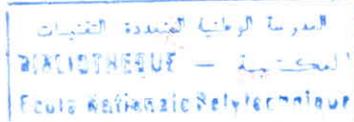


3/90

وزارة التعليم العالي

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR



2ex

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT

HYDRAULIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

S U J E T

ETUDE ET MODELISATION
DU BILAN HYDRIQUE
ET DU BILAN HYDROLOGIQUE

Proposé par :

M^r. DECHEMI

Etudié par :

CHOUAKI Amina

OUADAH Baya Souad

Dirigé par :

M^r. DECHEMI

PROMOTION :

1990

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT

H Y D R A U L I Q U E

PROJET DE FIN D'ETUDES

S U J E T

ETUDE ET MODELISATION
DU BILAN HYDRIQUE
ET DU BILAN HYDROLOGIQUE

Proposé par :

M^r. DECHEMI

Etudié par :

CHOUAKI Amina

OUADAH Baya Souad

Dirigé par :

M^r. DECHEMI

PROMOTION :

1990

REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer nos remerciements à :

Notre promoteur Mr DECHEMI, qui nous a aidé et conseillé tout au long de cette étude.

L'équipe GESTOP, et tout particulièrement Mr BENZIADA.

Tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à l'élaboration de cette étude.

DEDICACES

Je dédie ce travail à,

mes parents,

mes frères,

et tous mes amis,

BAYA.

Je dédie ce travail à,

mes parents,

mes frères et soeurs,

et tous mes amis,

AMINA.

SOMMAIRE

INTRODUCTION1

PARTIE I - BILAN HYDRIQUE

1 Généralités3

1-1 Données climatiques4

 1-a Précipitation4

 1-b Evapotranspiration4

1-2 Données phénologiques9

 2-a Différents types de culture9

 2-b Profondeur d'enracinement9

 2-c Coefficient cultural9

1-3 Données édaphiques10

 3-a La réserve utile10

 3-b Le drainage11

2 Présentation des modèles12

2-1 Modèle 112

 1-a Description du modèle13

 1-b Programmation du modèle18

2-2 Modèle 218

 2-a Description du modèle19

 2-b Programmation du modèle21

3 Interprétation des résultats22

3-1 Critique des données22

3-2 Résultats23

 2-1 Etude statistique des séries23

3-3 Comparaison des modèles26

4 Conclusion27

PARTIE II - BILAN HYDROLOGIQUE

1 Généralités	28
2 Présentation des modèles	29
2-1 Modèle 1	29
1-a Conception du modèle	30
1-b Programmation du modèle	32
2-2 Modèle 2	33
3 Interprétation des résultats	34
3-1 Optimisation des paramètres des modèles	34
3-2 Résultats	35
4 Conclusion	36
CONCLUSION GENERALE	37
BIBLIOGRAPHIE	38
ANNEXE	

INTRODUCTION

L'eau est la ressource fondamentale de notre environnement et de l'agriculture. Mais, la tâche importante est de savoir gérer cette ressource d'une façon adéquate.

Dans ce contexte, on doit étudier et approfondir les connaissances du système complexe, sol-eau- plante-atmosphère basé sur :

- un apport en précipitation ou apport artificiel par irrigation, et une demande qui n'est autre que l'évapotranspiration de la culture considérée, qui définissent ainsi le bilan hydrique,

- et, la transformation pluie-débit qui permet la formulation du bilan hydrologique .

Le bilan hydrique s'applique dans le cas d'un périmètre agricole pour déterminer le déficit ou le surplus d'eau au niveau du réservoir-sol , durant une période donnée.

Si dans ce bilan, l'évapotranspiration est un terme prépondérant, par contre dans le bilan hydrologique, il n'est que secondaire. De ce fait, le but recherché est alors l'estimation du ruissellement sur un bassin versant pour une prédétermination des débits de crue.

Les deux bilans cités précédemment, peuvent être établis sur un pas de temps journalier, hebdomadaire ou mensuel.

Leur évaluation se fait à partir de modèles mathématiques qui font justement l'objet de cette étude .

Les applications seront faites sur :

- la plaine de la Mitidja, pour le bilan hydrique,
- le bassin versant de La Cheffia, pour le bilan

hydrologique .

L'étude a été donc structurée de la manière suivante :

Après introduction, une première partie sera consacrée au bilan hydrique, contenant des notions théoriques pour une meilleure compréhension des modèles. Ensuite, seront présentés les modèles proprement dits, suivis d'une interprétation des résultats.

Et une deuxième partie, tout à fait similaire à la première, mais consacrée cette fois-ci au bilan hydrologique

PARTIE-I- BILAN HYDRIQUE

1/ GENERALITES :

Le bilan hydrique est la formalisation du principe de la conservation de la masse d'eau contenue dans le sol .

La variation de la quantité d'eau dans le sol est fonction des données climatiques (précipitation et évapotranspiration), des données phénologiques (différents types de sol, coefficient cultural et profondeur d'enracinement), des données édaphiques (humidité dans le sol, la réserve utile, le drainage) et des remontées des eaux des nappes phréatiques .

La plante puise son eau du sol par les racines, dans le but de satisfaire ses besoins qui se traduisent par l'évapotranspiration (il ne faut pas oublier l'évaporation du sol) .

L'eau contenue dans le sol provient de la partie de précipitation qui s'infiltré. L'étude du bilan hydrique se fait par la confrontation de cet apport et des besoins en eau de la culture .

Cette étude permet de suivre les fluctuations de la quantité d'eau stockée dans le sol, sur un pas de temps donné, durant une période considérée .

L'analyse de ce suivi, rend possible la prévision des déficits en eau des cultures, sur une plaine agricole et ainsi de combler leurs besoins par des apports artificiels en eau (irrigation) durant les périodes sèches .

L'équation du bilan hydrique s'écrit :

$$RH = P + W - ETR - DR .$$

RH : réserve hydrique ou eau stockée dans le sol (mm) .

P : précipitation (mm) .

W : remontée d'eau des nappes phréatiques (mm) .

ETR : évapotranspiration réelle (mm) .

DR : drainage (mm) .

1-1/ Données climatiques :

1-a/ Précipitation :

La précipitation est un terme prépondérant intervenant dans le bilan hydrique. Sa source première est la vapeur d'eau de l'atmosphère .

Elle est mesurée à l'aide d'un dispositif appelé pluviomètre, qui donne la hauteur de précipitation, définie comme étant l'épaisseur, comptée suivant la verticale, de la lame d'eau .

Les précipitations qui atteignent directement le sol, sont appelées pluies brutes, et la quantité d'eau qui s'y infiltre définit les pluies nettes dans ce cas. Ce phénomène n'est observé qu'à partir d'une pluie-seuil préalablement donnée, les pluies trop faibles sont immédiatement évaporées

1-b/ Evapotranspiration :

L'évapotranspiration est un phénomène complexe défini par la quantité d'eau consommée qui comprend d'une part, l'eau transpirée par la plante, d'autre part l'évaporation directe à partir du sol.

Une évapotranspiration de référence dite évapotranspiration potentielle (ETP) a été définie comme étant celle maximale d'un couvert végétal, continu, homogène, tel que le gazon.

Pour une culture autre qu'un couvert végétal, soumise aux memes conditions, on calcule l'évapotranspiration maximale ETM par la formule :

$$ETM = Kc * ETP \text{ (mm) .}$$

Kc : coefficient cultural (voir suite pour explication).

Dans des conditions réelles, pour la meme culture, est prise une évapotranspiration réelle ETR, inférieure ou à la limite égale à ETM :

$$ETR \leq ETM .$$

L'ETP varie en fonction du stade de développement de la culture et des conditions météorologiques. Elle peut être mesurée ou encore calculée par des formules. En ce qui concerne ces formules, certaines ont été proposées résultant d'ajustements statistiques (TURC, THORNTHWAITE) et d'autres se basant sur le bilan énergétique (PENMAN) .

b-1/ Mesure de l'ETP :

Pour cela, est utilisé un dispositif appelé évapotranspiromètre ou cases lysimétriques (lysimètres), faisant appel au bilan hydrique d'un couvert végétal :

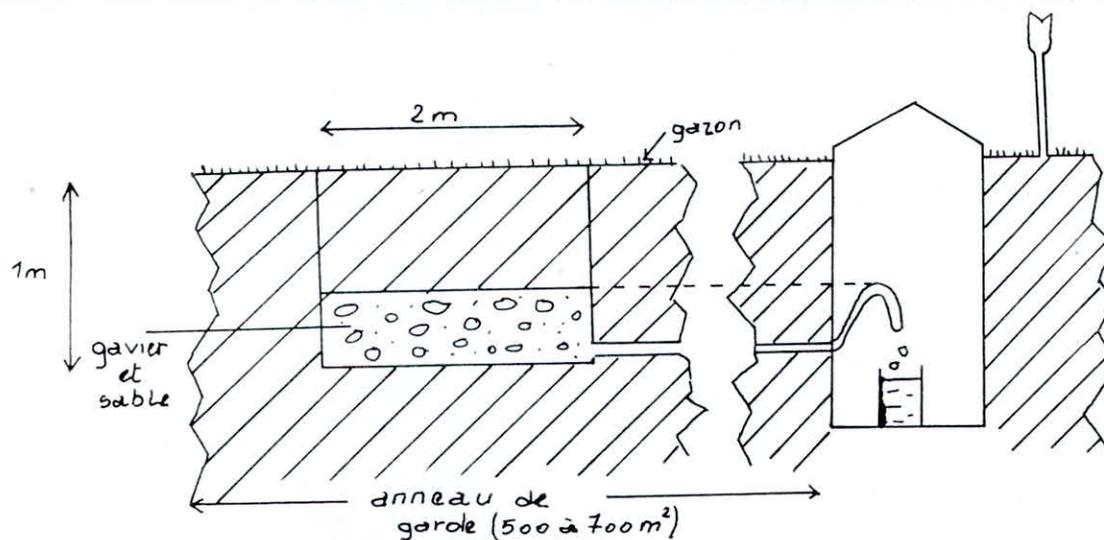


Fig.1- Evapotranspiromètre

L'inconvénient pour ces dispositifs, est qu'ils demandent de grandes précautions à cause de la difficulté de leur installation et de leur mise en oeuvre.

b-2/ Calcul de l'ETP :

b-2-1/ Formule de THORNTHWAITE :

THORNTHWAITE, a tenté de relier l'ETP à des paramètres facilement accessibles : température moyenne sous abri et durée théorique du jour.

$$\text{ETP (mm/j)} = 16 * ((10 * t / I) ** a) * F(\lambda) .$$

$F(\lambda)$: fonction de la durée théorique d'insolation.

t : température moyenne de la période considérée (en °C).

a : fonction de l'indice I :

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} * (I ** 3) - 7,71 \cdot 10^{-5} * (I ** 2) + 1,792 \cdot 10^{-2} * I + 0,49239 .$$

I : indice thermique annuel, somme des 12 indices

mensuels i_j :

$$I = \sum_{j=1}^n i_j \quad i_j = (t_j / 5) * x 1,514$$

t : température moyenne mensuelle du mois j (en °C).

b-2-2/ Formule de TURC :

C'est une formule valable pour une période de temps supérieure ou égale à la décade.

Si l'humidité relative moyenne considérée U_m est supérieure à 50 % :

$$\text{ETP (mm/j)} = 0,013 * (t / (t + 15)) * (R_g + 50) .$$

Si l'humidité relative moyenne considérée U_m est inférieure à 50 % :

$$\text{ETP (mm/j)} = 0,013 * (t/(t+15)) * (R_g+50) * (1+(50- U_m)/70) .$$

t : température moyenne de l'air sous abri (°C).

R_g : rayonnement global reçu sur une surface horizontale pouvant être évalué par la formule d'Angstrom (en cal/cm^2).

$$R_g / I_{ga} = a * (n / N) + b .$$

I_{ga} : rayonnement global reçu à la limite supérieure de l'atmosphère sur une surface horizontale en cal/cm^2 .

b/N : fraction d'insolation.

n : durée probable de l'insolation.

N : valeur d'insolation effective.

b-2-3/ Formule de PENMAN :

Le volume des échanges d'eau entre une surface évaporante et l'atmosphère est évalué par le biais du bilan énergétique, le rayonnement net devant équilibrer les différents flux de chaleur :

$$RN + \phi_k + \phi_c + \phi_L = 0$$

ϕ_k : flux de conduction dans le sol.

ϕ_c : flux de chaleur sensible dans l'atmosphère.

ϕ_L : flux de chaleur latente mise en jeu par l'évaporation ou évapotranspiration E .

$$\phi_L = L_v * E \quad (L_v : \text{chaleur latente de vaporisation}).$$

L'expression prend la forme simplifiée quand ϕ_k est négligeable :

$$RN + \phi_c + L_v * E = 0$$

PENMAN propose alors la formule suivante :

$$ETP(\text{mm/j}) = 10 / L_v * (\Delta / (\Delta + \gamma)) * RN + (\gamma / (\Delta + \gamma)) * E_a$$

Δ : pente de la courbe de tension de vapeur saturée en fonction de la température.

L_v : chaleur latente de vaporisation,

$$L_v = 595 - 0.55 * T. \quad (T \text{ en } ^\circ\text{C}).$$

γ : constante psychométrique, fonction de la pression et de la chaleur latente,

$$\gamma = 0.38 / 2 * L_v. \quad (\text{Pa en mb}).$$

$$RN = (1 - \alpha) * RS - \nabla * T^4 * (0.56 - 0.0092 * \sqrt{ed}) * (0.1 + 0.9 * n/N)$$

T : température de l'air (en $^\circ\text{K}$).

RS : rayonnement solaire.

a et b sont des constantes d'ajustement.

α : albédo variant de 0.2 à 0.25.

ed : tension de vapeur saturante au point de rosée.

∇ : constante = $72 * 10^{(-8)}$.

E_a : pouvoir évaporant de l'air,

$$E_a = f(u) * (e_a - ed).$$

e_a : tension de vapeur moyenne de l'air.

$f(u)$: fonction du vent,

$$f(u) = 0.26 * (1 + 0.53 * u).$$

u : vitesse du vent.

L'expression de PENMAN fait apparaître que l'ETP peut se décomposer en :

- une part radiative $f(RN) = (10 / L_v) * (\Delta / (\Delta + \gamma)) * RN$

- et une part advective $g(E_a) = (\gamma / (\Delta + \gamma)) * E_a$

Les avantages de cette formule est qu'elle est basée sur une démarche physique, et étant donné le nombre important de données à introduire, le calcul sera plus précis, quand bien sur, toutes ces données sont disponibles .

1-2/ Données phénologiques :

2-a/ Différents types de culture :

On distingue essentiellement :

- Les cultures pérennes (arboriculture et agrumiculture),
- les cultures industrielles,
- les cultures maraichères.

2-b/ Profondeur d'enracinement :

La profondeur d'enracinement varie pour chaque type de culture. On a retenu les valeurs suivantes :

- 0.5 m pour les maraichages,
- 0.8 m pour les cultures industrielles,
- 1.2 m pour les cultures pérennes.

2-c/ Coefficient cultural :

Comme on l'a vu précédemment, le coefficient cultural apparait dans l'expression de l'évapotranspiration :

$$ETR = Kc * ETP .$$

Il varie selon le type de culture, son stade de développement, le type de climat, ...

Cette variation indique que :

- il est minimum au début du développement, il augmente avec la croissance du végétal et l'augmentation du couvert,
- il passe par un maximum au moment du stade adulte pendant la phase de reproduction (floraison et formation du grain),

- il décroît ensuite à l'approche de la maturation et de la récolte :

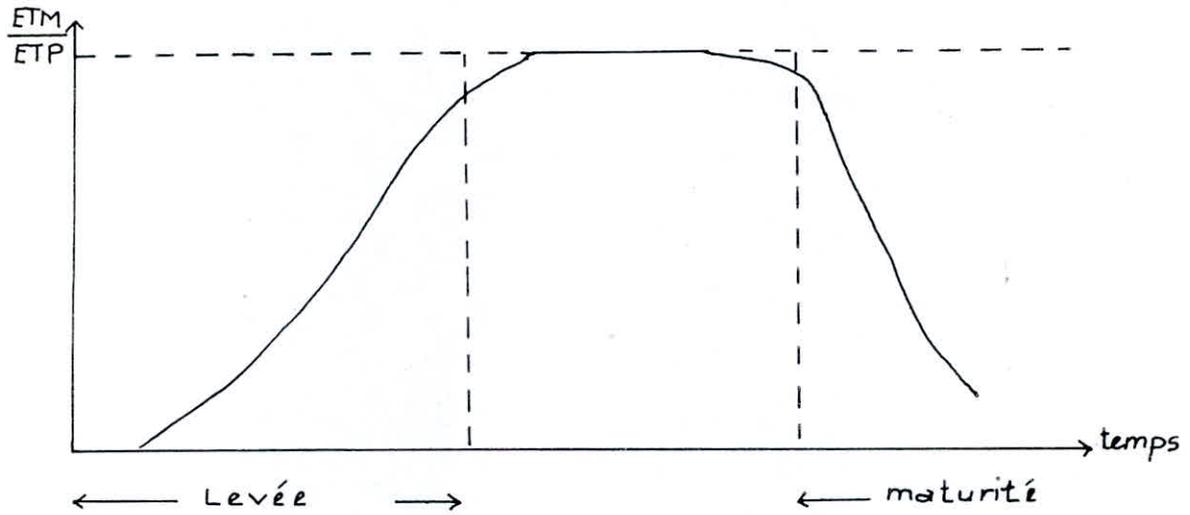


Fig.2- Variation du coefficient cultural

1-3/ Données édaphiques :

Ce sont des paramètres liés directement au sol et permettant ainsi de définir son rôle de réservoir.

3-a/ Réserve utile RU :

La RU est définie comme étant la différence entre les quantités d'eau stockées à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent, dans une tranche de sol d'épaisseur égale à la profondeur moyenne d'enracinement. Cette réserve utile évolue donc en fonction du stade de développement de la culture :

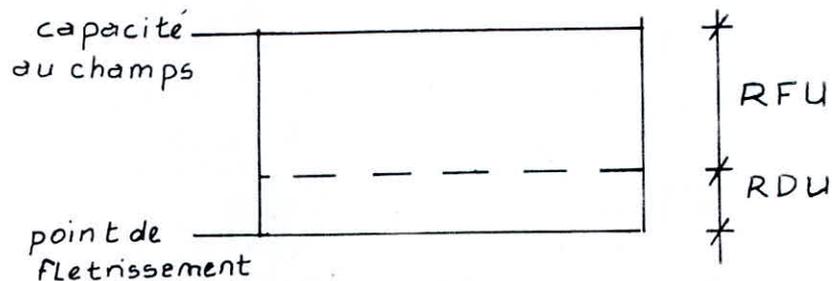


Fig.3- Réserve utile

Cette notion de RU ne suffit pas. En effet, plus on s'approche du point de flétrissement et plus la plante va avoir du mal à pomper l'eau. De ce fait, elle n'utilise pas toute la RU avec la même facilité. On introduit alors la notion de réserve facilement utilisable RFU, qui est la quantité d'eau facilement utilisable par la plante évapotranspirant au maximum. Alors même se trouve définie une réserve difficilement utilisable RDU, qui est le complémentaire de la RFU par rapport à la RU :

$$RU = RFU + RDU .$$

On considère que $RFU = C2 * RU$, avec C2 compris entre 0.5 et 1. La valeur de 2/3 est couramment employée.

La réserve hydrique RH, représente la quantité d'eau stockée dans le sol et disponible pour les plantes. Elle exprime la variation de la RU en fonction du temps.

3-b/ Drainage :

Il y a drainage, lorsque la quantité de pluie tombée est supérieure à la capacité de rétention du sol. Le drainage est défini comme étant une perte par percolation et donc évacuation de l'eau excédentaire par voie gravitaire. Il est nécessaire d'assurer un drainage, car l'excès d'eau crée un milieu asphyxiant pour la plante. De ce fait, l'humidité devient un facteur intéressant du point de vue de l'irrigation.

2/ PRESENTATION DES MODELES

2-1/ Modèle agroclimatologique de simulation du bilan hydrique BH des cultures : Modèle 1

Généralement, l'équation du bilan hydrique est établie directement à partir du bilan PLUIE-ETP, sans tenir compte des caractéristiques du sol, qui jouent un rôle intermédiaire entre ces deux paramètres.

Ce modèle est utilisé pratiquement, pour caractériser les risques de sécheresse ou d'excès d'eau, et pour déterminer la date optimale de semis d'une culture annuelle.

Les données d'entrée sont :

- les précipitations journalières,
- les valeurs moyennes journalières de l'ETP,
- les paramètres d'ajustement, concernant le sol et la culture considérée.

Les sorties sont :

- les variations de la réserve hydrique,
- le calcul du déficit hydrique,
- le calcul des valeurs du drainage.

Ce modèle tient compte du stade d'évolution de la plante. De façon à pouvoir annuler le ruissellement, le sol est considéré comme horizontal. De ce fait, l'eau qui est en excès, stagne et peut soit s'évaporer, soit s'infiltrer.

1-a/ Description du modèle :

a-1/ Evolution de la réserve utile RU :

Considérons le cycle de culture d'une plante. En d'autres termes, prenons comme point de départ la date de semis notée S, et comme point d'arrivée la date de récolte notée R.

Entre ces deux dates, la RU va croître d'une valeur minimale à une valeur maximale. La RU minimale est définie par un certain coefficient $0 < C1 < 1$, tel que :

$$RU_{\min} = C1 * RU_{\max}, \quad \text{ou bien}$$

$$RU_n = C1 * RU_x .$$

Dans le cas d'un sol nu, RU_n représente la quantité maximale d'eau stockable dans la tranche de sol contribuant à l'évaporation.

Et entre la date de récolte R et la date de semis suivante, la RU va rester à sa valeur minimale.

Ce phénomène est traduit mathématiquement par une variation linéaire de la RU entre les dates S et R en fonction du jour.

