions Silteux, Solonetz, Solnehak, Sols Concrétionnaires, Planosols, Regosols, Litoliques et Rendzines.

La présence de croûtes et de pellicules doit être appréciée sur le terrain. Si ce phénomène est confirmé, on doit alors apporter une importante correction aux valeurs centrales des lames écoulées L_{600} indiquées dans les tableaux précédents.

A N N E X E**NOTES SUR LE MODE DE CALCUL DES COEFFICIENTS PROPOSES POUR LE
DIMENSIONNEMENT DE PETITS BARRAGES DANS LE NORDESTE SEMI-ARIDE****REDACTION PROVISOIRE ET INCOMPLETE**

Ces notes de calcul sont incomplètes, destinées à des hydrologues expérimentés et ne doivent pas être publiées pour le moment. Elles réunissent pêle-mêle un certain nombre d'indications sur les hypothèses faites et sur les éléments dont nous disposons pour proposer cette méthode. Elles permettent donc de mieux comprendre les points forts de ce que nous avançons, mais aussi ses limites. Nous sommes en train d'élaborer un document plus complet à ce sujet.

1 - CALCULS DES ECOULEMENTS ANNUELS

La classification hydro-pédologique proposée a été réalisée au cours de deux étapes qui exploitent deux ensembles de données totalement différents:

1.1 - UTILISATION DES DONNEES ACQUISES SUR BASSINS REPRESENTATIFS

La première partie de cette synthèse est basée sur les observations réalisées et les écoulements mesurés sur un réseau de petits Bassins Versants Représentatifs et Expérimentaux gérés par la SUDENE depuis 1974. A partir de ces données, Leprun et Cadier ont proposé, en 1983, une première classification et hiérarchisation des aptitudes des sols à l'écoulement. Plusieurs publications ont décrit ce réseau de BVR et cette hiérarchisation, que nous ne reprendrons pas dans ce document provisoire.

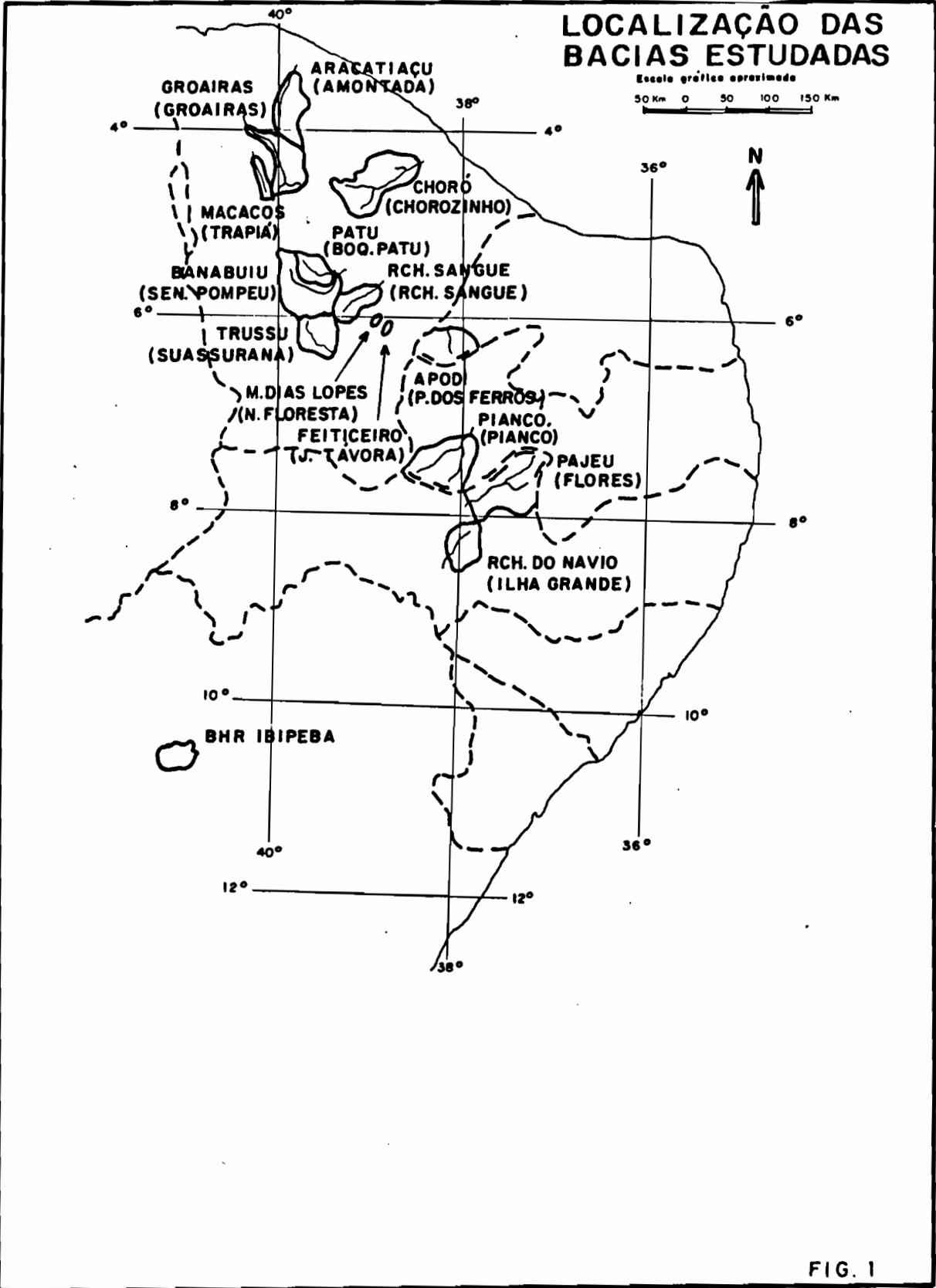
1.2 - UTILISATION DES DONNEES ACQUISES SUR LE RESEAU GENERAL

Dans une seconde étape, la validation de la classification proposée et la quantification des L_{600} ont été réalisées en utilisant les informations disponibles, obtenues à partir du réseau hydrométrique de base du Nordeste, que l'on appelle aussi "réseau général" et qui constitue une source d'information totalement différente de la première.

On a utilisé pour cela des techniques d'optimisation numérique pour quantifier les L_{600} moyennes de chaque sol. Ce sont ces valeurs de L_{600} qui ont été utilisées pour le calcul des lames écoulées de chaque bassin, à l'aide de la méthode que nous nous proposons de valider .

La Figure 1 montre la situation des Bassins du réseau hydrométrique de base que nous avons utilisés. Le tableau suivant permet de comparer les lames réellement observées avec celles calculées avec la présente méthode.

CARTE DE SITUATION DES BASSINS DU RESEAU GENERAL UTILISES



N°	Nom du Bassin	L Calc	L OBS	Calc-Obs
1	MACACOS. TRAPIA	82.920	90.000	-7.1
2	GROAIRAS. GROAIRAS	70.927	65.000	5.9
3	ARACATIACU. AMONTADA	77.347	79.900	-2.6
4	CHORO. CHOROMOZINHO	79.957	85.200	-5.2
5	TRUSSU. SUSSUARANA	61.988	57.000	5.0
6	M. DIAS. NOVA FLORESTA	68.374	68.000	0.4
7	FEITICEIRO. JOAQUIM. TAVORA	57.528	72.000	-14.5
8	Acid. RIACHO. SANGUE	58.226	59.500	-1.3
9	PATU. BOQ. PATU	77.274	76.500	0.8
10	BANABUIU. SENADOR. POMPEU	59.194	58.000	1.2
11	APODI. PAU. DES. FERROS	66.401	63.900	2.5
12	PIANCO. PIANCO	68.997	69.900	-0.9
13	PAJEU. FLORES	44.925	37.300	7.6
14	R. DO. NAVIO. ILHA. GRANDE	24.455	17.800	6.7
15	B. H. R. IBIPEBA	10.000	10.800	-0.8

Le coefficient de corrélation entre les lames observées et calculées est de 0,97.

Nous publierons un document plus détaillé sur la méthodologie suivie, les résultats obtenus, les points forts et les limites constatées.

Nous nous limiterons, pour le moment, aux commentaires suivants:

1.3 - IMPORTANCE DES CLASSES DE SOL

Les Figures 2 et 3 montrent les histogrammes de distribution et donc l'importance relative des différentes classes et sous-classes de sol dans les 15 bassins du réseau général étudiés.

On constate que la classe 3 couvre plus de 55% de la surface des bassins étudiés (la L_{600} de la classe 3 est de 37 mm).

Les sols de la classe 4 couvrent 22% de la surface, ceux de la classe 2 : 20% et ceux de la classe 1 : 2%.

La L_{600} moyenne de tous les bassins est de 42,7 mm.

La pluviométrie moyenne annuelle de tous ces bassins est de 710 mm.

