

REPUBLIQUE TUNISIENNE  
MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE  
DIRECTION DES RESSOURCES EN EAU ET EN SOL  
DIVISION DES RESSOURCES EN EAU  
SERVICE HYDROLOGIQUE

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
ET TECHNIQUE OUTRE - MER  
MISSION EN TUNISIE

RECHERCHES EN MILIEU MEDITERRANEEN HUMIDE  
(Oued Sidi Ben Naceur, Nord - Tunisie)

**DEUX APPROCHES DIFFERENTES POUR LA DETERMINATION  
DES ECOULEMENTS DANS LE NORD DE LA TUNISIE  
A PARTIR DU BILAN HYDRIQUE**

G. AUBERTIN et D. IBIZA, Hydrologues à l'ORSTOM.

Septembre 1980

République Tunisienne

Ministère de l'Agriculture

DIRECTION DES RESSOURCES EN EAU

ET EN SOL

DIVISION DES RESSOURCES EN EAU

Service Hydrologique  
-----

République Française

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
ET TECHNIQUE OUTRE-MER

Mission Tunisie

RECHERCHE EN MILIEU MEDITERRANEEN HUMIDE  
(OUED SIDI BEN NACEUR, TUNISIE DU NORD)

DEUX APPROCHES DIFFERENTES POUR LA DETERMINATION  
DES ECOULEMENTS DANS LE NORD DE LA TUNISIE  
A PARTIR DU BILAN HYDRIQUE.

Guy AUBERTIN et Daniel IBIZA  
Hydrologues à l'ORSTOM

## S O M M A I R E

### AVANT-PROPOS

#### CHAPITRE PREMIER : Introduction

- I 1 Choix du pas de temps
- I 2 Définition des principales variables utilisées
- I 2-1 Pluviométrie
- I 2-2 Ecoulement
- I 2-3 Evaporation

#### CHAPITRE SECOND : Approche théorique pour la détermination des Ecoulements en Tunisie du Nord -

(Extrait du Rapport : "Recherches méthodologiques sur des bassins versants dans le Nord de la Tunisie" Chapitre 8)

- II 1 But recherché
- II 2 Processus d'Infiltration - Schéma simplifié
- II 2-1 Zone d'application : sols à recouvrement végétal important
- II 2-2 Effet de la végétation sur les caractéristiques physiques des sols dans l'horizon végétal
- II 2-3 Hydrodynamique et stockage
- II 2-4 Récapitulatif
- II 2-5 ETP - ETR
- II 3 Bilan hydrique sur les séquences pluvieuses
- II 3-1 But recherché
- II 3-2 Principe de la méthode
- II 3-3 Les éléments du bilan hydrique
- II 3-4 Méthode de calcul du déficit initial DEF
- II 3-5 Résultat obtenu sur le bassin versant amont
- II 3-6 Bassin aval
- II 3-7 Récapitulatif et conclusion.

## CHAPITRE TROISIEME

### APPROCHE SIMPLIFIEE POUR LA DETERMINATION DES ECOULEMENTS EN TUNISIE DU NORD

-----

- III 1 Présentation de la méthode utilisée
  - III 1-1 Données utilisées
  - III 1-2 Rappel du principe du bilan hydrique
- III 2 Régressions multiples
  - III 2-1 1ère régression : corrélation entre lame écoulée et précipitations
  - III 2-2 2ème régression : régression linéaire entre l'écart ( $D_1$ ) et la pluie antérieure ( $P_{a1}$ )
  - III 2-3 3ème régression : régression linéaire entre l'écart ( $D_{21}$ ) et la durée de la période sèche ( $D_{p1}$ )
  - III 2-4 Ajustement final : régression entre ( $P_1$ ) et ( $LE_1 + P_{11} + P_{21}$ )
- III 3 Examen des résultats - Interprétation
  - III 3-1 Précision des corrélations
  - III 3-2 Grandeurs physiques mises en évidence
    - III 3-2.1 Déficit hydrique initial des sols
    - III 3-2.2 Evapotranspiration moyenne journalière pendant la saison des pluies
    - III 3-2.3 Comportement des bassins quand le déficit hydrique des sols est nul.
- III 4 Résumé de la méthode

## CHAPITRE QUATRIEME

### CONCLUSION

-----

#### BIBLIOGRAPHIE

- ANNEXE 1 - Présentation du bassin versant de l'Oued Sidi Ben Naceur
- ANNEXE 2 - La méthode des déviations résiduelles - Rappel théorique -

AVANT - PROPOS

Cette note présente deux approches d'une méthode d'étude des écoulements établie lors de l'exploitation des mesures hydrologiques et climatologiques effectuées sur le bassin versant de l'Oued Sidi Ben Naceur ou B.V.N.\* (TUNISIE du Nord) entre 1973 et 1979.

Il nous est apparu que le schéma du bilan hydrique classiquement appliqué dans les régions tempérées est aussi applicable à la Tunisie du Nord:

- d'une part les intensités des précipitations s'abattant sur la Tunisie du Nord sont tout à fait comparables à celles des pays tempérés. En effet les courbes intensité-durée établies par Montmarin à Tunis (1) sont inférieures à celles données par la formule de Caquot à Paris.
- d'autre part la couverture végétale relativement importante assure une bonne perméabilité des sols en surface.

Deux approches fondées sur le principe du bilan hydrique sont développées :

- la première, relativement élaborée met en oeuvre un traitement informatique. Elle est extraite du rapport intitulé "Recherches méthodologiques sur des bassins versants dans le Nord de la Tunisie", qui est à ce jour en cours de publication.
- la seconde, simplifiée, est inspirée des résultats précédents et consiste en une approche manuelle du phénomène hydrologique et a un intérêt régional.

Avant d'entreprendre la description précise de ces deux approches dans un premier chapitre nous justifierons le choix du pas de temps, la séquence pluvieuse en l'occurrence, et nous définirons les principales variables utilisées.

\* B.V.N. : Bassin Versant du Nord.

La description précise des bassins versants de l'Oued Sidi Ben Naceur sur lesquelles ont été effectués l'ensemble des mesures hydrologiques ayant servi de base au présent travail, doit être publié dans des rapports non encore édités à ce jour. Le lecteur trouvera dans l'annexe 1 un résumé des principales caractéristiques du bassin versant de l'Oued Sidi Ben Naceur.

---

Chapitre premier

I N T R O D U C T I O N

-----

## Chapitre Premier : INTRODUCTION

### I.1. - CHOIX DU PAS DE TEMPS

La production d'écoulement dans le temps est en relation directe avec le régime des précipitations. Il apparaît à la lecture des tableaux de pluviométrie journalière établis à la station météorologique du BVN que les précipitations peuvent être groupées en séquences de quelques jours de pluies séparées de séquences de jours sans pluie. Ces séquences de jours pluvieux correspondent aux passages des systèmes nuageux associés eux-mêmes aux dépressions atmosphériques circulant grossièrement d'Ouest en Est.

Il nous est paru intéressant d'envisager l'étude des écoulements à l'échelle des séquences pluvieuses. Ce pas de temps est suffisamment fin pour qu'on puisse bien appréhender les relations pluies-écoulements. Ce pas de temps est donc directement lié aux événements physiques. On évite ainsi les problèmes qui se posent lors des choix de pas de temps fixes (hebdomadaires, décadaires ou mensuels) qui ne sont pas directement liés aux événements physiques.

### I.2. - DEFINITIONS DES PRINCIPALES VARIABLES UTILISEES

#### I.2.1. - Pluviométrie

Séquence pluvieuse : une telle séquence se définit comme étant, précédée d'un jour à pluviométrie nulle, constituée de n jours à pluviométrie non nulle et suivie d'un jour à pluviométrie nulle.

Notons que dans/<sup>la</sup> présente étude, seules les séquences pluvieuses ayant produit un écoulement ont retenu notre attention.

Pluie pendant la séquence pluvieuse : la pluie moyenne tombée sur le bassin versant, au cours de la séquence pluvieuse a été calculée par la méthode de Thiessen à partir des mesures effectuées à chacun des pluviomètres implantés sur le bassin (voir carte d'implantation des pluviomètres dans (2).



Séquence sèche : une telle séquence est constituée de jours consécutifs à pluviométrie nulle (ou inférieure à 1 millimètre).

### I.2.2. - Ecoulement

#### I.2.2.1. - Définitions

L'écoulement total ( $L_{ET}$ ) pendant les séquences pluvieuses est la somme du ruissellement ( $L_{RU}$ ), du ressuyage ou drainage oblique ( $L_{RE}$ ) et du débit de base ( $L_{DB}$ ). On a donc

$$L_{ET} = L_{RU} + L_{RE} + L_{DB}$$

Cette décomposition de l'écoulement total en trois termes est classique pour les hydrologues. Elle peut être obtenue facilement par report des hydrogrammes sur papier semi-logarithmique.

Ruissellement : il représente la quantité d'eau qui s'écoule pendant les crues. Cette phase est de courte durée (2 heures). La durée correspond à la première droite obtenue sur papier logarithmique.

Ressuyage : il représente la quantité d'eau qui s'écoule une fois que la phase de ruissellement est terminée. Sur le BVN on observe pour la plupart des crues; deux phases de ressuyage (deux droites sur le papier logarithmique). Lors de la première phase de ressuyage le débit met environ 10 heures pour décroître dans les proportions de 10 à 1. Pendant la seconde phase de ressuyage le débit met environ 3 à 4 jours pour décroître dans les proportions de 1 à 0,1.

Débit de base : il est constitué par la quantité d'eau que les aquifères de surface restituent aux rivières. La durée de cette phase d'écoulement peut être longue. Sur le papier logarithmique la droite qui le caractérise à la pente la plus faible.

#### I.2.2.2. - Détermination pratique des écoulements à l'échelle de la séquence pluvieuse.

Le procédé de décomposition théorique des écoulements étant lourd on a utilisé la méthode approximative suivante, qui s'est avérée satisfaisante en raison de la modeste participation des phases lentes d'écoulement (2ème phase de ressuyage, débit de base) au bilan hydrique sur le BVN.

La détermination des écoulements a été effectuée en retranchant à la somme des débits moyens journaliers correspondant à la séquence pluvieuse considérée :

. le ressuyage éventuel des écoulements de la séquence pluvieuse précédente (cas où deux séquences pluvieuses ayant produit des écoulements sont rapprochées dans le temps). L'estimation du ressuyage des écoulements des séquences pluvieuses précédentes a été effectuée d'après des valeurs types mises en évidence lors de l'étude sur papier logarithmique des débits instantanés de crues bien individualisées en fonction du temps.

. le débit de base (quand il existe) en prenant pour valeur moyenne de chaque jour de la séquence d'écoulement, la moyenne du débit de base initial et du débit final. Sur le BVN les débits de base sont très faibles pendant la saison des pluies et pratiquement inexistant pendant le reste de l'année.

I.2.3. - Evaporation

Un bac d'évaporation a permis de déterminer une valeur régionale de l'évapotranspiration donnant des résultats voisins de la formule de PENMAN. Les valeurs moyennes journalières exprimées en millimètres pour chaque mois sont consignées dans le tableau suivant :

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Evaporation moyenne journalière en mm.	1,0	2,0	2,9	3,5	3,7	4,2	4,8	4,8	3,5	3,1	2,2	1,7

Chapitre second

APPROCHE THEORIQUE POUR LA DETERMINATION  
DES ECOULEMENTS EN TUNISIE DU NORD

-----

Chapitre Second : APPROCHE THEORIQUE POUR LA DETERMINATION  
DES ECOULEMENTS EN TUNISIE DU NORD (EXTRAIT DU RAPPORT "RECHERCHES METHODOLOGIQUES  
SUR DES BASSINS VERSANTS DANS LE NORD DE LA TUNISIE" - CHAPITRE 8.

II.1. - BUT RECHERCHE

L'analyse des mesures hydrométriques a permis de montrer la bonne homogénéité d'ensemble des comportements hydriques des différents bassins. Les singularités observées sur les petits bassins par rapport au processus général, semblent essentiellement provoquées par un couvert végétal spécifique. Ces résultats qui confirment l'homogénéité des sols, présentés par l'étude pédologique, nous encouragent à aborder l'étude de bilans hydriques d'un point de vue global et à rechercher des grandeurs moyennes à l'échelle de chaque bassin versant, considéré comme une entité homogène.

Notre objectif est triple et essentiellement orienté par les problèmes de variation d'échelle :

- Dans l'optique d'une éventuelle discrétisation spatiale nous cherchons à définir sur ces bassins des grandeurs biophysiques invariantes typiques pour améliorer nos connaissances dans le domaine de la "production des écoulements".
- Nous souhaitons pouvoir rattacher ces grandeurs moyennes à des mesures ponctuelles affectées soit sur des parcelles, soit au moyen d'infiltromètres.
- Nous nous proposons d'étendre à des bassins plus vastes cette approche globale du bilan hydrique par des méthodes appropriées en particulier par le choix d'un pas de temps judicieux .

Pour notre investigation nous utiliserons un processus d'infiltration schématique plus ou moins admis à l'heure actuelle.

II.2. - Processus d'infiltration schéma simplifié (milieu naturel)

L'interprétation des profils neutroniques effectués par l'ORSTOM en Côte d'Ivoire, à Madagascar et en Tunisie permettent une esquisse de l'hydrodynamique des sols.

Les graphiques F2.1. inspirés de mesures réelles permettront d'illustrer une description schématique des principaux transferts hydriques qui s'effectuent dans les sols, plus ou moins admise à l'heure actuelle. Ces éléments théoriques semblent pratiquement validés par les différentes équipes de chercheurs qui étudient ces phénomènes par des approches différentes.

Nous présentons ici quelques traits essentiels.

#### II.2.1. - Zone d'application : Sols à recouvrement végétal important

Nous regroupons sous ce vocable tous les types de végétation dont la densité de recouvrement au sol est importante, (disons pour fixer les idées supérieures à 70%), dont le volume végétal est relativement peu variable tout au long de l'année et dont la fonction des racines reste active au moins dix mois par an ce qui nous permet de penser qu'elle est peu évolutive.

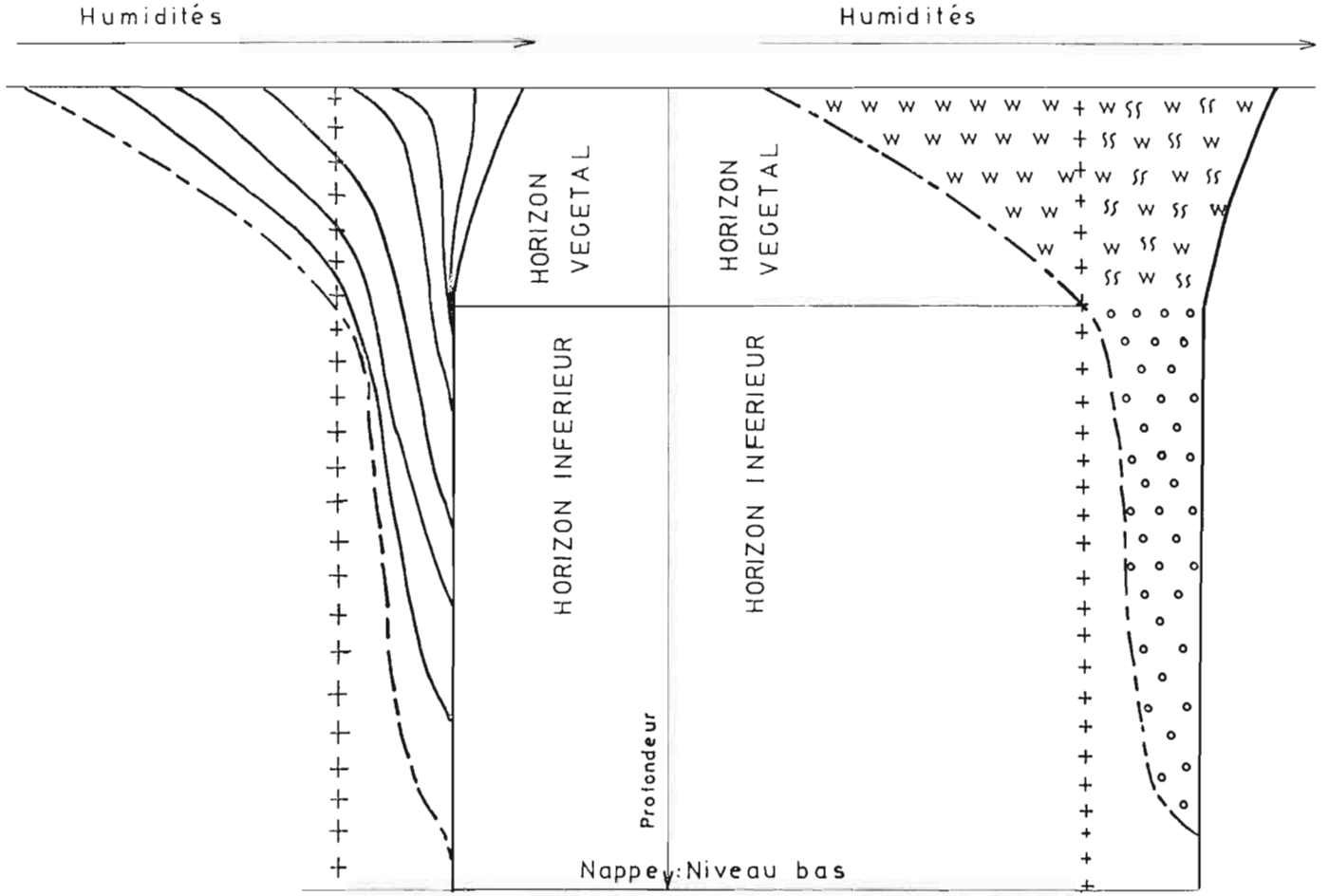
Les couverts végétaux ainsi définis sont susceptibles d'avoir une action de surface sur les propriétés physiques intrinsèques des sols importants qui en modifie le comportement. A l'intérieur de l'horizon végétal, le complexe sol-végétation doit être étudié globalement, sur sols en place, sans en dissocier les deux composantes.

Les techniques, d'utilisation récente, de mesures de l'infiltration par simulation des pluies, qui ne désorganisent pas la structure de surface sont susceptibles dans un avenir très proche de nous fournir les mesures qui nous manquent pour confirmer les quelques éléments théoriques qui nous servirait de schéma directeur de base.

#### II.2.2. - Effet de la végétation sur les caractéristiques physiques des sols dans l'horizon végétal

La végétation est susceptible de modifier en surface les caractéristiques physiques des sols par les effets suivants : effet de protection du sol, de l'énergie cinétique de la pluie, maintien par l'implantation des racines d'une structure aérée des sols, effets de macroperméabilité et d'infiltration préférentielle dus aux racines et à l'activité biologique qui est liée à la végétation. On peut dire avec une quasi certitude que tous ces effets tendent généralement à une augmentation importante de la perméabilité de l'horizon de

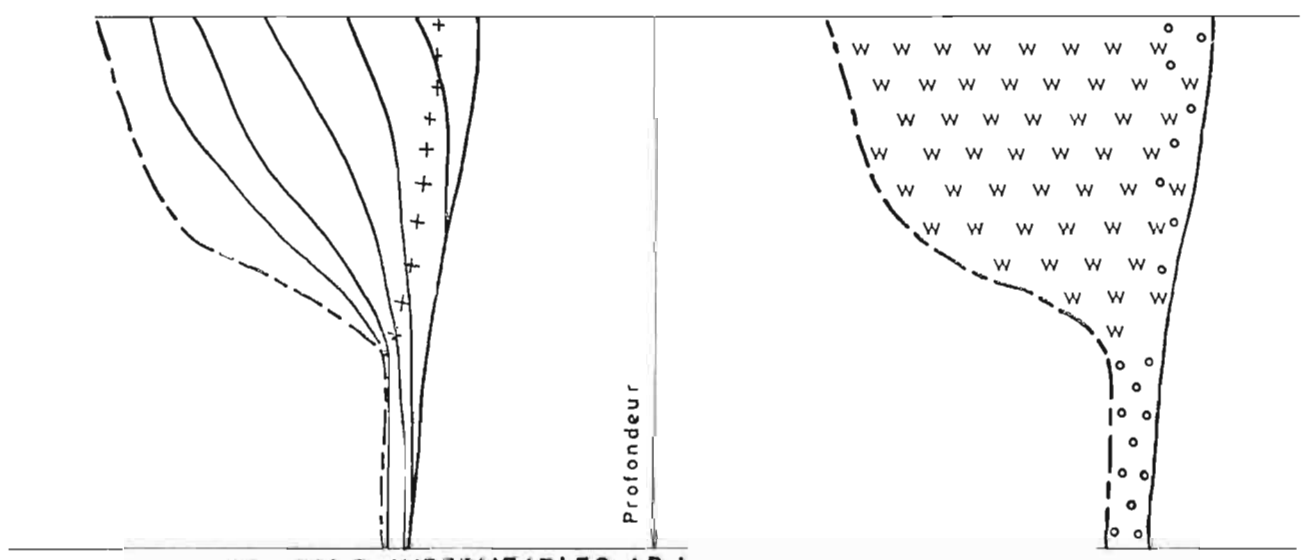
# SOLS A RECOUVREMENT VEGETAL IMPORTANT PROFILS HYDRIQUES HYDRODYNAMIQUES STOCKAGE SCHEMATISATION



a) SOLS PERMÉABLES (d'après Ambatomainy)

----- Profil sec stabilisé  
 + + + + Profil de rétention  
 ——— Profil de saturation

w w Evaporation pure  
w sr Evaporation percolation et drainage oblique  
o o Percolation



b) SOLS IMPERMEABLES (B V)

surface et que cette perméabilité diminue dans l'horizon végétal de la surface vers le fond. En dehors de l'horizon végétal les propriétés physiques intrinsèques des sols redeviennent dominantes et conditionnent la percolation en profondeur.