Soit DSR la durée de jour qui sépare S et R, et DSJ la durée qui sépare S et un jour j, la réserve utile du jour j sera :

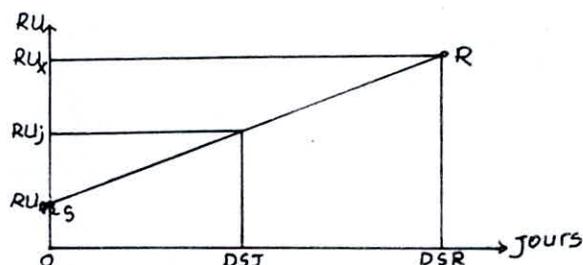


Fig.4- Evolution de la RU

L'équation est de la forme :

$$y = a * x + b .$$

$$\text{Soit } \tan \alpha = a = \frac{RUx - RU_n}{DSR} = \frac{(1 - C1) * RU_n}{DSR}$$

$$\text{et } b = C1 * RUx \quad x = DSJ \quad \text{et } y = RUJ$$

$$(1 - C1) * RUx$$

$$\text{D'où : } RUJ = \frac{(1 - C1) * RUx}{DSR} * DSJ + C1 * RUx$$

$$\text{et donc : } RUJ / RUx = Aj = C1 + (1 - C1) * \frac{DSJ}{DSR}$$

En résumé, sur toute l'année, on a :

$$RUJ = \begin{cases} C1 * RUx & \text{si } j \in]R, S[\\ Aj * RUx & \text{si } j \in]S, R[\end{cases}$$

Pour une culture pérenne, c'est à dire une culture dont la durée de cycle est supérieure à 12 mois, la réserve utile ne varie pas restant ainsi à son niveau maximum RUx .
Ce qui revient à mettre $C1 = 1$.

a-2/ Evolution de l'évapotranspiration maximale ETM :

De la date R à la date S, lorsqu'il n'y a pas de végétation, l'ETM équivaut à l'évaporation maximale du sol nu :

$$ETM = C0 * ETP$$

$C0$: coefficient réducteur $0 < C0 < 1$.

On définit une date C à partir de laquelle la culture recouvre à peu près le sol. De S à C, l'ETM va croître de $C0 * ETP$ à ETP , se maintenant à ce niveau de C à R.

La loi de variation de l'ETM entre S et C est linéaire en fonction du nombre de jours j, donc :

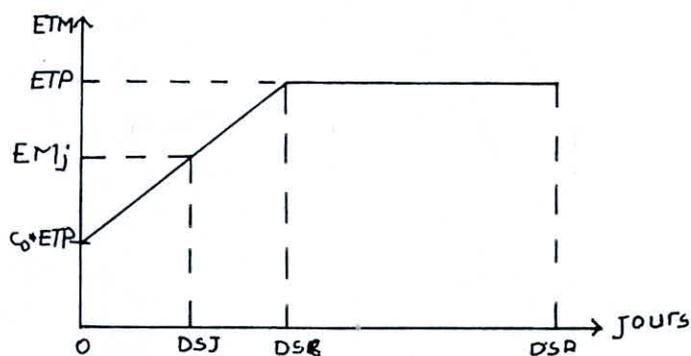


Fig.5- Evolution de l'ETM

L'équation s'écrit :

$$y = a * x + b .$$

où $b = C_0 * ETP$ et $a = \tan \alpha = \frac{ETP_j - C_0 * ETP_j}{DSC}$.

et $x = DSJ$; $y = ETM_j$.

$$D'où : ETM_j = \frac{(1 - C_0) * ETP_j}{DSC} * DSJ + C_0 * ETP_j .$$

et donc, $ETM_j / ETP_j = C_0 + (1 - C_0) * \frac{DSJ}{DSC}$.

En résumé, sur toute l'année, on aura :

$$ETM_j / ETP_j = \begin{cases} 1 & \text{si } j \in [JC, JR] \\ C_0 & \text{si } j \in [JR, JS] \\ B_j & \text{si } j \in [JS, JC] . \end{cases}$$

Dans le cas d'une culture pérenne, on a $ETM = ETP$ tout au long de l'année.

a-3/ Calcul de l'évapotranspiration réelle ETR :

L'ETR évolue par rapport à l'ETM en fonction de l'état de la réserve hydrique du sol.

Comme il l'a été dit précédemment, l'utilisation de l'eau par les plantes fait qu'il existe une réserve facilement utilisable RFU et une réserve difficilement utilisable RDU, de telle manière que : $RU = RFU + RDU$.

On définit $RFU = C2 * RU$.

$C2$: autre paramètre du modèle.

Tant que la plante puise l'eau de la RFU, l'évapotranspiration est maximale ETM. Si cette plante a des difficultés d'alimentation en eau (la RDU est atteinte dans ce cas), il y a fermeture stomatique, d'où une diminution de l'ETM qui devient à ce moment-là égale à ETR.

Le rapport ETR / ETM croit linéairement de 0 à 1 en fonction de la RH du sol. Soit RH_{j-1} représentant l'état de la réserve hydrique à la fin du jour $j-1$ et donc au début du jour j , on aura :

$$ETR_j / ETM_j = \begin{cases} 1 & \text{si } RH_{j-1} > RDU_j \\ RH_{j-1} / RDU_j & \text{si } RH_{j-1} < RDU_j . \end{cases}$$

Lorsqu'il y a réduction de l'évapotranspiration, on parle alors de déficit hydrique :

$$DH_j = ETM_j - ETR_j .$$

a-4/ Calcul de la pluie efficace (nette) PE :

Les pluies trop faibles ne participent pas à l'alimentation de la RH. On définit alors une pluie seuil P_n (2 mm/j) à partir de laquelle la pluie participe à cette alimentation :

P : pluie enregistrée et PE : pluie efficace.

$$PE_j = \begin{cases} P_j & \text{si } P_j > P_n . \\ 0 & \text{si } P_j < P_n . \end{cases}$$

a-5 Calcul du drainage DR :

Il y a drainage, c'est à dire perte d'eau par percolation souterraine et par ruissellement s'il existe, lorsque la quantité de pluie tombée le jour j est supérieure à la capacité de rétention du sol.

La capacité de rétention étant la différence entre la RU du jour j et la RH du jour j-1 :

$$CR_j = RU_j - RH_{j-1}.$$

Si $CR_j < 0$, on approxime $CR_j = 0$.

La quantité perdue par drainage s'écrira:

$$DR_j = \begin{cases} P_j - CR_j & \text{si } P_j > CR_j \\ 0 & \text{si } P_j < CR_j . \end{cases}$$

a-6/ Equation du bilan hydrique :

Elle est établie sur une base journalière :

$$RH_j = RH_{j-1} + PE_j - ETR_j - D_j .$$

Pour initialiser le processus :

Si saison sèche, on prend : $RH_0 = 0$.

Si saison humide, on prend : $RH_0 = RU$.

Si entre les deux, on prend: $RH_0 = RU / 2$.

1-b/ Programmation du modèle :

La liste d'entrée fait apparaître :

- des données climatiques: P (pluie), ETP (évapotranspiration potentielle). Elles sont journalières.
- des caractéristiques culturales: JS (date de semis), JC (date à partir de laquelle la culture couvre à peu près complètement le sol), et JR (la date de récolte).
- des caractéristiques édaphiques: RUX (réserve utile correspondant au maximum d'enracinement), C1 (coefficient définissant la réserve utile minimale), et C2 (coefficient définissant la RFU).

Le programme commence par calculer l'ETM et la RU journalières, fonctions de la culture considérée. Ensuite, vient le calcul du bilan hydrique. Le processus récurrent est initialisé le 1er janvier de la 1ère année d'enregistrement de la pluviosité P. Des fichiers de sortie ont été prévus, comportant les résultats de calcul des réserves hydriques RH, ceux des déficits hydriques DH et ceux des pertes par drainage DR, tous évidemment journaliers.

2-2/ Etude agrométéorologique du bilan hydrique:

Le but est de calculer le bilan hydrique journalier, en tenant compte de la pluie, de l'évapotranspiration et de la réserve hydrique du sol.

Il calcule ainsi, la quantité d'eau emmagasinée dans le sol et disponible pour les plantes.

Les paramètres d'entrée sont :

- les pluies journalières,
- des paramètres,
- les évapotranspirations potentielles.

Les paramètres de sortie sont les résultats journaliers concernant le calcul du bilan hydrique exprimés par la réserve hydrique RH.

2-a/ Description du modèle :

a-1/ Evolution de la RU :

La RU varie selon le type de couvert végétal. Dans ce modèle, 3 valeurs ont été retenues, d'après les résultats d'un travail fait par des étudiants, dans le cadre du projet de fin d'études (voir référence bibliographique) :

105,5 mm pour des cultures pérennes.

70.5 mm pour des cultures industrielles.

30 mm pour les cultures maraichères.

Il a été considéré que $RFU = 2/3 * RU$.

a-2/ Calcul de la PE :

Tout d'abord une pluie seuil P_n a été définie comme étant $P_n = 2 \text{ mm/j}$, et pour laquelle si une pluie $P < P_n$ qui tombe sur le sol, elle est évaporée immédiatement, d'où :

$PE_j = P_j$ si $P_j > P_n$ ou $P_j < P_n$ et $RH_{j-1} > RDU$.

$PE_j = 0$ si $P_j < P_n$ et $RH_{j-1} < RDU$.

RH_{j-1} : quantité d'eau stockée avant le jour considéré, et j un indice représentant le numéro du jour.

a-3/ Calcul de l'ETM :

Elle est définie par $ETM = Kc * ETP$.

Remarque: pour une culture pérenne, le bilan hydrique est effectué en continu, sans interruption, d'où $ETM = ETP$.

a-4/ Détermination de l'ETR :

Elle varie en fonction de la RH du sol, de telle manière qu'elle croît de 0 à ETM quand la réserve hydrique passe de 0 à RDU, et se maintient à la valeur d'ETM quand la RH fluctue entre RDU et RU. D'où :

$$ETRj = ETMj \quad \text{si } RH_{j-1} > RDU.$$

$$ETRj = ETMj * RH_{j-1} / RDU \quad \text{si } RH_{j-1} < RDU .$$

a-5/ Equation du bilan hydrique :

L'équation s'écrit :

$$RHj = RH_{j-1} + PEj - ETRj .$$

C'est une relation récurrente, avec les conditions :

$$\text{Si } RHj = 0 \quad \text{alors } RHj = 0$$

$$\text{Si } RHj > 0 \quad \text{alors } RHj = RU.$$

A l'initialisation du processus :

$$RH0 = 0 \quad \text{en saison sèche,}$$

$$RH0 = RU \quad \text{en saison humide,}$$

$$RH0 = RU/2 \quad \text{entre les deux.}$$

a-6/ Déficit hydrique :

$$DHj = ETM(j) - ETR(j) \quad \text{si } ETMj > ETRj .$$

$$DHj = 0 \quad \text{si } ETMj = ETRj .$$

2-b/ Programmation du modèle :

La liste d'entrée fait apparaître :

- les données de la pluie et de l'ETP journalières,
- les différentes valeurs du coefficient cultural K_c , pour chaque type de culture.
- les valeurs de RU pour chaque type de culture également.

Des fichiers de sortie ont été prévus, comportant les résultats de calcul des réserves hydriques RH et ceux des déficits hydriques DH.

3/ INTERPRETATION DES RESULTATS

3-1/ Critique des données :

Les programmes ont été écrits en FORTRAN 77 et l'ordinateur utilisé est le M24 (OLIVETTI).

Les fichiers employés sont ceux de la pluie, de la vitesse du vent, de la température moyenne, de l'humidité relative et de l'insolation, qui ont été fournis par l'Office National de la Météorologie, concernant la station de DAR-EL-BEIDA (ALGER), sur une durée de 29 ans.

L'ETP a été calculée par la formule de PENMAN, en faisant intervenir les paramètres cités précédemment (T° , ins, hr, vent). Cette formule a été développée sous forme d'un logiciel de calcul, par Mr BENZIADA (post-graduant en 2e année).

Ce dernier, s'est également chargé de faire une critique de données, avant leur utilisation, en procédant de la manière suivante:

- En faisant sortir sur un graphique chacun des fichiers, pour voir s'il n'y avait pas d'abérations ou d'anomalies quelconques avec le phénomène physique (discontinuité des données, brusques variations par pics importants, erreurs de transcriptions, ...).

- Puis en comblant les données manquantes, par une simulation des valeurs.

- Après cela, en faisant introduire les données pour le calcul de l'ETP, il s'est avéré qu'il y avait un problème. La série chronologique concernant cette anomalie a été donc partagée en 2 échantillons, pour étudier leur homogénéité par des tests statistiques:

Le test de Fisher, qui est une condition nécessaire mais pas suffisante, complétée alors par le test de Student.

En conclusion, les échantillons appartenait tous à la même population.

L'analyse des graphiques journaliers, montre que la pluie varie d'une façon aléatoire avec certains pics en période pluvieuse, jusqu'à des valeurs nulles correspondant à des périodes de sécheresse en été (Annexe 1).

L'évolution journalière de l'ETP montre un phénomène cyclique assez régulier (Annexe 2). Cyclique, car le coefficient d'autocorrélation calculé lors de la critique des données, après introduction de celles-ci dans le logiciel de calcul, est très élevé.

3-2/ Résultats :

2-1 Etude statistique des séries :

Les résultats essentiellement retenus sont ceux concernant le déficit hydrique pour chaque type de culture.

D'après les graphiques obtenus (Annexe 3), il a été remarqué une évolution annuelle identique entre les 2 modèles pour chaque culture considérée. Seulement, une différence entre les valeurs assez importante a été décelée et dont il faut définir les causes, en faisant une comparaison entre les deux modèles.

Cependant, la remarque à faire, est que l'année la plus sèche 1961, et la plus humide 1972, sont identiques pour toutes les cultures.

Les moyennes des valeurs de déficit hydrique sont les suivantes :

	cult.pérenne	cult.indust.	cult.maraichère
modèle 1	857 mm	834 mm	776 mm
modèle 2	502 mm	573 mm	383 mm
différence	355 mm	261 mm	393 mm

Les variances sont :

	cult.pérenne	cult.indust.	cult.maraichère
modèle 1	13058 mm	7517 mm	4164 mm
modèle 2	7156 mm	4907 mm	2247 mm

1-a/ Détermination de l'intervalle de confiance sur la moyenne :

Pour cela, on effectue le test de STUDENT :

En fixant l'erreur à $\alpha = 5\%$, l'intervalle est déterminé par la formule :

$$\bar{X} \pm t_{1-\frac{\alpha}{2}} * \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$$

où : t est une variable déterminée dans le tableau de Student, pour une erreur α , et un degré de liberté D :

$$D = N - 1 \quad \text{avec} \quad N = 29 \text{ (taille de l'échantillon).}$$

Donc pour $t = 2.05$, DMOY sera :

	cult.pérenne	cult.indust.	cult.maraichère
modèle 1	43.5 mm	33.0 mm	24.6 mm
modèle 2	32.2 mm	26.7 mm	18.0 mm

1-b/ Détermination de l'intervalle de confiance sur la variance :

Pour cela, on effectue le test du KHI-DEUX :

$$\bar{X} \pm t_{1-\frac{\alpha}{2}} * \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$$

L'erreur est fixée à $\alpha = 5\%$, l'intervalle est déterminé par la formule :

Pour la borne inférieure :

$$\sqrt{SCE} / \chi_{\alpha/2}^2$$

Pour la borne supérieure :

$$\sqrt{SCE} / \chi_{1-\alpha/2}^2$$

Où : SCE est la somme des carrés des écarts-type : $\sum X^2 - \frac{1}{N} (\sum X)^2$

	MODELE 1		MODELE 2	
	DVARmin	DVARmax	DVARmin	DVARmax
culture				
pérenne	13.8 mm	40.2 mm	10.3 mm	29.7 mm
indust.	10.5 mm	30.5 mm	8.5 mm	24.6 mm
maraich.	7.8 mm	22.7 mm	5.7 mm	16.7 mm

1-c/ Analyse des séries :

Vue la grande différence entre les résultats des deux modèles, un test sur la différence des moyennes des deux séries, permet de vérifier si elles appartiennent pour chaque culture à la même population.

On commence tout d'abord, par vérifier la variance des séries, en appliquant le test de FISHER :

Fcal est calculé par la formule :

$$F_{cal} = S1 ** 2 / S2 ** 2 .$$

Fobs est tiré du tableau par D1 et D2 pour $\alpha = 5\%$:

$$D1 = N1 - 1 \quad , \quad D2 = N2 - 1 .$$

Où : D1, D2 sont les degrés de liberté ,
N1, N2 sont les tailles des séries.

Donc Fobs = 1.86.

	cult.pérenne	cult.indust.	cult.maraichère
Fcal	1.82	1.53	1.85

On voit que :

$$F_{cal} < F_{obs} .$$

Pour chaque culture, les variances des modèles sont identiques.

On effectue à présent, le test de STUDENT :

tcal est calculé par la formule : (pour $\mu_1 - \mu_2 = 0$)

$$t_{cal} = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\bar{x}_1, \bar{x}_2}} , \text{ où :}$$

$$\sqrt{\bar{x}_1, \bar{x}_2} = \sqrt{\frac{(N_1-1) \bar{v}_1^2 + (N_2-1) \bar{v}_2^2}{N_1+N_2-2} \left(\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2} \right)}$$

tobs est donné par le tableau pour $\alpha = 5\%$ et un degré de liberté, $D = N1 + N2 - 2$:

$$t_{obs} = 1.673 .$$

	cult.pérenne	cult.indust.	cult.maraichère
tcal	13.5	12.8	26.4

On voit que :

$$t_{obs} < t_{cal}$$

On en conclut que les séries n'appartiennent pas à la même population.

3-3/ Comparaison des deux modèles :

La RU dans le premier modèle, varie linéairement suivant le jour, et en fonction du stade de développement des racines de la culture.

Dans le deuxième modèle, celle-ci est prise au maximum d'enracinement dès le départ.

L'ETM dans le premier modèle, varie linéairement de la date S à la date C, et reste constante jusqu'au jour de récolte. Tandis que dans le deuxième, elle évolue suivant le coefficient cultural K_c (fig.2) d'une valeur minimale, passant par un maximum, puis redevenant minimale.

Une autre différence importante est à noter, dans le fait que, dans le premier modèle, le drainage (ruisselement, drainage effectif) est comptabilisé dans l'équation du bilan hydrique, la rendant ainsi plus complète.

Alors que dans le deuxième modèle, aussitôt que la réserve hydrique atteint la capacité maximale de rétention du sol, elle est mise alors égale au maximum à la valeur de RU, négligeant de ce fait, l'excédent d'eau.

Tout ceci influence le calcul du déficit hydrique, en plus de l'ETR dont le calcul découle en partie de la détermination de la réserve hydrique du jour précédent.

Cette réserve où intervient la valeur du drainage, dans le premier cas, alors que dans l'autre non.

4- CONCLUSION :

D'après les résultats obtenus et les tests effectués, on en conclut que les modèles sont différents. Pour pouvoir désigner le modèle qui suit la réalité physique, il est nécessaire d'effectuer des mesures in-situ, pouvant ainsi être une référence pour un choix.

PARTIE-II- BILAN HYDROLOGIQUE

1/ GENERALITES :

Le bilan hydrologique est établi après évaluation du cycle d'eau .

D'une façon générale, le cycle d'eau est défini comme un processus continu, par lequel l'eau est transportée des océans vers l'atmosphère, ensuite vers la terre, et finalement retourne vers les océans, formant ainsi un cycle fermé.

La transformation pluie-débit étant un phénomène complexe, implique l'intervention d'un grand nombre de facteurs hydrométéorologiques et édaphiques.

Les points de départ de cette évaluation sont alors la répartition des précipitations et l'intensité de l'évaporation.

La quantité d'eau tombée subit une première réduction due à l'interception par la végétation (feuilles, branches, litière du sol,...). Une partie alors retombe à des niveaux inférieurs, tandis que le reste s'évapore.

La pluie arrivant au sol, se répartit de la manière suivante :

- Une fraction va s'écouler pour constituer le ruissellement
- une autre va stagner et s'évaporer
- le reste va pénétrer dans le sol et s'infiltrer.

La proportion qui s'infiltrera sera préservée dans le sol. Arrivée à un certain niveau de stockage (toutes premières couches du sol), il se produit un écoulement dit hypodermique, de direction sensiblement parallèle à la pente du terrain.

A travers les diverses autres couches perméables, est observé le phénomène de drainage. L'eau drainée s'écoulera en profondeur constituant ainsi l'écoulement de base.

La modélisation consistera, d'une façon générale, à simuler les débits d'une rivière à partir de la connaissance de la pluie journalière reçue par le bassin versant.

Dans ce qui suit, les modèles étudiés sont dits à réservoirs déterministes et à pas de temps journalier.

Les données d'entrée sont les précipitations et les évapotranspirations moyennes journalières, et les débits observés journaliers. Dans les modèles, il y a également des paramètres qui sont à optimiser par une méthode de calage sur une période donnée, pour permettre une bonne mise en route. Ces paramètres difficiles donc à obtenir, sont les caractéristiques du sol du bassin versant représentatif.

Les précipitations, comme dans le cas du bilan hydrique, constituent également un paramètre important. Mais il est nécessaire de faire remarquer que dans ce cas, les pluies nettes sont celles qui contribuent au ruissellement.

2/ PRESENTATION DES MODELES

2-1/ Modèle GR1 :

Les premiers modèles apparus dans ce domaine étaient complexes à cause d'une difficulté de mise en oeuvre et de la longueur de réglage. C'est pourquoi dans cette étude, le modèle recherché doit être aussi simple que possible : partir d'un modèle élémentaire, à un réservoir et un paramètre voir les résultats (concernant les débits), le compliquer par la suite si nécessaire.

1-a/ Conception du modèle :

Le modèle a été conçu à deux (2) réservoirs :

- Un réservoir "S" assurant le bilan hydrologique,
- un réservoir "R" assurant le routage des débits.