1.4 - ROLE DES FACTEURS PEDOLOGIQUE ET PLUVIOMETRIQUE DANS LE CALCUL DES ECOULEMENTS

Pour chaque bassin, la lame écoulée est calculée par la formule suivante :

$$L(p)(\text{calculé}) = \sum_{UC=1}^n L600 \text{ de chaque UC} \times e_{0,033(p-600)} \quad (1)$$

(1)
(2)

Terme de correc-
tion pédologique
Terme de correc-
tion par la plu-
viométrie

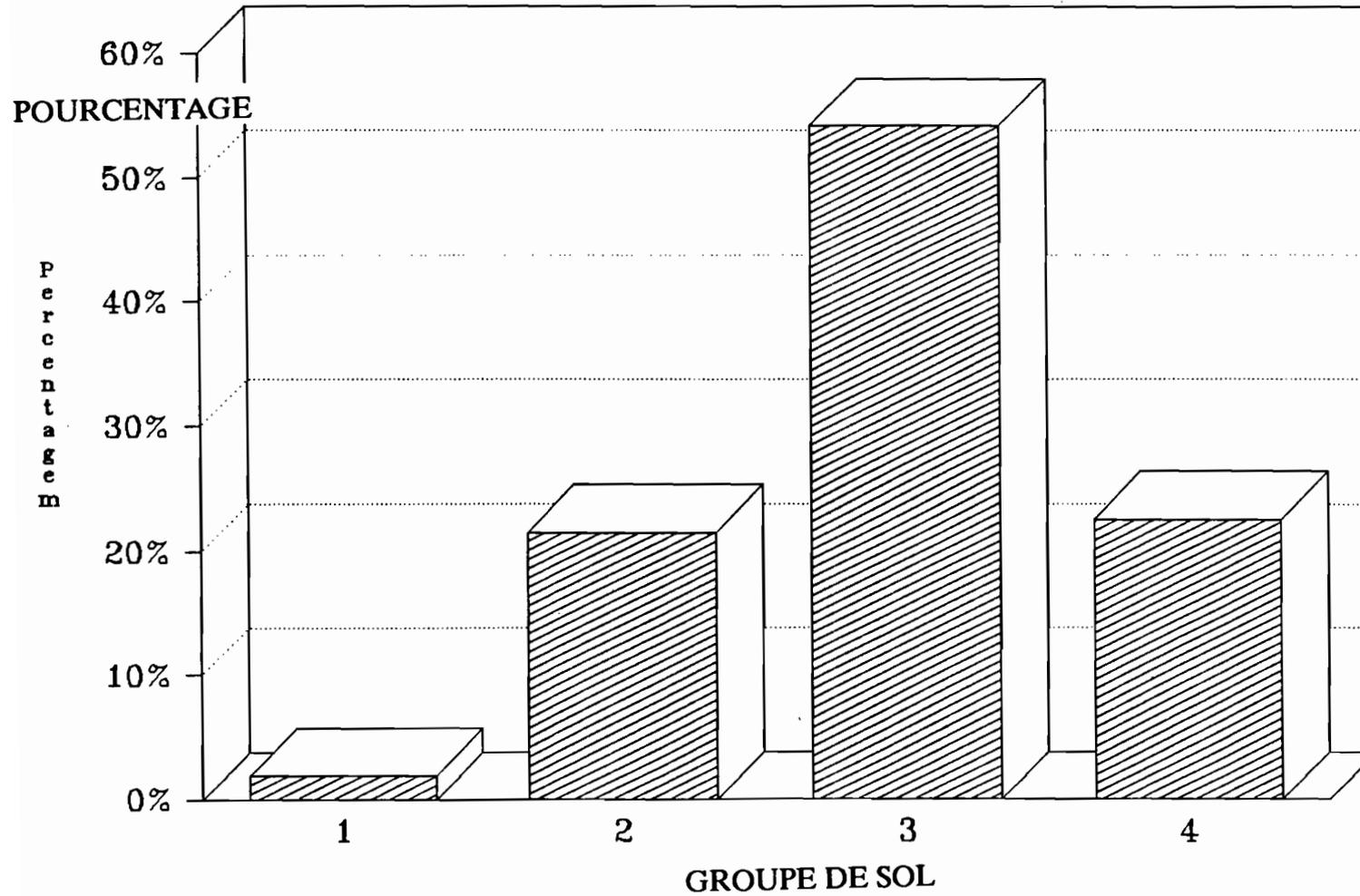
(U.C. = Unité Cartographique de carte pédologique)

Le terme (1) de l'équation (1), appelé terme de correction pédologique explique, seul, 63% de la variance des écoulements observés.

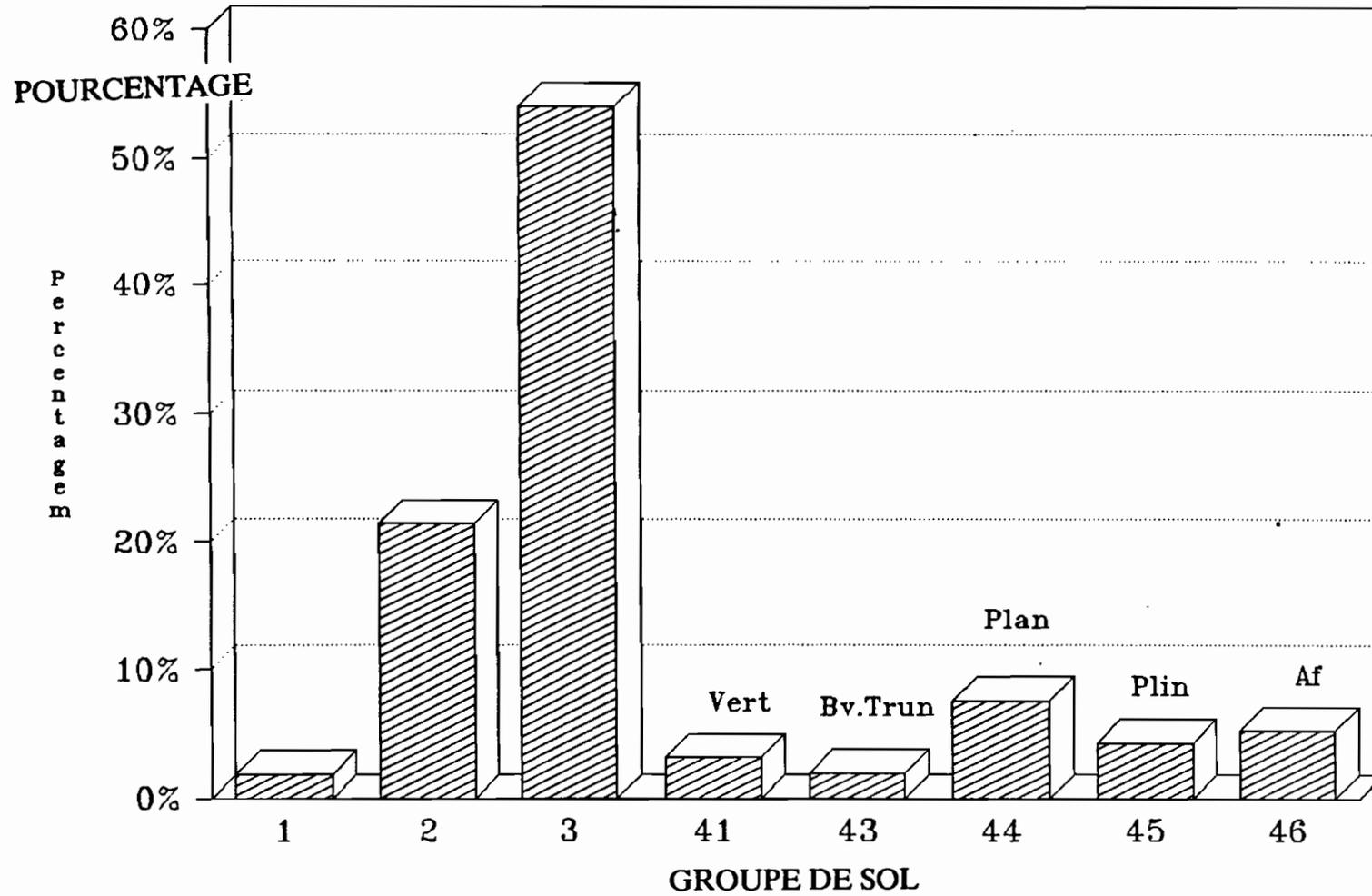
Le terme (2) de l'équation (1), appelé terme de correction pluviométrique, explique, seul, 39% de la variance des écoulements observés.

Les deux termes de l'équation (1) expliquent ensemble 87% de la variance des écoulements observés.

**FIG. 2 DISTRIBUTION DES CLASSES DE SOL
DANS LES BASSINS DU RESEAU GENERAL UTILISES**



**FIG. 3 DISTRIBUTION DES CLASSES DE SOL
DANS LES BASSINS DU RESEAU GENERAL UTILISES**



1.5 - COMPARAISON AVEC LA FORMULE D'AGUIAR

F.C. AGUIAR (1940) a proposé le calcul des lames écoulées à l'aide de la formule:

$$L(p) = U * R(H) = U(28,53 H - 112,95 H^2 + 351,91 H^3 - 118,74 H^4); R\% = R_{mm}/10H$$

où H est la hauteur de la pluie annuelle en mètres et

U un coefficient de correction, défini par le Tableau suivant:

Coefficient de correction U de la formule d'AGUIAR

Type	Bassin Versant	U
1	Petit "ingreme" et rocheux.....	1,3 à 1,4
2	Bien accidenté sans dépressions évaporatoires	1,2
3	Moyen.....	1,0
4	Légèrement accidenté.....	0,8
5	Idem, avec des dépressions "évaporatoires"....	0,7
6	Quasi horizontal, terrain argileux.....	0,65
7	Idem, terrain variable.....	0,6
8	Idem, terrain sableux.....	0,5

Pour la valeur de U = 1, qui doit correspondre, dans l'esprit d'AGUIAR à une sorte de bassin standard ou de référence, nous pouvons calculer les valeurs suivantes de L(p):

Lames écoulées en fonction de la pluviométrie calculée avec diverses formules

Pannuel (mm)	500	600	700	800	900	1000
Formule d'AGUIAR:						
L(p) AGUIAR	23	37	57	82	113	149
Formule de la SUDENE (1)						
avec: L ₆₀₀ = 37	26,7	37	51,4	72	100	139
Formule de la SUDENE (1)						
avec L ₆₀₀ = 42,7	30,7	42,7	59	83	115	159

$$^{(1)} L(p) = L_{600} e^{0,0033(p-600)}$$

On Constate que:

1) La valeur moyenne de L₆₀₀ proposée par AGUIAR pour les petits bassins (U = 1) qui est de 37 mm, est aussi égale à la valeur de L₆₀₀ de la classe de sol 3, qui est la classe de sol la plus représentée dans les bassins étudiés.