### II.2.3. - Hydrodynamique et stockage

L'horizon végétal joue un rôle spécifique, de distributeur des différents types d'écoulement, et de zone dans laquelle s'effectuent l'essentiel des échanges et des transferts hydriques.

#### II.2.3.1. - Capacité de stockage dans l'horizon végétal

Le prélèvement d'eau dans cet horizon au-dessous de l'état de rétention ne peut être effectué que par l'apport d'une certaine énergie sous l'action des racines ou directement, par énergie solaire dans l'horizon de surface. Cette fonction permet de rendre disponible dans l'horizon végétal une première capacité de stockage qui ne peut produire que de l'évapotranspiration ou de l'évaporation.

En reprenant les notations utilisées en agronomie on peut distinguer :

- capacité de stockage à l'état de rétention  $W_R$  c'est toute l'eau contenue dans cet horizon à l'état de rétention
- capacité de stockage résiduelle (point de flétrissement  $W_f$ ), quantité d'eau résiduelle qui ne peut être extraite par la végétation. Pour peu que la saison sèche soit bien accentuée cet état est atteint le plus souvent en fin de saison sèche et représente un état initial bien défini de début de saison des pluies.
- capacité de stockage utile :  $W_u$

$$W_u = W_R - W_f$$

#### II.2.3.2. - Fonctions de l'horizon végétal.

On peut distinguer différentes phases de fonctionnement de cet horizon :

\* phase de rehumidification : les premières pluies comblent le déficit hydrique dans le sol jusqu'à l'état de rétention. Au cours de cette phase les écoulements de toutes natures peuvent être considérés comme nuls ou très faibles en raison de la forte perméabilité des sols secs.

\* phase d'écoulement : lorsque l'état de rétention est dépassé sur tout l'horizon, tous les types d'écoulement peuvent apparaître, et apparaissent au cours des averses, plus ou moins simultanément.

a) ruissellement : le ruissellement ne peut apparaître que lorsque l'horizon de surface a atteint un état proche de la saturation (en raison des faibles intensités d'averses), ce qui suppose dans l'hypothèse d'une perméabilité décroissante de la surface vers le fond, que cet état a plus ou moins été atteint sur toute la profondeur de l'horizon végétal.

b) drainage oblique (ou écoulement hypodermique ou ressuyage apparent) : c'est un écoulement souterrain tangentiel qui ne peut apparaître de façon systématique que dans l'hypothèse d'un gradient de perméabilité décroissant.

c) la percolation est un écoulement vertical vers les horizons profonds des sols et éventuellement vers la nappe. Elle ne peut apparaître que lorsque tout l'horizon de surface a dépassé l'état de rétention.

\* phase de ressuyage : après une averse qui a provoqué des écoulements le profil hydrique dans l'horizon végétal qui a le plus souvent atteint l'état de saturation tend à revenir naturellement vers l'état de rétention par ressuyage sous l'effet combiné de la percolation et du drainage oblique.

\* phase d'assèchement : c'est la phase inverse de la phase de rehumidification. Le déficit qui se crée dans le sol pendant cette phase résulte d'une restitution à l'atmosphère par évaporation.



### II.2.3.3. - Horizons inférieurs

Les variations d'humidité dans cet horizon semblent traduire un ressuyage par percolation. Les variations de stockage de cet horizon pourraient être rattachées au complexe "nappe". Les remontées par capillarité dans l'horizon végétal nous paraissent en effet peu probables.

### II.2.4. - Récapitulatif

Le schéma de fonctionnement des sols à fort recouvrement végétal nous paraît bien représenté par un fonctionnement "à réservoir" du type utilisé dans le modèle "Canadien" à discrétisation spatiale depuis 1980.

On admet que les écoulements ne peuvent apparaître que lorsque le réservoir de surface est rempli. Ce réservoir représente la capacité de stockage  $W_u$  et peut être considéré comme initialement vide en début de saison des pluies si la saison sèche est suffisamment accusée.

### II.2.5. - ETP-ETR

En Tunisie, il semble parfois excessif d'admettre l'ETP pour valeur approchée de l'ETR, même en pleine saison des pluies, en raison de la longueur de certaines périodes d'assèchement.

On distingue deux processus selon qu'on se trouve en phase d'assèchement ou de réhumidification.

#### II.2.5.1. - Phase d'assèchement

##### II.2.5.1.1. - Observation des profils hydriques EVN (cf. étude DELHUMEAU)

Les graphiques F.2.2 extraits de l'étude de DELHUMEAU sur parcelles, représentent les déficits d'humidité par rapport à l'état de saturation à deux sites représentatifs, l'un sur parcelle à maquis

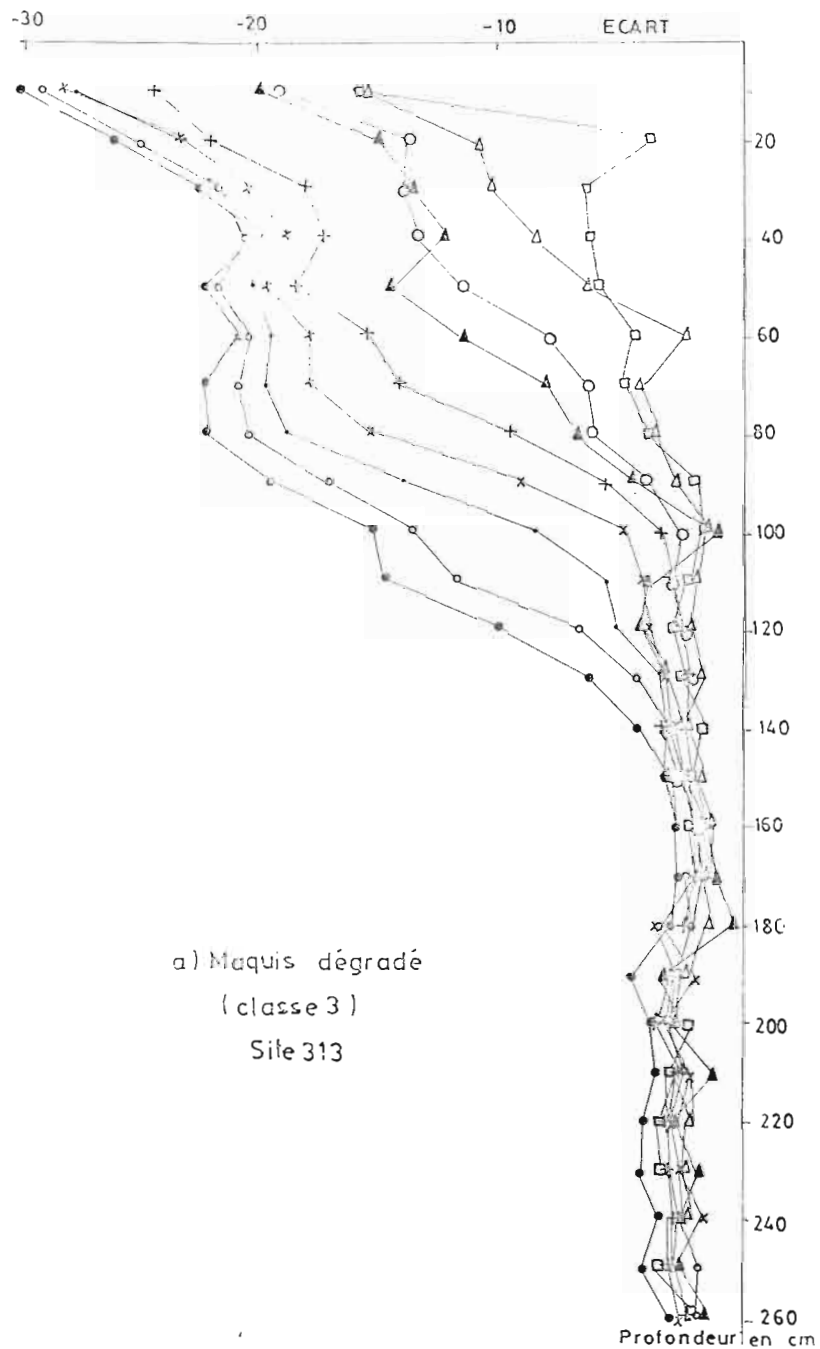
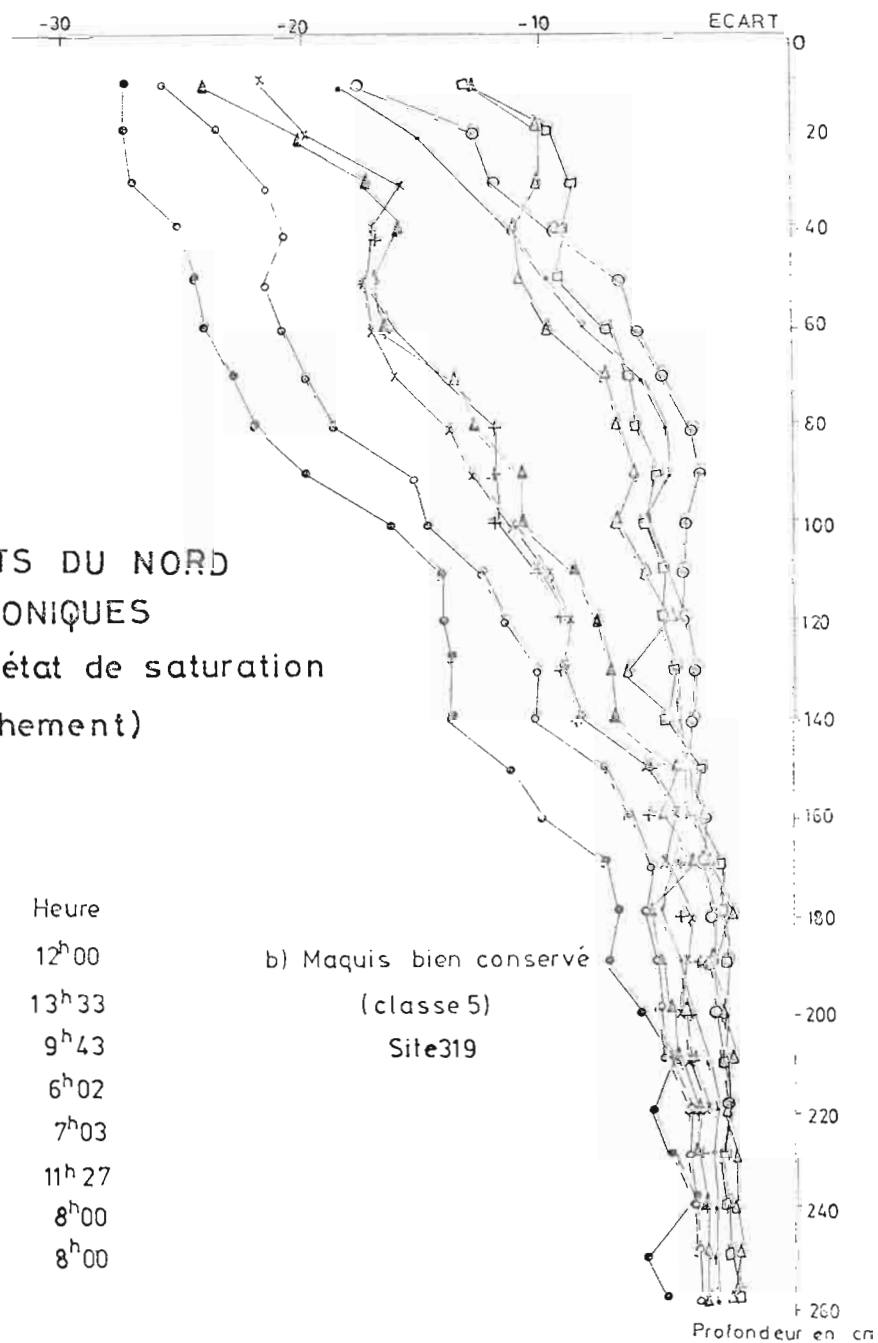


FIG. 22

BASSINS VERSANTS DU NORD  
PROFILS NEUTRONIQUES  
Déficits par rapport à l'état de saturation  
(Phase d'assèchement)

	Jour	Heure
▲	31 / 3 / 77	12 <sup>h</sup> 00
○	26 / 4 / 77	13 <sup>h</sup> 33
○	21 / 5 / 77	9 <sup>h</sup> 43
▲	17 / 6 / 77	6 <sup>h</sup> 02
+	19 / 6 / 77	7 <sup>h</sup> 03
x	2 / 7 / 77	11 <sup>h</sup> 27
○	5 / 8 / 77	8 <sup>h</sup> 00
●	30 / 8 / 77	8 <sup>h</sup> 00



bien conservé, l'autre sur parcelle à maquis dégradé. Ces profils représentent la phase d'assèchement.

On observe que l'évolution des profils d'assèchement se poursuit jusqu'au 30 août ce qui laisse supposer que les plantes continuent à évaporer jusqu'à cette période.

Les différents profils d'assèchement constituent un faisceau de droites ayant en commun un point invariant que l'on peut identifier comme le fond de l'horizon végétal. Ce faisceau s'élargit vers la surface.

Quelque soit l'explication théorique, énergétique, (les racines fonctionnent comme une pompe dont le rendement diminue lorsque l'énergie d'extraction augmente) ou chimique (cycle court accéléré dans l'horizon de surface), on constate que les plus fortes variations de stock s'effectuent toujours en surface.

Le prélèvement par évaporation des plantes est bien plus intense en surface. Les mesures de profils neutroniques sur le BVN mettent clairement ce phénomène en évidence. Ce schéma est généralement observé sur tous les sols à recouvrement végétal important et dans tous les climats.

#### II.2.5.1.2. - Loi approchée de l'ETR

On peut considérer que l'ETR est proportionnelle à l'ETP du moment mais également proportionnelle au stock actuel dans l'horizon végétal.

$$ETP = K (\text{climat}) \times W_u$$

$$ETR = K (\text{climat}) \times (W - W_f)$$

$$ETR = ETP (W - W_f) / W_u \quad (1)$$

Cette loi est couramment admise. Elle traduit une variation exponentielle de l'ETR en fonction du temps lorsque le déficit dans le sol augmente.

En effet, l'équation de continuité, en l'absence de précipitations permet d'écrire

$$dW/dT = ETP = -KW$$

$$\frac{dW}{W} = -k dT$$

Pour une ETP constante le stock dans le sol, en phase d'assèchement a une évaluation exponentielle ainsi que l'ETR.

Nous préférons en pratique remplacer dans la formule  $W_u$  par  $W_R$  pour obtenir un épuisement du stock en un temps fini. Cette formule devient alors

$$ETR = ETP \cdot W/W_R \quad (2)$$

W étant borné inférieurement par  $W_f$ .

#### II.2.5.2. - Phase de réhumidification

Pendant la phase de réhumidification les précipitations sont "perchées" c.-à-d. qu'elles commencent à réhumidifier les parties du sol en contact avec la surface. Les pluies peuvent être considérées comme entièrement disponibles pour l'évaporation et on peut considérer pendant cette période que :

$$ETR = ETP$$

### II.3. - Bilan hydrique sur les séquences pluvieuses - BVN Amont

#### II.3.1. - But recherché

L'objectif est de définir avant chaque séquence pluvieuse la partie du déficit du sol DEF qui doit être prise en considération dans l'écoulement produit par la séquence pluvieuse.

Nous nous proposons d'utiliser les écoulements observés pour caler et mettre au point une fonction de calcul de DEF.

Le problème se pose sur les BVN et sur le Nord de la Tunisie sous forme extrêmement complexe.

La capacité de stockage à rétention de l'horizon végétal est en effet particulièrement élevée. D'autre part, la structure du sol dans cet horizon évolue fortement avec la saison des pluies. En début de saison les fentes de retrait rendent cet horizon très perméable. Lorsque les sols sont réhumidifiés ils se comportent alors comme des sols imperméables.

Si on réussit sur ce type de sols à mettre au point une fonction de calcul de la fraction du déficit intervenant dans la production d'écoulement, on peut espérer pouvoir l'appliquer dans des cas plus simples.

#### II.3.2. - Principe de la méthode

Le bilan est effectué de la fin de la séquence pluvieuse précédente à la fin de la séquence pluvieuse observée. L'écoulement est calculé, par bilan, par la formule

$$LE = P - DEF - EV$$

avec les notations suivantes :

LE = écoulements rapides pendant la séquence

P = Pluie pendant la séquence pluvieuse

DEF = partie du déficit initial du sol qui influence l'écoulement

EV = évaporation pendant la séquence pluvieuse.

### II.3.3. - Les éléments du bilan hydrique

#### II.3.3.1. - L'évaporation

Par raison de simplification, l'ETP journalière est la moyenne journalière de l'ETP pour le mois considéré.

ETP régionale en mm/j

! Mois !	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
! ETP !	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
! (mm/j) !	1,8	2,0	2,9	3,5	3,7	4,2	4,8	4,8	3,5	3,1	2,2	1,7

#### II.3.3.2. - Précipitations

Ce sont les précipitations moyennes sur le bassin Amont. Les dates inscrites dans la colonne 2 du tableau T.2.2. correspondent aux jours de pluie de la séquence.

#### II.3.3.3. - Les lames écoulées ont été calculées :

à partir des volumes écoulés journaliers en retranchant les débits de base et éventuellement le ressuyage rapide de l'épisode précédent.

#### II.3.4. - Méthode de calcul du déficit initial DEF

Nous avons testé de nombreuses méthodes pour aboutir, par éliminations successives, à une méthode relativement simple.

Le calcul du déficit est effectué chaque jour par un programme et cette valeur DEF est utilisée dans le bilan général.