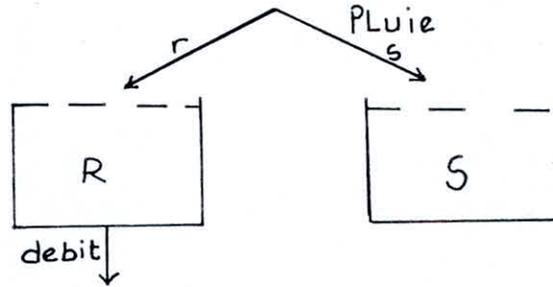


Fig.6- Conception du GR1

a-1/ Fonctionnement du réservoir superficiel S :

Ce réservoir reçoit une fraction de la pluie "s", et est soumis à l'évapotranspiration. Ces deux fonctions dépendent de son niveau.

La pluie "P" sert à faire face à l'évapotranspiration "EP". A la suite de cette opération, la pluie restante est notée "P1" :

Si $EP < P$ d'où $P1 = P - EP$ et $EP1 = 0$.

Par contre, si la pluie "P" n'arrive pas à faire face à "EP", l'évapotranspiration restante est notée "EP1" et la pluie restante est nulle :

Si $EP > P$ d'où $EP1 = P - EP$ et $P1 = 0$.

Dans ce cas-là, on calcule l'évapotranspiration réelle, qui varie linéairement en fonction du réservoir "S" :

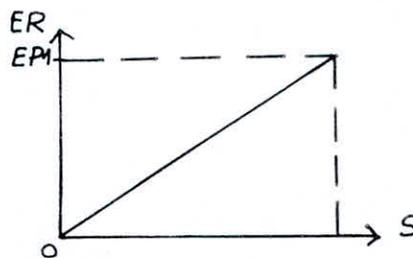


Fig.7- Evolution de ER

L'équation est de la forme :

$$y = a * x + b. \quad \text{EP1}$$

$$y = ER ; b = 0 ; x = S \quad \tan \alpha = \frac{\text{EP1}}{A}$$

$$\text{D'où : } ER = EP1 * S / A.$$

Ou bien :

$$\text{Si } S = 0 \text{ alors } ER = 0.$$

$$\text{Si } S = A \text{ alors } ER = EP1.$$

(A : niveau maximum de ce réservoir).

Il en sort donc la relation suivante :

$$ER = EP1 * S / A .$$

Ce réservoir sert à fixer la proportion de pluie "r" admise à s'écouler. Pour expliciter "r" (donc $s = 1 - r$), la relation utilisée est celle proposée par le Soil Conservation Service (USDA) :

Le ruissellement consécutif à la pluie "P1" est :

$$(P1 - u) ** 2 / (P1 + v) .$$

u et v sont deux paramètres tels que, $v \gg u$, d'où pour simplifier, on a $u = 0$. Et il est rationnel de poser, $v = a - S$, il vient alors que :

$$r = P1 ** 2 / (P1 + A - S),$$

$$\text{et } s = P1 * (A - S) / (P1 + A - S).$$

a-2/ Fonctionnement du réservoir de routage R :

Il sert au transit de la fraction r de la pluie P1. Alors le débit Q fourni par le réservoir R est fonction d'une puissance du niveau de ce réservoir.

Dans le cas présent, pour pouvoir comparer les débits journaliers observés et calculés, le décalage est de un (1) jour :

$$Q_{j+1} = R ** 2 / (R + B).$$

B : niveau maximum du réservoir R

R : niveau du réservoir.

L'équation de continuité de vidange du réservoir s'écrit :

$$R_{j+1} = R_j - Q_{j+1} .$$

Le modèle étant à un seul paramètre, doù :

$$A = B$$

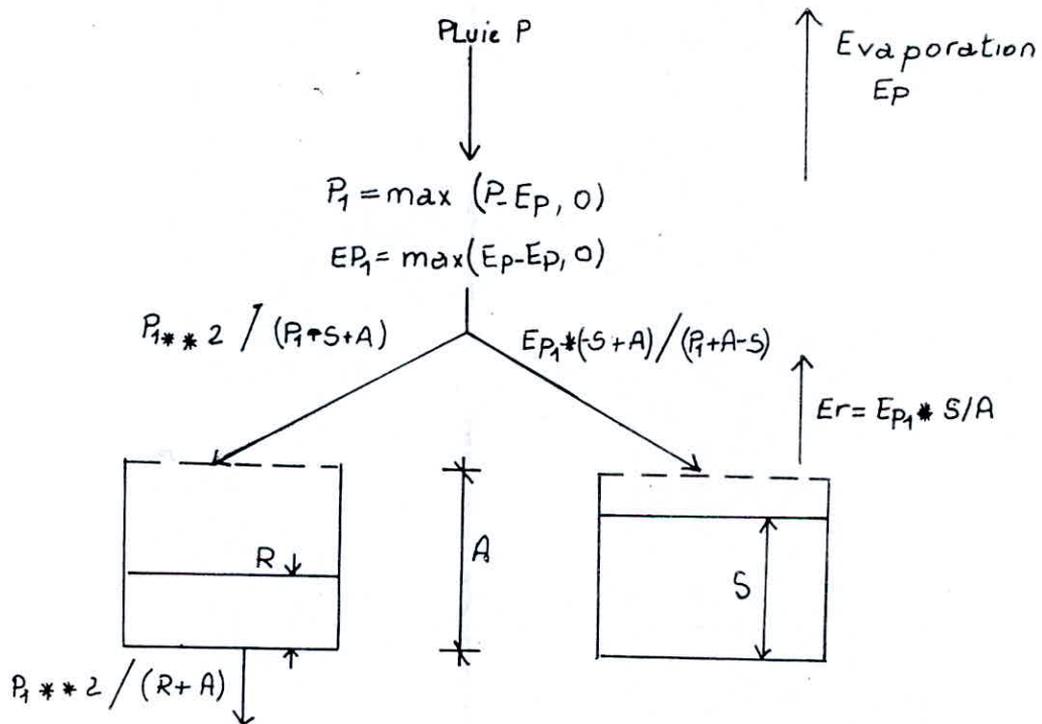
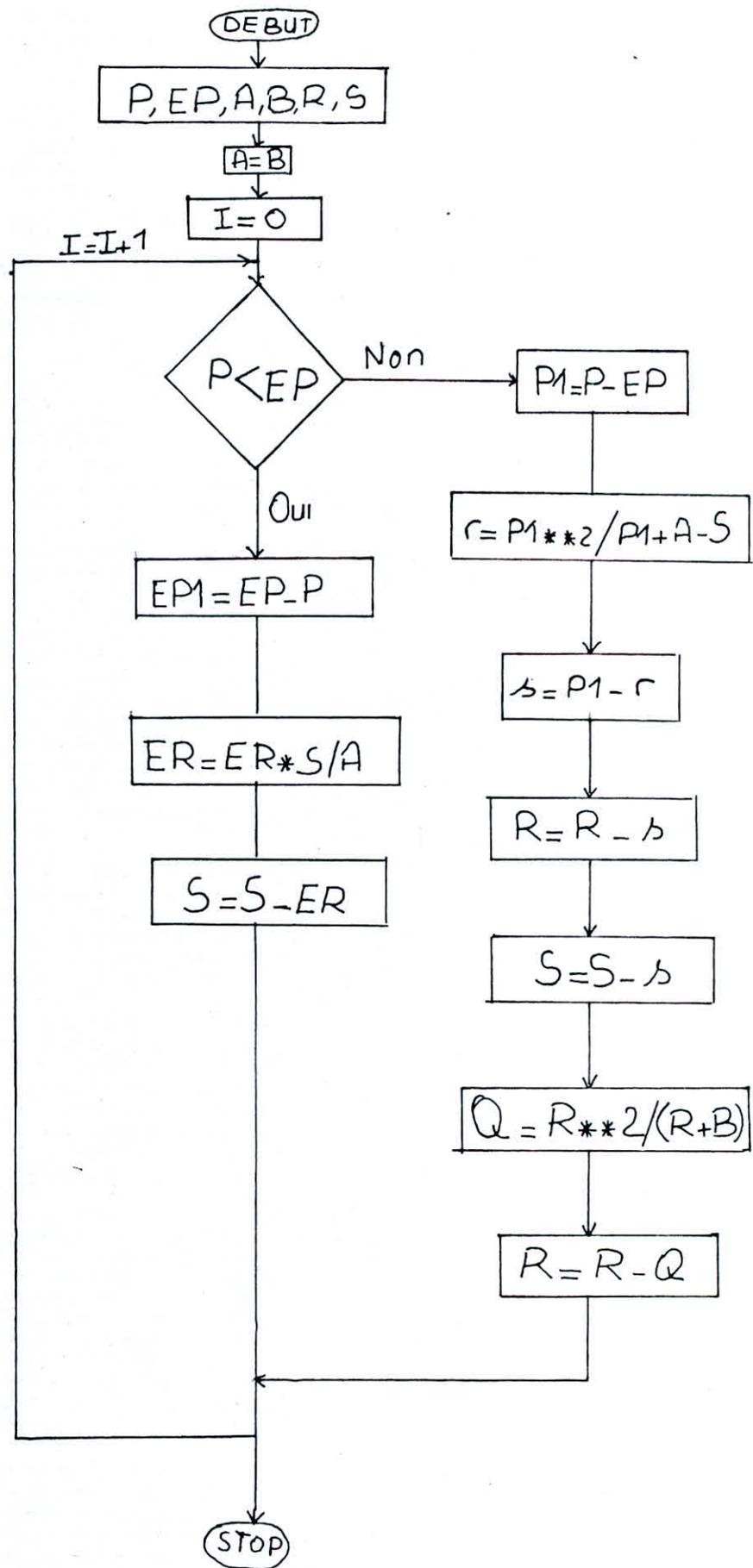


Fig.8- Schéma général du modèle

1-b/ Programmation du modèle :

Le modèle a été programmé en FORTRAN 77, sur M290.

Un fichier résultat a été prévu pour les valeurs de débits calculés par ce modèle.



Bilan hydrologique: organigramme du
modele 1

2-2/ Modèle GR2 :

Ce modèle est une version améliorée du GR1. Il est toujours à 2 réservoirs, mais les niveaux maximums sont différents, donc à deux (2) paramètres :

$$A \neq B.$$

La marche à suivre est la même que celle du GR1, à quelques différences dans :

- Le calcul de l'ER :

$$ER = EP * \text{SQRT}(S / A) .$$

- La fraction qui ruisselle devient :

$$r = P1 * (S / A) ** 2,$$

celle qui pénètre dans le réservoir S est :

$$s = P1 - r = P1 * (1 - (S / A) ** 2) .$$

Le réservoir quadratique recueille la pluie nette et relache un débit Q :

$$Q = R ** 2 / (R + B) .$$

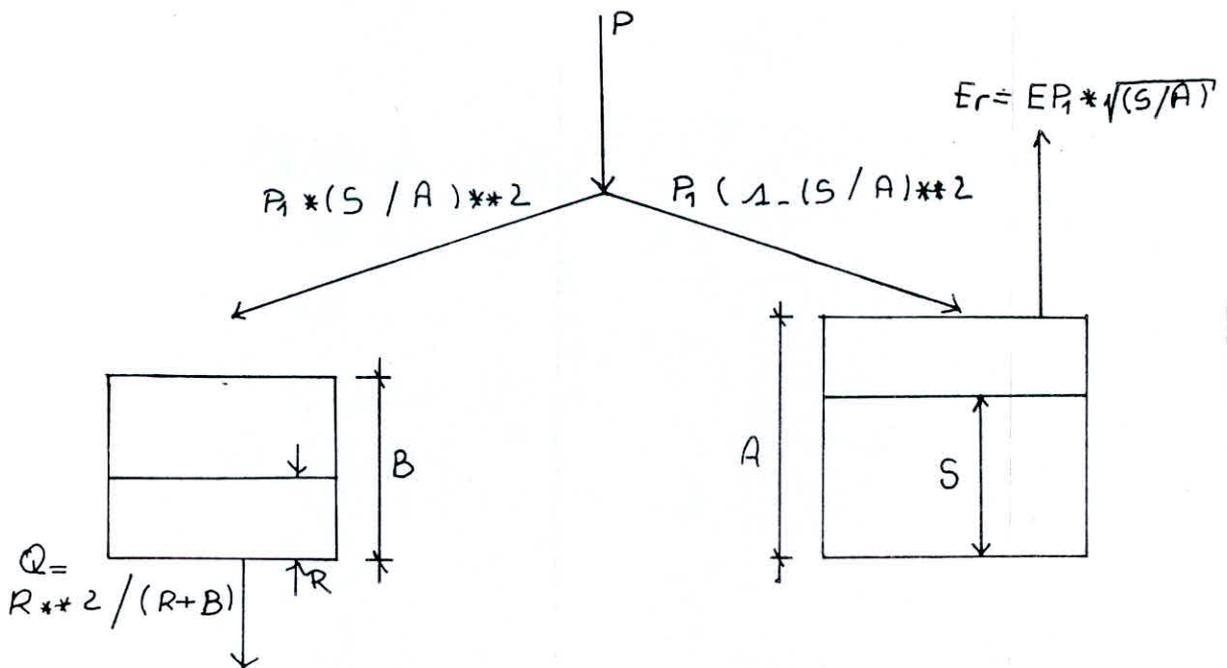
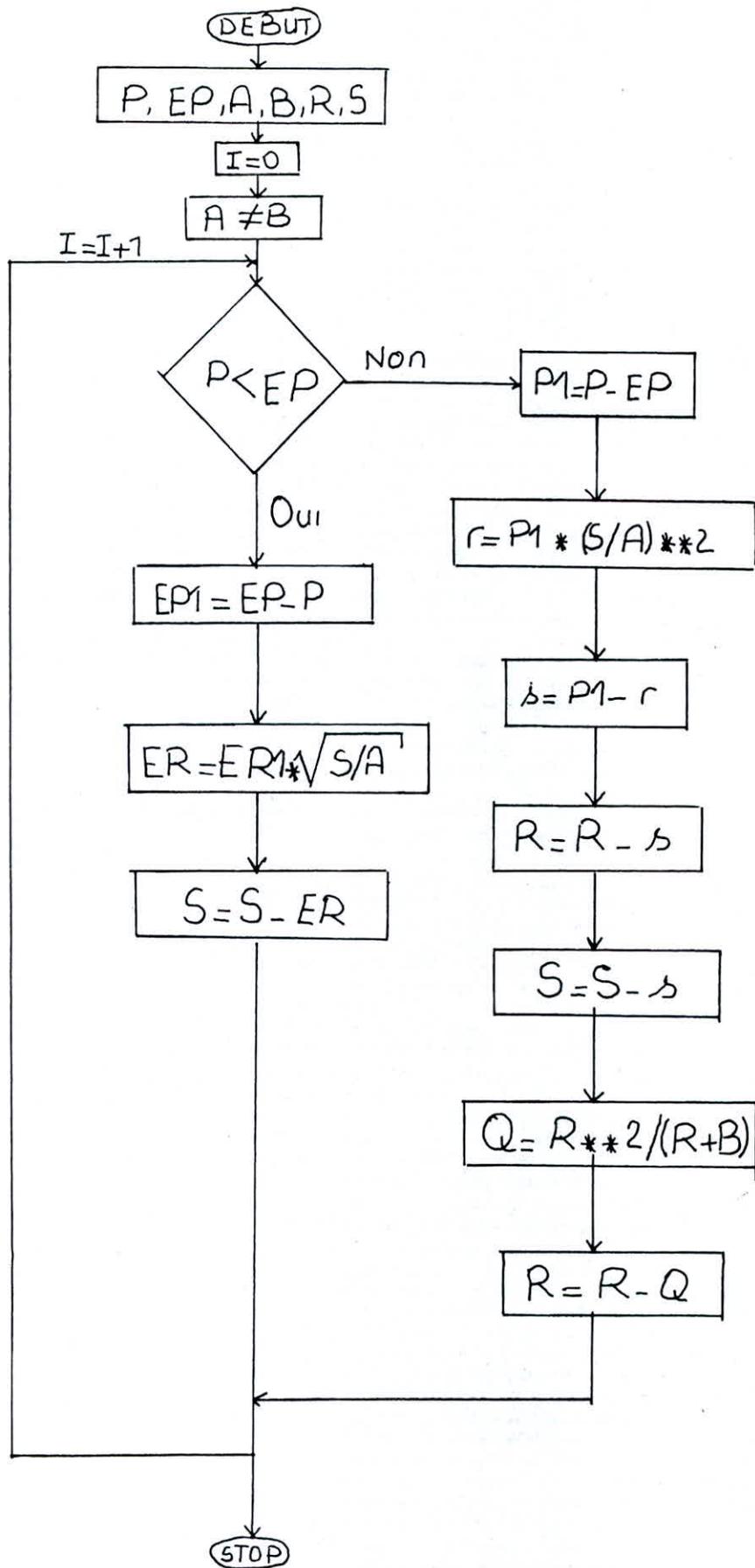


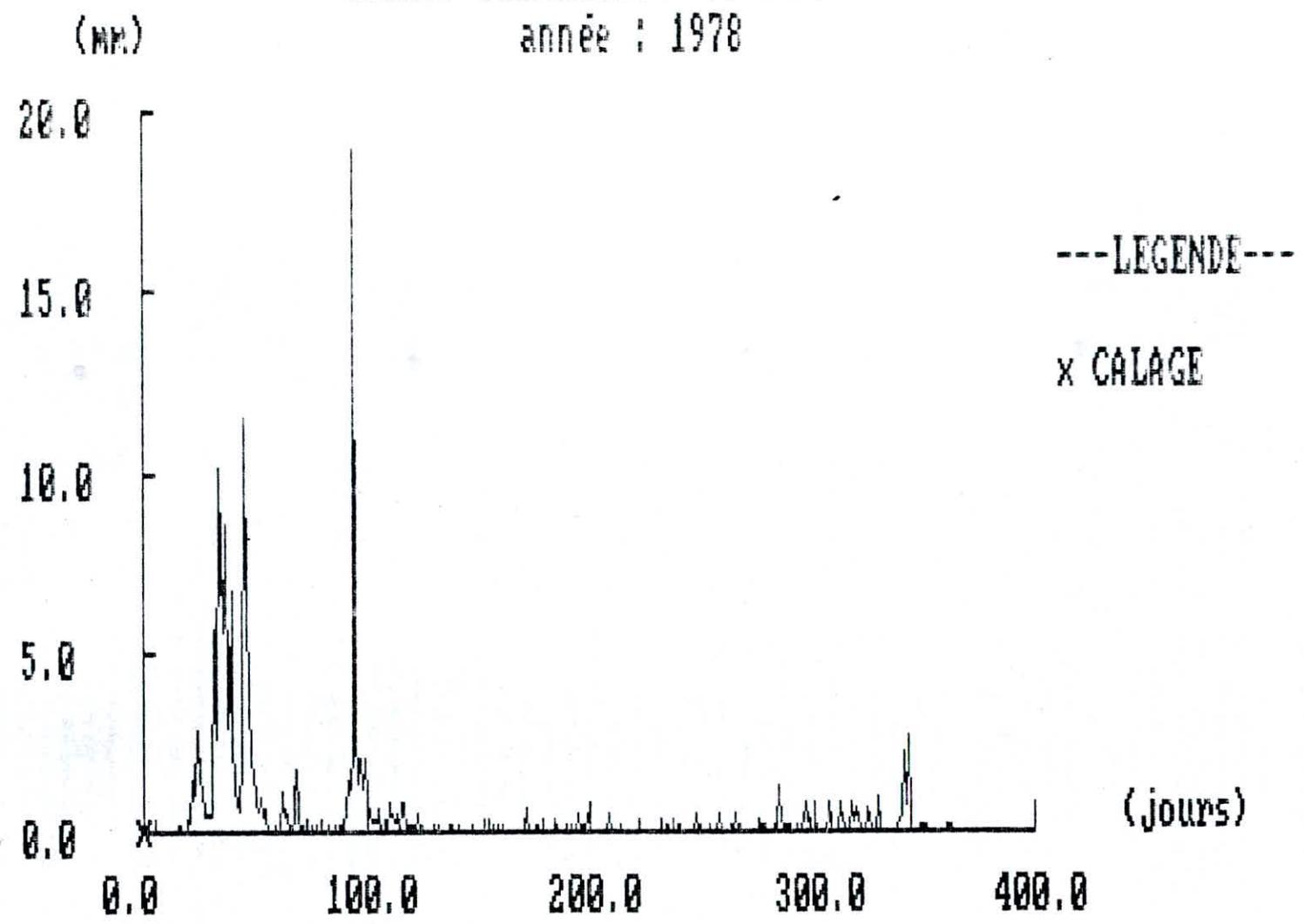
Fig. 9 - Schéma général du modèle



Bilan hydrologique : organigramme du
modele 2

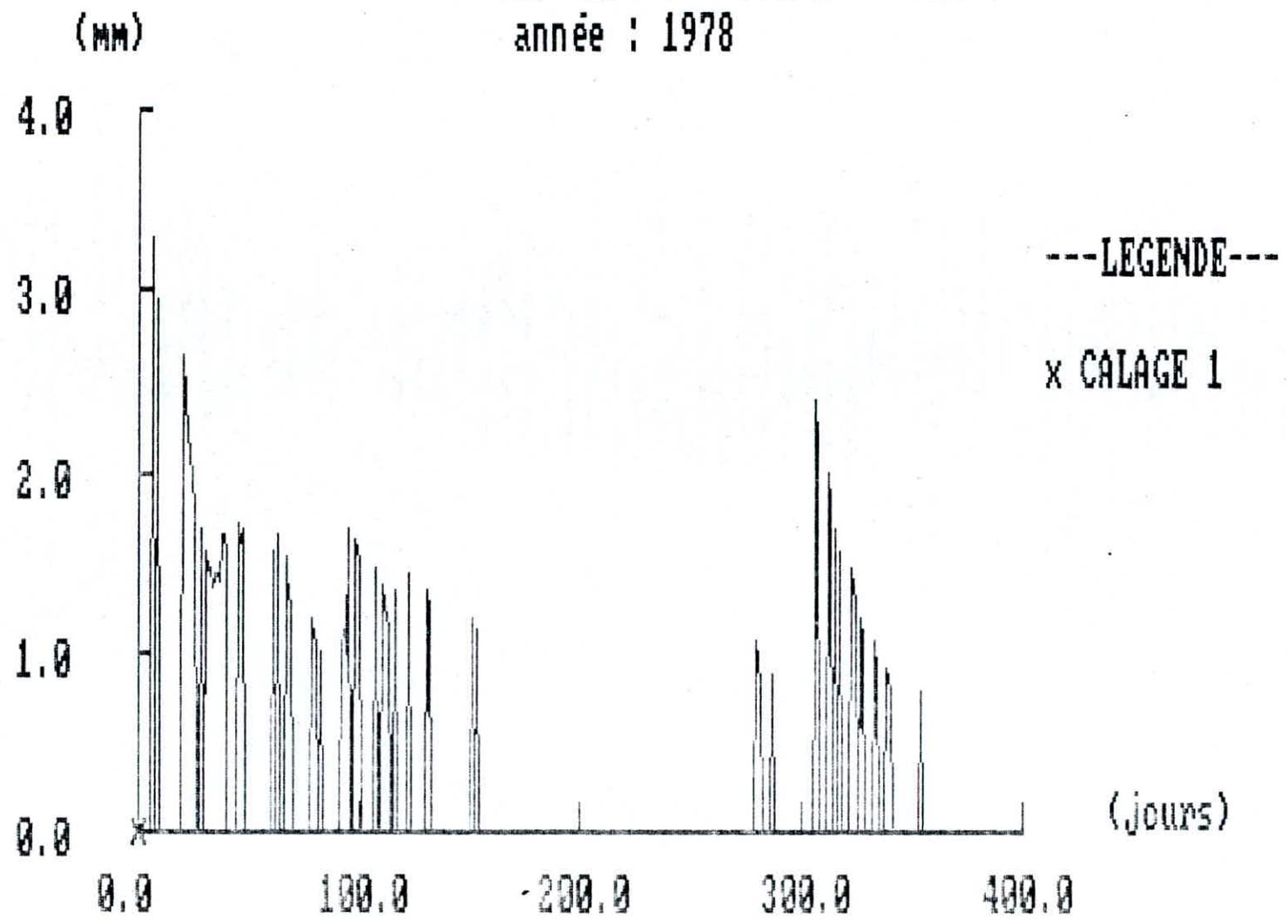
DEBITS JOURNALIERS OBSERVES (ANNABA)