2) les différences entre les deux formules (AGUIAR et SUDENE) lorsque la pluviométrie varie entre 500 et 1000 mm, ne sont très grandes. Ces différences seraient encore plus faibles si l'on considérait, pour L₆₀₀, la valeur moyenne calculée sur tous les 15 bassins étudiés qui est de 42,7 mm (tout du moins pour les valeurs de P supérieures à 600 mm).

3) Les plages de variation du coefficient U de AGUIAR sont relativement bien plus étroites que celles de la L_{600} de la SUDENE. Ceci veut dire que la formule d'AGUIAR atténuera les écoulements des bassins très imperméables ou augmentera les écoulements des BVA qui coulent le moins. Ceci est normal puisque, dans les grands bassins, pour lesquels a été conçue la formule d'AGUIAR, les irrégularités se compensent souvent entre elles.

En conclusion, nous pouvons dire que les deux formules fourniront des résultats globalement comparables. Cependant la formule de la SUDENE est plus adaptée au cas spécifique des petits bassins, où les variations des comportements sont plus grandes. De plus, la formule de la SUDENE peut aussi être utilisée pour de grands bassins, à condition que la pluviométrie ne dépasse pas 1000 mm/an.

La formule de la SUDENE utilise des Unités de Cartographie pédologique qui sont des critères moins subjectifs et plus faciles à utiliser par des non-spécialistes. La méthode SUDENE propose, en plus, des formules complémentaires pour le calcul des lames annuelles et de sécheresses pluriannuelles (années sèches consécutives) de diverses fréquences.

2 - CALCUL DE LA CRUE DE PROJET

2.1 - CALCUL DU DEBIT MAXIMUM POUR DIVERSES SURFACES DE BASSIN

Les formules que nous proposons pour les crues sont applicables pour des bassins de surface variant entre 0,1 et 500 km². En effet, la définition de leur domaine d'application dépend des surfaces des 19 BVR du réseau SUDENE, avec lesquels nous avons établi leurs équations. Or ces surfaces varient entre 0,77 et 468 km².

2.1.1 - SURFACES DE BASSIN COMPRISES ENTRE 5 ET 500 KM²

Dans cette gamme de surface la théorie de l'hydrogramme unitaire est applicable.

La Tableau suivant définit les principales caractéristiques des crues observées sur les 19 BVR.

Nous avons déterminé, pour chaque BVR, deux ensembles de valeurs caractéristiques des crues:

- le premier, relatif à la moyenne des 10 plus fortes crues observées sur chaque BVR, est symbolisé par le suffixe **med** dans les tableaux et graphiques suivants;
- Le second, relatif aux caractéristiques de l'hydrogramme unitaire symbolisé par le suffixe **unit**.

Nous avons calculé la valeur de la lame décennale, des temps de base T_b , de montée T_s , le coefficient $T_b/ALFA$ et le coefficient $K_x = S \cdot ALFA / (3,6 \cdot T_b)$. K_x correspond au débit maximum d'un hydrogramme de 1mm de lame écoulée.