#### II.3.4.1. - Première approche

Le déficit dans l'horizon végétal est calculé jour par jour par la formule

$$DEF = DEF - P + ETP$$

T 22 BVN AMONT - Bilan hydrique

ANNEE 1973 - 1974

N° Code	Jours/pluie	Mois	LE	P	DEFI	β-DEFI	EV	P-DEFI-EV
O3	24-25-26-27	10	21,1	158,6	140,8	17,8	12,4	5,4
D3	2-3	12	1,1	27,4	46,4	-199	3,4	-22,0
D3	12-13-14	12	3,7	28,4	31,8	-3	5,1	-8,0
J4	1	1	13,0	16,0	16,0	0,0	1,8	-1,8
J4	7-8-9-10	1	1,0	16,0	10,1	6,0	5,4	1
F4	3-4-5-6	2	1,8	28,2	21,5	7,0	8,0	-1,0
F4	13-14	2	22,3	53,4	10,1	44,1	4,0	40,0
F4	16-17	2	5,5	13,1	1,9	11,0	4,0	7,0
F4	22-23-24-25-26	2	57,0	78,8	7,6	71,2	10,0	61,2
M4	3-4-5-6-7-8	3	13,0	40,8	8,4	32,4	17,4	15,0
M4	29-30-31	3	0,0	22,9	32,7	-10,0	8,7	-18,7
A4	3-4-5	4	2,0	23,4	20,4	3,0	-10,5	-13,0
A4	16-17-18	4	5,6	26,2	15,3	11,0	10,5	0
A4	24	4	1,9	13,6	13,3	0,0		

ANNEE 1974-1975

N° Code	Jours/pluie	Mois	LE	P	DEFI	β-DEFI	EV	P-DEFI-EV
O4	20-21	10	0,0	42,9	139	-96,0		
O4	26-27-28-29-30-31	10	2,5	80,9	113,0	-32,1	-18,6	
N4	5-6-7-8	11	55,3	131,7	59,2	72,5	8,8	63,7
D4	11-12-13	12	16,6	51,9	31,7	20,2	5,1	15,1
J5	19-20-21	1	7,0	48,9	38,4	10,0	5,4	5,0
F5	3-4-5	2	35,0	62,3	17,3	45,0	6,0	39,0
F5	12-13-14	2	16,0	33,6	11,2	22,4	6,0	16,4
F5	15-16-17	2	42,0	55,6	1,3	54,0	6,0	48,0
M5	7-8-9	3	6,0	26,8	18,7	8,0	8,7	0,0
M5	13-14-15	3	5,0	20,4	8,1	12,3	8,7	3,6
M5	22-23-24	3	21,1	35,9	2,7	33,2	8,7	24,5
A5	31-1	4	2,0	19,3	15,6	3,7	7,0	-3,0
M5	11-12-13	5	0,0	34,5	50,0	-15,0	11,0	-25,0

T 22 BVN AMONT BILAN HYDRIQUE  
(suite)

ANNEE 1975-1976

N° Code	Jours/Pluie	Mois	LE	P	DEFI	β-DEFI	EV	P-DEFI -EV
O5	16-17-18-19-20	10	1,0	102,9	169,2	-66,0	-15,0	-81,0
N5	2-3-4-5-6-7		12,5	119,0	86,0	33,0	13,2	19,8
N5	19-20-21-22	11	92,8	161,7	19,5	142,0	8,8	130,0
N5	27-28	11	33,0	55,3	7,8	47,5	4,4	43,0
D5	1	12	17,5	29,1	1,8	27,3	1,7	25,6
D5	20	12	1,4	10,2	15,5	-5,0	1,7	-6,7
D5	26	12	2,6	8,2	7,2	1,0	+1,7	-0,7
D6	7-8	1	0,5	12,9	16,6	-4,0	3,0	-7,0
J6	17-18-19-20	1	4,2	20,3	17,1	3,2	7,2	-10,0
J6	26-27-28	1	32,0	56,0	10,6	45,0	5,4	39,6
F6	1-2	2	6,9	17,9	5,1	12,8	5,8	7,0
F6	11-12-13-14	2	8,5	22,2	7,2	15,0	8,0	7,0
F6	15-16	2	20,3	30,9	0,4	30,4	4,0	26,0
F6	23-24-25-26	2	2,5	16,5	10,6	6,0	8,0	-2,0
M6	13-14	3	12,7	38,5	28,5	10,0	5,0	5,0
M6	16-17	3	15,1	28,4	2,7	25,7	5,8	20,0
M6	23-24-25	3	12,6	14,0	9,5	4,5	8,7	-4,5
A6	11-12	4	1,3	18,3	22,5	-	-	-
A6	19-20	4	0,0	18,2				
M6	14-15-16	5	3,4	43,0	45,0	-		

ANNEE 1976-1977

N° Code	Jours/Pluie	Mois	LE	P	DEFI	β-DEFI	EV	P-DEFI -EV
O6	16-17-18	10	2,2	49,7	70,8	-	-	-
O6	20-21	10	7,5	43,0	47,0	-4,0	6,0	-10,0
O6	25-26	10	2,1	25,9	18,3	7,6	6,0	1,0
N6	4-5	11	3,1	21,9	9,4	12,5	4,0	8,0
N6	13-14	11	6,5	29,5	4,9	25,0	4,4	21,0
N6	16-17-18-19	11	68,0	70,5	2,0	128,0	+5,4	112,6
N6	20-21-22	11	30,0	59,7				
N6	29-30	11	3,4	12,8	8,1	4,7	4,4	+0,3
D6	2-3-4-5	12	13,7	22,0	2,0	20,0	6,8	13,2
D6	21-22-23	12	16	33,0	8,7	24,3	5,1	19,2
D6	25-26	12	5,5	13,2	1,6	11,6	3,4	8,2
J7	6-7-8-9	1	16,2	37,2	15,9	21,3	7,2	14,1



T 22 BVN AMONT BILAN HYDRIQUE  
(suite 22)

ANNEE 1977-1978

N° Code	Jours/Pluie	Mois	LE	P	DEFI	β-DEFI	EV	P-DEFI-EV
N7	22-23-24-25-26-27	11	0	58,0				
J8	17-18-19	1						
J8	18-19-20-21-22-23	1	5	82,9	8,1	0,1		
F8	28-29-30-31-1-2-3-4	2	29,0	78,2	27,7	50,2	19,7	30,8
F8	6-7-8	2	7,8	22,2	1,9	20,3	6	
F8	12-13-14-15	2	29,0	56,4	5,7	50,7	8	42,7
M8	1	3	4,7	30,2	23,0	7,2	2,9	14,3
M8	5-6-7-8-9	3	3,0	25,7	8,1	17,6	14,5	3,1
A8	30-31/1-2-3	4	57,5	118,0	31,2	86,8	16,3	70,5
A8	5-6-7-8-9	4	7,5	19,2	3,3	15,9	17,5	1,6

la valeur DEF est initialisée au début de chaque année par la valeur DEFO ou capacité utile du Réservoir. DEF est borné par zéro ou DEFO (Réservoir plein ou vide).

Les déficits ainsi calculés sont en assez mauvaise corrélation avec les autres termes du bilan au cours des épisodes pluvieux. Les valeurs du déficit s'avèrent trop fortes après les épisodes d'assèchement prolongés. On a introduit une légère amélioration.

#### II.3.4.2. - Méthode retenue

\* On utilise une capacité de stockage DEFO invariante chaque année, assimilée à la capacité de stockage utile  $W_u$  du Réservoir de surface. On distingue deux phases :

##### II.3.4.2.1. - Phase de réhumidification

On prend  $ETR = ETP$  comme dans la première approche. La valeur de DEFO est calée sur les écoulements des premières crues.

Au cours de cette période l'ETR peut valoir ETP ou zéro lorsque le réservoir est vide.

##### II.3.4.2.2. - Phase d'assèchement

Lorsque la valeur de DEF devient nulle on suppose que sauf un horizon de surface, identifié par sa capacité de stockage DEFO, intervient dans la production des écoulements.

On utilise alors pour calculer le déficit dans cette tranche une loi d'ETR du type de celle examinée au paragraphe II.2.5.2. (formule (2))

$$ETR = ETP (DEFO_1 - DEF) / DEFO_1$$

Cette méthode très approchée revient à évaluer la contribution de l'horizon de surface  $DEFO_1$  à l'ETP, le reliquat d'évaporation pouvant être prélevé dans les autres tranches de l'horizon végétal.

# BILAN HYDRIQUE SUR LES SEQUENCES PLUVIEUSES

## Principe de la methode

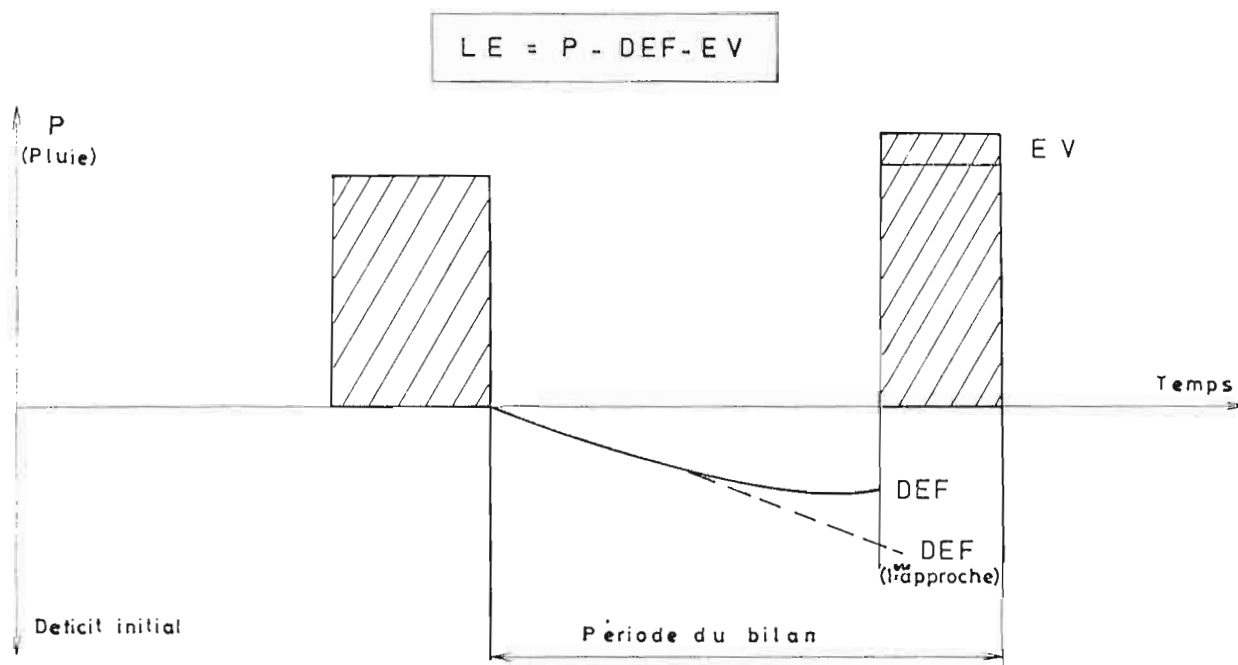
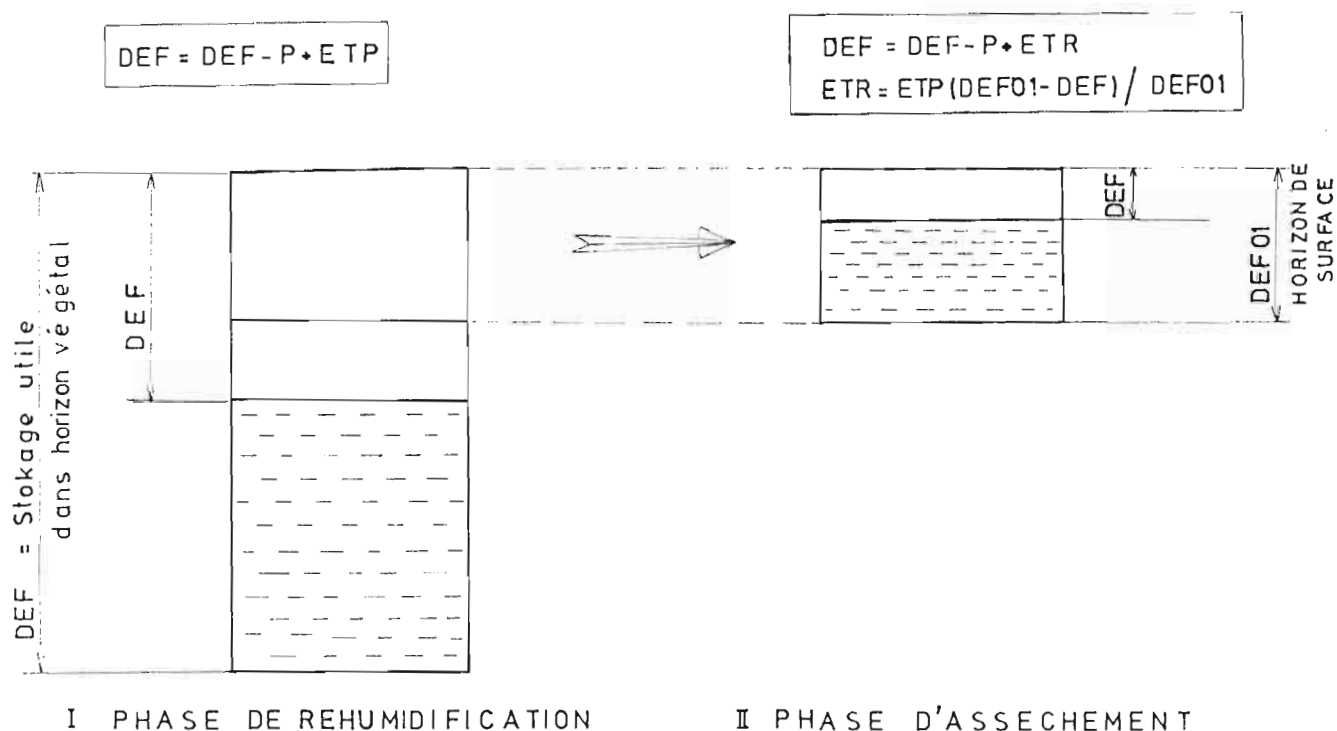


FIG. 24

## CALCUL DU DEFICIT INITIAL



I PHASE DE REHUMIDIFICATION

II PHASE D'ASSECHEMENT

#### II.3.4.3. - Paramètres de calage

- DEFO capacité de stockage  $W_u$  de l'horizon végétal.

Cette valeur est essentiellement calée à partir des premières crues de chaque année. Ce paramètre ne concerne que la phase de réhumidification.

- COEF coefficient de passage de l'ETP régionale au bassin. Ce paramètre est pratiquement fixé puisqu'on peut le faire évoluer de 0,85 à 1,05 suivant le type de végétation qui recouvre le bassin, la valeur la plus courante est 0,90. Un calage à 5 % près est suffisant.

- DEFO<sub>1</sub> capacité de stockage de l'horizon de surface. Cette valeur représente en phase d'assèchement une capacité potentielle, assimilable à  $W_R$ , et concerne des variations pratiques pendant la saison des pluies ne dépassant pas  $W_R/2$ . Cette valeur pourrait être considérée comme plus ou moins invariante pour tous les types de sol.

En définitive le paramètre le plus important est le paramètre DEFO, encore que son influence soit sensible uniquement au début de la saison des pluies.

#### II.3.4.4. - Calage sur le bassin Nord Amont

DEFO = 170 mm

COEF = 0,95 mais on aurait pu prendre 0,90 sans grands changements

DEFO<sub>1</sub> = 60 mm on aurait pu prendre 400 mm.

#### II.3.4.5. - Examen des variations de DEF (Tableau T.21.)

Nous avons reproduit dans ce tableau les valeurs journalières du déficit calculées par le programme pour l'année 1975-1976, pour illustrer le fonctionnement de cette méthode de calcul.

On voit que le déficit diminue progressivement en phase de réhumidification jusqu'à zéro. Lorsque le déficit est nul et puisque la valeur de zéro est une borne inférieure, la pluie est excédentaire et l'excédent est susceptible de produire de l'écoulement ou de la percolation.

T 21 BVN AMONT CALCUL DE DEF

ESSAI = COEF : 0,95 DEFO : 170 mm DEFO<sub>1</sub> = 60 mm

ANNEE 1974-75

	SEPT	OCT.	NOV.	DEC.	JANV.	FEVR.	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL.	AOUT
1	170.0	163.0	53.2	31.5	27.1	15.4	8.3	0.9	46.2	49.7	57.9	58.7
2	170.0	165.9	55.2	32.8	28.0	17.3	18.3	4.2	47.0	50.3	58.0	58,7
3	170.0	168.3	57.2	34.4	27.5	5.7	11.0	7.5	47.7	50.9	58.1	58.7
4	170.0	168.3	59.2	36.0	29.1	.	13.3	10.8	45.0	51.4	58.2	58.7
5	170.0	166.0	47.2	37.6	30.0	.	16.0	14.1	42.6	51.9	58.3	58.7
6	170.0	156.2	.	38.7	30.8	1.7	18.5	16.6	45.2	52.4	58.4	58.7
7	170.0	159.1	.	37.5	31.6	3.6	15.5	18.9	42.5	52.8	58.5	58.7
8	170.0	162.0	.	30.3	30.1	5.5	12.9	21.1	46.0	53.2	58.6	58.7
9	170.0	164.9	1.6	30.1	31.8	7.4	2.7	23.2	46.8	53.6	58.7	58.7
10	170.0	167.8	3.6	31.7	33.1	9.3	2.7	24.8	49.9	53.0	58.7	58.7
11	170.0	166.2	5.6	23.7	33.8	11.2	5.4	27.1	40.4	54.4	58.7	58.7
12	170.0	160.1	7.6	9.7	34.5	.	8.1	28.9	32.8	54.7	58.7	58.7
13	170.0	150.0	9.6	.	35.2	.	1.1	30.6	22.9	55.0	58.7	58.7
14	170.0	132.8	11.6	1.6	35.9	1.3	.	32.2	26.4	55.3	58.7	58.7
15	170.0	132.8	13.	3.2	36.5	.	.	33.7	29.9	55.6	58.7	58.7
16	170.0	130.4	15.6	4.8	37.1	.	1.6	35.1	33.4	55.8	58.7	58.7
17	170.0	133.3	17.6	6.4	37.7	.	4.	36.4	36.9	56.0	58.7	58.7
18	170.0	136.2	19.6	8.0	38.3	1.4	5.9	37.6	38.2	56.2	58.7	58.7
19	169.5	139.1	21.6	9.6	9.4	3.3	7.6	38.8	39.4	56.4	58.7	58.7
20	162.5	132.3	23.6	11.2	4.6	5.2	.	39.9	40.6	56.6	58.7	58.7
21	165.8	102.0	25.6	12.8	.	7.1	2.7	41.0	36.3	56.8	58.7	58.7
22	169.1	104.9	27.6	14.4	1.7	5.0	.	35.2	39.8	57.0	58.7	58.7
23	170.0	107.8	29.6	16.0	2.2	5.6	.	36.4	42.8	57.1	58.7	43.4
24	157.1	110.7	31.6	17.6	3.6	2.5	.	39.7	43.8	57.2	58.7	26.6
25	159.3	113.6	33.3	17.5	5.3	.	2.1	41.0	43.2	57.3	58.7	31.1
26	162.3	105.1	33.2	19.1	7.0	.	4.8	42.0	45.6	57.4	58.7	27.7
27	165.6	103.0	35.2	20.7	7.3	1.8	7.5	42.9	46.4	57.5	58.7	30.5
28	168.3	88.9	37.1	22.1	8.6	3.7	10.2	43.8	47.1	57.6	58.7	35.0
29	156.4	71.4	37.9	23.8	10.3	.	12.9	44.6	47.7	57.7	58.7	36.3
30	159.7	71.8	36.8	25.1	12.0	.	15.6	45.4	48.5	57.8	58.7	40.8
31		50.3		25.7	13.7	.	8.7		49.1		58.7	42.2

- Les seules valeurs du déficit à peu près sûres sont les valeurs nulles. Ces valeurs permettent "de refaire le zéro" sur le calcul du déficit.
- Les moyens de calcul du déficit sont grossiers et entraînent une certaine "dérive" par rapport aux déficits réels mais cette erreur cumulative est d'autant plus faible que les périodes d'assèchement sont courtes et que les périodes d'écoulement sont nombreuses. Pour les années sèches l'erreur faite sur le déficit sur de longues périodes d'assèchement peut être importante. En d'autres termes l'erreur absolue est proportionnelle à la valeur du déficit.
- En début d'année en période de réhumidification, le calcul du déficit est très approximatif. Cette période s'arrête généralement vers le premier novembre; souvent les écoulements les plus importants ont lieu en novembre. Il n'est donc pas inutile de se contenter d'une estimation du déficit même médiocre pendant cette période.

#### II.3.5. - Résultats obtenus sur le bassin Amont

Les tableaux T.2.2. donnent pour chaque épisode pluvieux les valeurs des différents paramètres du bilan LE, P, DEF, EV.