année : 1978

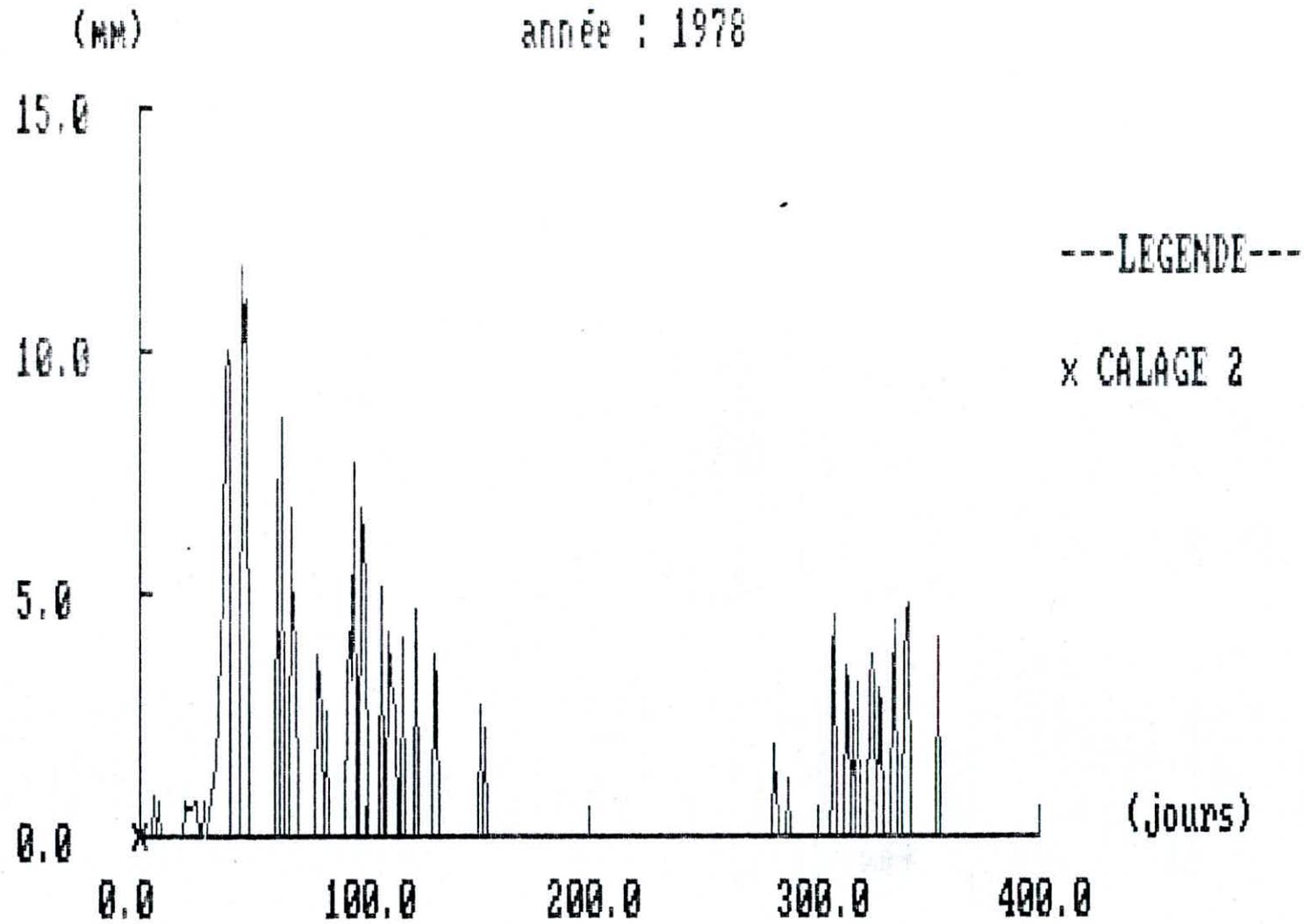


DEBITS JOURNALIERS CALCULES (ANNABA)

année : 1978

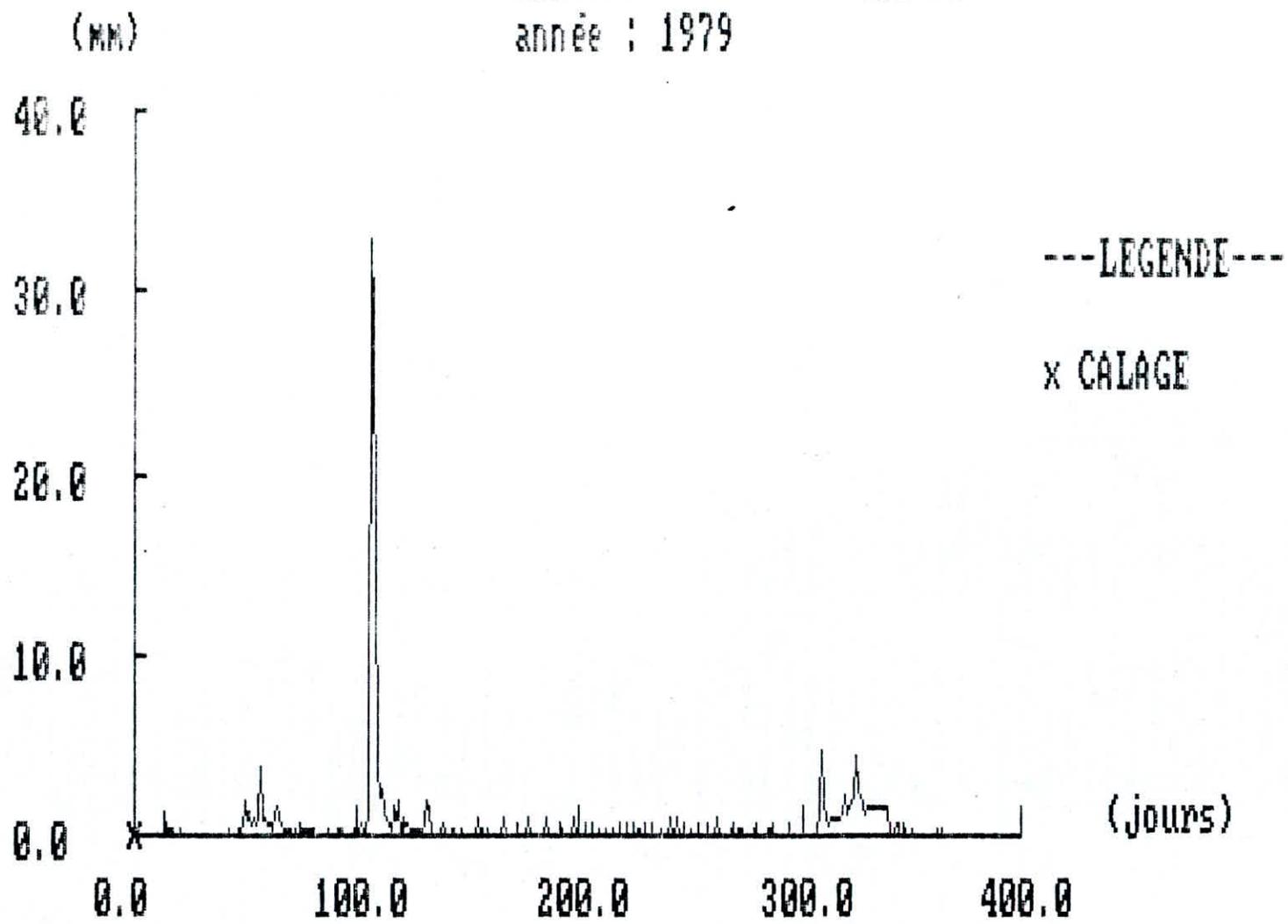


DEBITS JOURNALIERS CALCULES (ANNABA)
année : 1978

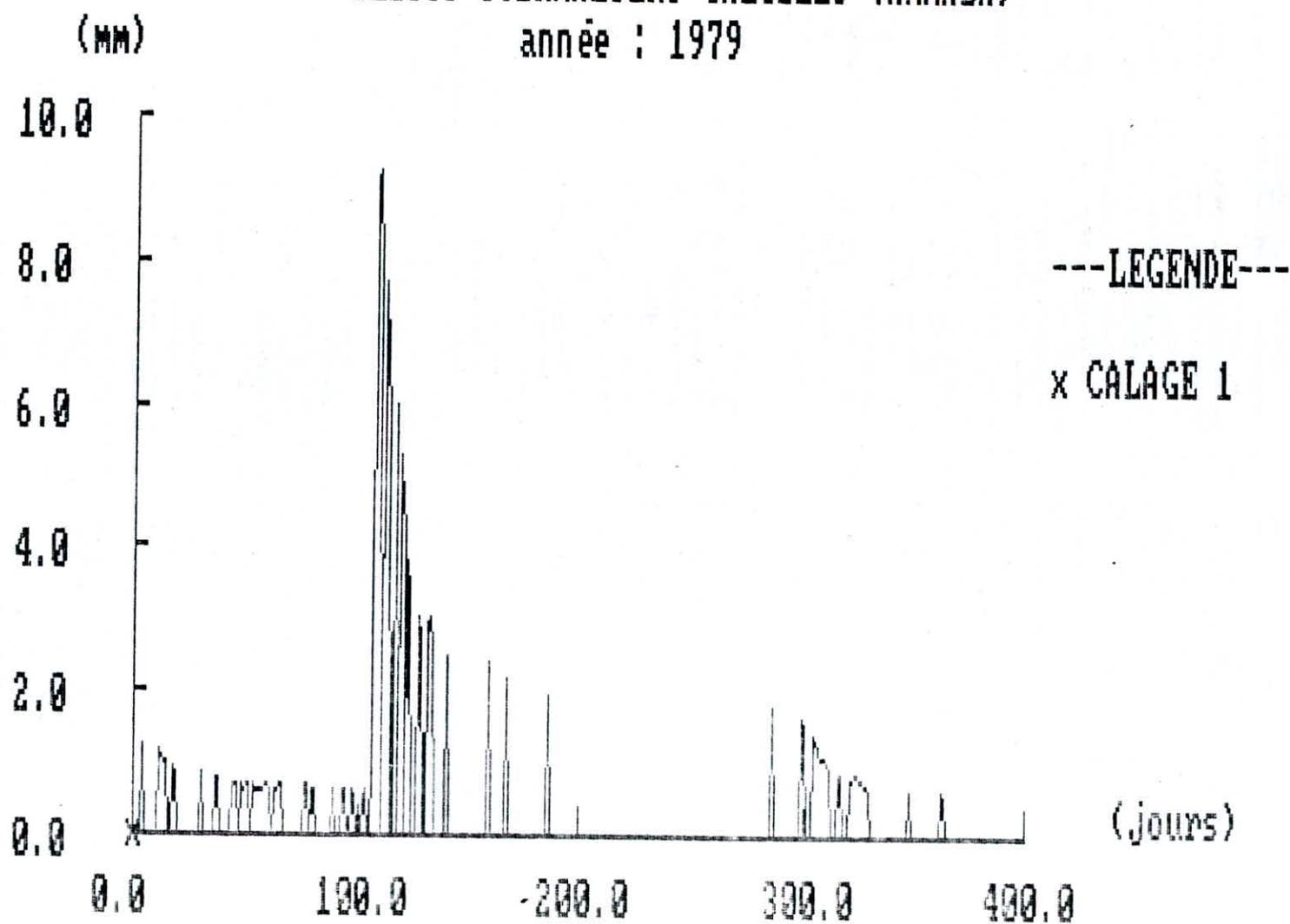


DEBITS JOURNALIERS OBSERVES (ANNABA)

année : 1979

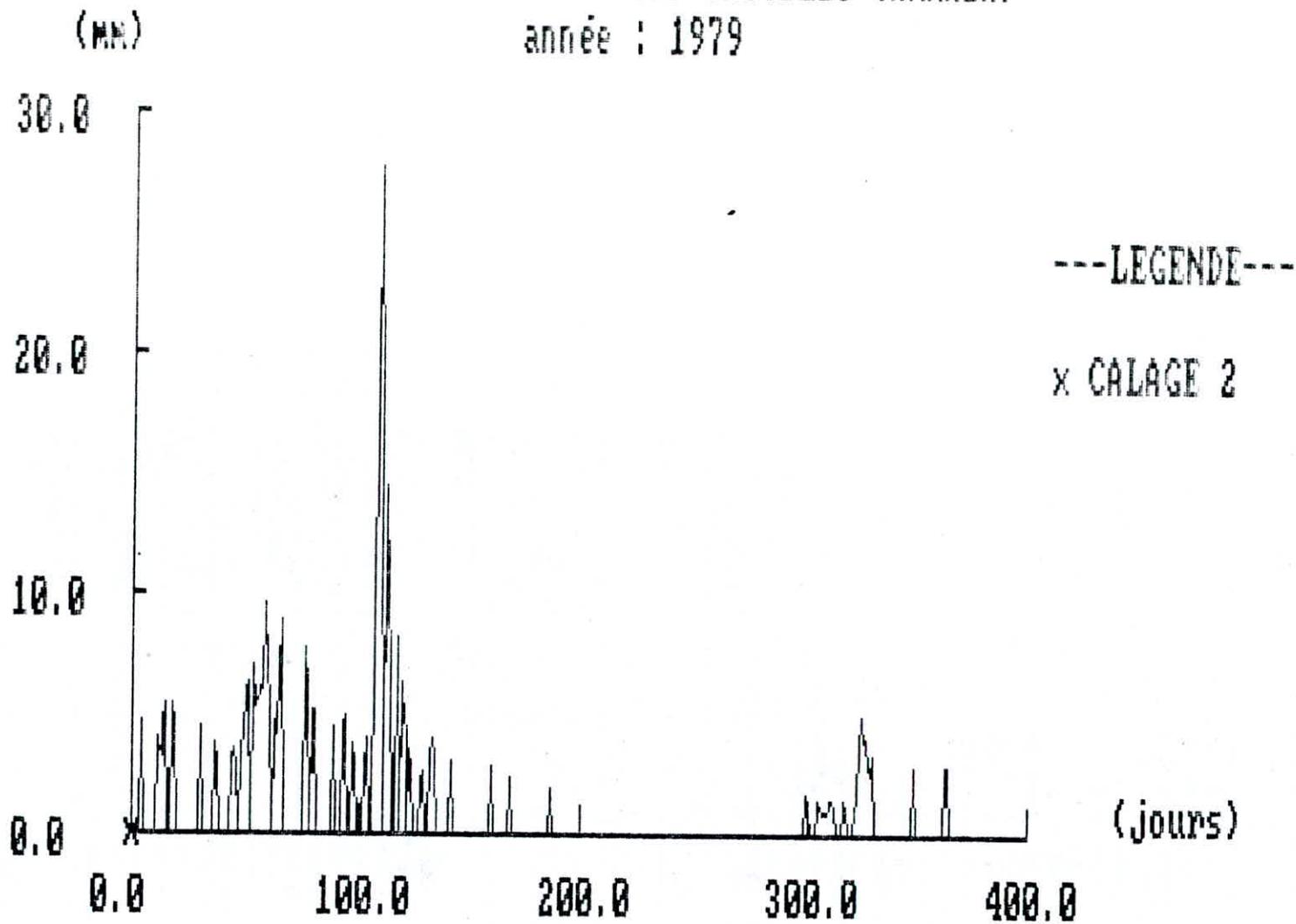


DEBITS JOURNALIERS CALCULES (ANNABA)
année : 1979



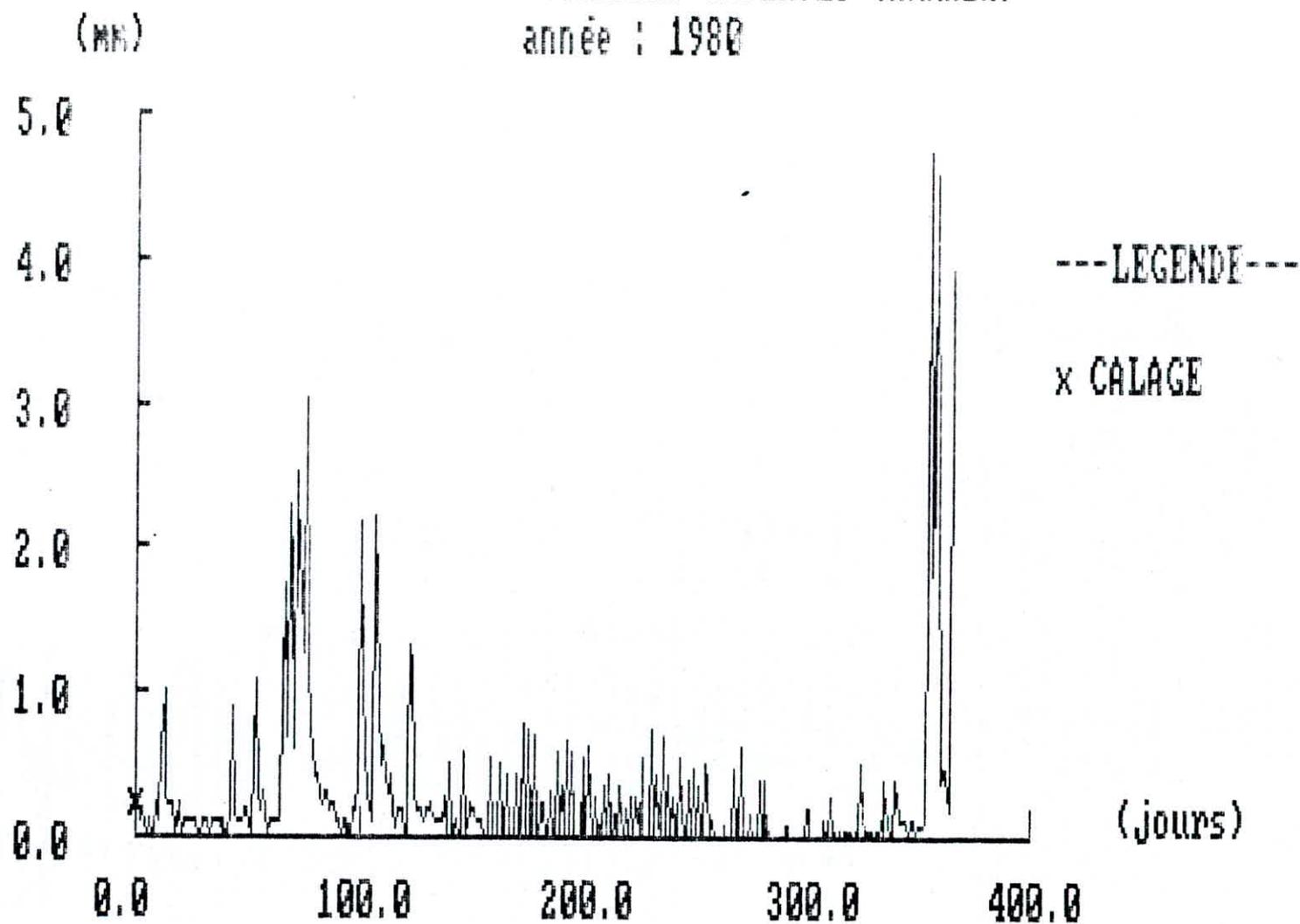
DEBITS JOURNALIERS CALCULES (ANNABA)

année : 1979



DEBITS JOURNALIERS OBSERVES (ANNABA)

année : 1980



DEBITS JOURNALIERS CALCULES (ANNABA)

année : 1980

(mm)