FIG. 4 | **CARACTERISTIQUES DES CRUES**
Kx MOYEN EN FONCTION DE LA SURFACE DU BVA
BASSINS DES ZONES CRISTALLINES

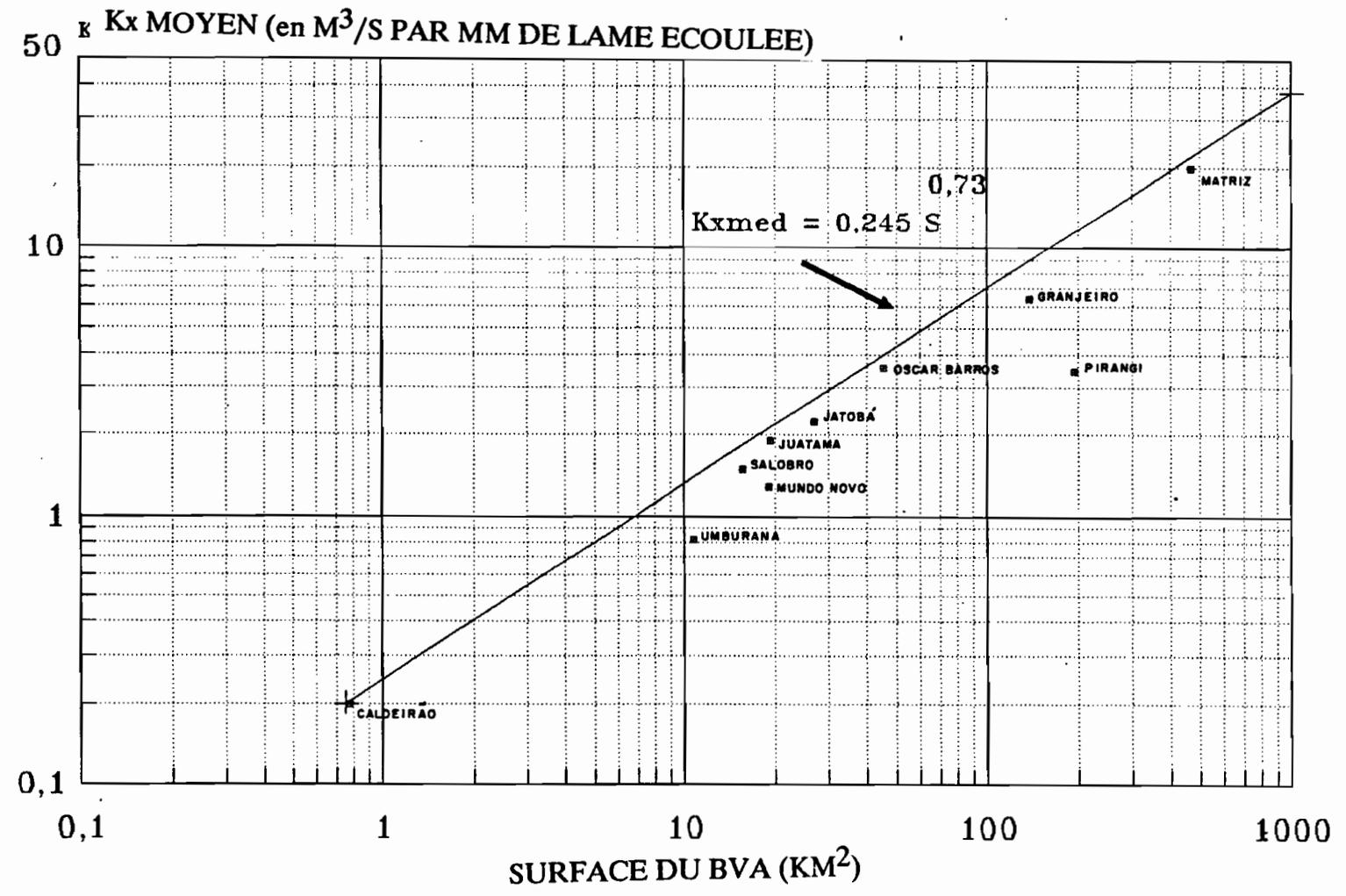


FIG. 5 **CARACTERISTIQUES DES CRUES**
Kx MOYEN EN FONCTION DE LA SURFACE DU BVA
BASSINS DES ZONES SEDIMENTAIRES

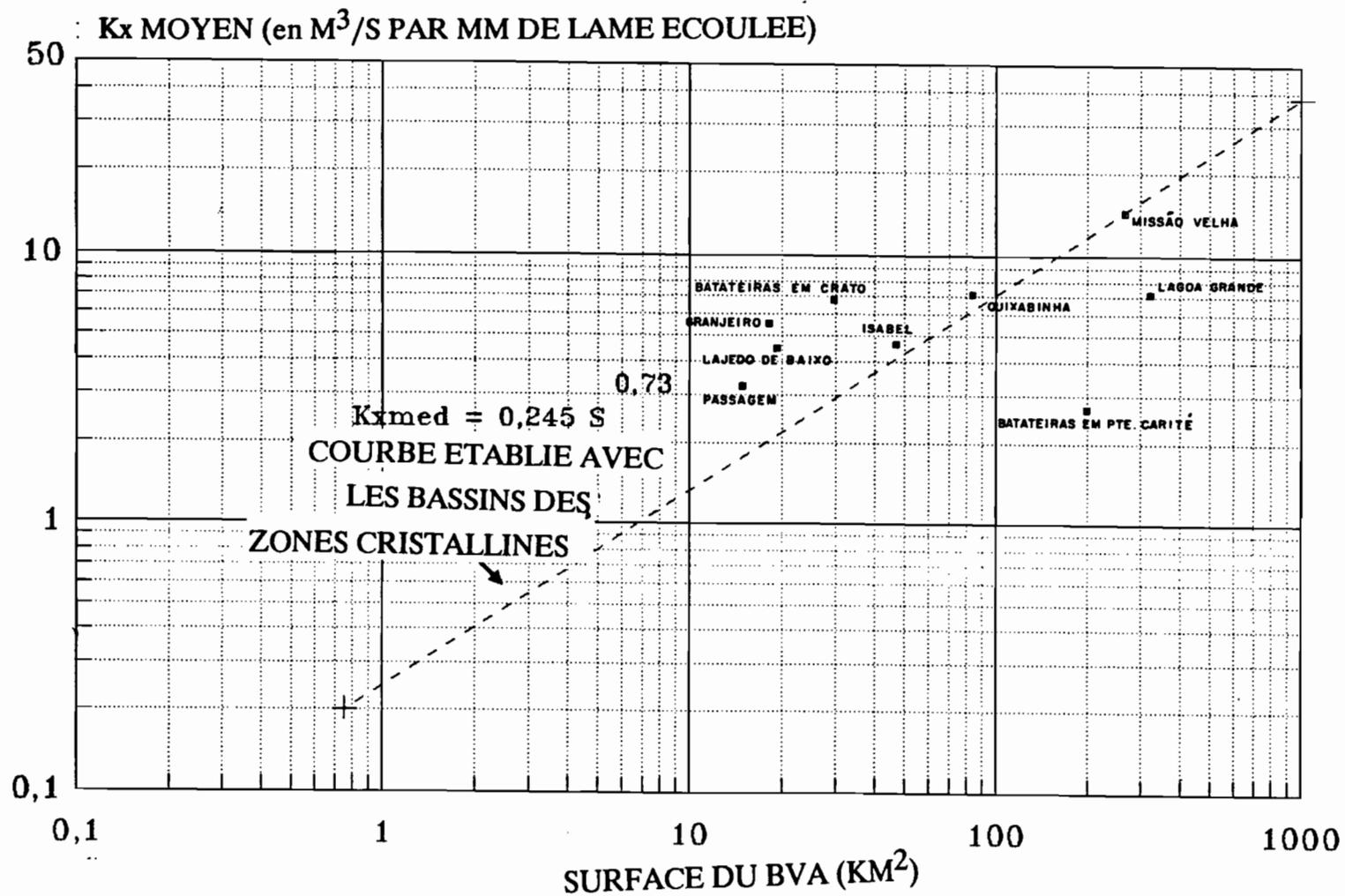
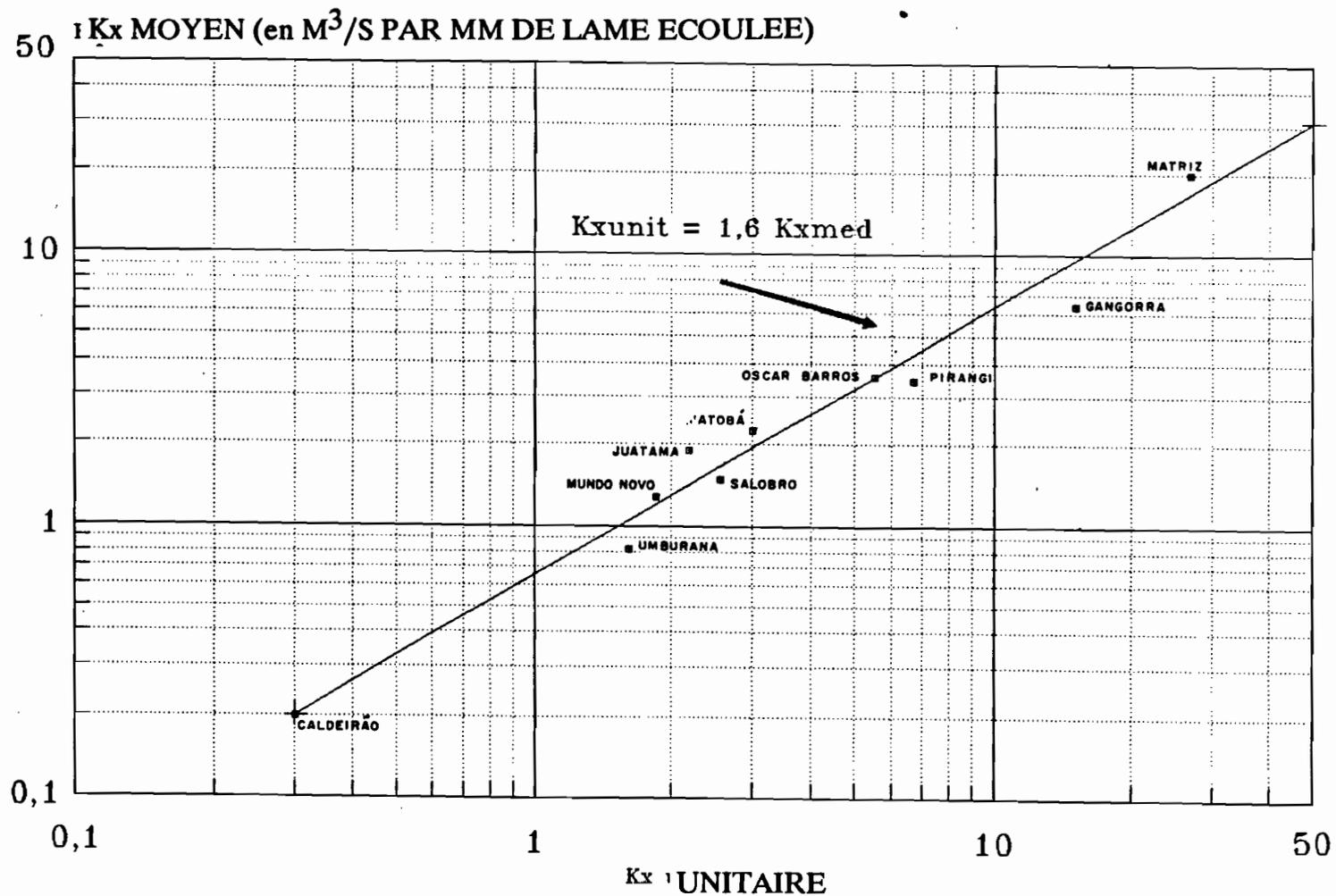


FIG. 6 **CARACTERISTIQUES DES CRUES**
 RELATION ENTRE K_x MOYEN ET K_x UNITAIRE
 BASSINS DES ZONES CRISTALLINES



Caractéristiques des crues des BVR du Nordeste Brésilien

N°	Nom	Surface (km ²)	Lame décennale (mm)	Kx med.	Tb med. (h)	alfa med.	T.sub med. (h)	Tb/ Alfa med.	Kx unit	Tb unit (h)	alfa unit	T.sub unit (h)	Tb/ alfa unit.
1	Cal	0.77	37.00	0.198	3.98	3.09	1.37	1.29	0.30	2.00	2.78	0.65	0.72
2	Mnov	19.00	56.00	1.270	13.10	2.98	2.87	4.40	1.84	6.00	2.10	2.00	2.86
3	Pgi	194.00	26.00	3.440	49.98	2.77	14.76	18.04	6.67	20.00	2.66	4.00	7.52
4	Jtam	19.20	35.00	1.880	9.78	3.06	3.87	3.20	2.18	6.00	2.45	1.00	2.45
5	Sal	15.60	10.10	1.470	14.64	3.70	2.36	3.96	2.55	6.25	3.60	0.75	1.74
6	Obar	45.20	10.90	3.550	13.40	3.62	2.39	3.70	5.50	9.00	3.90	1.00	2.31
7	Matr	468.00	9.50	19.690	21.05	2.99	4.55	7.04	26.70	13.00	2.65	4.00	4.91
8	Umb	10.70	30.50	0.810	9.77	2.34	2.96	4.18	1.60	5.00	2.60	1.10	1.92
9	Jtba	26.80	12.60	2.220	10.78	3.02	2.27	3.57	3.00	5.50	2.60	1.60	2.12
10	Gang	137.00	18.30	6.370	16.24	2.52	3.63	6.44	15.00	8.00	3.00	2.50	2.67
11	Pas	14.80	16.00	3.200	5.35	3.12	2.09	1.71	5.90	2.17	3.11	0.50	0.70
12	Lgbx	19.10	0.40	4.420	3.01	2.43	1.06	1.24	12.00	1.00	2.26	0.33	0.44
13	Isa	46.80	12.00	4.620	10.25	2.80	3.91	3.66	11.70	3.33	3.00	0.67	1.11
14	Lgr	321.00	1.60	7.150	33.00	2.41	12.36	13.69	10.40	20.00	2.33	7.00	8.58
15	Gran	18.00		5.480	2.82	3.01	1.10	0.94	5.00	2.75	2.75	1.00	1.00
16	Bcra	29.50		6.750	3.37	2.67	0.70	1.26	12.00	1.67	2.44	0.50	0.68
17	Bcar	198.00	12.50	2.680	64.75	2.81	12.29	23.04	3.33	40.00	2.42	3.50	16.53
18	Quix	83.00	14.80	7.100	9.64	2.92	0.92	3.30	10.90	5.00	2.36	1.00	2.12
19	Mvel	266.00	4.00	14.290	17.21	3.21	5.75	5.36	11.50	15.00	2.33	4.50	6.44

A) VARIATIONS DE KX AVEC LA SURFACE

Les Figures 4 et 5 montrent la relation entre Kx et la surface S du bassin.