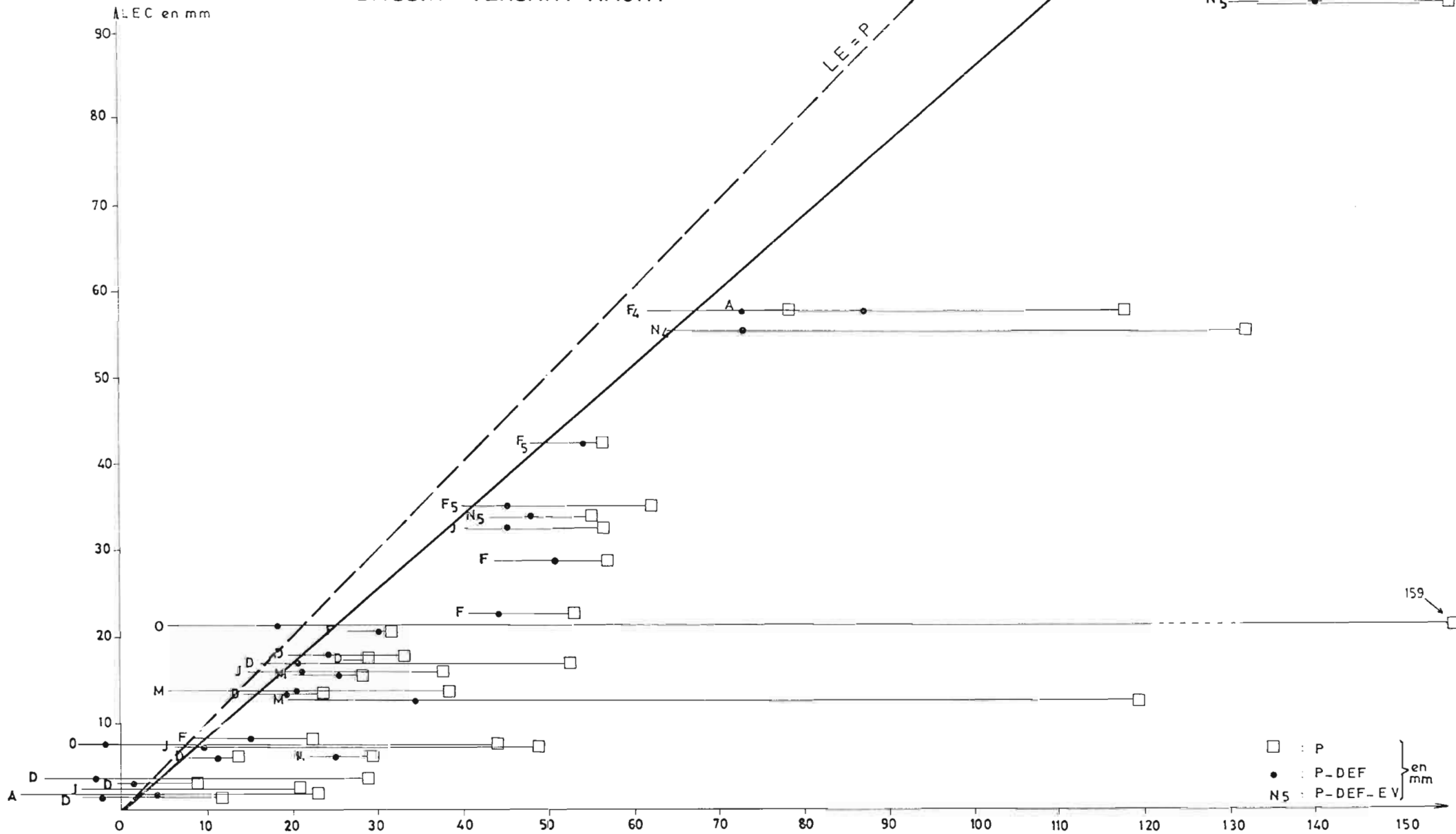
Sur les graphiques F.2.5. on a reporté (graphique a) les couples de points (LE, P), (LE, P-DEF) et (LE, P-DEV-EV) afin de montrer l'amélioration de la corrélation par l'introduction progressive des différents termes du Bilan. Le graphique b représente la corrélation définitive.

##### II.3.5.1. - Observations des résultats

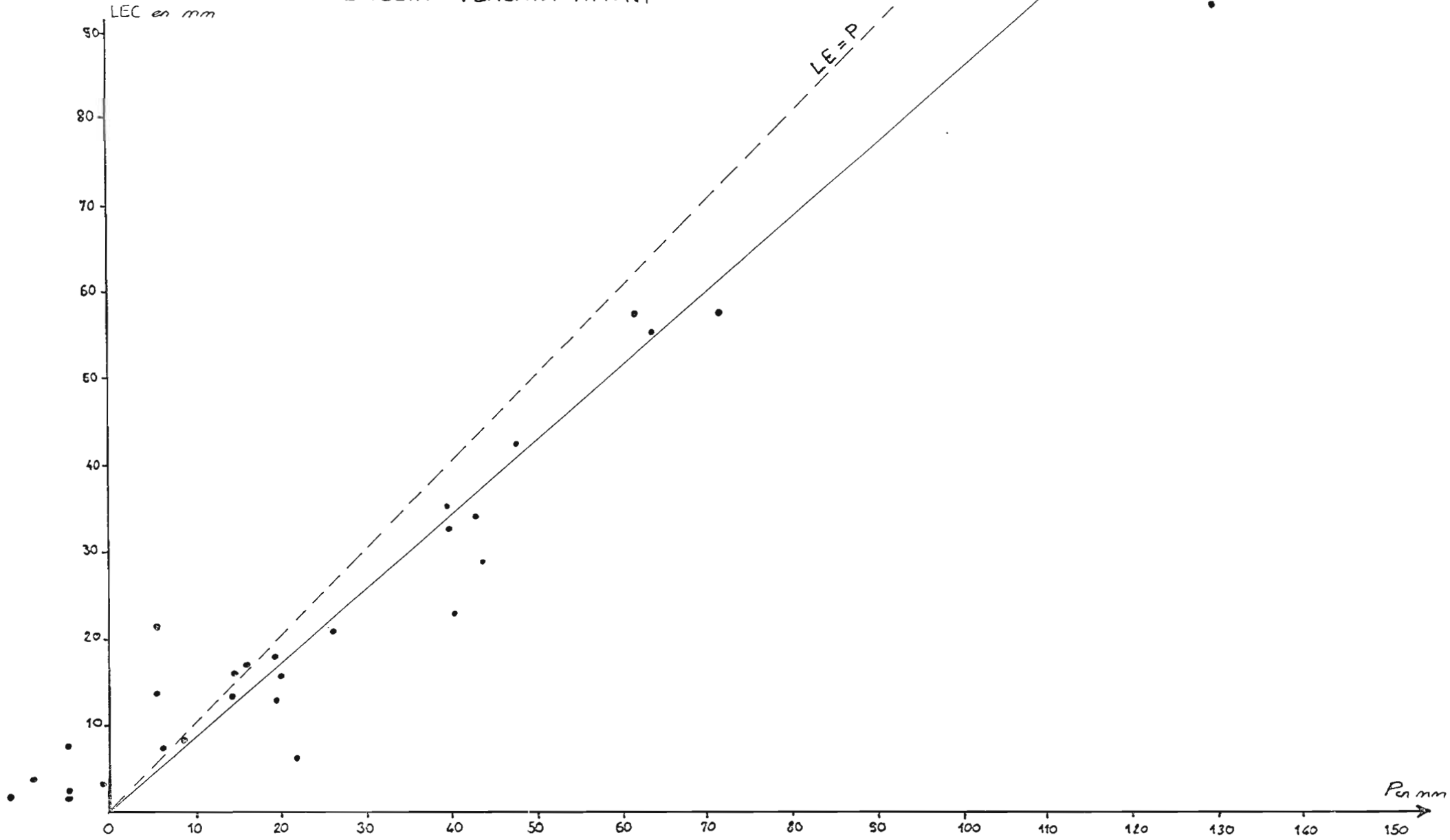
La corrélation établie nous paraît très satisfaisante compte-tenu de l'énorme dispersion des couples de base (LE, P).

- Les points les plus éloignés de la courbe correspondent le plus souvent aux premières crues de l'année.

# BILAN HYDROLOGIQUE SUR LES SEQUENCES PLUVIEUSES BASSIN VERSANT AMONT



BILAN HYDROLOGIQUE SUR LES SEQUENCES PLUVIEUSES  
 BASSIN VERSANT AMONT





- Pour les faibles valeurs de LE le bilan est généralement négatif. Cela ne nous surprend pas. Nous avons pris l'habitude, dans l'étude du ruissellement de ne pas prendre en considération les crues dont les lames ruisselées sont inférieures à 1 mm, car ces ruissellements sont localisés sur quelques zones imperméables et ne sont pas représentatifs du comportement du bassin.

De la même façon on peut considérer comme non représentatif tous les écoulements inférieurs à 2 mm.

#### II.3.5.2. - Liaison entre les productions d'écoulement et les déficits initiaux des sols

La liaison est directe et indiscutable puisque les déficits d'écoulement valent à peu près les déficits de stockage des sols.

Ce résultat est particulièrement important puisqu'on vient de prouver que les sols dans l'horizon de surface ont une perméabilité globale très forte, surtout lorsqu'ils sont secs.

A peu de chose près, la production d'écoulement est déterminée par l'état initial du sol.

Ces résultats sont d'autant plus significatifs qu'on les observe sur des argiles dont la perméabilité est très faible lorsqu'elles sont réhumidifiées (environ 1 mm/h).

La production d'écoulement peut être considérée comme pratiquement indépendante des intensités des précipitations, pendant les séquences pluvieuses.

Il convient de signaler toutefois que ces intensités sont particulièrement faibles dans le Nord Tunisien, et que cette caractéristique du climat entre sans doute pour une bonne part dans l'explication du processus.

Nous avons souligné à plusieurs reprises que le régime des précipitations du Nord, du type "dépressions cycloniques", peut être considéré comme "tempéré" du point de vue de la répartition des précipitations ou des intensités pluviométriques.

Le schéma de fonctionnement du sol peut être assimilé à un réservoir qui ne peut produire des écoulements que lorsqu'il est plein.

L'hypothèse du réservoir utile,  $W_u$  ou DEFO, toujours initialement vide en début de saison des pluies nous paraît fondée.

Sur la parcelle du maquis dégradé, la plus représentative des caractéristiques du bassin AMONT : la variation annuelle totale de stockage déduite des profils neutroniques est de 210 mm environ sur la tranche des 120 premiers centimètres, qui correspond à peu près à la dimension de l'horizon végétal (cf. F.2.2.).

La capacité de stockage DEFO que nous avons identifiée, d'une valeur de 170 mm correspond à une capacité en relation directe avec les précipitations est restituée sous forme d'évapotranspiration. Ce réservoir est plein vers le début du mois de novembre.

Les mesures de DELHUMEAU mettent en évidence une seconde capacité de stockage qui se remplit lorsque le premier réservoir DEFO est plein et qui correspond à un mouvement lent pouvant se prolonger jusqu'en janvier et même jusqu'en mars pour les années déficitaires.

Ce mouvement lent, sans relation directe avec les précipitations, constaté dans les tranches inférieures de l'horizon végétal, ressemble à une mise en charge progressive d'une nappe. Il n'est pas impossible qu'il s'agisse très exactement d'une mise en charge d'une nappe perchée susceptible de se ressuyer :

- par percolation profonde
- par écoulement, en provoquant ce que nous avons identifié dans les mesures hydrométriques comme du débit de base et dont le tarissement peut durer 1 mois environ après l'arrêt des précipitations.
- l'alimentation de cette "nappe" peut être assurée par l'eau que nous perdons dans notre schéma lorsqu'on se restreint à l'horizon de surface  $DEFO_1$ .

L'analogie entre les deux systèmes d'approche du fonctionnement du sol nous paraît assez bonne et il n'est pas impossible qu'une analyse plus fine des mesures de sonde à neutrons permettent une plus grande identification des deux méthodes d'approche différentes. Cette analyse pourrait nous permettre de définir un éventuel "coefficient de passage" entre les mesures directes ponctuelles d'une part et une approche théorique globale sur un bassin entier.

### II.3.6. - Bassin Aval

Nous avons en effet mis en évidence lors de l'étude la très bonne similitude du comportement du bassin Aval par rapport au bassin Amont. Nous n'avons pas effectué pour le présent rapport l'étude du bassin AVAL.

### II.3.7. - Récapitulatif et conclusion

Les études de bilan hydrique procèdent habituellement de deux techniques différentes :

- Soit on fait des mesures ponctuelles de bilan précises mais habituellement peu représentatives d'un milieu en raison de la trop petite dimension de l'unité étudiée. Le milieu étudié est d'ailleurs souvent remanié ou dénaturé pour les besoins de l'expérience (cases lysimétriques, blocs monolithes, etc...)
- Soit on fait des bilans sur des bassins de plus grandes dimensions mais qui se limitent à l'échelle annuelle et qui se bornent à faire un constat. Ce constat conclut généralement à une sous-estimation des précipitations moyennes.

L'originalité de notre approche est d'avoir utilisé sur un bassin entier une méthode d'approche à un pas de temps plus fin qui nous permet non seulement de faire un constat mais encore de valider un processus schématisé de comportement hydrique des sols.

Ce processus est valable dans le cas d'un certain type de climat et de distribution des précipitations auquel appartient toute la Tunisie du Nord, il est restreint d'autre part à des zones dont le recouvrement végétal important, correspond à une tendance naturelle du milieu, susceptible d'avoir été la cause d'une longue évolution et d'une patiente structuration des sols.

Il est évident qu'un accroissement récent de la végétation sous une action anthropique ne peut avoir produit les mêmes effets.

Ces bassins sont d'ailleurs très complexes du point de vue de l'organisation structurelle de l'espace. La seule simplification par rapport à un bassin de plus grande dimension nous paraît être une relative homogénéité globale des sols, mais les pédologues ne sont peut être pas de cet avis.

---

Chapitre troisième

APPROCHE SIMPLIFIEE POUR LA DETERMINATION  
DES ECOULEMENTS EN TUNISIE DU NORD

-----

### III 1 PRESENTATION DE LA METHODE UTILISEE

Le bassin versant expérimental de l'Oued Sidi Ben Naceur (BVN) a été étudié pendant six années (de septembre 1973 à Août 1979).

La production d'écoulement dans le temps est en relation directe avec le régime des précipitations. Il apparaît à la lecture des tableaux de pluviométrie journalière de la station météorologique du BVN, que les précipitations peuvent être groupées en séquences de quelques jours de pluies séparées de séquences de jours sans pluie. Les séquences de jours pluvieux correspondent aux passages des systèmes nuageux associés eux-mêmes aux dépressions atmosphériques circulant d'Ouest en Est. Les intensités de pluie ne dépassent que rarement 30 millimètres par heure.

Il nous est paru intéressant d'envisager l'étude des écoulements des bassins AMONT et AVAL du bassin versant de l'Oued Sidi Ben Naceur (BVN) par une méthode basée sur le PRINCIPLE DU BILAN HYDRIQUE utilisant les REGRESSIONS MULTIPLES

#### III 1-1 DONNEES UTILISEES

Les séquences pluvieuses ayant produit un écoulement dont la lame écoulée est supérieure à 2 millimètres sur le bassin versant AVAL, et supérieure à 1 millimètre sur le bassin versant AMONT, ont été respectivement reportées dans les tableaux 3-1 et 3-2 avec les notations suivantes :

- Date : dates de début et de fin de la séquence pluvieuse
- P : pluie moyenne tombée sur le bassin au cours de la séquence pluvieuse exprimée en millimètres
- $\Sigma P$  : pluie moyenne cumulée dès le début de l'année hydrologique (y compris la séquence pluvieuse considérée) exprimée en millimètres
- Pa : pluie moyenne cumulée depuis le début de l'année, antérieure à la séquence pluvieuse considérée, exprimée en millimètres
- LE : lame écoulée au cours de l'épisode pluvieux considéré, exprimée en millimètres
- LR : lame ruisselée au cours de l'épisode pluvieux considéré, exprimée en millimètres
- Ds : durée en jours de la séquence sèche précédant la séquence pluvieuse considérée

Tableau 31 - Bassin Versant de l'Oued Sidi Ben Naceur - Tunisie du Nord

## Bassin AVAL

Année	Date	Pluviométrie			Ecoulements		Période sèche		Déviations résiduelles		
		P	$\Sigma P$	Pa	LE	LR	D <sub>s</sub>	$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\Delta_F$	
1973	24 au 27 Oct.	159.0	159.1	(79.4)	21.2	12.6	30	81	-8		
	12 au 14 Déc.	27.1	249.5	301.8	3.8	2.7	4	14	5	-4.	
1974	3 au 6 Fév.	20.1	329.0	388.3	2.6	1.5	6	10.5	7	-5.0	
	13 au 14 Fév.	48.9	380.1	410.6	21.0	9.1	5	10	7	-3.0	
	16 au 17 Fév.	15.5	395.6	459.5	6.0	2.3	1	3.5	6	4.0	
	22 au 26 Fév.	92.9	504.0	490.5	56.0	25.4	4	4	4	-5.0	
	3 au 8 Mai	39.8	543.8	583.4	14.5	5.0	4	11	11	+3.0	
	3 au 5 Avr.	21.2	610.2	668.4	2.5	1.0	1	11.5	11.5	+9.5	
	16 au 18 Av.	21.9	654.2	711.7	4.1	2.0	1	10	10.0	+8.0	
	26 au 31 Oct.	76.1	201.8	125.7	2.3	1.0	5	42	-4	-14.0	
1974	5 au 8 Nov.	111.5	313.3	201.8	39.6	23.9	4	32	9	+1.0	
	11 au 13 Déc.	47.8	388.5	340.7	13.2	7.2	1	18	3	-1.0	
1975	19 au 21 Janv.	54.1	449.1	395.0	9.3	7.2	10	25.5	25.5	+5.5	
	3 au 5 Fév.	64.1	514.7	452.6	34.9	24.5	6	6	6	-6.0	
	12 au 14 Fév.	29.6	546.1	516.8	12.2	7.8	6	7	7	-5.0	
	15 au 17 Fév.	60.8	609.9	546.1	42.0	32.0	1	-3	-3	-5.0	
	7 au 9 Mars	23.1	645.5	622.4	3.8	2.7	8	11.5	11.5	-4.5	
	13 au 15 Mars	20.6	661.1	645.5	3.7	1.0	3	9	9	+2.0	
	31 Mars au 1 Av.	18.2	728.5	710.3	2.7	0	6	9	9	-3.0	
	2 au 7 Nov.	107.2	222.7	115.5	14.0	13.6	5	55	4	-6.0	
1975	19 au 22 Nov.	141.0	364.6	223.6	77.0	44.8	10	13	0	-10	
	27 au 28 Nov.	50.0	414.6	364.6	33.0	15.8	4	-1	7	-1.0	
1976	1er Déc.	28.1	445.4	417.3	23.0	1.5	0	-5	-5	-5.0	
	26 Déc.	10.1	573.6	473.5	2.0	0.6	3	4	4	-2.0	
	17 au 20 Janv.	22.4	613.5	591.1	5.8	3.7	2	8	8	+4.0	
	26 au 28 Janv.	57.1	672.6	614.9	33.0	14.0	5	4	4	-6.0	
	1 au 2 Fév.	18.1	690.7	672.6	9.0	5.0	3	2.5	2.5	-3.5	
	11 au 14 Fév.	19.0	717.8	698.8	7.0	3.5	3	5	5	-1.0	
	15 au 16 Fév.	28.7	746.5	717.8	15.0	5.7	1	3	3	+1	
	23 au 26 Fév.	16.7	766.1	749.4	4.0	1.0	4	6	6	-2.0	
1976	13 au 14 Mars	38.5	809.3	771.3	12.7	5.5	2	11	11	+7.0	
	16 au 17 Mars	28.4	838.3	809.9	17.1	7.6	1	0	0	-2.0	
	23 au 25 Mars	14.0	856.3	842.3	2.6	0.2	1	6	6	+4.0	
	14 au 15 Mai	43.0	965.9	922.9	3.4	0.7	6	24	24	+12.0	

La pluie antérieure au 24 octobre 1973 (79.4) est celle qui a été mesurée à Sedjenane, les mesures sur le BVN n'ayant commencées que le 24.10.73.