1.0

0.8

0.6

0.4

0.2

0.0

---LEGENDE---

x CALAGE 1

(jours)

0.0

100.0

200.0

300.0

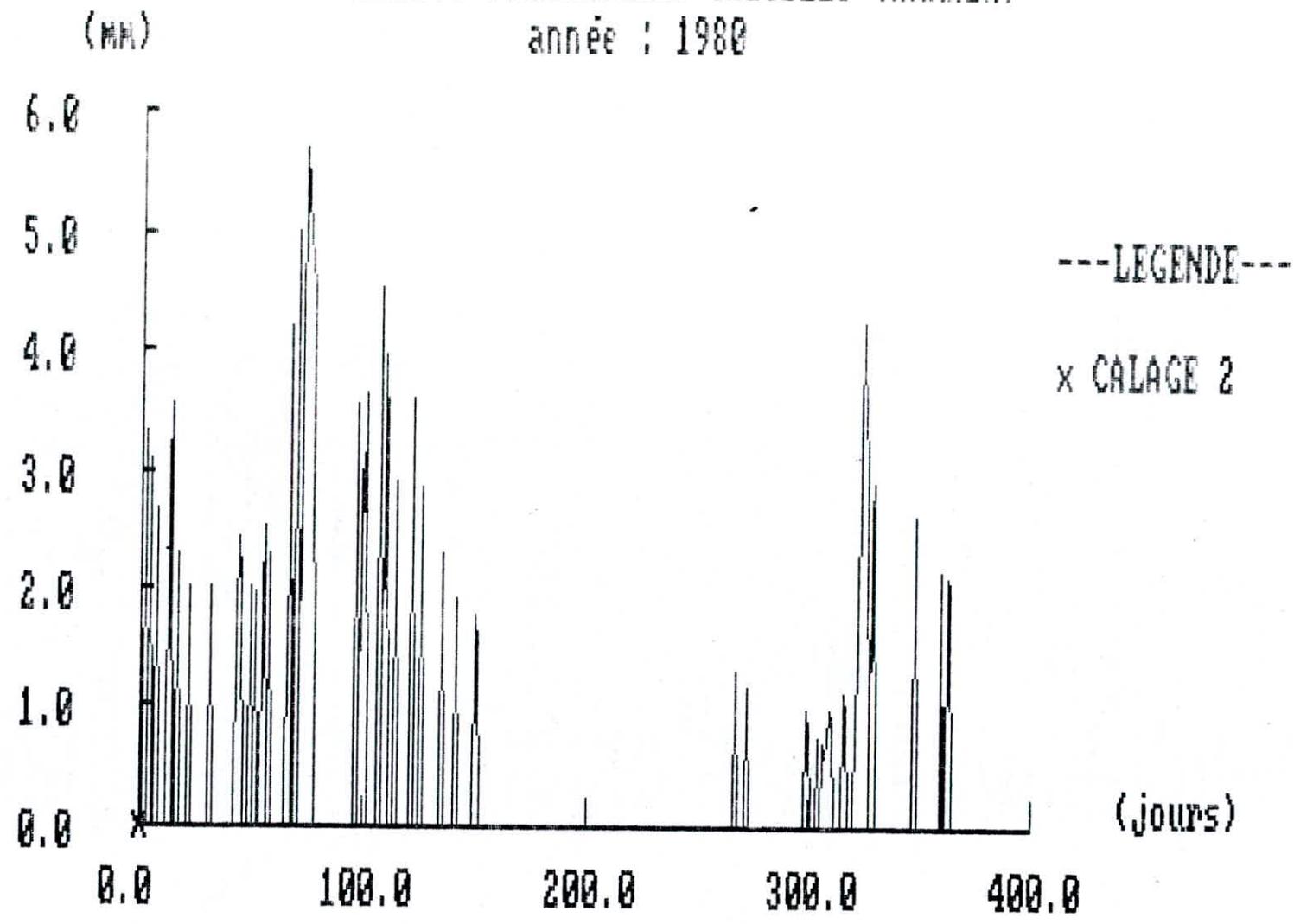
400.0

*



DEBITS JOURNALIERS CALCULES (ANNABA)

année : 1980



3/ INTERPRETATION DES RESULTATS

3-1/ Optimisation des paramètres des modèles :

En hydrologie, les principaux modèles opérationnels ont des paramètres qui ne peuvent pas être estimés directement. L'optimisation de ces paramètres, est une solution pour tous les problèmes rencontrés dans ce cas.

Les fonctions à minimiser sont donc, en général, des fonctions qui traduisent sous forme d'un scalaire la proximité entre deux tableaux de valeurs, les premières observées, les secondes calculées par le modèle.

Le critère des moindres carrés est un exemple de ces fonctions :

$$C = \sum_{i=1}^N (X_i - Y_i) ** 2 .$$

Où : X_i désigne le tableau de N valeurs observées.

Et Y_i le tableau des N valeurs calculées par le modèle.

L'erreur quadratique moyenne permet de substituer à C une grandeur de même dimension que X ou Y :

$$s = \text{sqrt} (C / N) .$$

Le procédé utilisé, est la méthode d'optimisation pas-à-pas :

C'est une méthode simple qui cherche le minimum. Elle ne le donne pas d'une façon précise, mais fournit une solution suffisante.

Généralement, les paramètres sont des nombres strictement positifs, devant être définis sur la droite des réels. Pour cela, une transformation de ces derniers est nécessaire. Celle retenue pour ce logiciel, est le logarithme :

$$Z = \ln X .$$

L'ensemble de définition de N paramètres est alors \mathbb{R}^N . Les recherches débutent à partir d'un point initial, qui se déplace sur chaque axe d'une même quantité DX pouvant évoluer au fur et à mesure de l'avancement. La valeur initiale de DX est 0.32. Si le critère ne s'est pas amélioré par rapport à sa valeur initiale, à l'itération suivante, DX est divisé par deux. Dans le cas contraire, il est multiplié par deux. S'il dépasse 0.64, les paramètres initiaux sont gardés.

Le critère d'arrêt porte sur DX : la recherche est terminée lorsque $DX < 0.01$.

3-2/ Résultats :

Pour le premier modèle les données initiales sont :

A = 150 mm , S = 25 mm et R = 25 mm.

Après une période de calage de trois années consécutives (1978 /1980), les paramètres optimisés sont :

A = 935 mm , S = 665 mm et R = 56 mm.

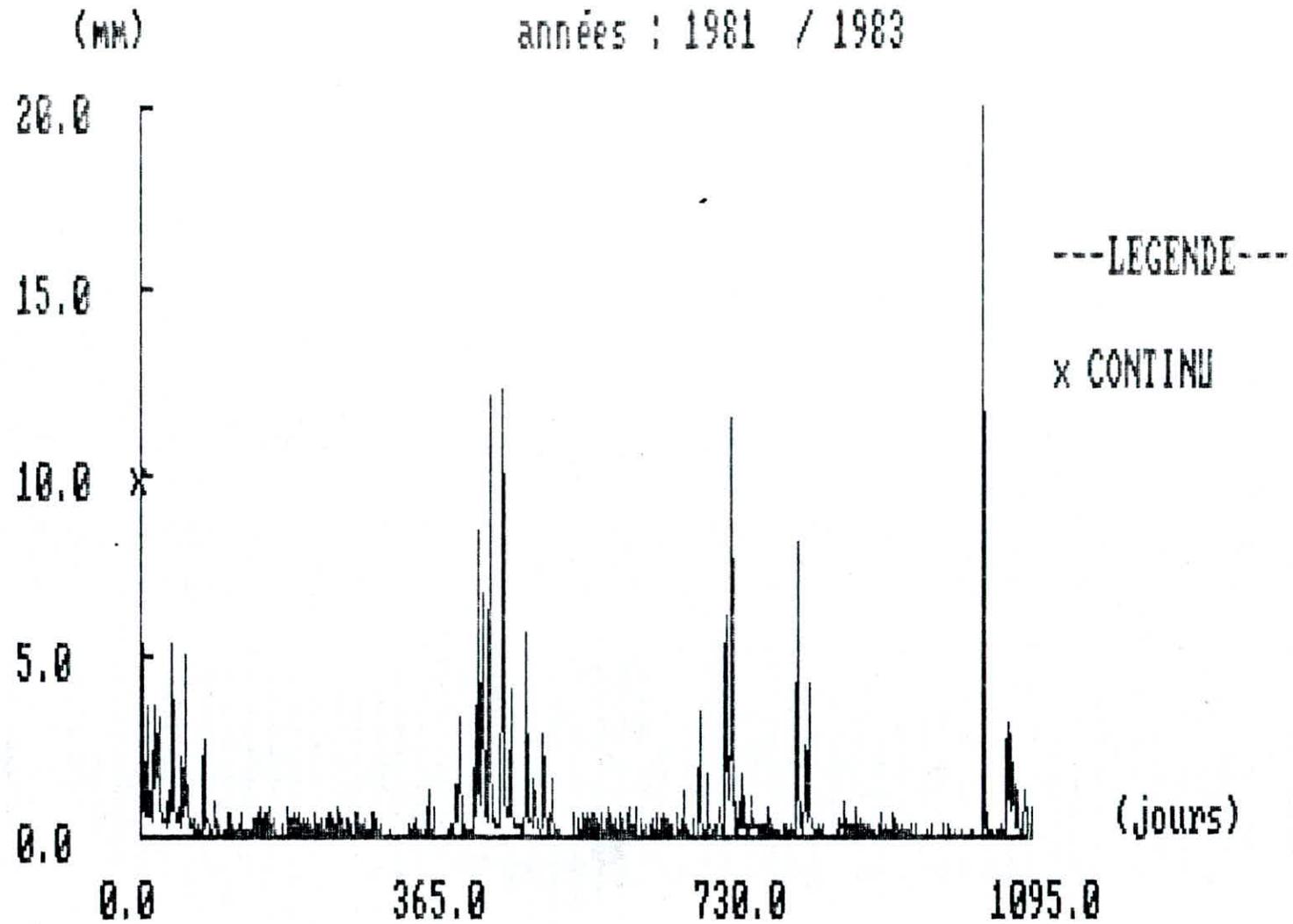
Durant cette période, les résultats obtenus ne sont guère satisfaisants : les débits calculés sont nettement inférieurs aux débits observés. De ce fait, les pointes de crue sont inexistantes (Annexe 4).

Le débit maximum observé est de 34 mm. Alors que le débit maximum calculé est de 9.8 mm, à la même année 1979.

Pour le deuxième modèle les mêmes données initiales ont été introduites. Les paramètres optimisés sur la même période sont :

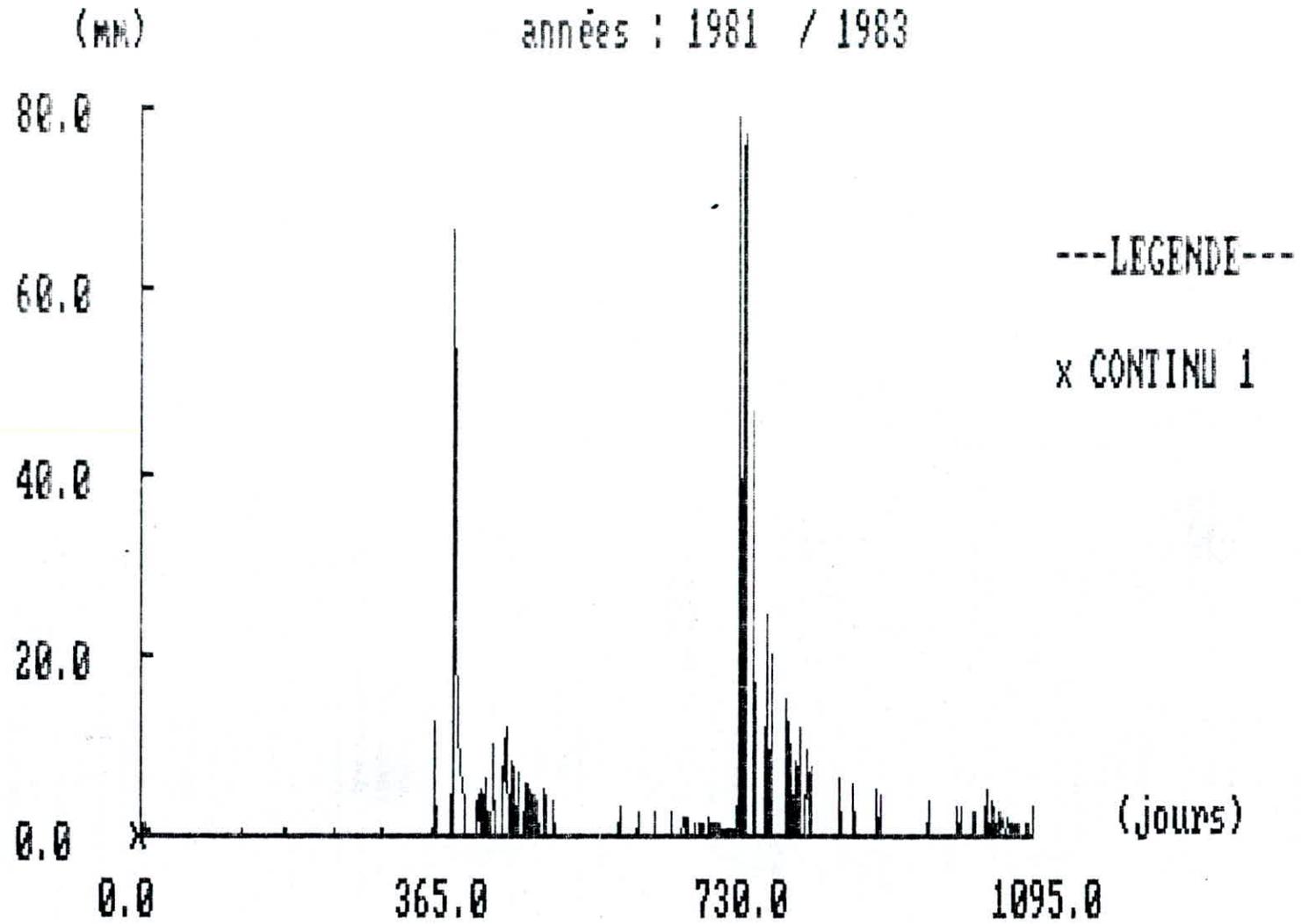
DEBITS JOURNALIERS OBSERVES (ANNABA)

années : 1981 / 1983



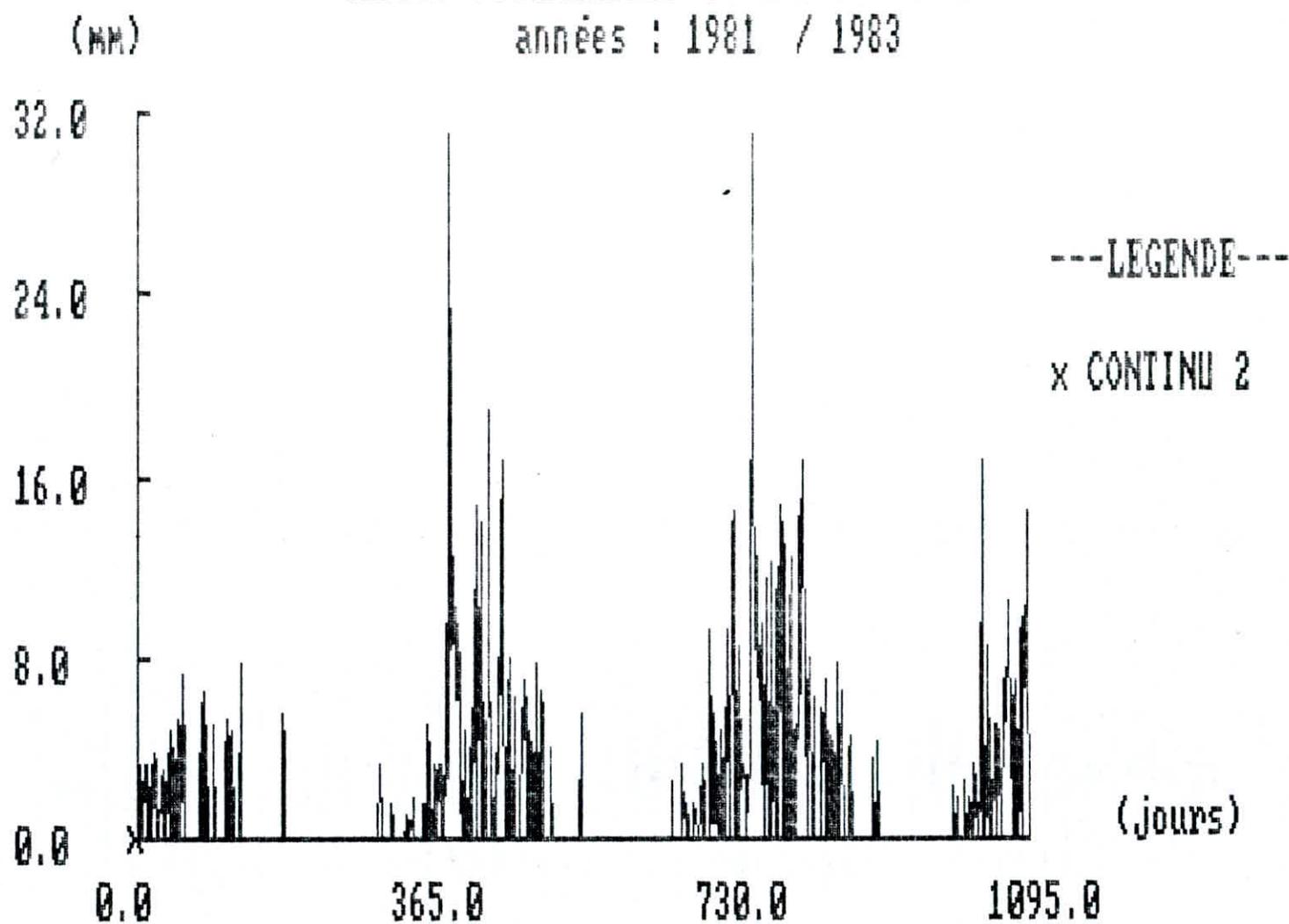
DEBITS JOURNALIERS OBSERVES (ANNABA)

années : 1981 / 1983



DEBITS JOURNALIERS CALCULES (ANNABA)

années : 1981 / 1983



A = 150 mm , S = 25 mm et R = 25 mm.

Ce modèle, par contre, reprend les pointes de crue, mais par moment à des valeurs inférieures, par d'autres à des valeurs supérieures, et parfois elles sont décalées.

Le débit maximum calculé dans ce cas est de 29 mm à la même année, reprenant ainsi mieux le débit observé.

Les deux modèles ont également été contrôlés sur les trois années suivantes (1981 / 1983).

Durant cette période les résultats du GR1 sont aussi mauvais qu'en période de calage (les débits sont trop exagérés) : Le débit maximum observé étant de 20 mm (en fin de 3^e année), celui calculé est de 80 mm (en fin de 2^e année).

Le GR2 reprend le débit maximum, à 16 mm (en fin de 3^e année), mais son débit maximum calculé est de 32 mm.

4/ CONCLUSION :

D'après les résultats obtenus, le GR2 reprend mieux le phénomène physique. Cependant, il serait bon d'envisager l'amélioration de ce modèle en introduisant une fonction de transfert qui régirait mieux la loi d'écoulement.

De plus, les pluies ne sont recueillies que par l'unique station dans la région de La Cheffia, dont la superficie est de 575 Km². De ce fait, l'étude spacio-temporelle de ces pluies est à approfondir, sachant qu'elles sont un facteur essentiel dans le véhiculement des débits.

CONCLUSION GENERALE

Comme il l'a été constaté, il n'est pas toujours simple de pouvoir trouver des équations représentant correctement les phénomènes physiques.

Par conséquent, la validité d'un modèle est acceptée ou réfutée, selon que son application est confirmée ou non, par une expérimentation.

La modélisation mathématique est un outil efficace dans le domaine de la recherche, mais demande une persévérance et une actualisation constantes.

BIBLIOGRAPHIE

- LHOMME J-P., ELDIN M., (1985). Un modèle agroclimatologique de simulation du bilan hydrique des cultures. Les besoins en eau des cultures. Conférence internationale, Paris, 11 - 14 sept. 1984. INRA, Paris.
- ROJAS O., (1984). Etude agroclimatologique du bilan hydrique théorique et essai de modélisation d'irrigation dans le sud-ouest de la France. Rapport de diplôme d'Agronomie Approfondie, D.A.A. Milieu physique. INRA - Versailles.
- CHOISNEL E., (1985). Un modèle agroclimatologique opérationnel de bilan hydrique utilisant des données climatiques. Les besoins en eau des cultures. Conférence internationale, Paris, 11 - 14 sept. 1984. INRA, Paris.
- CAHIERS DE L'ORSTOM, (1980). Série Hydrologie. Vol. XVII, N° 2.
- HILLEL D., (1984). L'eau et le sol (principes et processus physiques). Chap. 11. "Bilans hydrique et énergétique au niveau du champ", pp. 243 - 257. Ed. Cabay.
- BENYAHIA T., QUALITSEN K-A., (1989). Conception et dimensionnement d'un réseau d'irrigation par aspersion. Projet de fin d'études proposé par AGID. Dirigé par Monsieur BOUGUERRA K.
- MICHEL C., (1983). Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle conceptuel à un seul paramètre ? La houille blanche N° 1, pp 39 - 44.

EDIJATNO, MICHEL C., (1989). Un modèle PLUIE-DEBIT

journalier à trois (3) paramètres.

La houille blanche N° 2, pp 113 - 121. CEMAGREF, ANTONY.

OUAZAR D., CHQAF M., MARZOUK F., EL HANNAOUI B., (1986).

Conception d'un modèle déterministe pour la
transformation PLUIE - DEBIT : Application à un bassin
versant marocain.