La relation est beaucoup plus cohérente pour les bassins cristallins que pour les bassins sédimentaires.

Pour les bassins cristallins l'enveloppe supérieure de la relation $Kx = f(S)$ est définie par la relation:

$$Kx_{med} = 0,245 S^{0,73} \quad (1)$$

La relation est moins cohérente pour les bassins sédimentaires, d'abord parce que l'échantillon de bassins est très hétérogène et aussi parce qu'une partie des coefficients ont été établis en 1964, à l'occasion des études de la Monographie du Val du Jaguaribe (G.V.J.) en utilisant des techniques et des normes de calcul sensiblement différentes de ce que nous utilisons actuellement (en termes, par exemple, de séparation d'écoulements ou d'évaluation des temps de base etc).

Kx "sédimentaire" paraît être supérieur de 40% à 60% au Kx "cristallin". Cependant, ceci est plus que compensé par le fait que les lames écoulées des crues de ces bassins sédimentaires sont 3 ou 4 fois plus faibles; les crues de ces bassins sédimentaires seront donc, finalement, moins dangereuses.

B) VARIATIONS DU DEBIT DE POINTE QX AVEC LA SURFACE

Les lames écoulées décennales des petits bassins de 5 à 10 km² peuvent être estimées à 40 mm. Pour 500 km² cette estimation n'est plus que 20 mm.

La crue de projet, selon la définition admise au paragraphe 4.8.1.1, correspond au double de la crue décennale.

Nous proposons donc les lames suivantes pour la crue de projet:

$$\begin{array}{ll} \text{Pour } S = 5 \text{ km}^2 & L = 40\text{mm} \times 2 = 80 \text{ mm} \\ \text{Pour } S = 500 \text{ km}^2 & L = 20\text{mm} \times 2 = 40 \text{ mm} \end{array}$$

En adaptant une fonction puissance, on obtient:

$$L = 102 S^{-0,15} \quad (2)$$

La combinaison des équations (1) et (2) permet d'établir l'équation que nous proposons pour le calculer de Qx.

$$Qx = K_{\text{med}} \times \text{Lame crue}$$

$$Qx = 0,245 \times S^{0,73} \times 102 \times S^{-0,15} = 25 S^{0,58}$$

OBS: on a adopté la valeur Kxmed au lieu de Kxunit, puisque le débit calculé avec la lame de période de retour de 1/100, aurait évidemment une période de retour très supérieure à 100 ans, si l'on avait effectué les calculs avec un hydrogramme de forme unitaire!

2.1.2 - SURFACES COMPRISES ENTRE 0,1 ET 5 KM²

En dessous d'une certaine surface, la théorie de l'hydrogramme unitaire (qui a été utilisée pour établir la formule de la gamme de surfaces intermédiaires de 5 à 500 km²) n'est plus applicable, puisque la durée de la pluie est supérieure au temps de concentration du bassin, ce qui veut dire que les fortes pluies continueront à tomber durant la crue.

Le temps de concentration du bassin est défini comme étant le temps mis par une goutte d'eau pour s'écouler à partir de la partie la plus éloignée du bassin jusqu'à l'exutoire.

Ce temps de concentration peut être calculé par exemple, par la formule proposée par la California Highways and Public Works:

$$Tc = 57 (L^3/H)^{0,385}$$

où L en km est la longueur du talweg plus long;
H en m est la dénivelée du bassin;
Tc en minutes est le temps de concentration.

Pour fixer les idées, nous avons calculé le tableau suivant correspondant à divers cas de figure:

Valeurs de Tc en minutes calculées avec diverses hypothèses sur la morphologie du bassin

Surface du bassin	10 km ²	5 km ²	1 km ²	0,1 km ²
Relief fort/Bassin compact	41	31	14	6,4
Relief fort/Bassin allongé	92	69	32	14,3
Relief moyen/Bassin compact	86	62	27	9,2
Relief moyen/Bassin allongé	191	137	59	20,4

Ce tableau a été établi avec les hypothèses suivantes :

$$\text{Bassin compact: } L = 1,4 (S)^{0,5}$$

$$\text{Bassin allongé: } L = 2,8 (S)^{0,5}$$

Valeurs de la dénivelée H (m)

SURFACE	10 km ²	5 km ²	1 km ²	0,1 km ²
H relief fort	200 m	150 m	100	25
H relief moyen	30 m	25	20	10

En analysant les hauteurs et les intensités des fortes pluies présentées au paragraphe 4.8.1.2, on observe que 56% du total des fortes pluies tombe en moins de 1 h et 75% en moins de 2 h. Ceci nous amène à penser que la théorie de l'hydrogramme unitaire ne peut plus s'appliquer à des bassins dont le temps de concentration est supérieur à 1 ou 2 h. La Tableau ci-dessus permet de situer cette limite vers 5 ou 10 km².

La formule $Q = 17 \cdot Sc^{0,8} \cdot Fc$, que nous proposons pour les surfaces inférieures à 5 km² a été établie en partant de ces considérations et en appliquant la méthode rationnelle:

$$Q_c = \frac{CIA}{3,6}$$

où, C est un coefficient qui varie entre 0,6 et 0,5 lorsque la surface varie entre 0,1 et 5 km².

I est l'intensité de précipitation correspondant au temps de concentration t_c du bassin, pour la fréquence de la crue que l'on cherche à calculer.

On Calcule:

Calcul du débit de la crue de projet pour deux surfaces

SURFACE	0,1 km ²	5 km ²
Tc moyen	10'	45'
pluie durant Tc	27 mm	65 mm
I	162 mm/h	87 mm/h
C	0,6	0,5
Q	2,7 m ³ /s	60 m ³ /s

En adaptant une fonction puissance sur ces deux points, on obtient finalement la formule:

$$Q_x = 17 S^{0,8} \text{ qui correspond aux petits bassins les plus dangereux.}$$

2.1.3 - SURFACES SUPERIEURES A 500 KM²

Pour des surfaces supérieures à 500 km² nous conseillons d'utiliser la formule de F.G. d'AGUIAR qui a justement été établie pour cette gamme de surfaces. Rappelons sa formulation et son mode d'utilisation:

$$Q_s = \frac{1.150 \times S}{LC \sqrt{(120 + KLC)}} \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

où S = surface du bassin versant, en km²;
 L = longueur en km du cours d'eau le plus long;
 K, C = coefficients qui dépendent du type de bassin définis par le tableau suivant.
Coefficient K et C de la formule d'AGUIAR

CARACTERISTIQUES DU BASSIN VERSANT	TYPE	COEFFICIENTS	
		K	C
Petit "ingrème" et rocheux.....	1	0,10	0,85
Bien accidenté, sans dépression évaporatoire...	2	0,15	0,95
Moyenne.....	3	0,20	1,00
Légèrement accidenté	4	0,30	1,05
Légèrement accidenté avec une dépression..... évaporatoire.....	5	0,40	1,15
Quasi horizontal terrain argileux.....	6	0,65	1,30
Quasi horizontal terrain variable ou ordinaire.	7	1,00	1,45
Quasi horizontal terrain sableux.....	8	2,50	1,60

En effet, il n'est pas possible d'extrapoler la formule que proposons ($Q = 25 \cdot S^{0,58} \times FC$) beaucoup plus loin que 500 km² pour les raisons suivantes:

- Au dessus de 500 km² les temps de base des crues sont supérieurs à 24 h. Pour cette raison, les fortes crues risquent, trop souvent, d'être provoquées par des épisodes pluvieux complexes, survenant des jours différents. Ceci rentre en contradiction avec les hypothèses adoptées sur la forme de l'hydrogramme "pseudo-unitaire" et sur les valeurs des fortes précipitations utilisées pour le calcul des crues, qui sont, en fait, issues d'ajustements statistiques sur les séries des pluies en 24h.
- Au dessus de 500 km², l'homogénéité spatiale des pluies convectives diminue considérablement, puisque la probabilité de voir les différentes parties d'un bassin atteintes par plus d'un système nuageux convectif (ou cumulonimbus) augmente beaucoup.