Tableau 31 - (suite) Bassin AVAL

Année	Date	Pluviométrie			Ecoulements		Pér. séché	Déviations résiduelles		
		P	$\Sigma P$	Pa	LE	LR	D <sub>s</sub>	$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\Delta_R$
1976	16 au 18 Oct.	49.7	190.1	140.4	2.2	1.0	0	29	-12	-12.0
	20 au 21 Oct.	34.3	224.4	190.1	7.5	6.2	1	15	-8	-10.0
	25 au 26 Oct.	26.0	250.4	224.4	2.1	1.2	3	14	5	-1.0
	4 au 5 Nov.	23.7	285.3	263.3	3.1	0.4	2	11	7	+3.0
	13 au 14 Nov.	30.0	315.3	285.3	6.5	4.0	4	12.5	11	+3.0
	20 au 22 Nov.	60.0	446.3	386.3	30.0	21.8	0	8	7	+7.0
	29 au 30 Nov.	13.0	462.6	449.6	3.0	1.0	4	5	5	-3.0
	1 au 5 Déc.	22.0	484.6	462.6	14.0	5.0	1	0	0	-2.0
	21 au 23 Déc.	43.0	539.6	496.6	16.0	8.8	6	11	11	+1.0
	25 au 26 Déc.	13.0	552.6	539.6	5.0	1.3	1	3	3	+1.0
1977	6 au 9 Janv.	37.2	589.8	552.6	16.2	10.4	10	8	8	-12
	12 au 13 Janv.	25.5	615.3	589.8	13.5	9.8	2	4	4	0
	12 au 15 Fév.	27.6	677.5	649.9	3.0	0.5	7	13	13	-1.0
1978	18 au 23 Janv.	80.9	253.7	172.8	5	1.8	5	47	18	+8
	28 au 4 Fév.	92.9	348.6	255.7	29	13.4	2	31	26	+22.0
	5 au 8 Fév.	22.2	370.8	348.6	7.8	2.0	1	6	5	+3.0
	12 au 15 Fév.	56.4	427.2	370.8	29.0	6.0	3	7	6	0
	1er Mars	30.2	458.8	428.6	4.7	2.4	1	14	14	+12
	5 au 9 Mars	25.7	484.5	458.8	3.0	0	3	12	12	+6.0
	30 Mars au 3 Av.	118.0	610.8	492.8	56.0	25.0	8	19	19	+3.0
5 au 9 Avr.	19.2	630.0	610.8	7.5	0	1	4.5	4.5	+2.5	
1978	22 Nov. au 1 Déc.	151.1	229.5	78.4	16.0	8.5	4	81.0	16	+8.0
	3 au 5 Déc.	32.0	261.5	229.5	10.9	3.5	1	-6	-26	-24
1979	9 au 16 Janv.	40.2	322.1	281.9	2.5	1.9	6	24	20	+6.0
	12 au 13 Fév.	31.6	392.6	361.0	4.6	2.1	6	16	15	+3.0
	15 au 27 Fév.	144.0	536.6	392.6	92.6	27.7	1	0	0	-2.0
	1 au 6 mars	27.5	564.1	536.6	14.8	2.3	1	3	3	+1.0
	15 au 23 Avr.	81.9	722.6	640.7	43.2	10.8	2	9	9	+5.0



T3.2. - OUED SIDI BEN NACEUR -  
Bassin Amont

Année	Date	Pluviométrie			Ecoulements LE	Période sèche D <sub>s</sub>	Déviations résiduelles			
		P	ΣP	Pa			Δ <sub>1</sub>	Δ <sub>2</sub>	Δ <sub>R</sub>	
1973	24 au 27.10	158.6	158.6	(79.4)	21.1		66	-5		
	2 au 3.12	27.4	213.4	265.4	1.1	2	19	-1	-5	
	12 au 14.12	28.4	245.3	296.3	3.7	4	16	4	-4	
1974	1.01.	16.0	281.4	344.8	13.0	3	-1	-7	-13	
	7 au 10.01	16.0	297.5	360.9	1.0	5	11	11	1	
	3 au 6.02	28.2	338.7	389.9	1.8	6	18	9	-3	
	13 au 14.02	53.4	393.1	419.1	22.3	6	17	15	3	
	16 au 17.02	78.1	406.2	472.5	5.5	1	4	4	2	
	22 au 26.02	78.8	485.0	485.6	57.0	4	1	1	-7	
	3 au 6.03	33.8	518.8	564.4	13.0	4	12	12	4	
	3 au 5.04	23.4	582.2	638.4	2.0	1	14	14	12	
	16 au 18.04	26.2	630.5	683.7	5.6	1	13	13	11	
	24.04	13.6	646.6	712.4	1.9	(2)	8	8	4	
	1974	26 au 31.10	80.9	224.0	143.1	2.5	4	58	3	-5
		5 au 8.11	131.7	355.7	224.0	55.3	4	42	8	0
11 au 13.12		51.9	435.3	383.4	16.6	1	21	21	19	
1975	19 au 21.02	48.9	490.4	441.5	7.0	10	28	28	8	
	3 au 5.02	62.3	556.0	493.7	35.0	6	10	10	-2	
	12 au 14.02	33.6	589.6	556.2	16.0	6	9	9	-3	
	15 au 17.02	55.6	645.2	589.6	42.0	0	-1	-1	-1	
	7 au 9.03	26.8	693.1	666.3	6.0	7	14	14	0	
	13 au 15.03	20.4	713.5	693.1	5.0	3	10	10	4	
	22 au 24.03	35.9	763.7	727.8	21.1	1	5	5	3	
	31 au 1.04	19.3	783.6	764.3	2.0	6	12	12	0	
1975	16 au 20.10	102.9	169.2	66.3	1.0	2	73	1	-1	
	2 au 7.11	119.0	296.6	177.6	12.5	5	75	28	16	
	19 au 22.11	161.7	460.8	299.1	92.8	10	25	9	-11	
	27 au 28.11	55.3	516.1	461.0	33.0	4	8	8	0	
	1.12.	29.1	547.4	518.3	17.5	0	4	4	4	
	20.12	10.2	570.9	560.7	1.4	1	5	5	3	
	25.25.12	8.2	586.8	578.6	2.6	3	3	3	-3	

La pluie antérieure au 24 octobre 1973 est celle qui a été mesurée à Sedjenane, les mesures sur le BVN n'ayant commencées que le 24.10.73.

T3.2. - OUED SIDI BEN NACEUR (suite)  
Bassin Amont

Année	Date	Pluviométrie			Ecoulements LE	Période sèche D <sub>s</sub>	Déviations résiduelles		
		P	ΣP	Pa			Δ <sub>1</sub>	Δ <sub>2</sub>	Δ <sub>R</sub>
1976	17 au 20.01	20.3	622.4	602.1	4.2	2	10	10	6
	26 au 28.01	56.0	679.4	623.4	32.0	5	9	9	-1
	1 au 2.02	17.9	697.3	679.4	6.9	3	7	7	1
	11 au 14.02	22.2	727.5	705.3	8.5	3	7	7	1
	15 au 16.02	30.9	758.4	727.5	20.3	0	2	2	2
	23 au 26.02	16.5	775.7	759.2	2.5	6	9	9	-3
	13 au 14.03	38.5	816.3	777.8	12.7	(2)	14	14	10
	16 au 17.03	28.4	844.7	816.3	15.1	1	5	5	3
	23 au 25.03	14.0	862.7	848.7	2.6	1	7	7	5
	10 au 11.04	18.3	884.9	866.6	1.3	15	13	13	-17
	14 au 16.05	43.0	969.0	926.0	3.4	7	27	27	13
1976	16 au 18.10	49.7	191.0	141.3	2.2	0	34	20	-20
	20 au 21.10	43.0	234.0	191.0	7.5	1	24	-7	-9
	25 au 26.10	25.9	259.9	234.0	2.1	3	16	14	20
	4 au 5.11	21.9	293.8	271.9	3.1	2	13	-5	-9
	11 au 14.11	29.5	324.4	294.9	6.5	4	15	2	-6
	16 au 19.11	70.5	394.9	324.4	68.0	1	-16	-21	-23
	20 au 22.11	59.7	454.6	394.9	30.0	0	14	14	14
	29 au 30.11	12.8	471.3	458.5	3.4	4	7	7	1
	2 au 3.12	18.1	489.4	471.3	13.7	1	0	0	-2
	20 au 23.12	34.9	544.9	510.0	16.0	6	9	9	-3
	25 au 26.12	13.2	558.1	544.9	5.5	1	4	4	2
1977	6 au 9.01	37.2	595.3	558.1	16.2	10	11	11	-9
1978	18 au 23.01	82.9	281.0	198.1	5.0	4	56	13	5
	28.01 au 1.02	78.2	360.7	282.5	29.0	2	26	10	6
	6 au 8.02	22.2	397.6	375.4	7.8	1	8	8	6
	12 au 15.02	56.4	454.0	397.6	29.0	3	10	10	4
	1.03	30.2	486.0	455.8	4.7	13	17	17	-9
	5 au 9.03	25.7	511.8	486.1	3.0	1	15	15	13
	30.03. au 3.04	118.0	636.6	518.6	57.5	14	30	30	2
	5 au 9.04	19.2	655.8	636.6	7.5	1	7	7	5

### III 1-2 RAPPEL DU PRINCIPE DU BILAN HYDRIQUE

Le déficit d'écoulement ( $D_i$ ) lors d'une séquence pluvieuse peut s'exprimer par la relation suivante :

$$D_i = P_i - LE_i \quad (1)$$

avec  $P_i$  : pluie tombée lors de la séquence pluvieuse  $i$

$LE_i$  : lame écoulée lors de la séquence pluvieuse  $i$

Dans le cas particulier du bassin du Nord de la Tunisie, D. IBIZA a montré dans [ 2 ] qu'étant donné les faibles Intensités de pluie, le sol se sature lors des épisodes pluvieux produisant un ruissellement. On peut alors écrire

$$D_i = I_i + E_i + DEF_i \quad (2)$$

avec  $I_i$  : infiltration pendant la séquence pluvieuse  $i$

$E_i$  : évaporation pendant la séquence pluvieuse  $i$

$DEF_i$  : quantité d'eau nécessaire au comblement du déficit hydrique des sols

### III 2 REGRESSIONS MULTIPLES

#### III 2-1 1ère REGRESSION : CORRELATION ENTRE LAME ECOULEE ET PRECIPITATIONS

Sur les figures 31 (bassin AVAL) et 35 (bassin AMONT) sont reportés pour chaque séquence pluvieuse  $i$  la lame écoulée ( $LE_i$ ) en fonction de la pluie ( $P_i$ ).

On a tracé les droites enveloppes des couples ( $LE_i, P_i$ ).

Celles-ci ont pour équation, respectivement pour les bassins AVAL et AMONT :

$$LE = 0,64 P \quad (\text{cf fig. 31}) \quad (3)$$

$$LE = 0,73 P \quad (\text{cf fig. 35}) \quad (4)$$

Les couples ( $P_i, PE_i$ ) qui se trouvent sur ces droites correspondent à des séquences pluvieuses au cours desquelles on peut penser que les sols des bassins versants sont dans un état proche de la saturation. En effet ces épisodes pluvieux ont lieu en pleine saison des pluies et succèdent à d'autres épisodes pluvieux. On a pour ces épisodes pluvieux :

- $Ds_i \approx 0$
- le déficit hydrique du sol avant la séquence pluvieuse peut être considéré comme à peu près nul

BASSIN VERSANT AVAL  
 RELATION ENTRE PLUIE ET LAME ECOULÉE  
 (Echelle de la séquence pluvieuse )

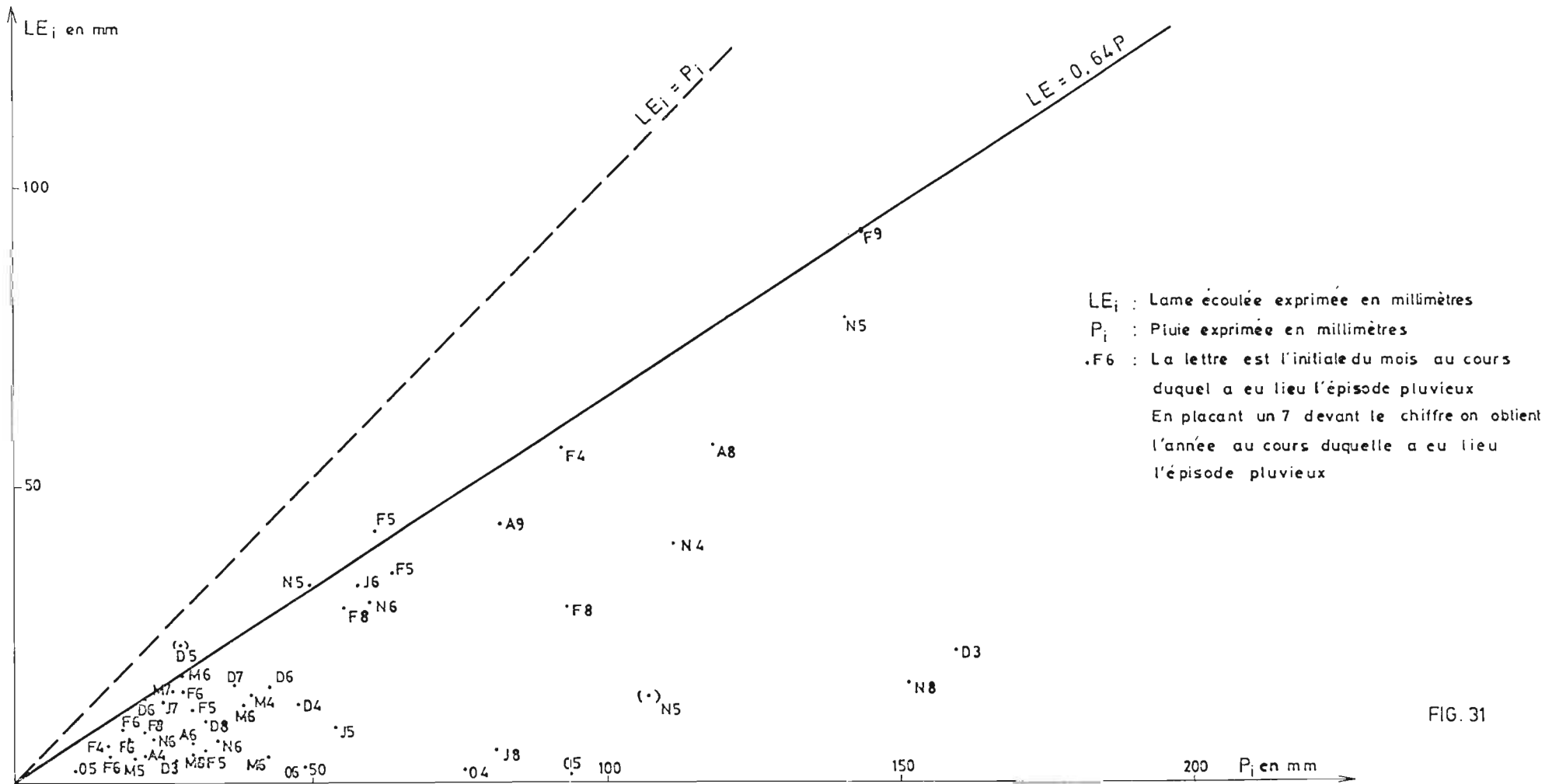
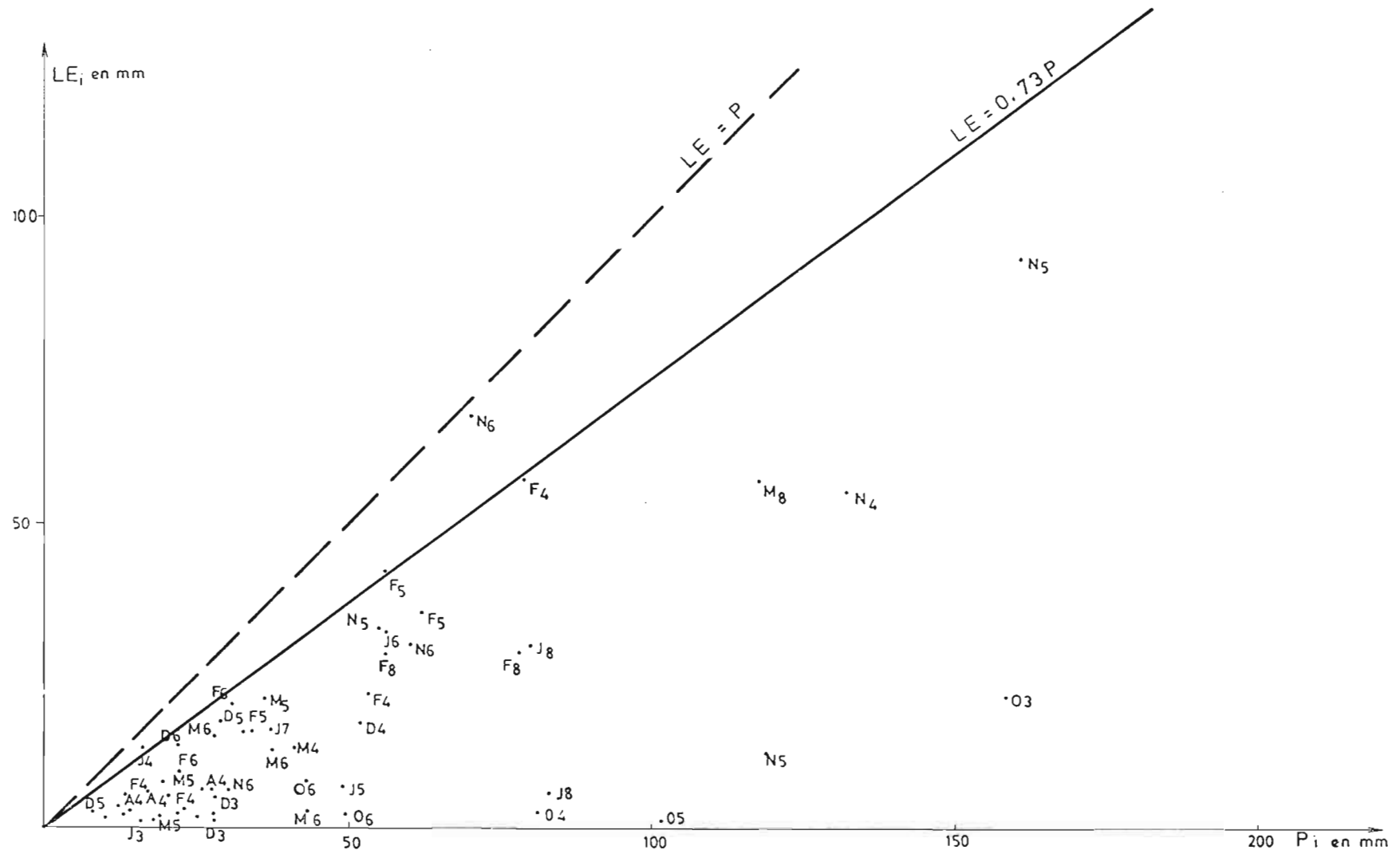


FIG. 31

BASSIN AMONT  
 RELATION ENTRE PLUIE ET LAME ECOULÉE  
 Echelle de la séquence pluvieuse



On peut définir, pour chacun des couples  $(P_i, LE_i)$ , l'écart  $(D_i)$  par rapport à la ligne droite de régression -droite enveloppe des couples  $(P_i, LE_i)$ , de la façon suivante :

$$D_i = a P_i - LE_i \quad (5)$$

avec  $a$  : coefficient angulaire de la droite enveloppe des couples  $(P_i, LE_i)$ .

$D_i$  peut s'exprimer selon la méthode des déviations résiduelles (cf annexe 2) par la somme de deux fonctions strictement indépendantes.

- l'une  $D_1$  pourrait être liée à l'important déficit hydrique initial des sols (existant en début de saison des pluies)
- l'autre  $D_2$  pourrait être liée au déficit hydrique créé par évaporation de la quantité d'eau retenue dans le sol pendant la période sèche antérieure à la séquence pluvieuse ;

### III 2-2 2ème REGRESSION : REGRESSION LINEAIRE ENTRE L'ECART $D_i$ ET LA PLUIE ANTERIEURE $Pa_i$ .

On a choisi la variable  $(Pa_i)$ , pluie cumulée antérieure à la séquence pluvieuse  $(i)$ , comme étant susceptible de représenter l'état initial de stocks d'eau retenus dans les sols.