Département Génie Civil. Ecole Mohammadia d'Ingénieurs.

CEMAGREF, (1988). L'hydrologie des petits bassins ruraux.

CEMAGREF, ANTONY.

GILBERT N., (1984). Statistiques.

Les éditions HRW.

LAROUSSE AGRICOLE.

ANNEXE

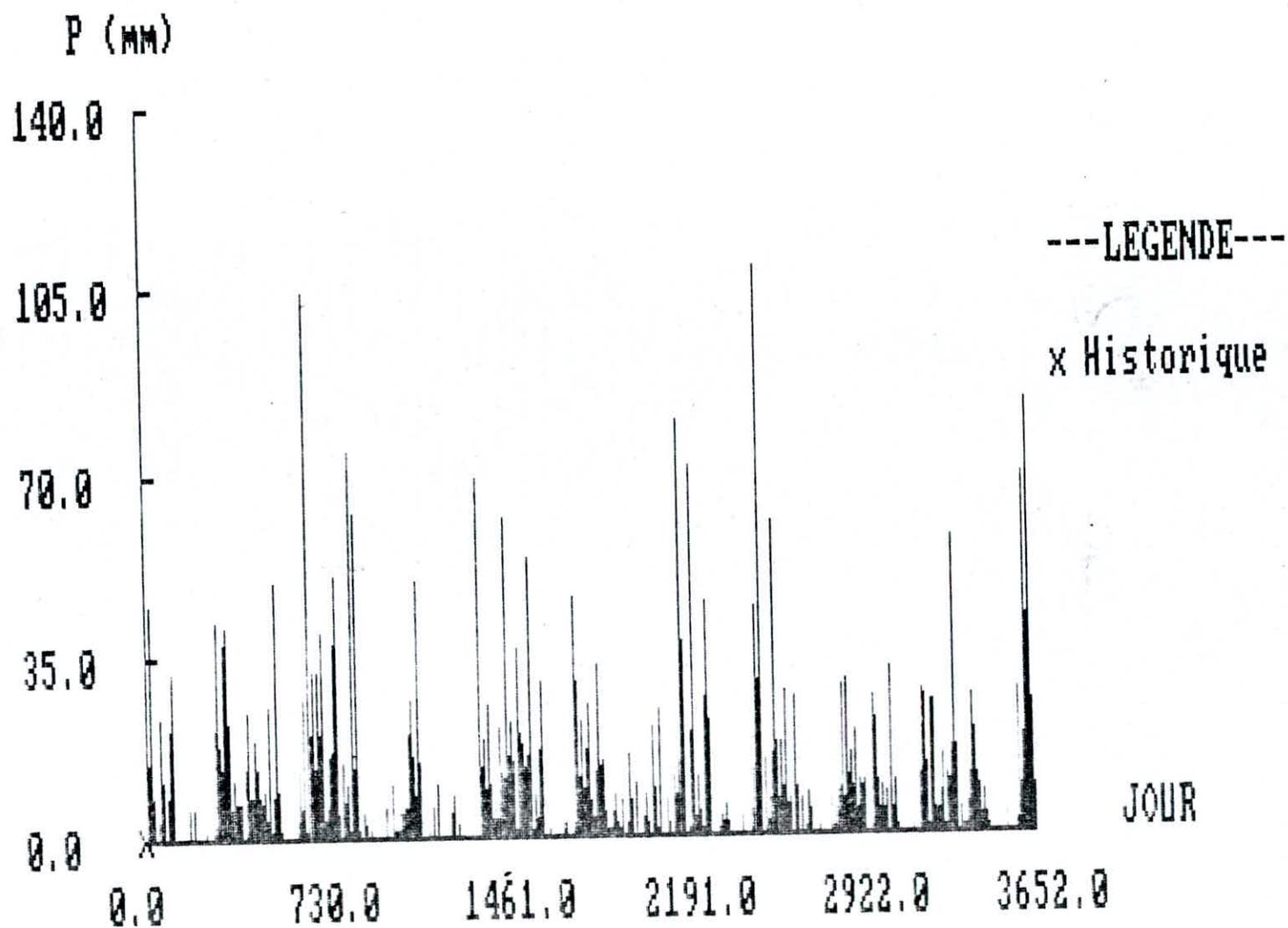
Tableau des coefficients culturaux utilisés

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
CULTURE	COEFFICIENTS CULTURAUX											
Arb.fru.	.6	.6	.65	.65	.65	.7	.7	.7	.7	.7	.65	.65
Industr.				.6	.8	.8	1	.8	.4			
Maraich.			.4	.5	.6	.7	.6	.5				

Répartition culturale

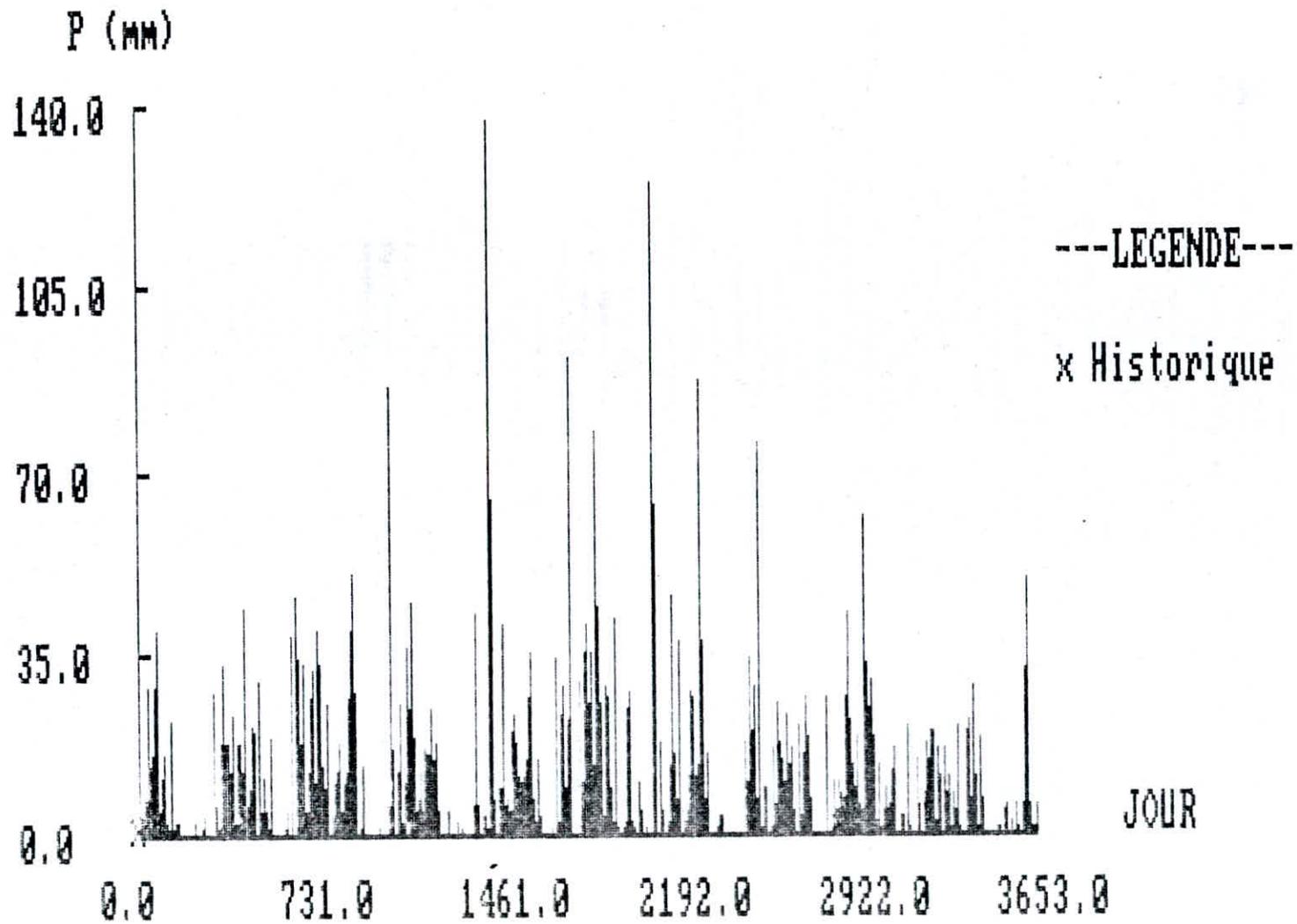
Culture	Surf.occupée	% de sup.tot.	Péριο.de cult.
Industrie.	118 ha	75	Avril-Sept.
Maraichage	20 ha	13	Mars-Aout
Pérenne	11 ha	7	> 12 mois

PLUVIOMETRIE (ST-ALGER:1958-1967)



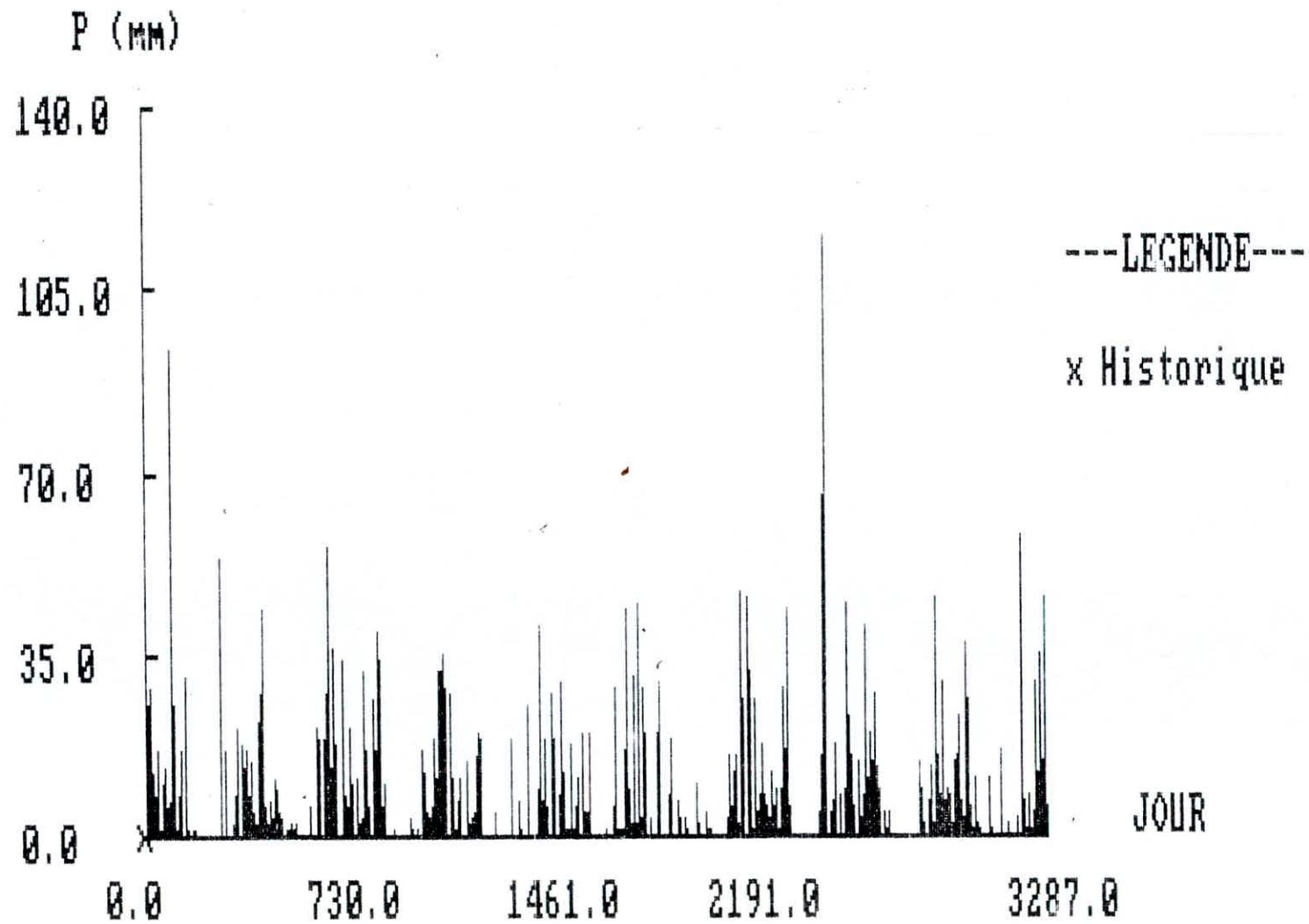
ANNEXE 1

PLUVIOMETRIE (ST-ALGER:1968-1977)



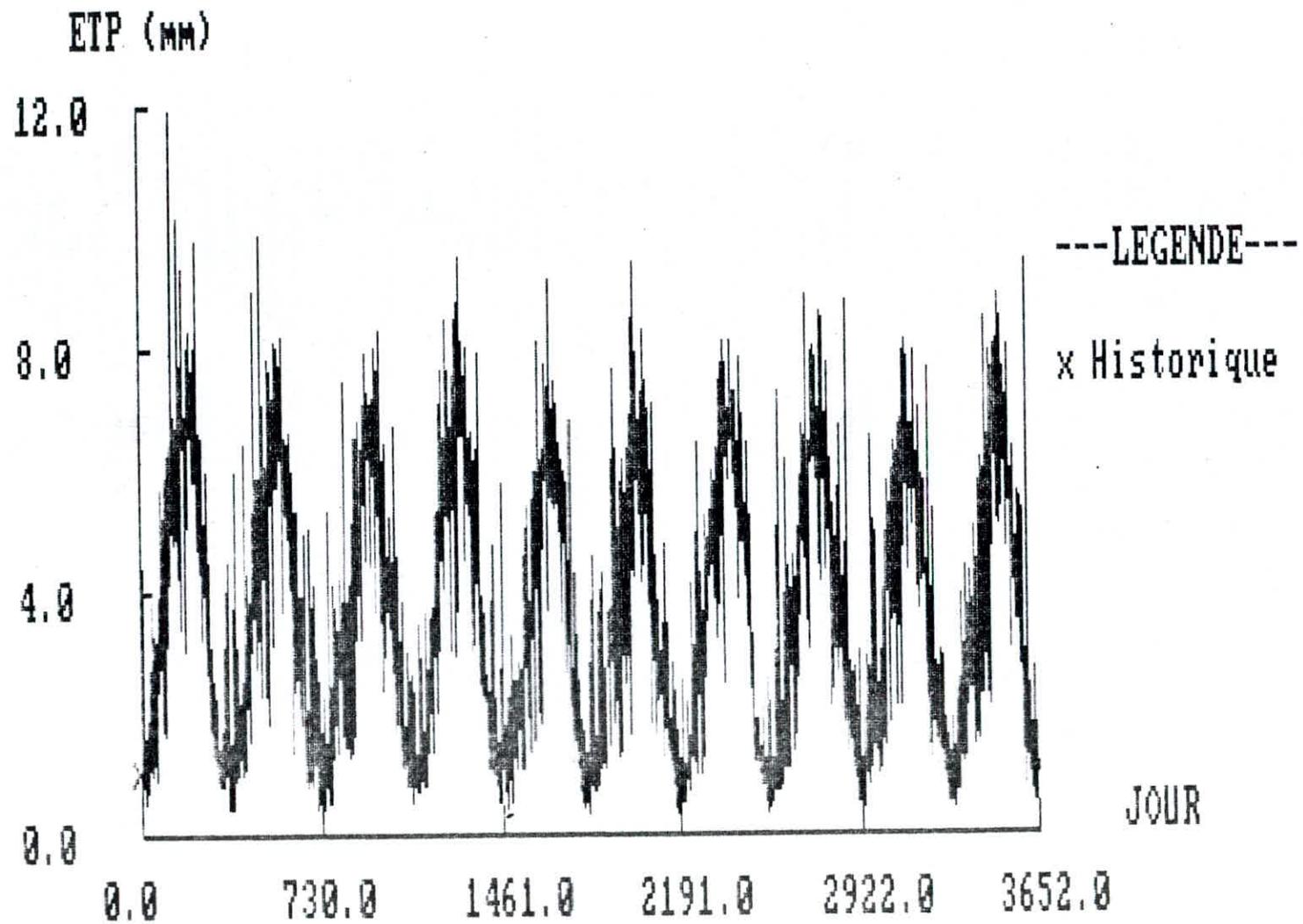
ANNEXE 1

PLUVIOMETRIE (ST-ALGER:1978-1986)



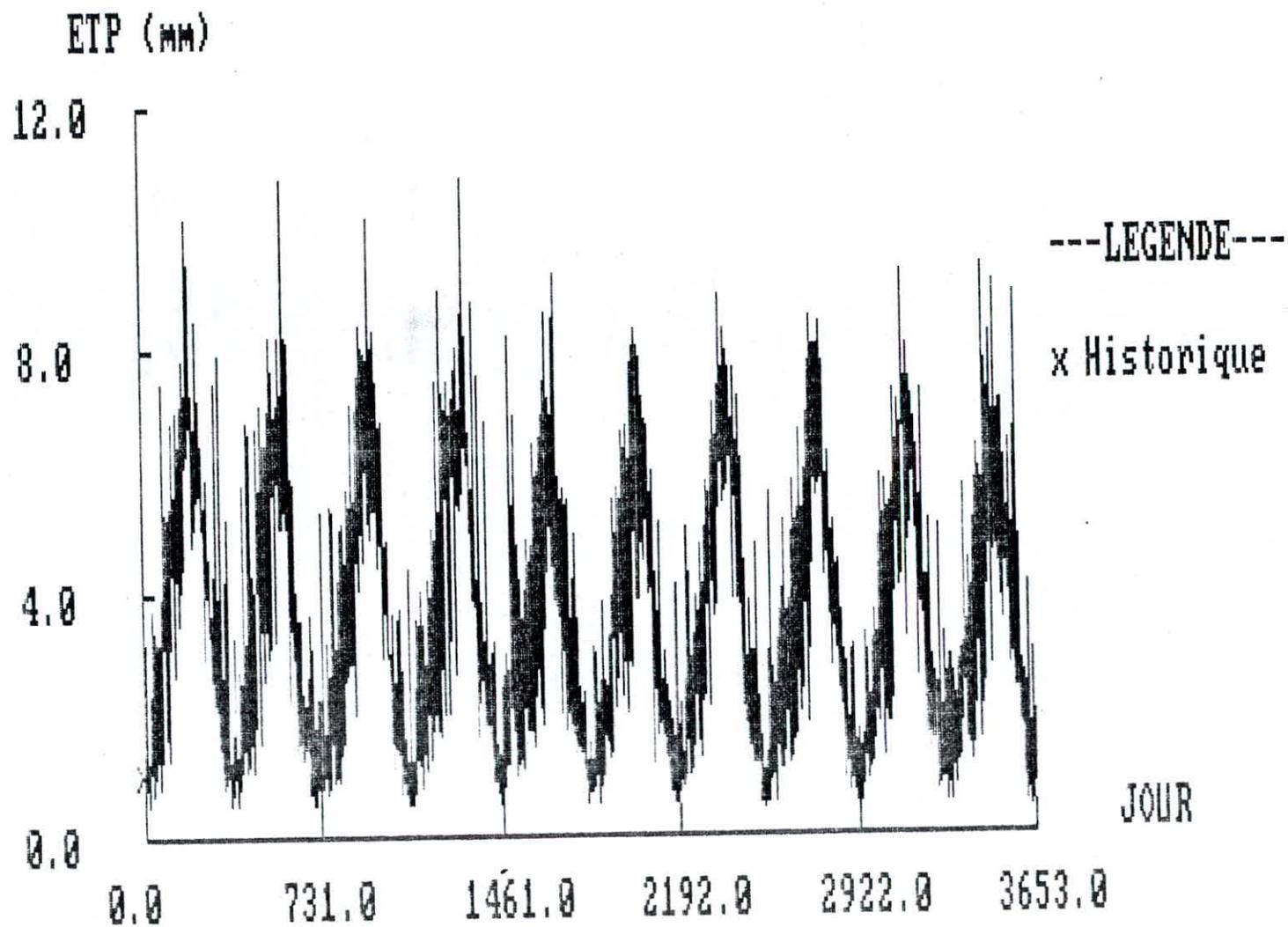
ANNEXE 1

ETP PENMAN JOURNALIERE (ST-ALGER:1958-1967)