2.2 - RELATION ENTRE LES TEMPS CARACTERISTIQUES DES HYDROGRAMMES

Les graphiques suivants et le tableau du début du paragraphe 2.1.1 permettent d'établir les relations suivantes:

$$\begin{aligned} K_x (\text{sédimentaire}) &= 1,6 K_x (\text{cristallin}) \\ K_x (\text{unit}) &= 1,6 K_x (\text{moyen}) \\ T_b (\text{med}) &= 1,8 T_b (\text{unit}) \\ T_s (\text{med}) &\text{ varie en général entre } 1,3 T_{s_{\text{unit}}} \text{ et } 2,5 T_{s_{\text{unit}}} \\ T_s (\text{med}) &\text{ varie, généralement, entre } 0,17 T_b \text{ et } 0,36 T_{b_{\text{med}}} \end{aligned}$$

FIG. 7 **CARACTERISTIQUES DES CRUES**
 1 RELATION ENTRE K_x MOYEN ET K_x UNITAIRE
 BASSINS DES ZONES SEDIMENTAIRES

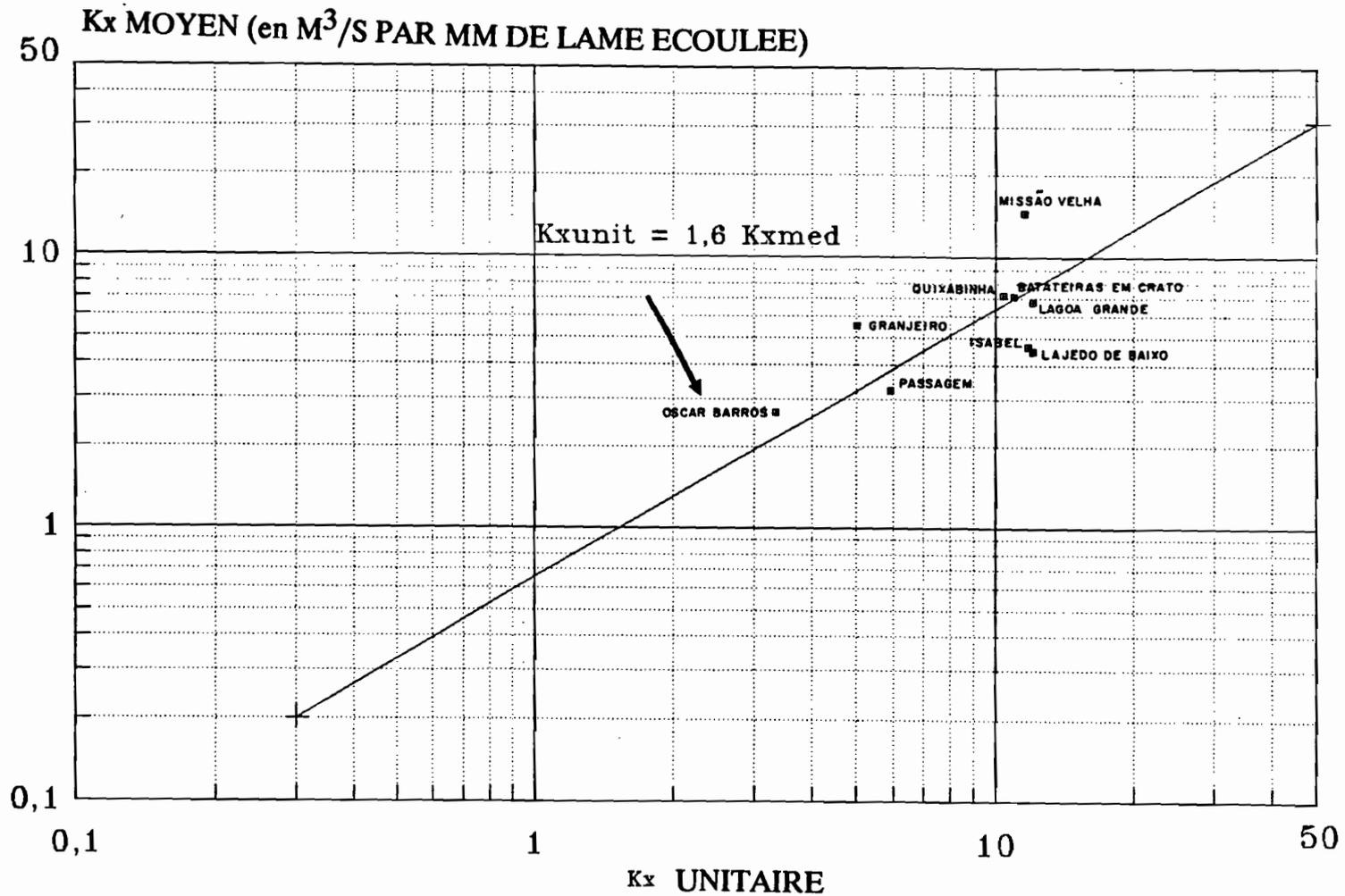


FIG. 8 **CARACTERISTIQUES DES CRUES:**
 TEMPS DE BASE MOYEN EN FONCTION DU TEMPS DE BASE UNITAIRE
 BASSINS DES ZONES CRISTALLINES ET SEDIMENTAIRES