Sur les figures 32 et 36 respectivement pour les bassins AVAL et AMONT,  $P_i$  est reportée en fonction de  $Pa_i$ . On peut observer que les valeurs de  $D_i$  sont particulièrement grandes pour les séquences pluvieuses de début de saison des pluies ( $Pa_i < 300$  mm) et peuvent s'ajuster selon la méthode des moindres carrés, à la droite  $D = D_i(Pa)$  on a :

$$\left. \begin{aligned} D_{1i} &= -0,33 Pa_i + 89 \\ \text{avec } R &= -0,91 \end{aligned} \right\} \text{ bassin AVAL} \quad (6)$$

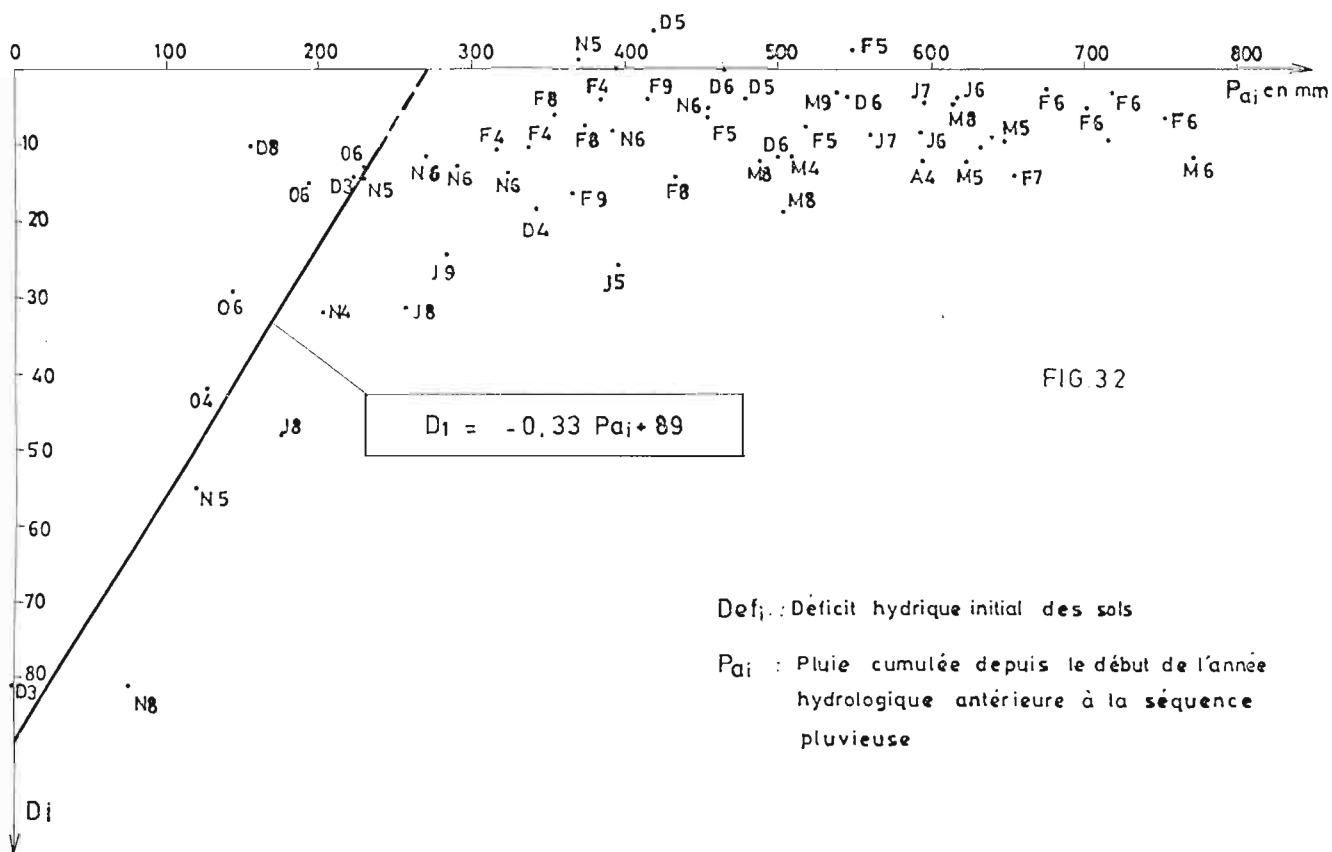
et

$$\left. \begin{aligned} D_{1i} &= -0,24 Pa_i + 88,6 \\ \text{avec } R &= -0,81 \end{aligned} \right\} \text{ bassin AMONT} \quad (7)$$

$R$  représente le coefficient de corrélation.

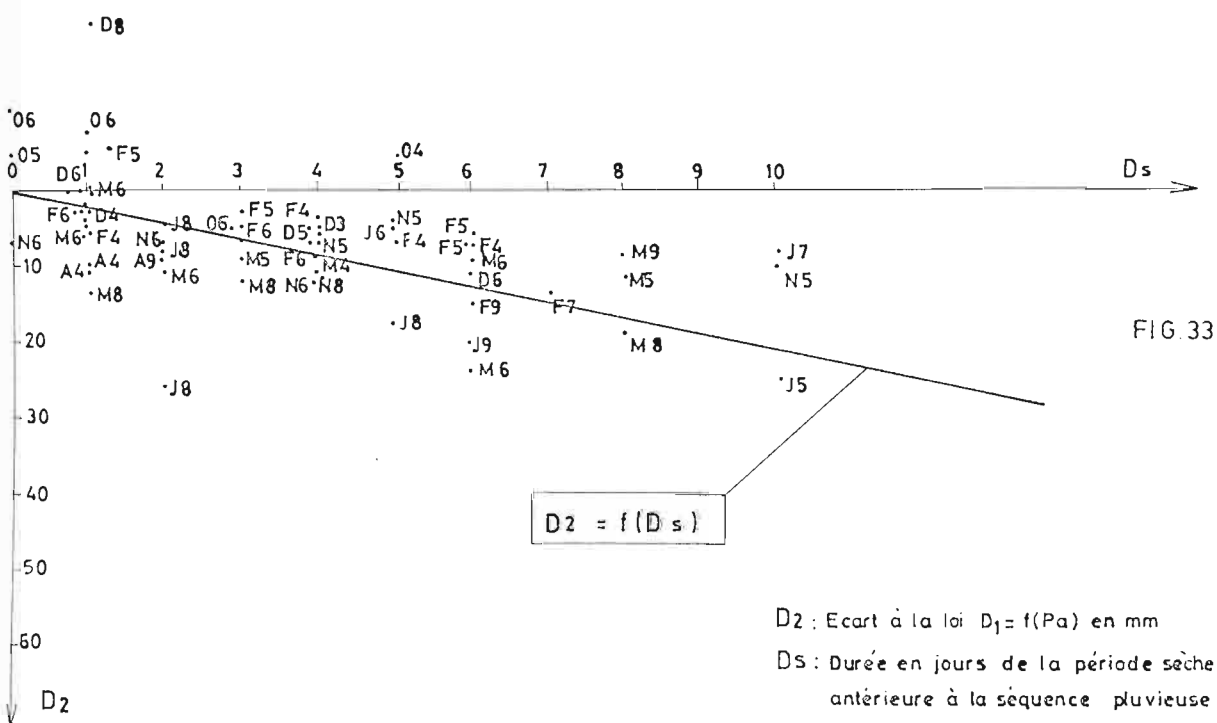
## BASSIN VERSANT AVAL

2<sup>ème</sup> Régression : Régression entre  $D_i$  et la pluie cumulée antérieure  $Pa_i$



## BASSIN VERSANT AVAL

3<sup>ème</sup> Régression : Régression entre  $D_2$  et la durée de la période sèche  $D_{s_i}$



# BASSIN VERSANT AVAL

2<sup>ème</sup> Regression : Regression entre  $D_i$  et la pluie cumulée antérieure  $P_{ai}$

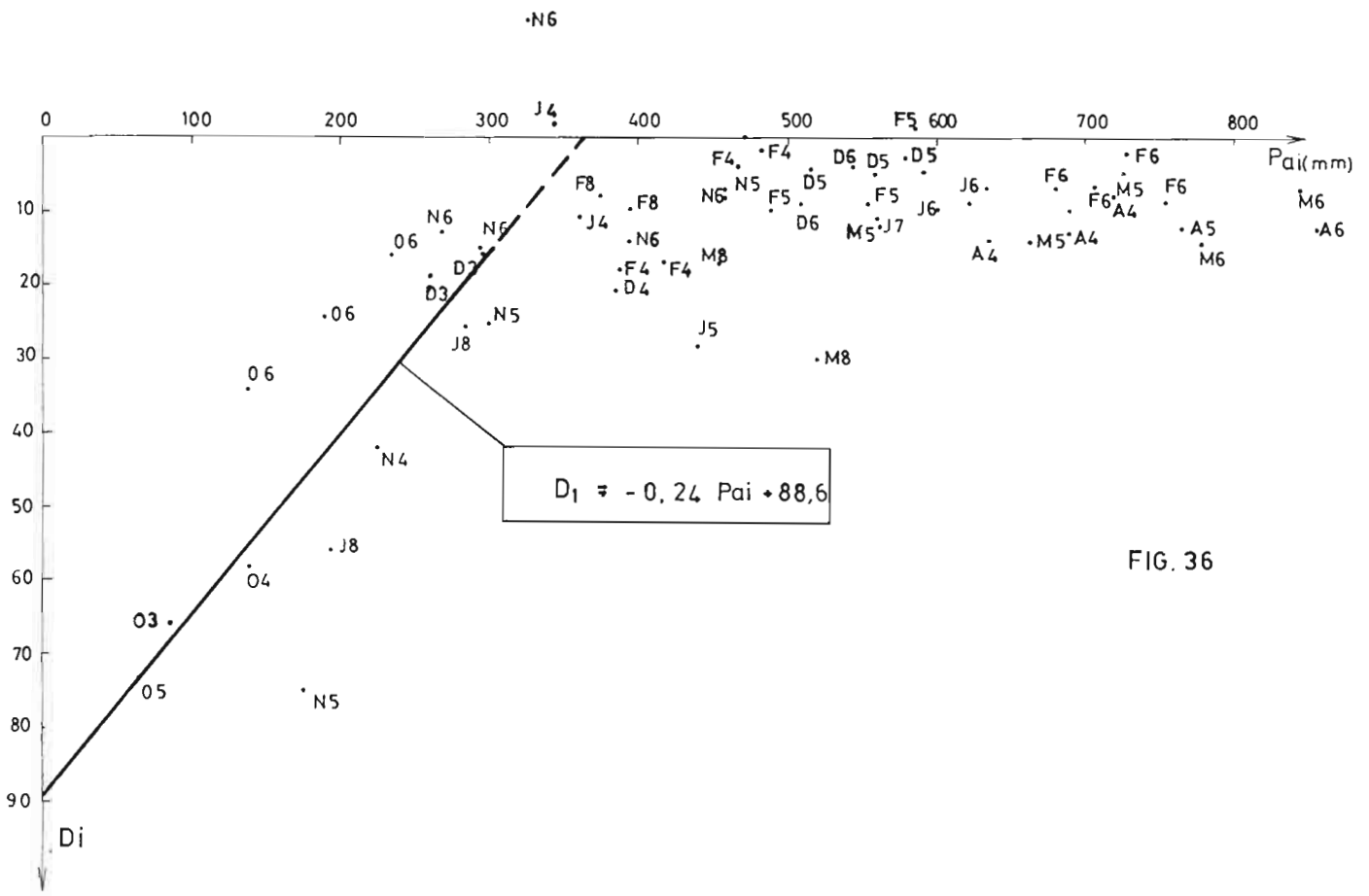


FIG. 36

3<sup>ème</sup> Regression : Regression entre  $D_{2i}$  et la durée de la période sèche  $D_{s_i}$

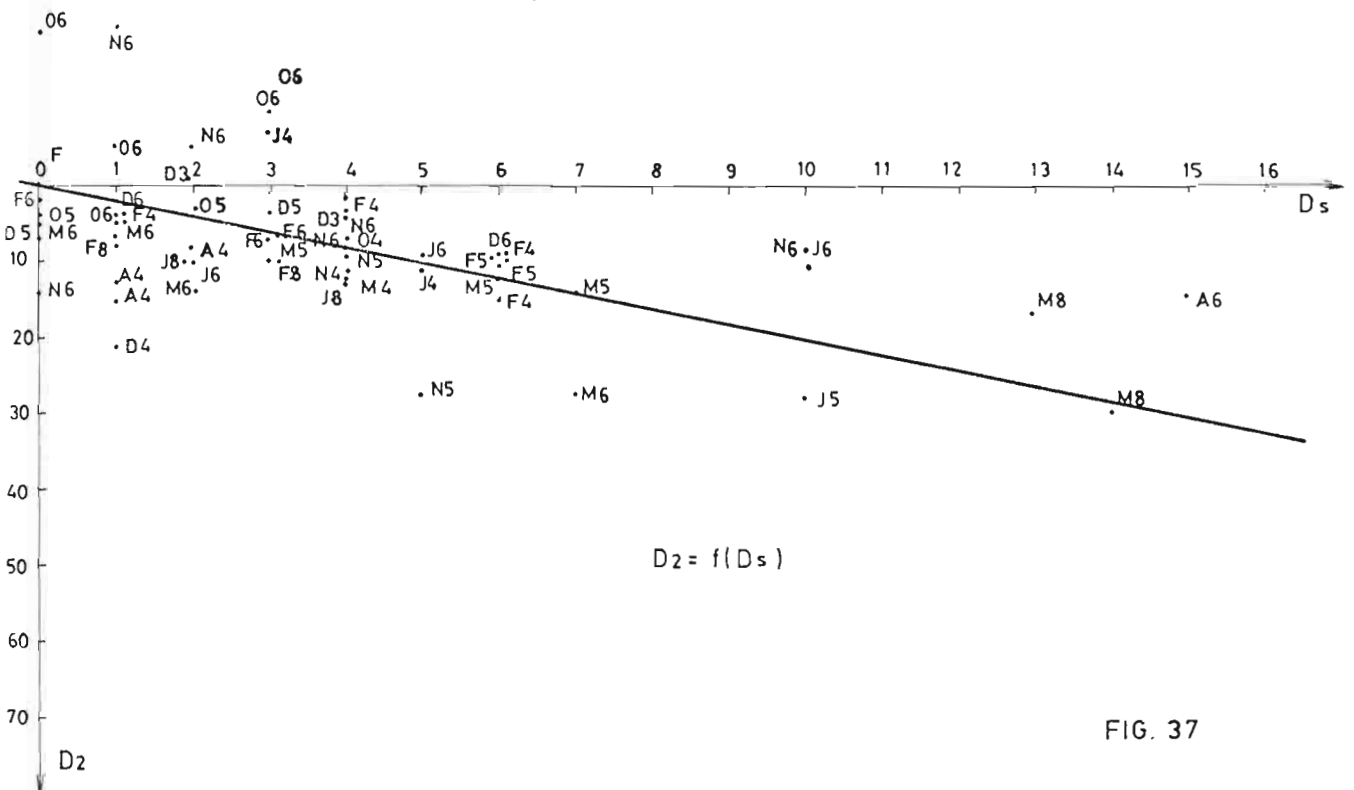


FIG. 37



La précision est honnête compte-tenu du nombre de couples  $(D_i, Pa_i)$  utilisé pour établir l'ajustement

15 couples pour le bassin AMONT

11 couples pour le bassin AVAL.

Le choix du nombre de couples  $D_i, Pa_i$  est problématique.

Ce choix effectué à la vue des graphes des figures 32 et 36 conditionne les équations des droites de régression.

Dans le cas présent on a retenu pour le bassin AMONT, tous les couples  $(D_i, Pa_i)$  où  $Pa_i$  est inférieure à 300 mm et pour le bassin AVAL tous les couples  $(D_i, Pa_i)$  où  $Pa_i$  est inférieure à 250 mm.

On peut définir  $D_{2i}$  écart à la droite

$D_i = D_1(Pa_i)$  pour une séquence pluvieuse à :

on a  $D_{2i} = D_i - D_{1i}$  soit

$$\left. \begin{array}{l} D_{2i} = D_i - (0,33 Pa_i + 89) \\ \text{si } -0,33 Pa_i + 89 > 0 \\ D_{2i} = D_i \\ \text{si } 0,33 Pa_i + 89 < 0 \end{array} \right\} \text{Bassin AVAL} \quad (8)$$

et

$$\left. \begin{array}{l} D_{2i} = D_i - (0,24 Pa_i + 88,6) \\ \text{si } -0,24 Pa_i + 88,6 > 0 \\ D_{2i} = D_i \\ \text{si } -0,24 Pa_i + 88,6 < 0 \end{array} \right\} \text{Bassin AMONT} \quad (9)$$

### III 2-3 3ème REGRESSION : REGRESSION LINEAIRE ENTRE L'ECART ( $D_{2i}$ ) ET LA DUREE DE LA PERIODE SECHE ( $D_{si}$ )

On a choisi la variable ( $D_{si}$ ), durée de la période sèche immédiatement antérieure à la séquence pluvieuse ( $i$ ), comme étant susceptible de représenter le déficit hydrique créé par évaporation de l'eau retenue dans le sol, entre deux séquences pluvieuses.

Sur les figures 33 (bassin AVAL) et 37 (bassin AMONT) sont reportées pour chaque épisode pluvieux ( $i$ ), les valeurs de ( $D_{2i}$ ) en fonction de ( $D_{si}$ ). Les couples ( $D_{si}$ ,  $D_{2i}$ ) ont été ajustés manuellement aux droites  $D_{2i} = D_2 (D_{si})$  d'équations :

$$D_{2i} = 2 \cdot D_s \quad (10)$$

Notons, dès à présent que la pente de la droite  $D_{2i} = 2 \cdot D_s$  a pour dimension des millimètres par jour et est donc homogène à une évaporation

### III 2-4 AJUSTEMENT FINAL - REGRESSION ENTRE $P_i$ et $(LE_i + D_{1i} + D_{2i})$

Sur les figures 34 et 38 sont reportés les valeurs de  $P_i$  en fonction de  $(LE_i + D_{1i} + D_{2i})$ . Par la méthode des moindres carrés on obtient comme droites de régression, respectivement pour les bassins AVAL et AMONT,

$$LE_i + D_{1i} + D_{2i} = 0,62 P_i + 7,01 \quad (11)$$

avec  $R = 0,94$

Pour 62 couples  $(LE_i + D_{1i} + D_{2i}$

$$LE_i + D_{1i} + D_{2i} = 0,75 P_i + 0,23 \quad (12)$$

avec  $R = 0,80$

pour 62 couples  $(LE_i + D_{1i} + D_{2i}, P_i)$

Les droites (11) et (12) sont très proches des droites (3) et (4) enveloppes des couples  $(P_i, LE_i)$

## III 3 EXAMEN DES RESULTATS - INTERPRETATION.

### III 3-1 PRECISION DES CORRELATIONS

Les coefficients de corrélation calculés lors de chaque régression linéaire nous donne, compte-tenu des nombres de couples utilisés pour faire l'ajustement, une bonne idée de la précision des corrélations.