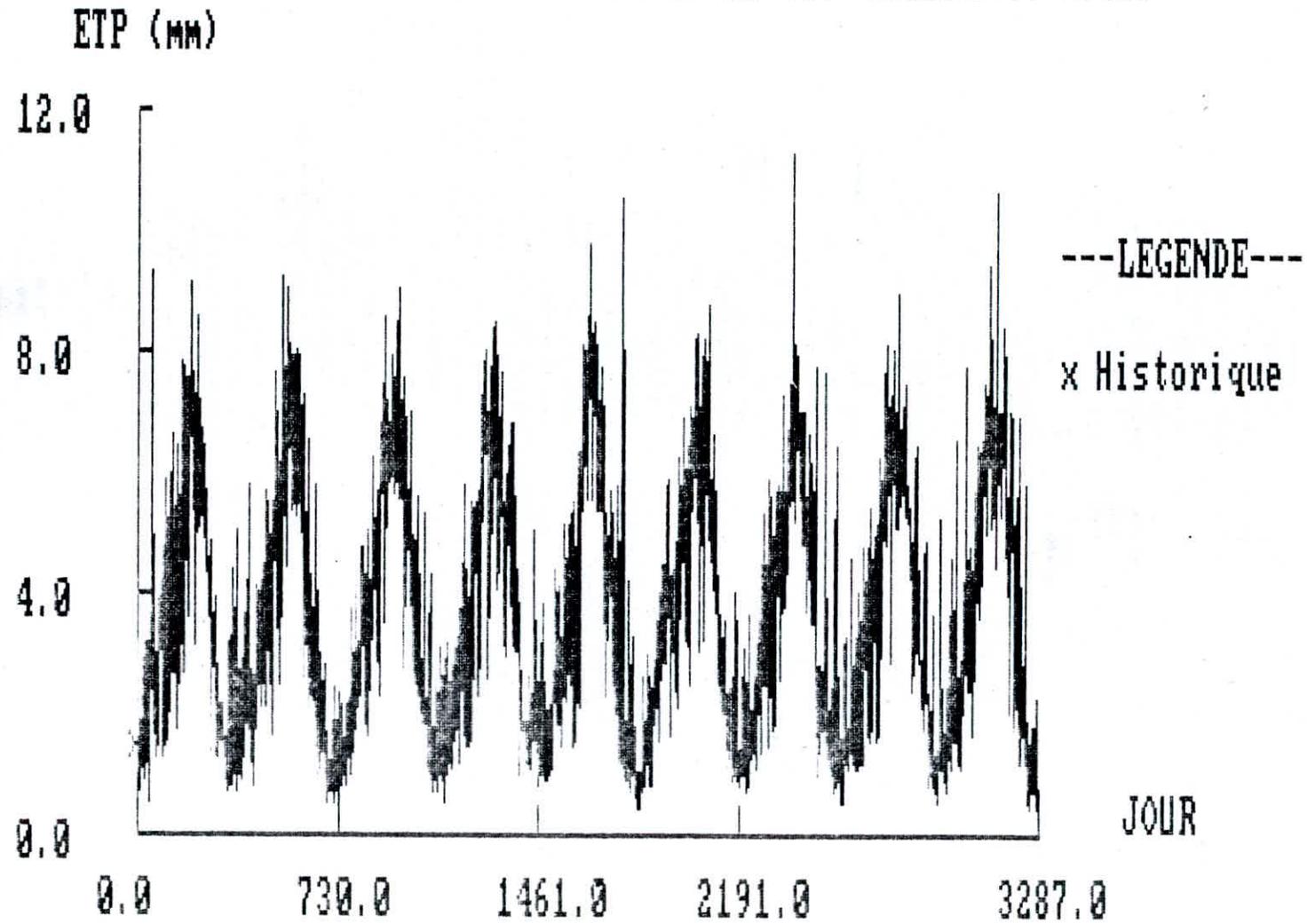
ANNEXE 2

ETP PENMAN JOURNALIERE (ST-ALGER:1968-1977)

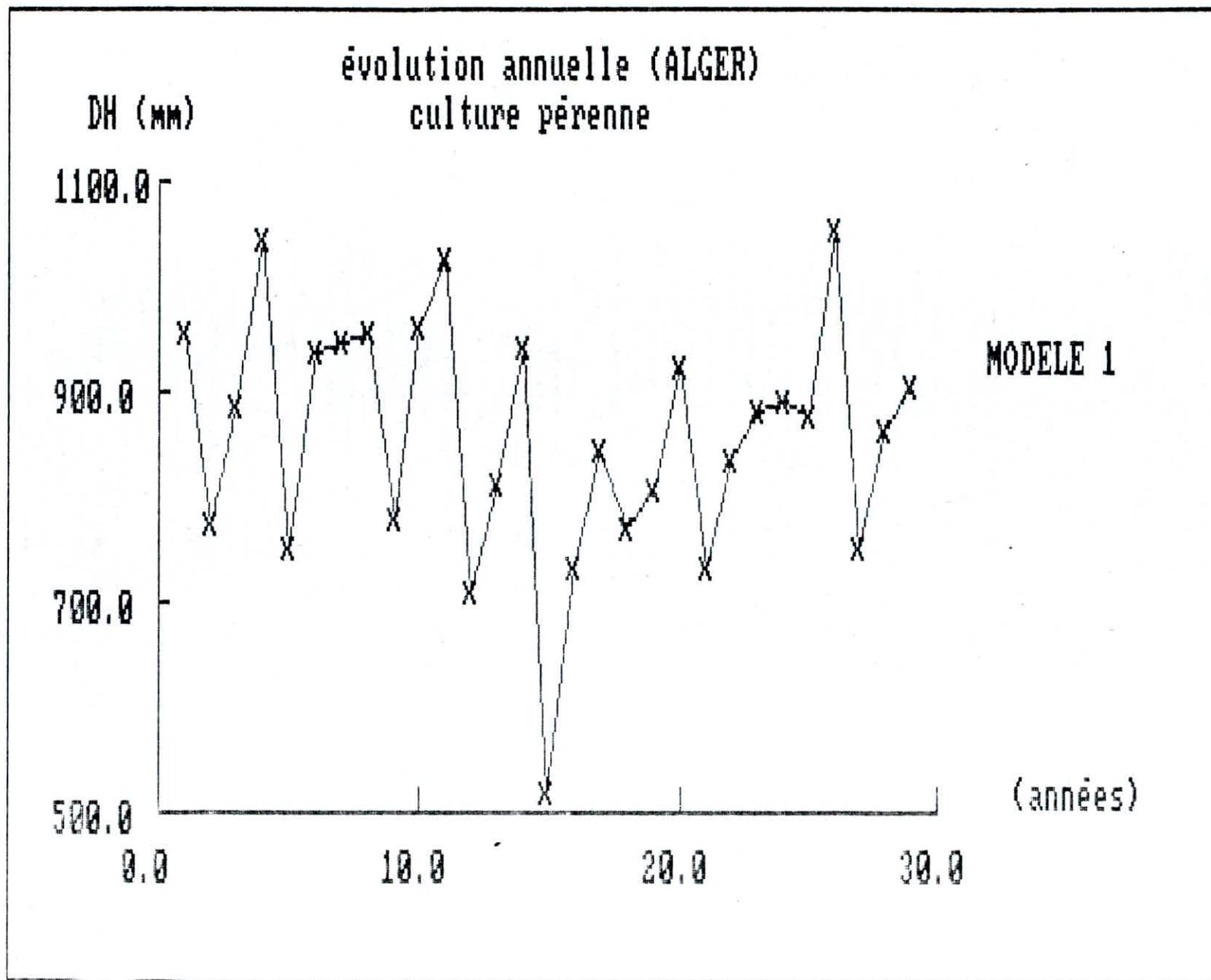


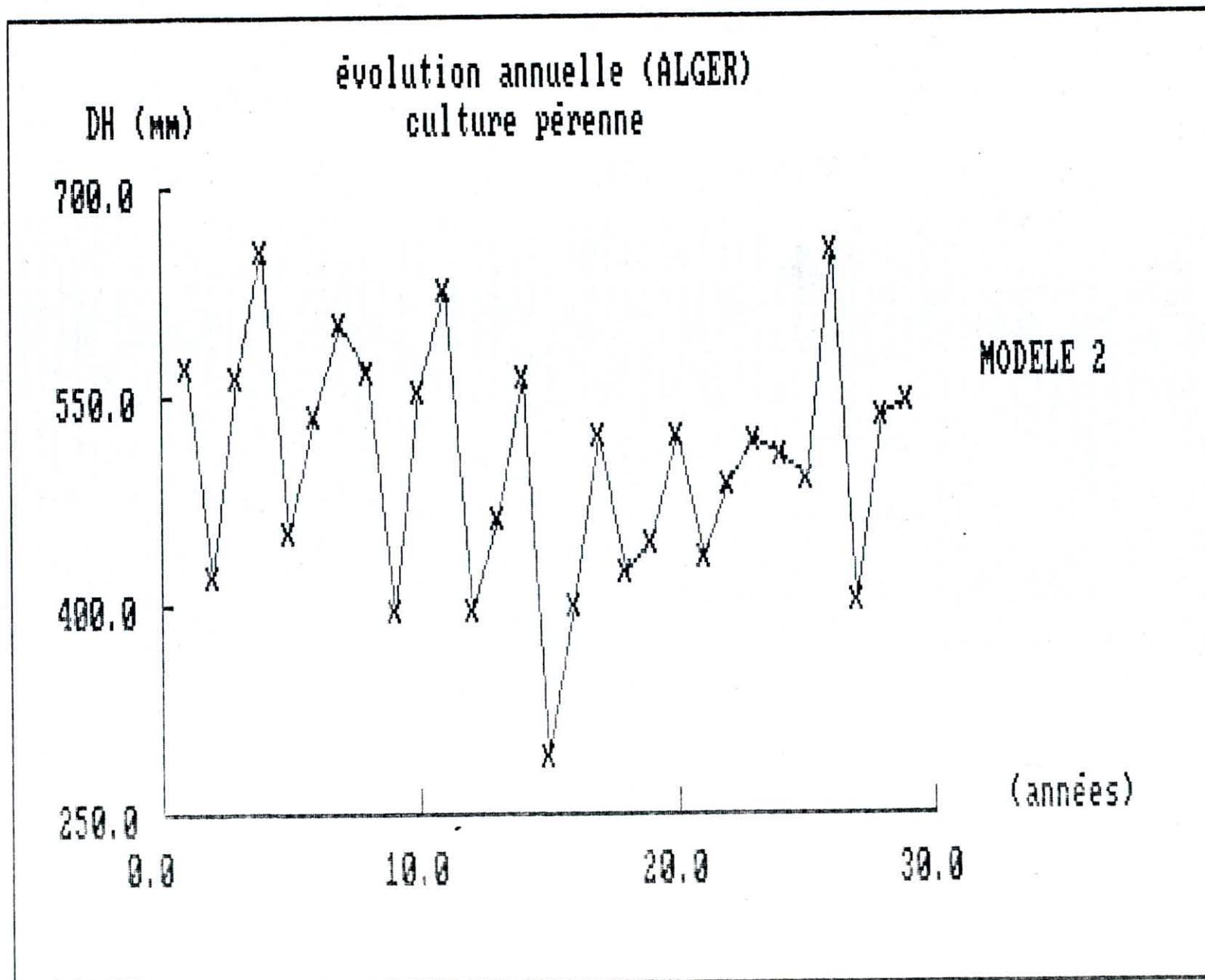
ANNEXE 2

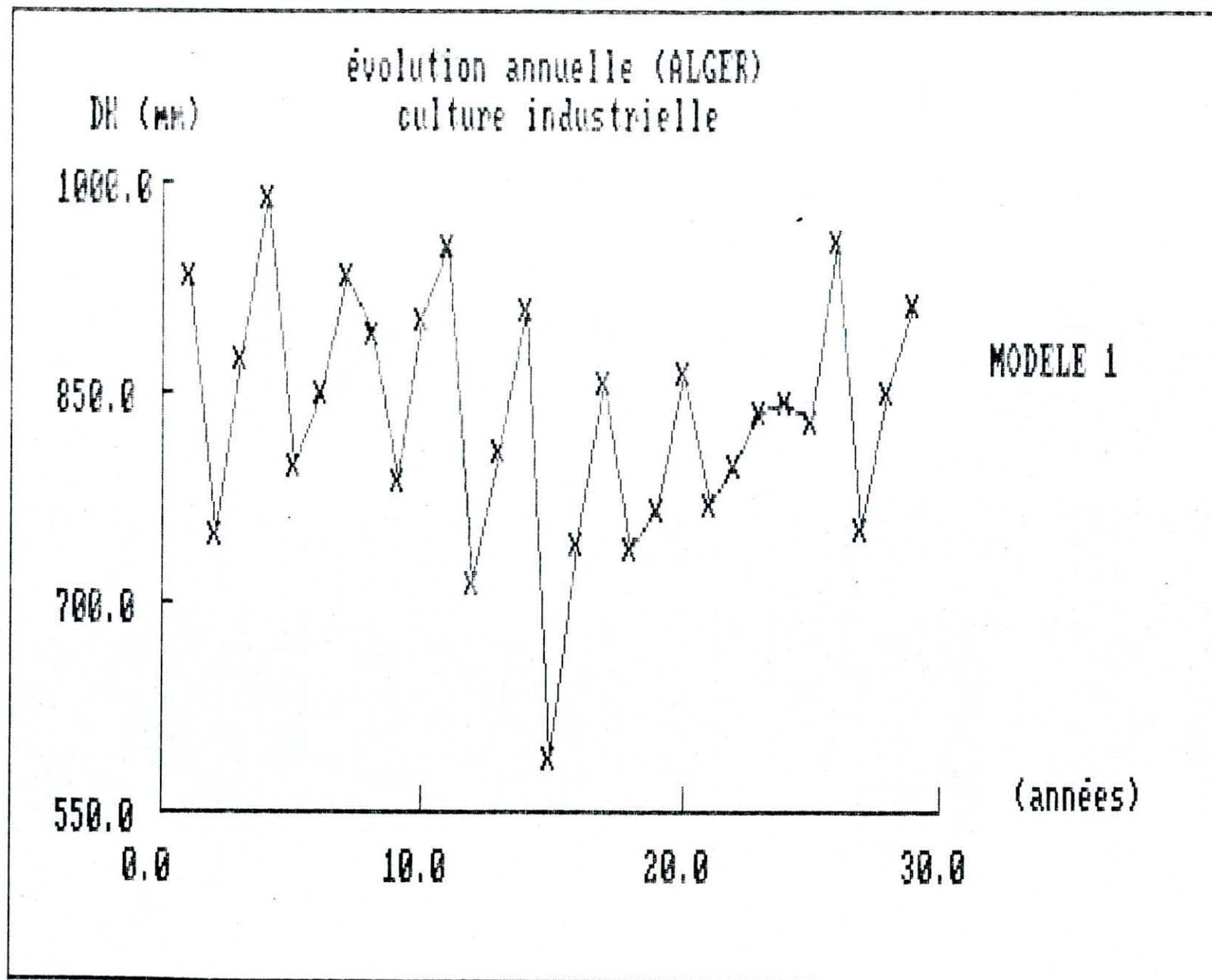
ETP PENMAN JOURNALIERE (ST-ALGER:1978-1986)