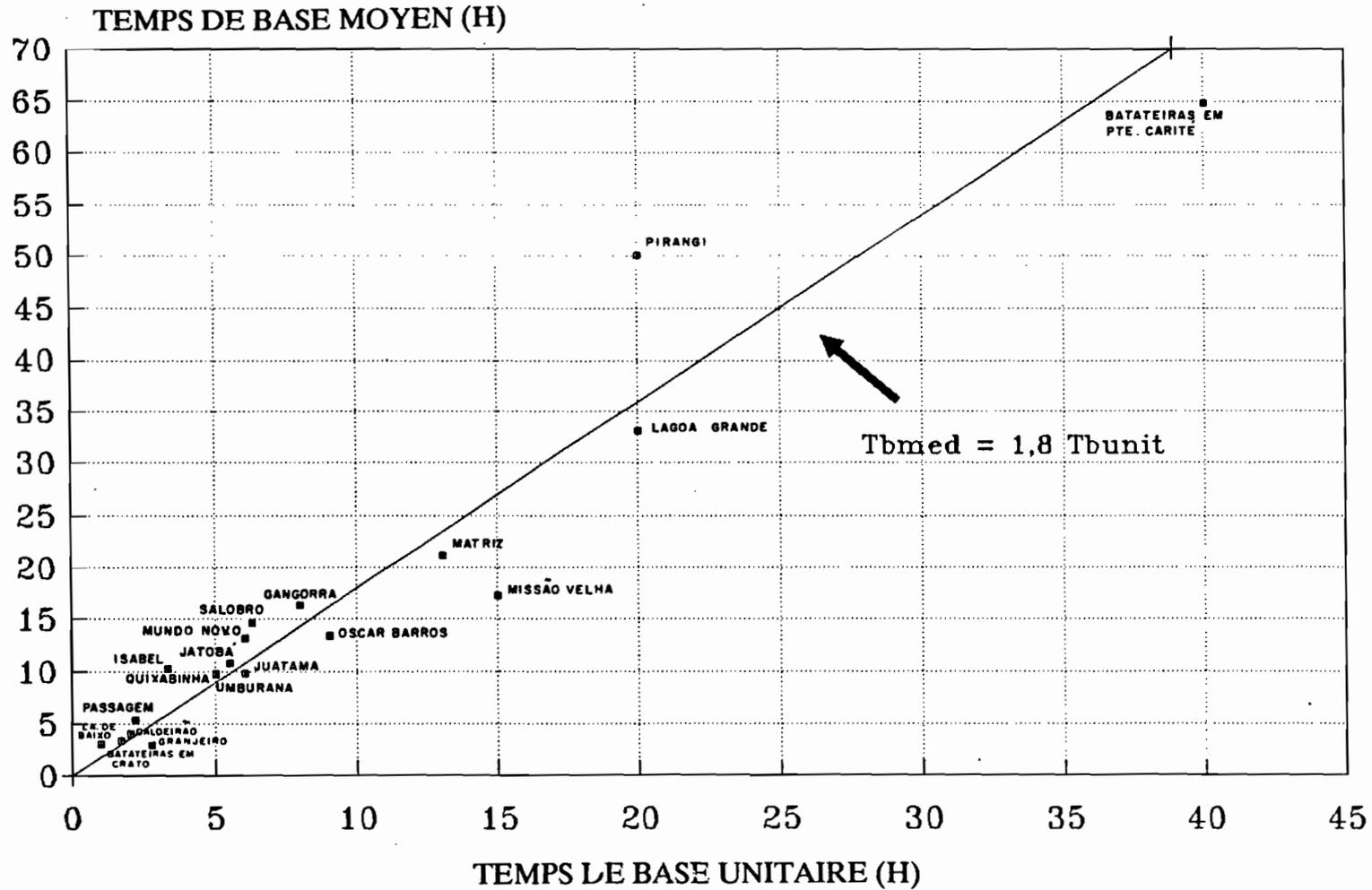


FIG. 9 **CARACTERISTIQUES DES CRUES**

TEMPS DE MONTEE (TS) MOYEN EN FONCTION DU TEMPS DE MONTEE (TS) UNITAIRE
 BASSINS DES ZONES CRISTALLINES ET SEDIMENTAIRES

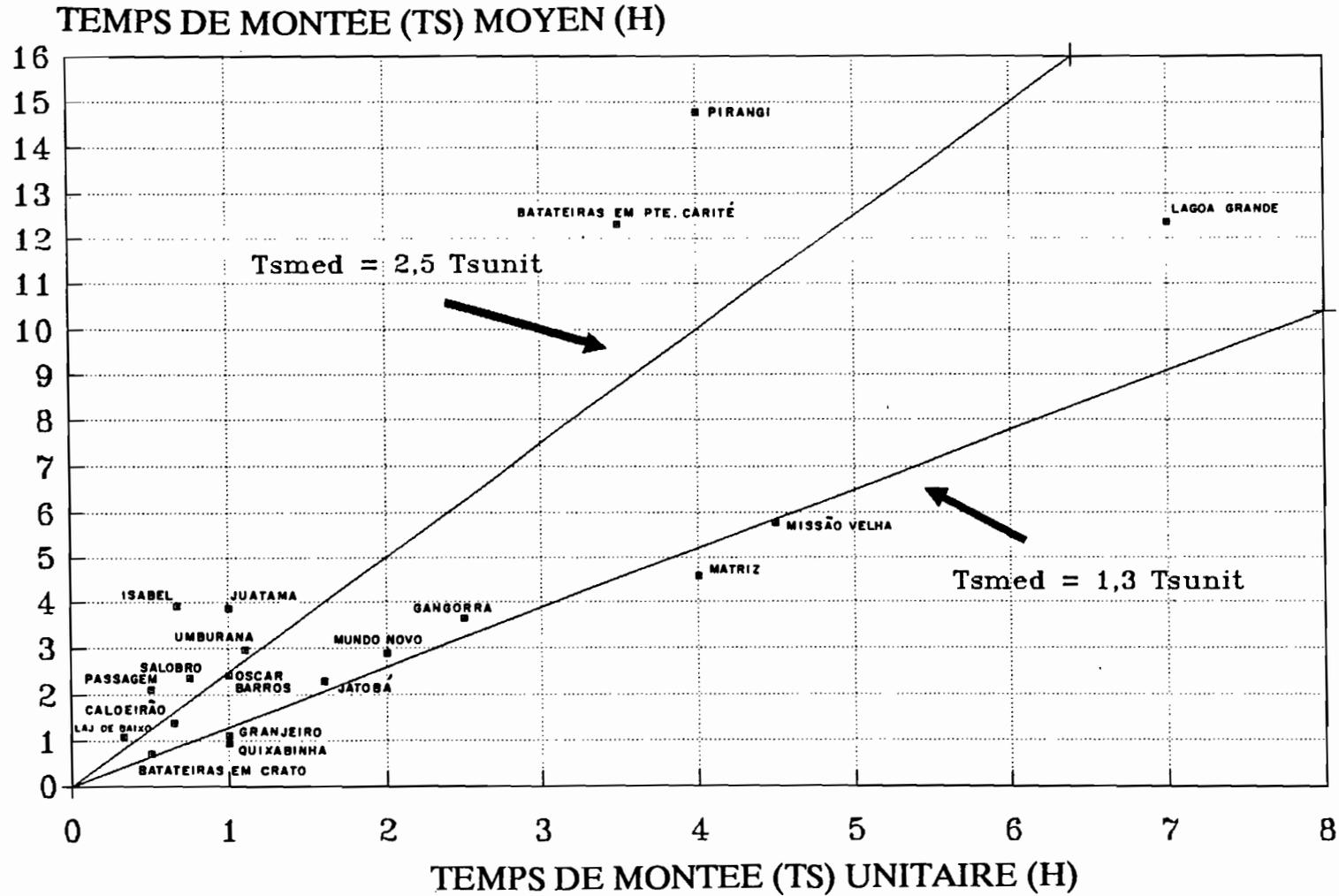
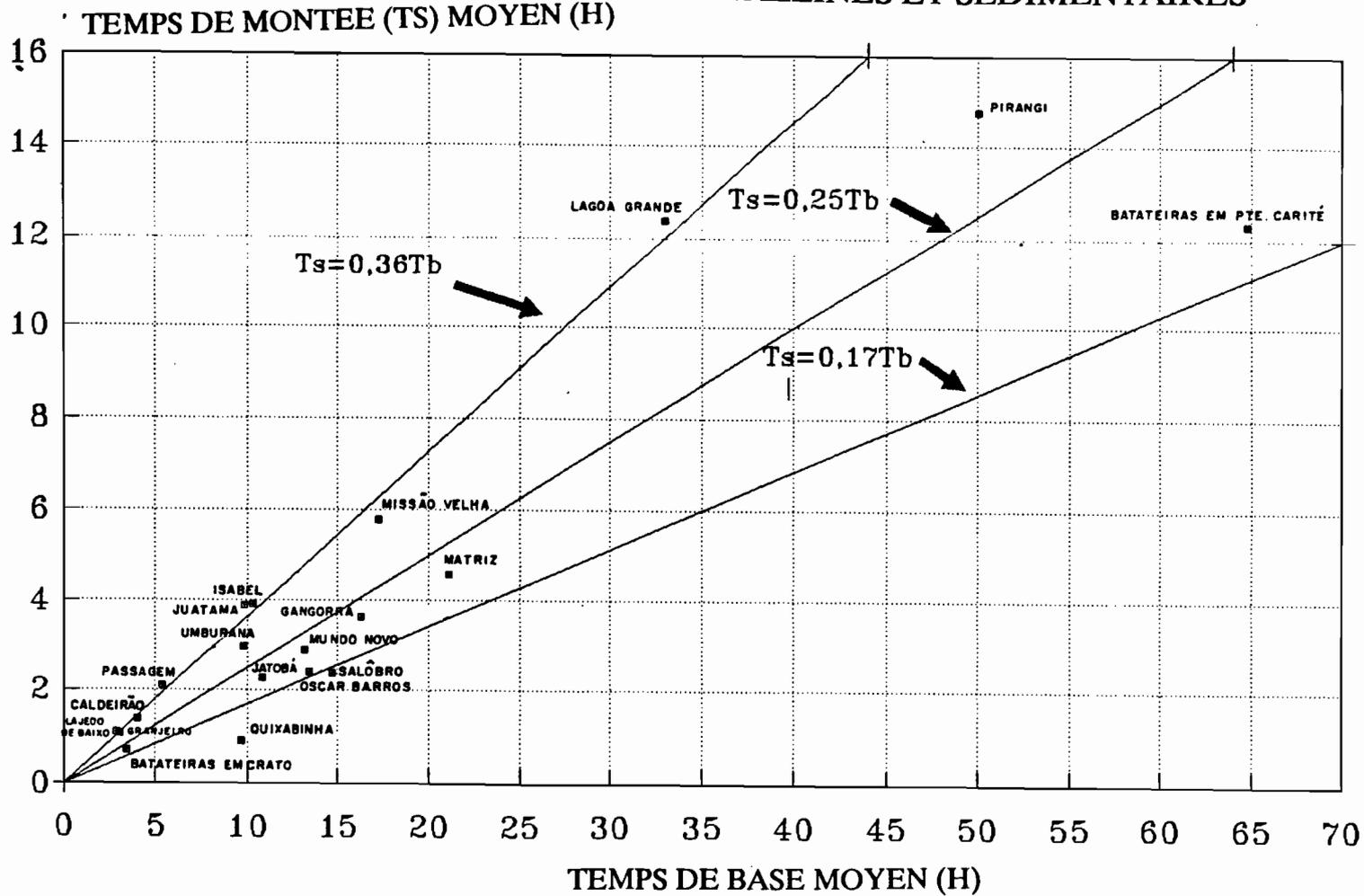


FIG. 10 **CARACTERISTIQUES DES CRUES**

T TEMPS DE MONTEE (TS) MOYEN EN FONCTION DU TEMPS DE
BASE MOYEN

BASSINS DES ZONES CRISTALLINES ET SEDIMENTAIRES



2.3 - ESTIMATION DU FACTEUR CORRECTIF DE CRUE FC

Pour estimer les coefficients correctifs proposés nous nous sommes basés sur:

- Les observations hydropluviométriques réalisées sur les bassins versants représentatifs du Nordeste Brésilien.
- Sur notre expérience personnelle et sur des formules proposées dans des conditions similaires par d'autres auteurs, lorsque nous ne disposons pas de données suffisantes et spécifiques au Nordeste, pour établir des corrections qui nous paraissent indispensables à l'utilisation de cette méthode.

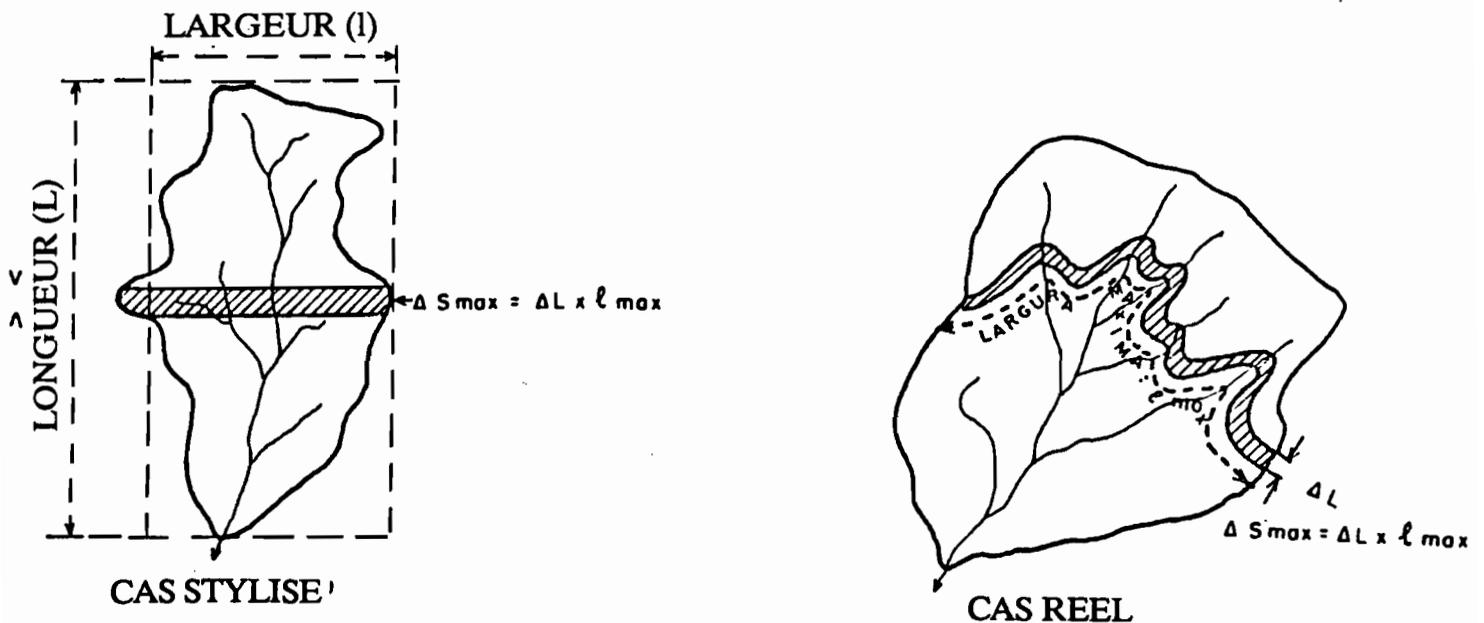
Nous nous sommes inspirés principalement des auteurs suivants:

- F.G. de AGUIAR, auteur très connu dans le Nordeste, dont la méthode y est très souvent utilisée.
- Des travaux et synthèses réalisés en Afrique, dans des conditions climatiques similaires, par les organismes et auteurs suivants : ORSTOM, CIEH, GRET, J. RODIER, P. RIBSTEIN, C. PUECH P.DUBREUIL et G. GIRARD.
- Des travaux et synthèses réalisés par la SUDENE et l'ORSTOM à l'occasion de l'élaboration de la Monographie hydrologique du Val du Jaguaribe (GVJ).
- Les travaux et formules utilisés par le BUREC et le Soil and Conservation Service des USA.
- Les travaux publiés par la SUDENE, qui proviennent de son programme d'étude de Bassins Versants Représentatifs et expérimentaux (BVR et BVE).

2.3.1 - Détermination du Coefficient de correction de forme (C_{form})

FIGURE A11

FORME DU BASSIN ET ISOCHRONES



Il est évident que la forme du bassin influera sur le temps de base des crues.

En simplifiant beaucoup la réalité et en considérant la théorie des lignes isochrones, pour la genèse des crues, la surface de la bande élémentaire qui devrait produire la pointe de crue est proportionnelle à la "largeur" maximum l_{max} du bassin.

Pour caractériser la forme du BVA nous avons donc choisi le coefficient L_{max}/l_{max} , de calcul très simple.

Dans la formule d'AGUIAR, la forme du BVA intervient, par l'intermédiaire L , qui est la longueur du cours d'eau le plus long. L , l et S sont liés par une relation du type $S = K.l.L$.

Dans cette formule, lorsque nous faisons varier la compacité du bassin entre deux valeurs opposées: compacte ($L/l = 2$) et très allongée ($L/l = 8$), les débits de pointe de crue diminuent de 30 à 50%, suivant la taille du bassin.

Ribstein, (La maîtrise des crues dans les bas fonds, page 327 et 380) recommande lui aussi, pour des bassins de surface inférieure à 10 km^2 , une diminution du Q_{max} lorsque les valeurs des coefficients de Gravelius C sont supérieures à 1,30. La correction proposée par Ribstein est équivalente à un coefficient C_{form} de 0,77 pour $C = 1,42$ et C_{form} de 0,62 pour $C = 1,54$.

On Calcule le coefficient C de Gravelius par la formule:

$$C = \frac{L + l}{(3,14 \times L)^{0,5} \times l}$$

Le Tableau du paragraphe 4.8.2.2 - A est compatible avec ces valeurs.

2.3.2 - DETERMINATION DU COEFFICIENT DE CORRECTION DE FORME DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE DE DRAINAGE C_{dren}

RIBSTEIN (La maîtrise des crues dans les bas fonds, p. 313), propose une majoration (ou minoration) maximale de 30% pour les débits de pointe en fonction des anomalies de forme du la réseau de drainage. Nous avons adopté des coefficients de correction légèrement inférieurs à ceux proposés par RIBSTEIN.

2.3.3 - DETERMINATION DU COEFFICIENT DE CORRECTION PAR LE RELIEF C_{rel} ET PAR LA PRESENCE DE DEPRESSIONS ET LACS C_{lag}

Aguiar propose une classification des bassins en 8 types, basée sur le le relief, la présence éventuelle de dépressions et la nature du sol. Pour $S = 500 \text{ km}^2$, les débits de pointe des deux types extrêmes varient dans un rapport de 3.

Les Bassins Versants représentatifs (BVR) exploités par la SUDENE, avec lesquels nous avons déterminé les équations qui permettent le calcul du débit de pointe, peuvent être être classés dans les types 2 ou 3 définis par Aguiar (bassin bien accidenté sans dépression évaporatoire ou bassin moyen. Le débit de pointe de ce type de bassin, toujours selon Aguiar, sera inférieur de 10 à 15% au débit du bassin le plus dangereux (du type 1).

Ribstein (La maîtrise des crues dans les bas fonds, p. 327) propose une majoration de 50% du temps de base et de 30% du débit de pointe dans le cas d'une dépression dans la partie aval qui représente 5% d'un bassin.

Les Tableaux proposés dans les paragraphes 4.8.2.2 - C et D sont, globalement compatibles avec ces ordres de grandeur.

2.3.4 - DETERMINATION DU COEFFICIENT DE CORRECTION DE PELLICULE DE SURFACE SOL COMPACTE OU TRONQUE C_{degr} , $Facr$

Nous n'avons observé des écoulements sur des zones de sol compacté ou tronqué que sur trois petits BVR de la SUDENE: les microbassins 3 et 4 de Sumé et la bassin de l'açude Luzimar. Sur ces petits bassins, nous avons constaté un accroissement de l'écoulement annuel de l'ordre de 200 à 300%. L'accroissement de la lame de crue décennale est, lui, plus faible et de l'ordre de 30 à 40%.

Le coefficient $Facr$ de 50% que nous proposons pour les classes de sol 3 et 4 est un peu plus fort, puisque le la bassin de Luzimar n'est pas totalement dégradé.

Pour les sols des classes 1 et 2, qui coulent moins, nous suggérons un facteur de $Facr$ de 100%, puisque le contraste entre les zones dégradées et les zones intactes risque de devenir encore plus grand .

Les valeurs de $Facr$ proposées sont grossières et indiquent seulement l'ordre de grandeur d'un phénomène très complexe qu'il serait illusoire de vouloir approfondir ici.

2.3.5 - DETERMINATION DU COEFFICIENT DE CORRECTION CLIMATIQUE C_{clim}

Cadier (1984) a proposé une diminution de 45% du débit de pointe de la crue décennale dans la zone de transition (pour une pluviométrie annuelle de 600 mm). Cette diminution n'est plus que de 20% pour une pluviométrie annuelle de 800 mm.

2.4 - COMPARAISON DES FORMULES SUDENE ET AGUIAR

En faisant varier la surface du BVA entre 10 et 5000 km², nous avons calculé les débits de pointe avec la formule d'AGUIAR pour 3 types de bassins:

$K = 0,1$ - le plus dangereux: "Petit, "ingreme" et rocheux"

$K = 0,35$ - intermédiaire

$K = 2,5$ - le moins dangereux: "Quasi horizontal, terrain sableux"

et pour deux compacités:

Compact: $L = 1,4 (S)^{0,5}$

Allongé: $L = 2,8 (S)^{0,5}$

Les mêmes calculs ont été effectués en utilisant la formule proposée par la SUDENE: $Q_x = 25 * (Sc)^{0,58} * Fc$, avec trois valeurs de Fc :

$Fc = 1,2$ (Les plus dangereux)

$Fc = 1$ (Bassin normal, sans correction)

$Fc = 0,5$ (Bassin moins dangereux)

Comparaison des formules de calcul de crue d'AGUIAR et SUDENE

FORMULE	FORME	SURFACE	5000 (km ²)	1000	500	100	10
A G U	Compact	K = 0,1	4853	1506	904	274	49
		K = 0,35	3459	1195	738	232	43
		K = 2,5	874	455	327	137	31
I A R	Allongé	K = 0,1	3219	1033	626	191	35
		K = 0,35	1968	750	478	158	30
		K = 2,5	349	201	153	73	20
S U D E N E		CORRECTION					
		1,2	4193	1650	1103	434	114
		1	3495	1373	919	361	95
		0,5	1747	687	460	181	48

La comparaison des deux formules montre que:

a) Pour 500 ou 1000 km² les deux formules fournissent des résultats équivalents.

Notons que, les plus faibles valeurs de la formule de la SUDENE sont bien supérieures aux plus faibles valeurs d'AGUIAR. Ceci est normal, puisque la surface Sc considérée dans la formule de la SUDENE peut être inférieure à la surface réelle du bassin. Ce sera toujours le cas pour les bassins sableux, qui correspondent à K = 2,5 dans la formule d'AGUIAR.

b) Pour les surfaces inférieures à 100 et surtout à 10 km², les valeurs calculés par AGUIAR sont bien inférieures à celles proposées par la SUDENE. Pour ces petits bassins on doit absolument utiliser la formule de la SUDENE qui a été établie à partir d'observations réalisées sur un échantillon de 19 petits Bassins dont AGUIAR ne disposait pas.

CONCLUSION:

Au dessus de 1000 km² - utiliser la formule d'AGUIAR
 En dessous de 500 km² - utiliser la formule de la SUDENE

Les deux formules sont utilisables entre 500 et 1000km².