## BASSIN VERSANT AVAL

### RELATION ENTRE PLUIE ET LAME ECOULÉE CORRIGÉE DU DEFICIT HYDRIQUE DU SOL

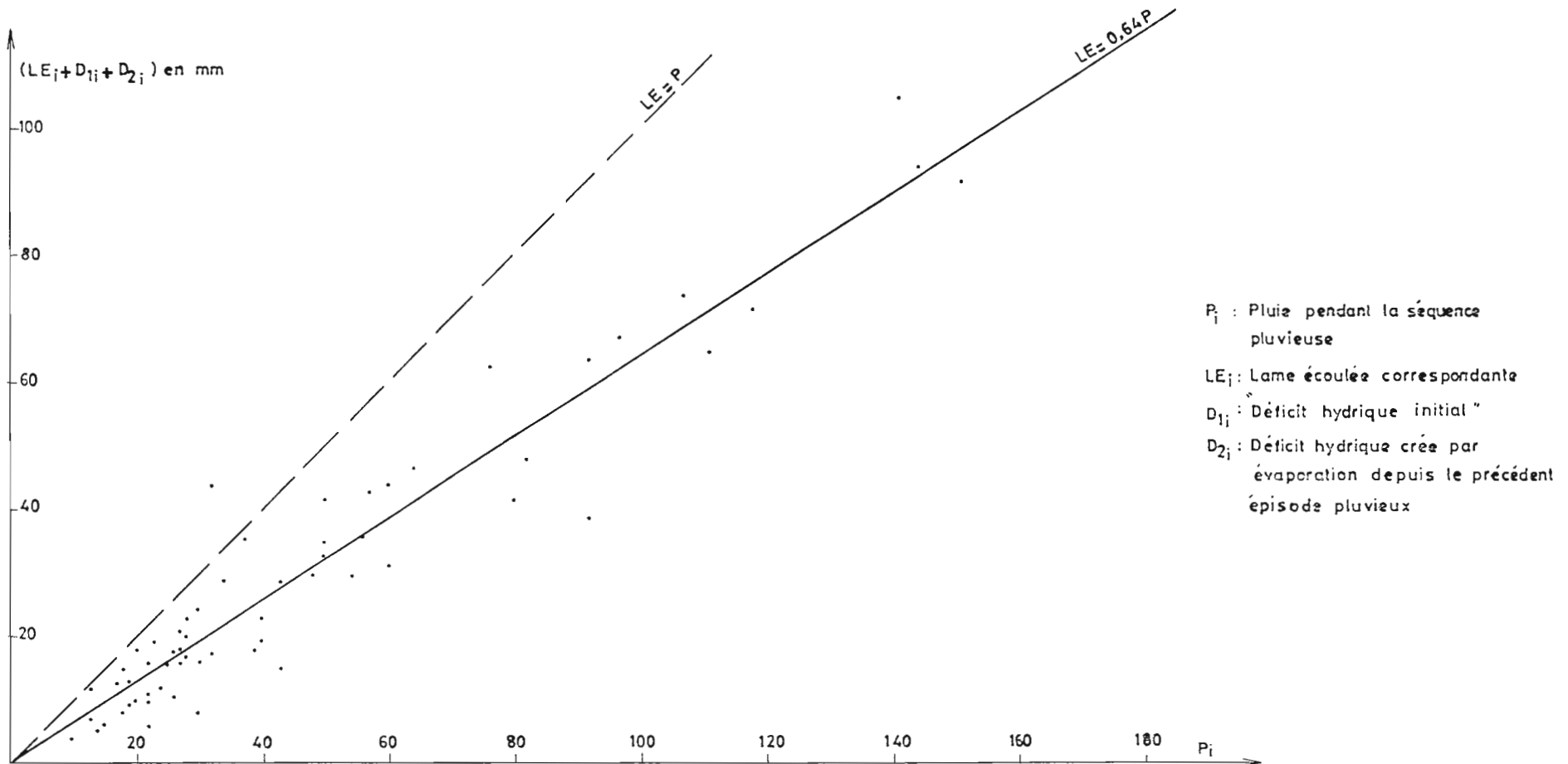
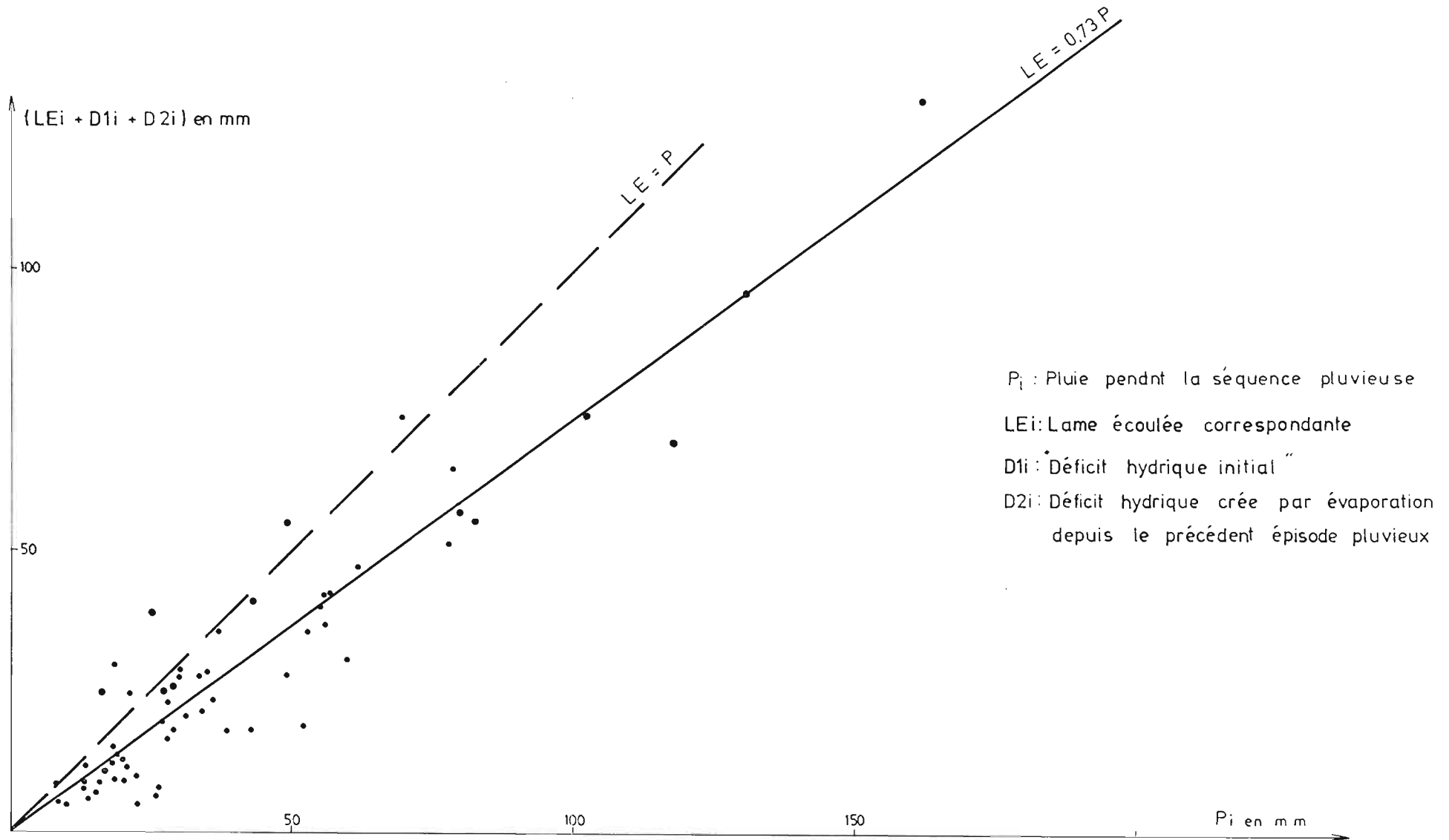


FIG. 34

# BASSIN AMONT

FIG. 38

## RELATION ENTRE PLUIE ET LAME ECOULEE CORRIGEE DU DEFICIT HYDRIQUE DU SOL



Les coefficients de corrélation ne sont jamais inférieurs à  $|0,80|$  ce qui semble tout à fait acceptable pour la présente étude.

### III 3-2 GRANDEURS PHYSIQUES MISES EN EVIDENCE

#### III 3-2.1 LE DEFICIT HYDRIQUE INITIAL DES SOLS

La régression linéaire entre le déficit d'écoulement ( $D_i$ ) et la pluie cumulée antérieure à la séquence pluvieuse  $i$  ( $Pa_i$ ) nous indique que les déficits d'écoulement des séquences pluvieuses de début de saison sont généralement beaucoup plus importants que les déficits d'écoulement de milieu et de fin de saison (Fig. 32 et 36). Cette observation nous conduit à supposer l'existence en début de saison des pluies d'un fort déficit hydrique initial.

Le déficit hydrique initial des sols peut être déterminé de la façon suivante :

- considérons le premier épisode pluvieux de chaque année hydrologique, ayant produit un écoulement.
- on peut, pour chacun de ces épisodes pluvieux, calculer le déficit hydrique initial des sols en additionnant à la pluie cumulée antérieure à l'épisode pluvieux considéré ( $Pa_i$ ), le déficit d'écoulement observé pendant la séquence pluvieuse considérée.

Soit :

$$DEF_i = Pa_i + D_i$$

La valeur du déficit hydrique initial ainsi calculée est toutefois légèrement surestimée, du fait qu'on néglige l'évapotranspiration réelle qui s'est produite depuis le début de la saison hydrologique.

Le calcul du déficit hydrique initial des sols a été effectué, sur les bassins AVAL et AMONT et les résultats sont présentés dans les tableaux T 3-3 et T 3-4.

T 3-3 TABLEAU DES DEFICITS HYDRIQUES INITIAUX DES SOLS

BASSIN AVAL

Séquence pluvieuse <sup>*</sup> $i$	$Pa_i$	$D_i$	$DEF_i = Pa_i + D_i$
$O_3$	79,4	81	160,4
$O_4$	125,7	42	167,7
$N_5$	115,5	55	170,5
$O_6$	140,4	29	169,4
$J_8$	172	47	219
$N_8$	78,4	81	159,4

T 3-4 TABLEAU DES DEFICITS HYDRIQUES INITIAUX DES SOLS

BASSIN AMONT

Séquence pluvieuse <sup>*</sup> $i$	$Pa_i$	$D_i$	$DEF_i = Pa_i + D_i$
$O_3$	79,4	66	145,4
$O_4$	143	58	201
$O_5$	66	73	139
$O_6$	141	34	175
$J_8$	198	56	256

\*  $O_3$  : la lettre est l'initial du mois au cours duquel s'est produit l'épisode pluvieux  $i$ .

En ajoutant un 197 devant le chiffre indiqué, on obtient l'année au cours de laquelle s'est produit l'épisode pluvieux.

Les valeurs du déficit hydrique initial, calculées sont pour chaque bassin relativement proches les unes des autres. Toutefois lors de de l'année hydrologique 1977-1978, les premiers écoulements ne se sont produits qu'en janvier, et donc le terme d'évaporation que l'on peut négliger pour les autres années hydrologiques devient important et les valeurs du déficit hydrique calculée est largement surestimée.

On calculera la valeur moyenne annuelle du déficit hydrique initial des sols en début de saison ( $\overline{\text{DEF}}$ ) en faisant abstraction de l'année hydrologique 1977-1978. On a :

$$\begin{aligned}\overline{\text{DEF}} &= 165,5 \text{ mm} && \text{pour le bassin AVAL} \\ \overline{\text{DEF}} &= 165,1 \text{ mm} && \text{pour le bassin AMONT}\end{aligned}$$

Les principaux facteurs de la dispersion des résultats lors des différentes années d'observation sur un bassin sont :

- le fait que l'on néglige l'évaporation qui s'est produite avant le premier écoulement,
- le déficit hydrique initial des sols n'est pas rigoureusement identique chaque année. Par exemple la géométrie des fentes de retrait n'est pas identique d'une année à l'autre.

### III 3-2.2 EVAPOTRANSPIRATION MOYENNE JOURNALIERE PENDANT LA SAISON DES PLUIES.

La pente de la droite de corrélation entre ( $D_{s_i}$ ) durée de la période sèche antérieure à la séquence ayant produit un écoulement et l'écart  $D_{2i}$  nous donne une valeur moyenne de 2 mm par jour d'évapotranspiration journalière pendant la saison des pluies.

Le fait que l'on ait choisi comme variable susceptible de représenter l'évaporation la durée de la période sèche antérieure induit des erreurs :

- ainsi en début de saison des pluies (octobre) et fin de saison (avril-mai), cette valeur de 2 mm par jour est trop faible.
- en janvier cette valeur est trop forte (cf. II 2-3)

Remarquons sur les tableaux T 3-5 et T 3-6, que la majorité des écoulements (en nombre), de même que les écoulements les plus importants en volume n'ont pas lieu pendant les mois d'octobre, avril et mai.

Tableau 3 5 : répartition des écoulements dans la saison sur le bassin AVAL

Lame écoulee en mm	Date :													Nombre d'écoulement	
		S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A		
2 à 10			4	3	3	4	8	5	4	1					32
10 à 20				2	4	3	3	3		1					16
20 à 30			1		1		1								3
30 à 40				3		1	1								5
40 à 50							1		1						2
50 à 60							1		1						2
60 à 70															0
70 à 80				1											1
80 à 90															0
90 à 100							1								1
Nombre d'écoulement		0	5	9	8	8	16	8	6	2	0	0	0		62

Tableau 3.6 : Répartition des écoulements dans la saison sur le bassin AMONT.

Lame écoulee en mm	DATE												Nombre d'écoulement	
	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A		
1 à 10		5	3	5	3	7	5	6	1					35
10 à 20			1	4	2	1	3							11
20 à 30		1				4	1							6
30 à 40			2		1	1								4
40 à 50						1								1
50 à 60			1			1	1							3
60 à 70			1											1
70 à 80														0
80 à 90														0
90 à 100			1											1
Nombre d'écoulement	0	0	6	9	9	6	15	10	1	0	0	0		62



### III 3-2.3 COMPORTEMENT DES BASSINS QUAND LE DEFICIT HYDRIQUE DES SOLS EST NUL.

On peut penser, étant donné le bon ajustement obtenu lors de la 3ème régression, que les droites enveloppes des couples  $(LE_i, P_i)$  traduisent le comportement des bassins AVAL et AMONT quand les sols sont saturés. Les coefficients angulaires de ces droites enveloppes sont respectivement de 0,64 et 0,73.

La dispersion observée peut s'expliquer d'une part par les simplifications effectuées (utilisation de variables comme  $Pa_i$  et  $D_{si}$  pour représenter le déficit hydrique des sols et l'évapotranspiration) et d'autre part les erreurs commises la mesure des lames écoulées et de la pluie moyenne sur les bassins.

L'analyse de la précision des résultats obtenus sur les bassins versant AVAL et AMONT (Tableaux T 3.7 et T 3.8) nous montre que les précisions relatives et absolues des résultats sont, en règle générale meilleures dans les classes de lame écoulee élevée que dans les classes de lame écoulee faible.

D'autre part les épisodes pluvieux de lame écoulee élevée de début de saison des pluies échappent quelquefois à cette règle du fait que l'on choisit pour établir la régression entre  $D_i$  et  $Pa_i$  une droite valable en moyenne pour toutes les années d'observation, alors qu'il existe une droite par année. (voir fig. 32 et 36).

TABLEAU 3.7 : Précision absolue et relative des résultats du bassin AVAL.

		CLASSE DE LAME ECOULEE (exprimée en millimètres)									
		2 à 10	10 à 20	20 à 30	30 à 40	40 à 50	50 à 60	60 à 70	70 à 80	80 à 90	
précision absolue	$ \overline{\Delta R} $	5.11	5.21	4.44	4.8	5	4		10	2	
	$S_{ \Delta R }$	3,52	6,41	(2,69)	(2,38)						
précision relative	$\frac{\overline{\Delta R}}{LE}$	1,37	0,44	0,18	0,15	0,12	0,07		0,13	0,02	
	$\frac{S_{\Delta R}}{LE}$	1,17	0,61	(0,16)	(0,07)						

TABLEAU 3.8 : Précision absolue des résultats du bassin AMONT.

		CLASSE DE LAME ECOULEE (exprimée en millimètres)									
		1 à 10	10 à 20	20 à 30	30 à 40	40 à 50	50 à 60	60 à 70	70 à 80	80 à 90	90 à 100
précision absolue	$ \overline{\Delta R} $	6.2	7.09	3.6	4.25	3.0	3.0	23			11
	$S_{ \Delta R }$	5,37	6.2	(1.51)	(6.55)	(3.6)					
précision relative	$\frac{\overline{\Delta R}}{LE}$	1.98	0.49	0.15	0.14	0.05	0.05	0.34			0.12
	$\frac{S_{\Delta R}}{LE}$	2.66	0.44	(0.03)	(0.22)	(0.06)					

$|\overline{\Delta R}|$  : moyenne des valeurs absolues des écarts résiduels

$S_{|\Delta R|}$  : écart type des valeurs absolues des écarts résiduels

$\frac{\overline{\Delta R}}{LE}$  : moyenne des rapports entre valeurs absolues des écarts résiduels et lames écoulées.

$\frac{S_{\Delta R}}{LE}$  : écart type des rapports, écarts résiduels - lames écoulées.

### III 4 -RESUME DE LA METHODE

Lecture des tableaux de pluviométrie moyenne journalière sur le bassin

⇒ Découpage en séquences pluvieuses

Tri des séquences pluvieuses ayant produit un écoulement\*

→ pour chaque séquence pluvieuse :

Calcul de la pluie tombée au cours de la séquence ( $P_i$ )

Calcul de la pluie antérieure à la séquence ( $Pa_i$ )

Calcul de la durée de la période sèche ( $D_{si}$ )

→ Etablissement de la loi de comportement du bassin quand les sols sont saturés : 1ère régression

Tracé de la courbe enveloppe des couples  $LE_i, P_i$   $LE = \alpha P$

→ Détermination du déficit hydrique des sols  $DEF \approx D_1 + D_2$

2ème régression

Déficit hydrique des sols en début de saison :  $D_1$

3ème régression

Déficit produit par évaporation entre deux séquences pluvieuses :  $D_2$

→ Calcul de l'écoulement produit pendant la séquence pluvieuse

$$LE_i = P_i - DEF_i$$

→ comparaison de  $LE_i$  calculée avec  $LE_i$  observée

Notons que si les régressions 1 et 2 sont connues sur le bassin versant, on peut déterminer les écoulements en ne connaissant que  $P_i, D_{si}$  et  $Pa_i$ .

La régression 3 a une représentativité plus régionale et peut être considérée comme établie en Tunisie du Nord.

Chapitre quatrième

C O N C L U S I O N

-----

## Chapitre quatrième

### C O N C L U S I O N

---

Les deux méthodes d'étude des écoulements, exposées dans les pages précédentes sont fondées sur le principe du bilan hydrique.

Un important déficit hydrique des sols en début de saison est mis en évidence par les deux approches sur les bassins AVAL et AMONT de l'Oued Sidi Ben Naceur. La valeur de ce déficit hydrique au début de chaque épisode pluvieux conditionne le volume des écoulements produits lors de l'épisode.

Il s'avère que les méthodes de bilan hydrique employées dans les régions tempérées peuvent être applicables aux bassins versants de Tunisie du Nord, à condition toutefois que le couvert végétal soit suffisamment dense.

B I B L I O G R A P H I E  
=====

- 1 MONTMARIN - Intensité et durée des averses enregistrées à Tunis  
Ed. HAR SPH - Tunis, 1956.
- 2 IBIZA - Recherches méthodologiques sur des bassins versants  
dans le Nord de la Tunisie. Rapport ORSTOM  
(en cours de publication), 1980.
- 3 KALLEL - La pluie en Tunisie durant la décennie 1968-1978.  
Rapport Division des Ressources en Eaux, Tunis, 1979.
- 4 ROCHE - Hydrologie de surface. Ed. Gauthier-Villars, Paris, 1963.
- 5 BORTOLI, GOUNOT - Climatologie et bioclimatologie de la Tunisie  
JAQUINET septentrionale. Annales de l'INRAT, Vol. 42, Fasc. 1  
Tunis.
- 6 RIAUCOURT - Aperçu géologique et lithologique du bassin versant  
de l'Oued Sidi Ben Naceur - Rapport ORSTOM, Tunis, 1980.
- 7 DELHUMEAU - Etude pédologique du bassin versant de l'Oued  
Sidi Ben Naceur - Rapport ORSTOM, Tunis - à paraître.
- 8 AMANDIER, JOFFRE - Carte des indices du biovolume végétal de l'Oued  
Sidi Ben Naceur. ORSTOM - Tunis.
- 9 GIRARD, GUISCAFRE Procès-verbal d'installation des bassins versants  
du Nord Tunisien - Rapport ORSTOM - Tunis.

## A N N E X E S

ANNEXE 1 : Présentation du Bassin Versant de l'Oued SIDI BEN NACEUR

ANNEXE 2 : La méthode des déviations résiduelles - Rappel théorique

ANNEXE 1 LE BASSIN VERSANT DE L'OUED SIDI BEN NACEUR

A I 1 GEOGRAPHIE REGIONALE - SITUATION (Carte A 1)

L'Oued Sidi Ben Naceur coule au coeur de la Chaîne des Mogods (Tunisie du Nord) et se jette dans l'Oued Sedjenane. D'une superficie de  $13.91 \text{ km}^2$ , le bassin versant étudié (BVN) appartient au bassin versant de l'Oued Sidi Ben Naceur et son exutoire est situé à deux kilomètres en amont de la confluence des Oueds Sidi Ben Naceur et Sedjenane.

Le bassin versant est compris entre  $37^{\circ}04'$  et  $37^{\circ}08'$  de latitude Nord, et  $7^{\circ}02'$  et  $7^{\circ}06'$  de longitude. Il culmine à 508 mètres. L'altitude de l'exutoire est de 108 mètres.