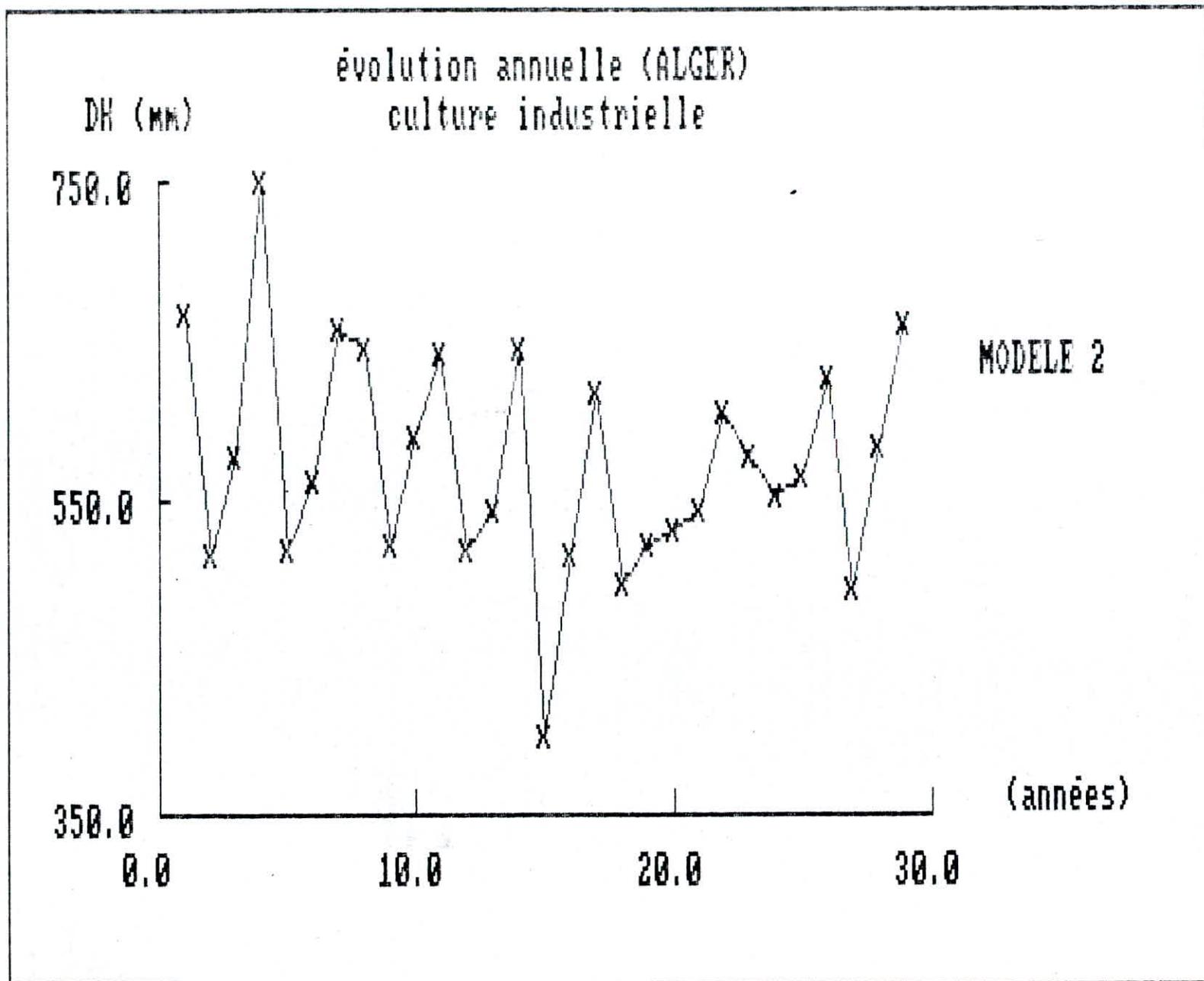


ANNEXE 2

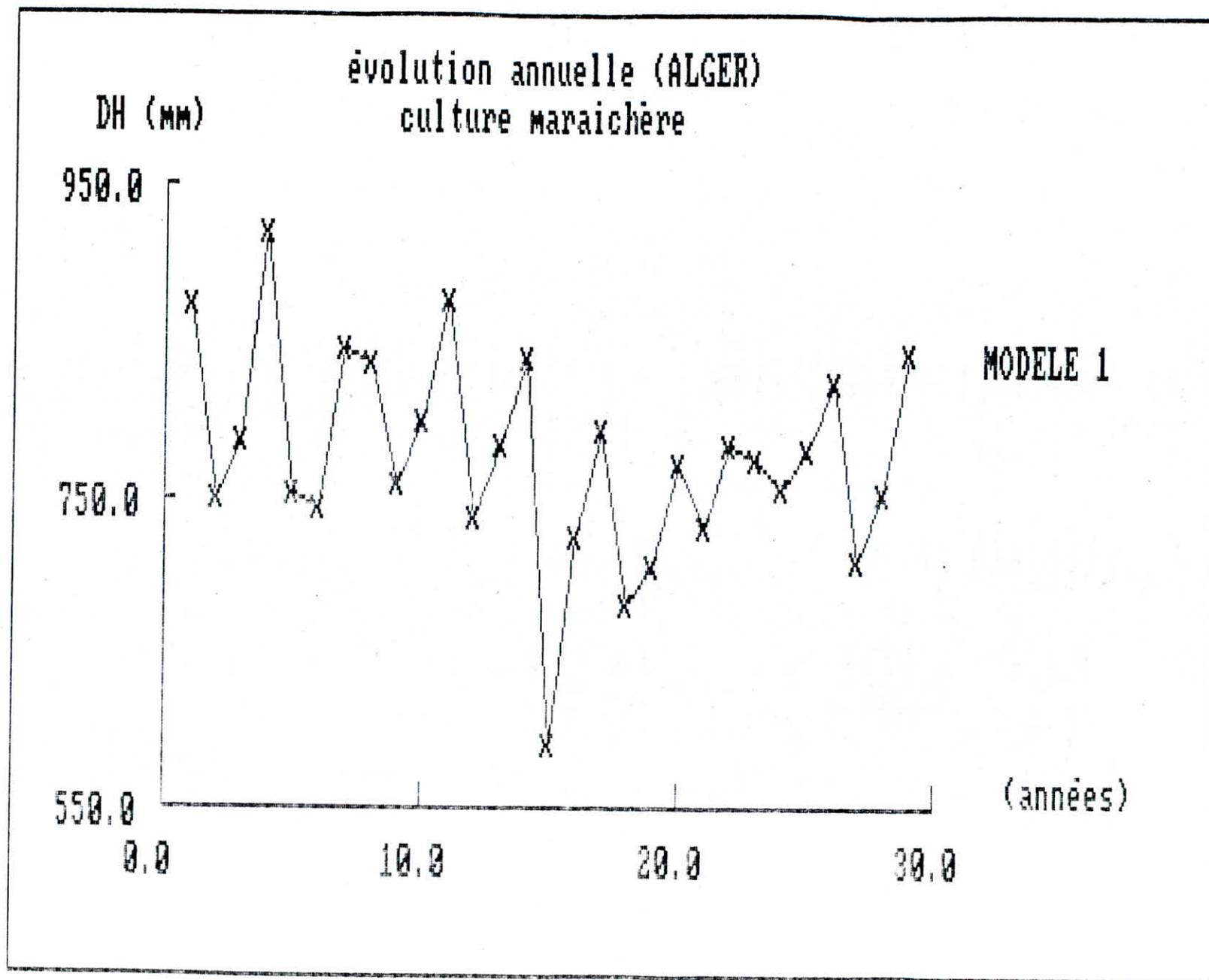


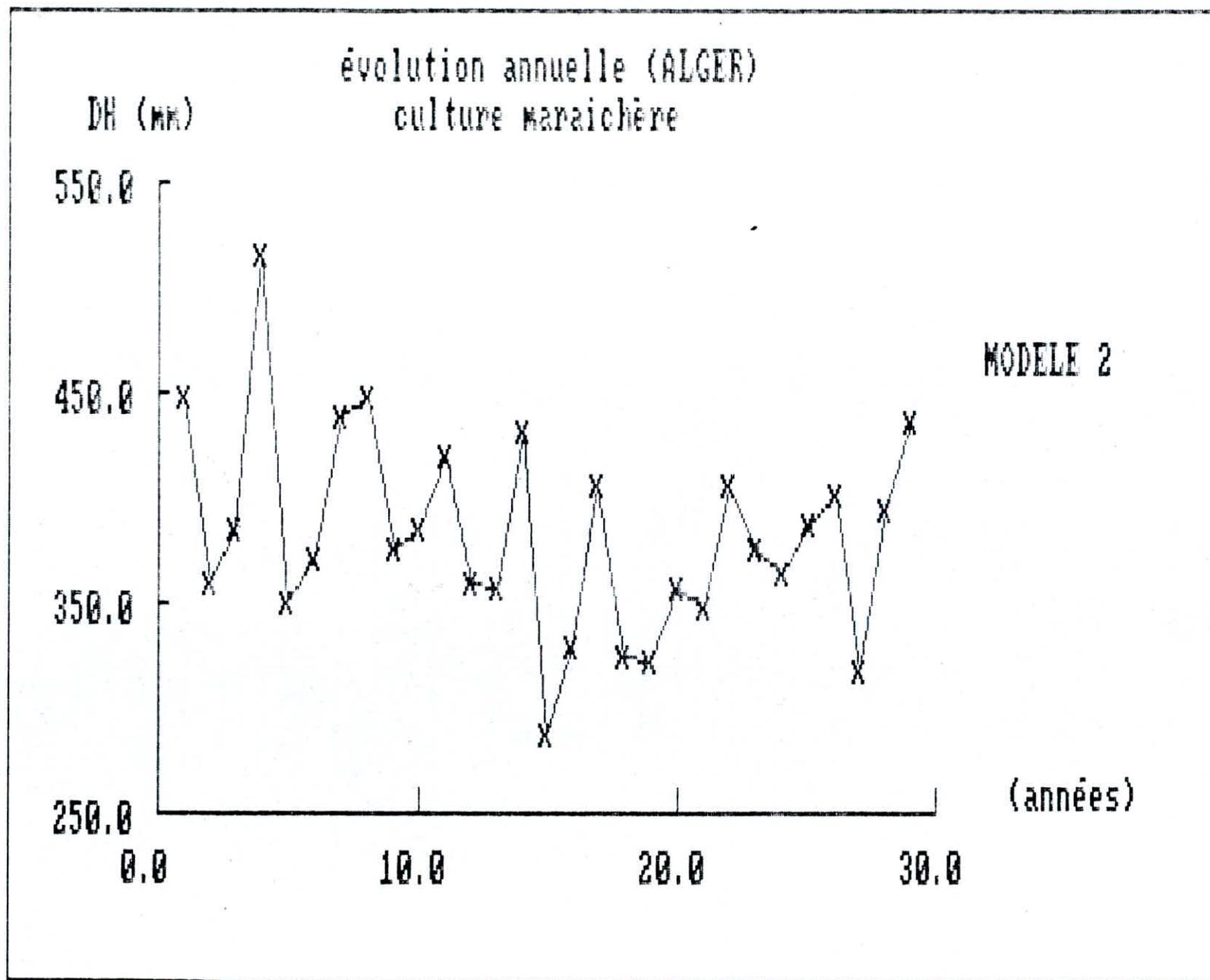


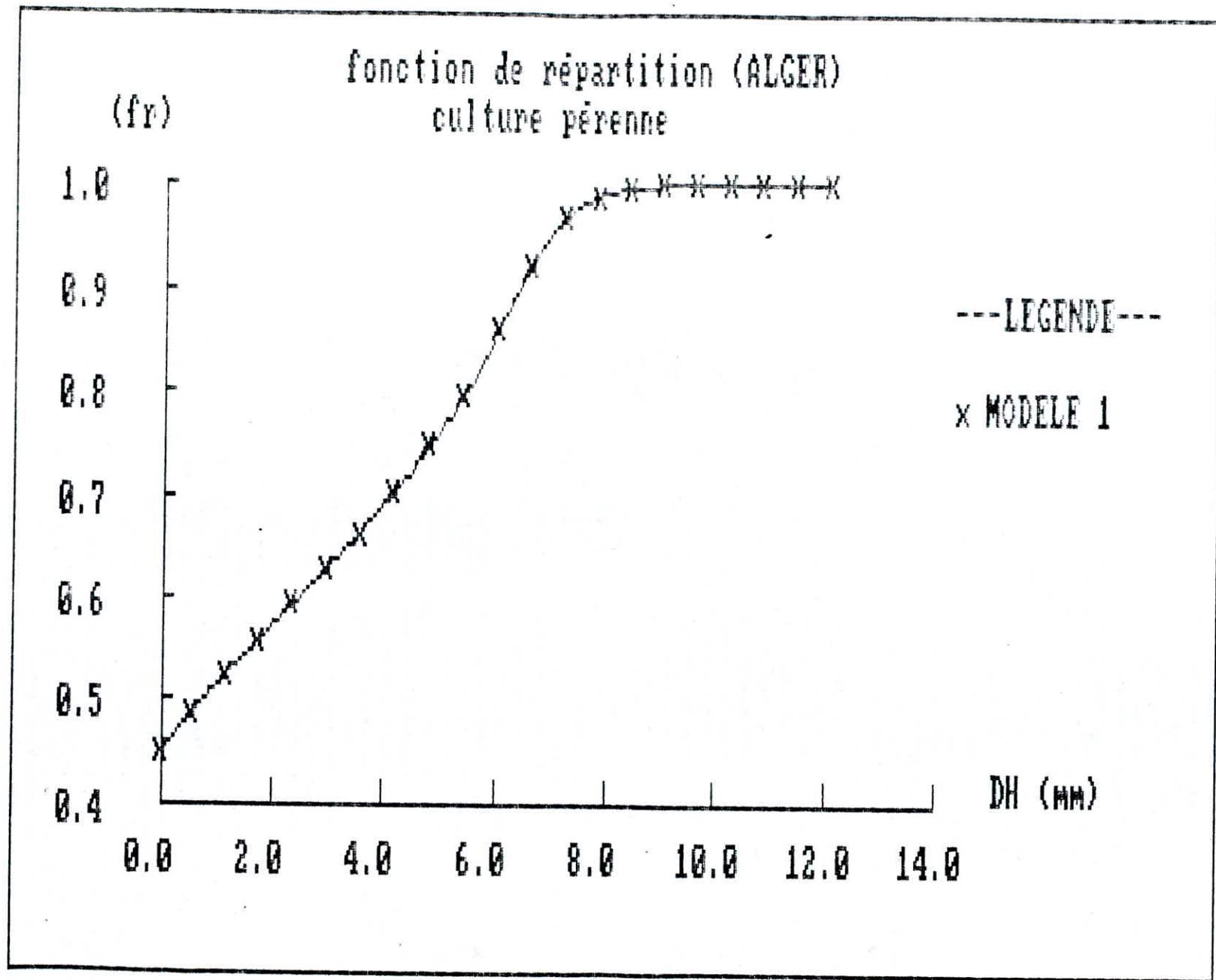




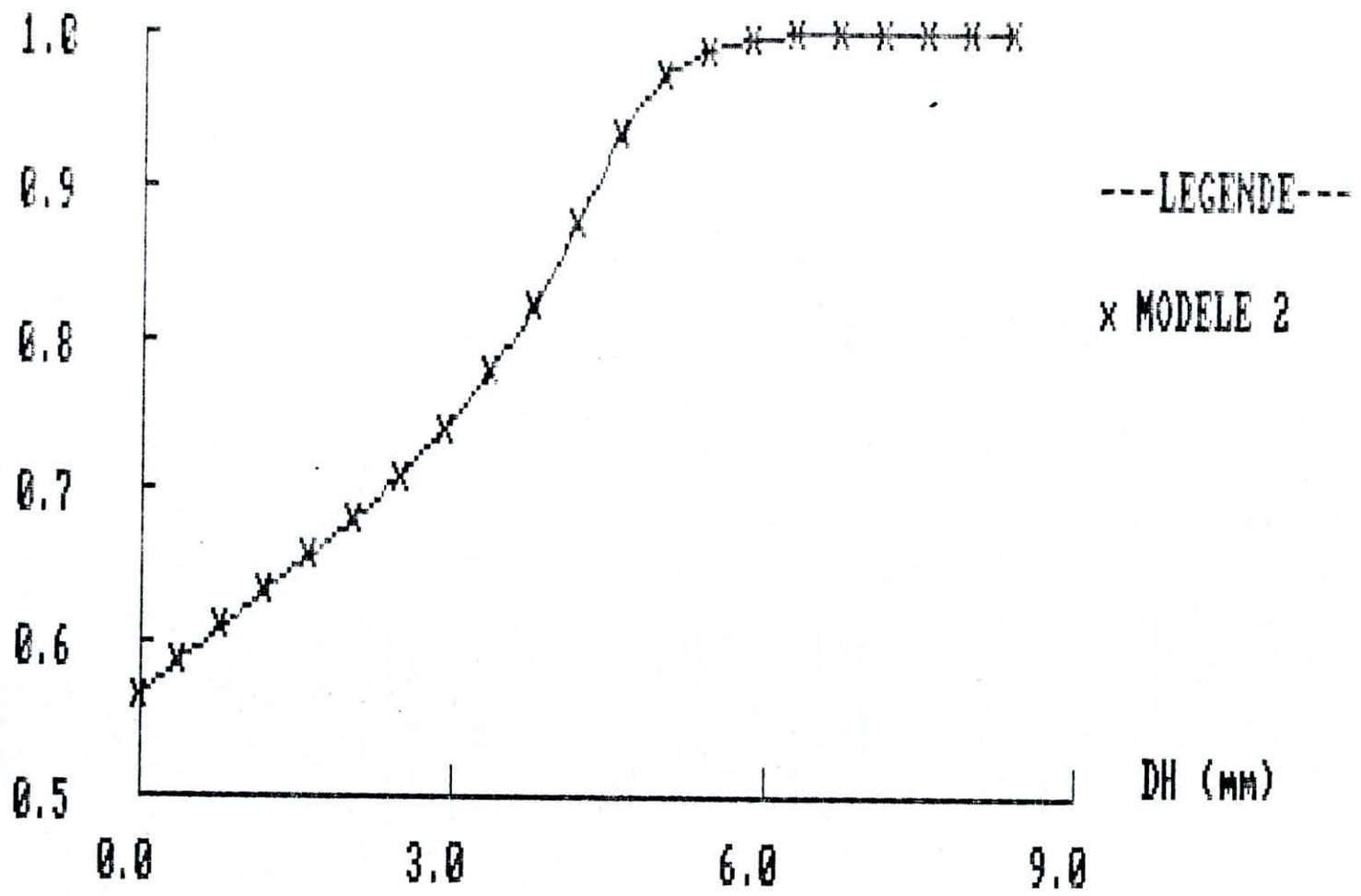
ANNEXE 3

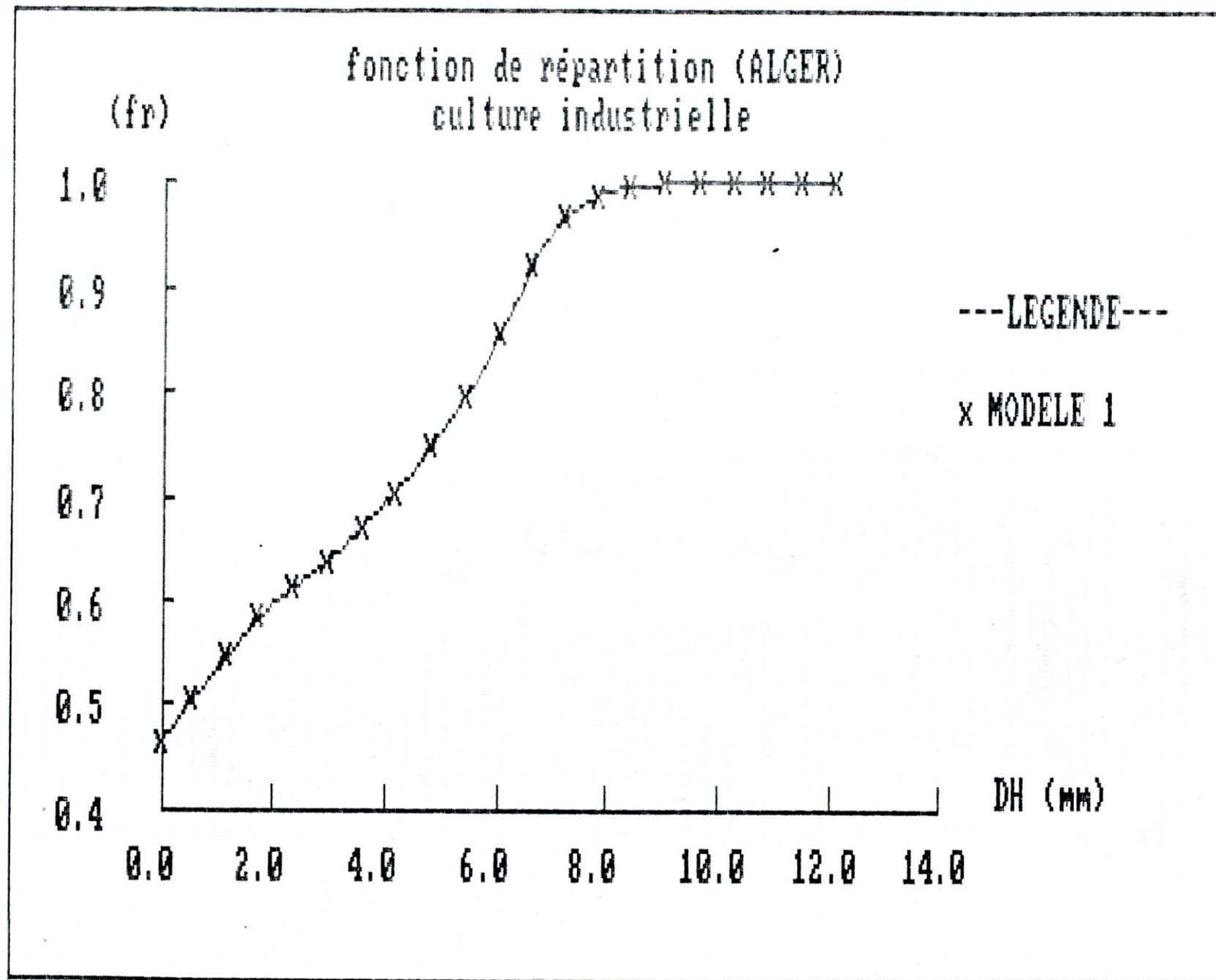






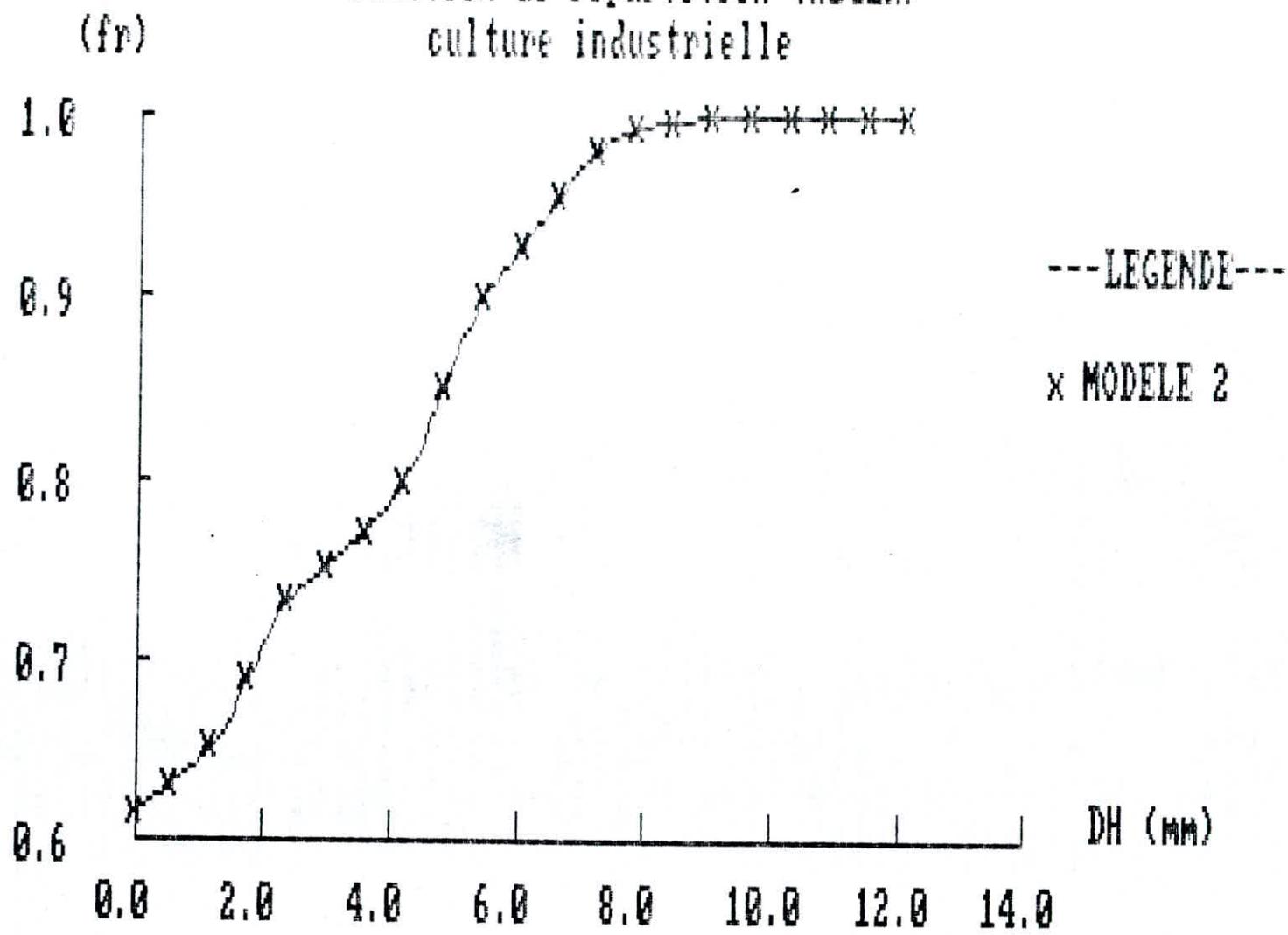
fonction de répartition (ALGER)
culture pérenne

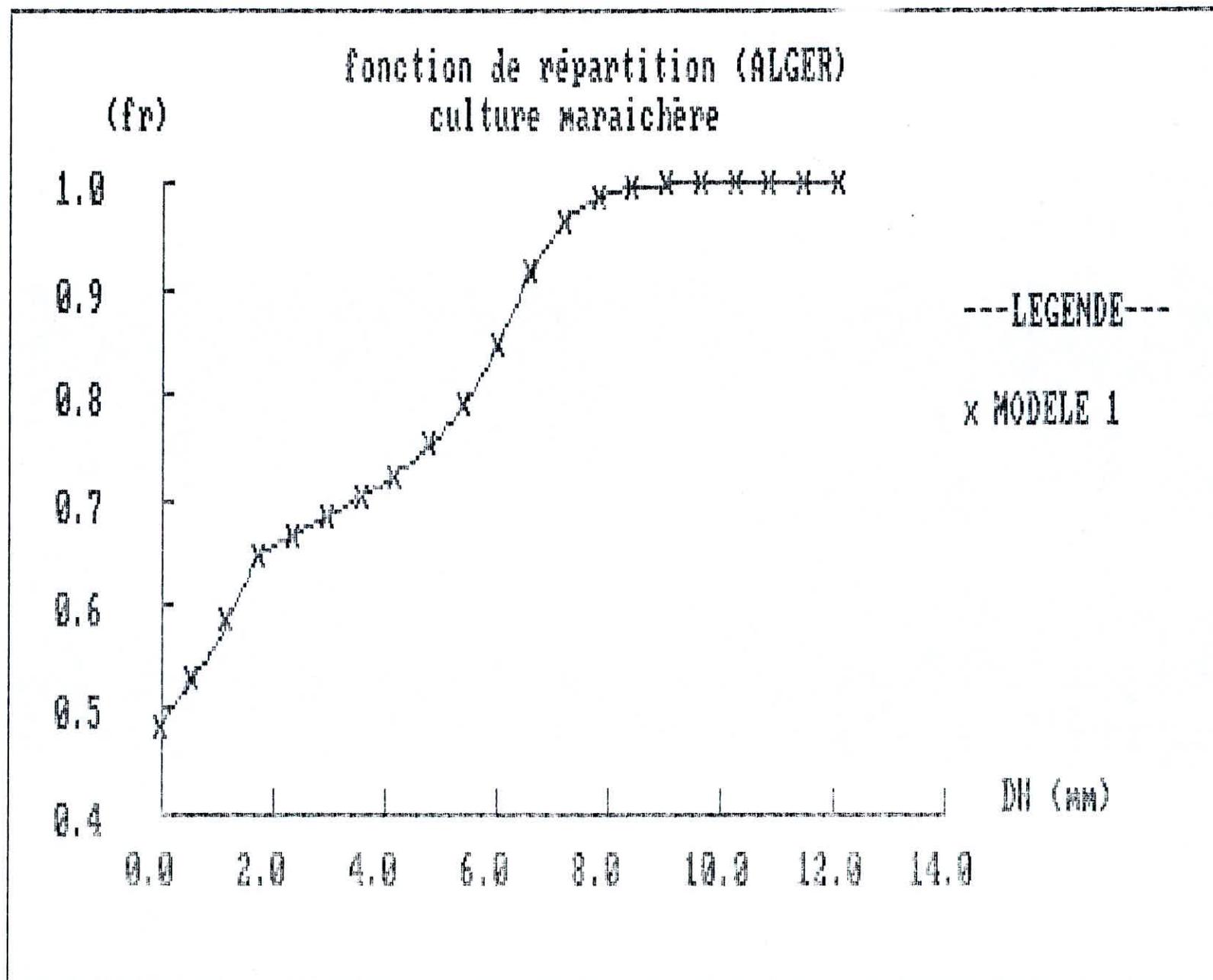




ANNEXE 3'

fonction de repartition (ALGER)
culture industrielle





ANNEXE 3'

fonction de repartition (ALGER)
culture maraichère