Le bassin versant se trouve à une quinzaine de kilomètres de la côte méditerranéenne.

A I 2 CLIMAT REGIONAL.

Le bassin versant de l'Oued Sidi Ben Naceur est soumis à l'influence d'un climat de type méditerranéen. La pluviométrie moyenne inter-annuelle sur le bassin a été évaluée à 887 mm à Sedjenane ; le gradient pluviométrique altitudinal est fort (IBIZA [2]).

Le régime pluviométrique se caractérise par un creux pluviométrique (précipitation totale annuelle) et par une abondance des précipitations pendant les mois de décembre, janvier, février et octobre.

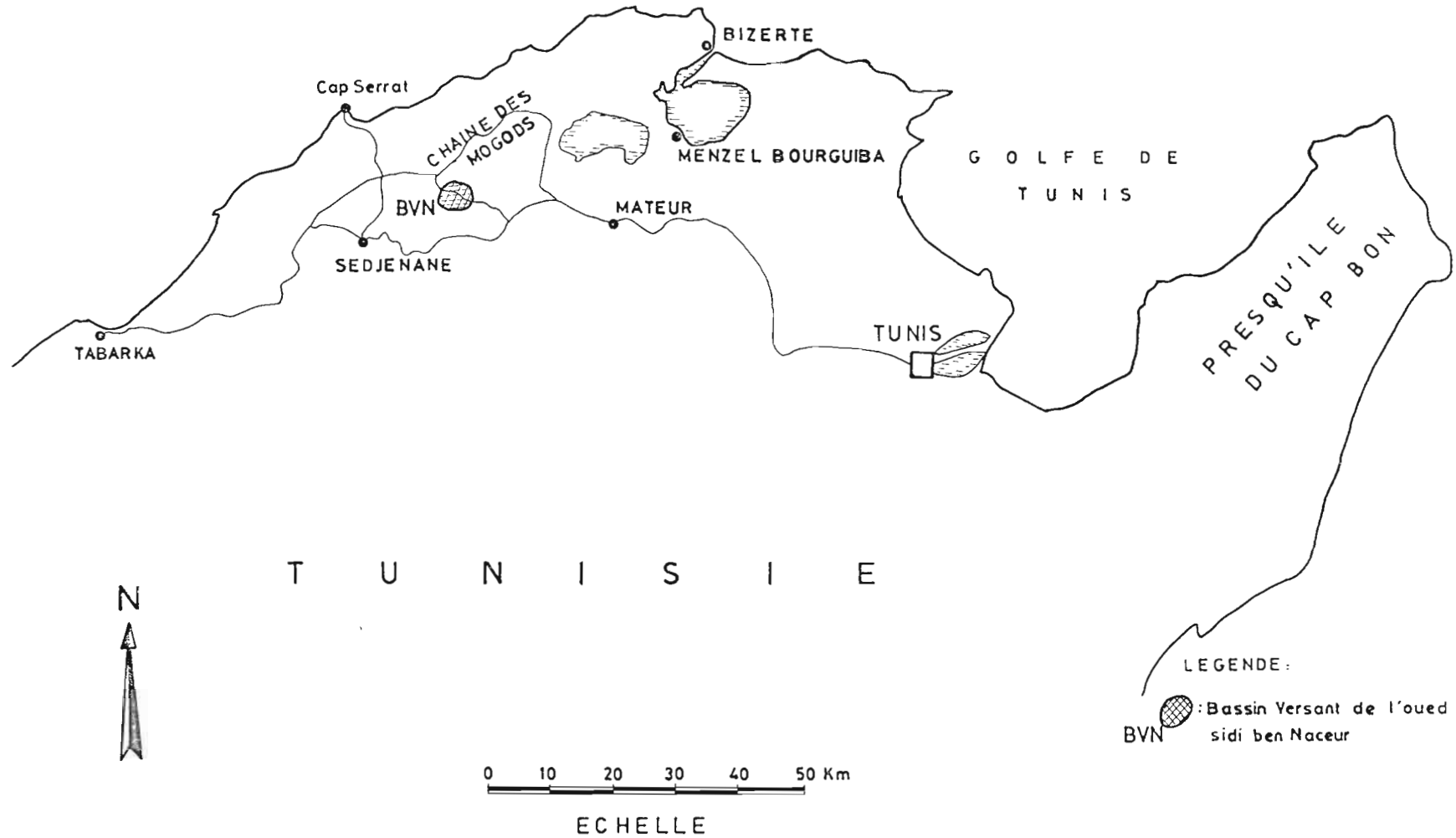
La proximité de la mer a une influence importante sur le climat ; les amplitudes thermiques annuelles et mensuelles sont faibles. L'indice de continentalité de GORSZINSKY vaut environ 19.

Les vents dominants soufflent du Nord-Est.

La région appartient au sous étage inférieur à hiver doux de l'étage humide (BORTOLI & al. [5]) de la classification bioclimatique de la zone méditerranéenne, établie par EMBERGER.



# CARTE DE SITUATION REGIONALE



## A.2 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU BASSIN VERSANT.

Quatre bassins versants ou sous-bassins ont été définis pour les besoins de l'étude (CA.2). Nous nous limiterons au rappel des principales caractéristiques physiques, celles-ci ayant été développées dans des documents publiés ou en cours de publication.

### A.2.1 TOPOMETRIE

Les données topométriques ont été évaluées à partir d'une carte topographique au 1/10.000 et sont consignées dans les tableaux (TA 1.1), (TA 1.2), (TA 1.3).

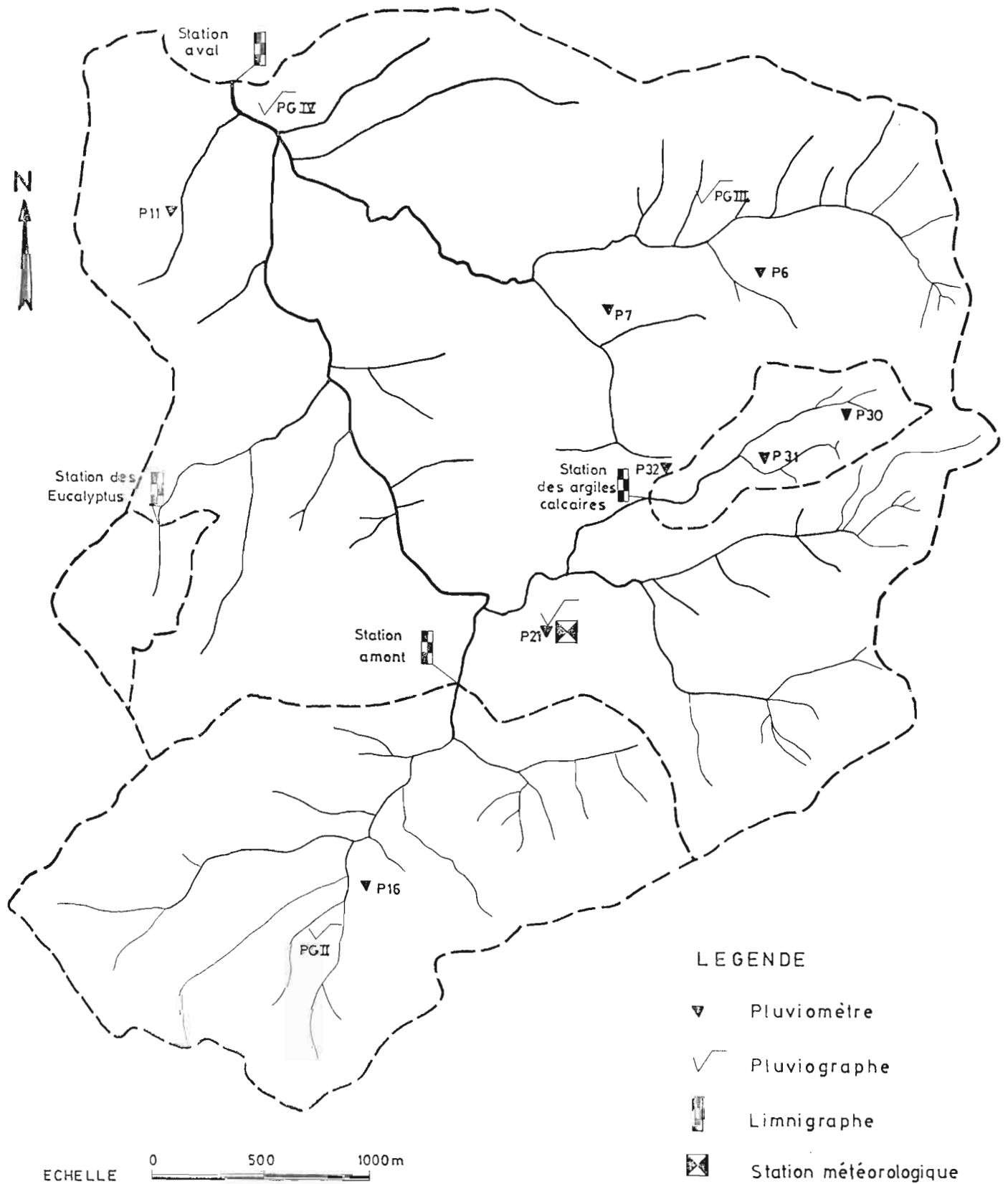
#### TA. 1.1 Paramètres de forme

	AVAL	AMONT	ARG. CALCAIRES	EUCALYPTUS
SURFACE	13,9 km <sup>2</sup>	3,24 km <sup>2</sup>	0.425 km <sup>2</sup>	0.311 km <sup>2</sup>
PERIMETRE	17 km	7.4 km	3.1 km	2.7 km
L. RECT. EQUI.	6.36 km	2.16 km	1.19 km	1.05 km
L. GRAVELIUS	1.28	1.16	1.33	1.35

Les bassins versants AVAL et AMONT ont des formes relativement arrondies (coefficient de compacité faible). Les petits sous-bassins des argiles calcaires et des Eucalyptus sont de forme plus allongée (coefficient de Gravelius élevé).

## BASSIN VERSANT DE L'OUED SIDI BEN NACEUR

## Carte d'équipement



T A 1.2 Hypsométrie

BASSIN	AVAL		AMONT		ARG. CALC.		EUCALYPTUS	
ALTITUDE	sup. %	Alt. Max Min	sup. %	Alt. Max Min	sup. %	Amt. Max Min	sup. %	Alt. Max Min
508		508		508				
	0,5		2,1					
450								
	2,1		7,9					
400								
	5,9		22,2		1,3	383		
350								
	9,9		18,7		13,2		1,3	325
300								
	19,3		23,3		43,0		20,3	
250								
	26,2		24,0		40,9		60,0	
200								
	23,5		1,8	177	1,6	193	18,4	185
150								
	12,5	108						

T A 1.3 Caractéristiques hypsométriques

BASSINS	AVAL	AMONT	ARGILES-CALC.	EUCALYPTUS
Altitude moyenne	234	307	265	232
Dénivelée utile	247	213	145	90
Indice de pente global	39	99	120	88
Indice de pente de Roche	0.224	0.350	0.364	0.333

T A 1.4 Densités de drainage et rapports de confluence

BASSIN O R D R E	AMONT			ARGILES-CALCAIRES			AVAL		
	Nb	Lx	x	Nb	Lx	x	Nb	Lx	x
1	44	9650	21932	11	1100	100	45	29500	203
2	12	2500	208.3	3	500	166.7	39	10150	260
3	3	1800	600	1	1050	1050	10	7500	750
4	1	950	950	0	0	0	3	4950	1650
5	0	0	0	0	0	0	1	3000	3000
LD	14,9 km			2.65 km			55,1 km		
Dd	4.599 km <sup>-1</sup>			6,23 km <sup>-1</sup>			3.96 km <sup>-1</sup>		

RAPPORT DE CONFLUENCE

BASSINS	AMONT	ARGILES-CALCAIRES	AVAL
Rc	3.954	4.037	3.594

Les pentes sont importantes, l'indice de Roche varie de 0.224 sur le bassin AVAL à 0.36 pour les trois autres bassins.

#### A.2.2 Réseau hydrographique naturel

Les caractéristiques du réseau hydrographique sont consignées dans le tableau. (T A 1.4).

- LD représente la somme sur le bassin de la longueur des cours d'eau
- Dd représente la densité de drainage qui se définit comme le rapport entre LD et l'aire du bassin versant considéré.
- Rc représente le rapport de confluence qui se définit par le rapport du nombre de cours d'eau  $N_i$  d'ordre  $i$  au nombre  $N_{i+1}$  de cours d'eau d'ordre  $i+1$ .

De l'examen de ces tableaux, il ressort que le bassin des Argiles-Calcaires est le mieux drainé des quatre bassins (densité de drainage, et rapport de confluence les plus élevés) ce qui est en accord avec les données de topométrie (indice de pente le plus élevé) et avec les données de végétation (le bassin est essentiellement recouvert de prairies, champs cultivés et maquis dégradés).

#### A.2.3. Géologie d'après (RIAUCOURT [6])

Le bassin versant est situé dans la province géologique de KROUMIRIE-NEFZA qui constitue la bordure Nord du sillon tunisien. Les structures régionales sont d'orientation Nord-Est - Sud-Ouest et sont déversées vers le Sud. Une tectonique de couverture avec décollement de celle-ci affecte la région.

A.2.4 Pédologie d'après (DELHUMEAU [7])

Le climat méditerranéen humide, la lithologie (alternance de grès et d'argiles peu calcaires), le relief montagnard et la végétation originelle (acidiphile de type forestier à base de feuillus) ont favorisé une pédogénèse brunifiante à matière organique de type mull, non calcaire caractérisée par le sol brun modal.

L'évolution de ce sol brun, en équilibre avec la végétation originelle est conditionnée par la dégradation de la végétation forestière en un maquis, lui-même de plus en plus dégradé.

Le matériau originel des sols est constitué d'une nappe colluviale argilogréseuse complexe en ce sens qu'elle est le résultat de la superposition de trois nappes d'âges différents ; au moins la plus ancienne porte la trace d'une pédogénèse fossile (rubéfaction intense).

Le tableau T A 1.5 montre les divers stades de l'évolution du sol brun modal en fonction de la nature du matériau originel et de l'état de dégradation de la végétation.

T A 1.5 Schéma général d'évolution actuelle sous l'effet d'un défrichement.

Matériaux Végétation	Grès	Colluvions gréso- argileuses	Colluvions argilo- gréseuses	Argiles faiblement calcaires
Forêt-climax	SOL BRUN MODAL			
Végétation forestière en bon état	Sol Brun Lessivé	Sol brun lessivé oblique	Brun acide	Brun calcique
Maquis	Sol brun podzologique	Sol brun lessivé dégradé hydromorphe	Brun hydromorphe	Brun vertique
Maquis dégradé ou culture	Sol podzologique	Sol hydromor- phe à pseudo- gley	Hydromorphe à pseudogley planosolique	Vertisol (Pélosol à pseudogley

#### A.2.5 Végétation

Le maquis couvre la plus grande partie du bassin versant. Les principales espèces sont le lentisque, le chêne kermès, la bruyère arborescente, l'oléastre ainsi que quelques reliques de chêne liège. Le maquis est souvent défriché pour la fabrication de charbon de bois et se dégrade de plus en plus ; le ciste de Montpellier, la bruyère à balai, la bruyère multiflore, l'arbousier et le genévrier de Phénicie apparaissent alors.

La partie Nord-Ouest du bassin a été reboisée par des Eucalyptus et est exploitée pour la fabrication de charbon de bois.

On trouve aussi quelques prairies, quelques terres cultivées en céréales et une oliveraie.

Une carte des indices du bio-volume végétal a été établie.

#### A-3 EQUIPEMENT DU BASSIN VERSANT

La carte A 2 représente l'essentiel du dispositif expérimental installé sur le bassin versant de l'Oued Sidi Naceur. Ce dispositif est constitué par :

- . un réseau de mesures pluviométriques (pluviographes et pluviomètres).
- . un réseau de mesures limnimétriques. Quatre bassins sont étudiés : le "bassin AVAL" d'une superficie de 13.9 km<sup>2</sup> contrôlé par l'exutoire principal ; le "bassin AMONT" d'une superficie de 3.2 km<sup>2</sup>, le "bassin des ARGILES-CALCAIRES" d'une superficie de 0.425 km<sup>2</sup> et le "bassin des EUCALYPTUS" d'une superficie de 0.311 km<sup>2</sup>.
- . une station climatologique d'évaporation (thermomètre minima et maxima, mesures des températures sèches et humides, évaporomètre de Piche, évaporomètre de type Bac-COLORADO).

Le dispositif expérimental est décrit en détail dans le procès verbal d'installation des bassins versants du Nord Tunisien (GIRARD & al [9]).



ANNEXE 2LA METHODE DES DEVIATIONS RESIDUELLES

## Rappel théorique - d'après (4)

Nous rappelons brièvement le principe de la méthode des déviations résiduelles.

Considérons une variable  $Y$  dépendant de  $n$  variables  $X_1, \dots, X_n$ .

On admettra pour simplifier les écritures que  $Y$  dépend de 3 variables seulement, ce qui est le cas dans l'exemple traité. On peut classer les variables  $X_i$  en  $X_1, X_2, X_3$  par ordre d'importance, suivant leur influence sur la variable  $Y$ . L'influence de la variable décroît quand l'indice croît. On peut exprimer  $Y$  par  $X_1$ , facteur conditionnel le plus important au moyen d'une relation

$$Y = f_1(X_1) + \Delta_1 Y$$

$\Delta_1 Y$  représente l'écart résiduel subsistant après l'ajustement graphique d'une courbe  $Y = f(x)$  à partir de  $n$  couples observés  $(Y_i, X_{1i})$ . Comme on sait qu'il existe d'autres facteurs conditionnels de la grandeur physique  $Y$ , il est raisonnable de supposer qu'une partie au moins de  $\Delta_1$  est due à l'influence de  $X_2$  et  $X_3$  et d'écrire :

$$\Delta_1 Y = f_2(X_2) + \Delta_2 Y$$

$$\Delta_2 Y = f_3(X_3) + \Delta Y$$

D'après l'hypothèse de départ, l'écart résiduel  $\Delta Y$  ne peut être imputé à l'existence d'un autre facteur conditionnel. Il provient donc, soit d'un mauvais tracé de la première courbe  $Y = f_1(X_1)$ , soit d'erreurs de mesures à caractère aléatoire, soit de facteurs conditionnels non envisagés ; il est possible de remédier à la première des causes de dispersion en retouchant la courbe  $Y = f(X_1)$ , puis  $\Delta_1 Y = f(X_2)$  etc... On se contente en général de deux approximations. En pratique on opère de la façon suivante :

Première approximation :

On porte sur un graphique tous les couples  $(Y_i, X_{1i})$ , une courbe est ajustée graphiquement au nuage de points : c'est la courbe de première approximation représentant  $Y = f_1(X_1)$ . Pour chaque point d'observation on observe une déviation  $\Delta_{1i} = Y_i - f_1(X_{1i})$  qui est reportée en ordonnées sur un autre graphique d'abscisse  $X_2$ . On ajuste graphiquement une courbe au nouveau nuage obtenu et on note les nouvelles déviations  $\Delta_{2i} Y$  qui font l'objet d'un troisième graphique d'abscisse  $Y_3$ . On obtient alors les déviations  $\Delta Y$ .

## Deuxième approximation

Les déviations  $\Delta_1 Y$  du troisième graphique sont considérées comme provenant en grande partie d'un ajustement déficient de la courbe  $Y = f_1 (X_1)$ , tracée en première approximation. On porte donc pour chaque point, dans un plan  $(Y, X_1)$ , les déviations  $\Delta_1 Y$  à partir de la première courbe  $Y_1 = f (X_1)$ . Une nouvelle courbe  $Y = f_1 (X_1)$  est alors ajustée graphiquement au nouveau nuage de points ainsi obtenus. Les déviations résiduelles observées servent à corriger la lère courbe  $\Delta_1 Y = f_2 (X_2)$ , etc.

Finalement la grandeur physique  $Y$  est estimée par la relation

$$Y = f_1 (X_1) + f_2 (X_2) + f_3 (X_3)$$

Les valeurs des différentes fonctions  $f_i$  étaient prises sur les graphiques correspondant respectivement aux variables indépendantes  $X_1, X_2, X_3$ .