

C.N.R.S. - P.I.R.E.N.

UNIVERSITÉ DE RENNES I

**OBSERVATOIRE
LE PAYS DE PAIMPONT**

RESPONSABLE : P. TRÉHEN

MODELISATION D'UN ECOSYSTEME

"L'ÉTANG BLEU DE PAIMPONT"

MODELISATION D'UN ECOSYSTEME

"L'ÉTANG BLEU DE PAIMPONT"

Projet M.I.A.G.E. RENNES I

1980-1981

Sous la direction de: Mme Annick PROD'HOMME, I.R.I.S.A. Rennes,
assistée de M. Louis BRETON.

Auteurs : DELTEIL Francis
FAGE Dominique
JOLIVEAU Olivier
VANDENBERGHE Jean

PLAN

I - LE PROJET

- I.1. Le P.I.R.E.N.
- I.2. Objectifs
- I.3. L'étang bleu
 - I.3.1. Eléments géographiques et géologiques
 - I.3.2. Histoire
 - I.3.3. Le pompage

II - L'ECOSYSTEME

- II.1. La méthode d'approche
- II.2. Le système, ses composantes et son environnement
 - II.2.1. Schéma
 - II.2.2. Les éléments du système et les relations qui les lient
 - II.2.3. Localisation des problèmes

III - ANALYSE DES ELEMENTS

- III.1. Introduction
- III.2. Données climatologiques
 - III.2.1. Introduction
 - III.2.2. Les précipitations
 - III.2.3. Les températures
- III.3. L'écran végétation
 - III.3.1. Introduction
 - III.3.2. L'ETP
 - III.3.3. L'ETR
- III.4. Mouvements d'eau en surface
 - III.4.1. Mouvement d'eau en direction de l'étang
 - III.4.2. Mouvement d'eau sortant de l'étang
- III.5. Le transit par la nappe
- III.6. La réserve
- III.7. La production

IV - REALISATION

- IV.1. Introduction
- IV.2. Lois de variations des températures
 - IV.2.1. Introduction
 - IV.2.2. Mise en forme mathématique
- IV.3. Lois de variations des précipitations
 - IV.3.1. Introduction
 - IV.3.2. Détermination du type d'année
 - IV.3.3. Détermination de la hauteur d'eau annuelle
 - IV.3.4. Répartition dans les différents mois de la hauteur d'eau annuelle.

IV.4. Lois d'évolution des échanges par le sous-sol

IV.5. L'évolution de l'étang

V - CONCLUSION

V.1. Résultats

V.2. Limites et critiques

V.3. Remarques générales

VI - ANNEXES

- Sources
 - Courbes
 - Tableau
 - Fichiers utilisés
-

RÉSUMÉ

Fonctionnement dynamique de l'étang bleu

Le fonctionnement de l'Etang bleu de Paimpont a été défini à partir de l'analyse détaillée des éléments suivants:

- précipitations (flux entrant)
- la réserve de l'étang
- le pompage (flux sortant)
- les échanges par le sous-sol (flux mixte).

LES DIFFERENTS TYPES D'ECHANGES

- Les précipitations: les précipitations qui intéressent directement l'étang sont celles qui s'appliquent à un bassin versant d'une surface de 1km^2 , auxquelles on retranche l'évapotranspiration réelle de la végétation (appliquées à la même surface).

N.B.: 1) l'eau tombée sur cette surface à un instant t ne rentrera dans l'étang qu'après un temps de transit dans le sol évalué à 2 mois;
2) dans le cas où l'évapotranspiration est supérieure aux précipitations, les rentrées d'eau par cette voie sont nulles.

- L'évapotranspiration: D'après la formule de Thornthwaite, l'évapotranspiration potentielle des plantes ne dépend que de la température. L'évapotranspiration réelle dépend de la réserve utile du sol et du déficit cumulé des précipitations, le déficit mensuel étant obtenu par différence entre précipitations et évapotranspiration potentielle.

- La production (pompage).

- Les échanges par le sous-sol: il apparaît que les échanges par le sous-sol sont fonction du terme $(P-ETR) * S$, où P = précipitations) avec transit
ETR = évapotranspiration réelle) = 2 mois
 S = surface du bassin versant.

Observations sur 35 mois (janvier 77 à novembre 79):

- . Si $(P-ETR) < 0$, il y a échange dans le sens: sous-sol ---> étang
- . Si $(P-ETR) > 0$, il y a échange dans le sens: étang ---> nappe; dans ce dernier cas, l'échange est fonction croissante de $(P-ETR)$.
- . L'échange s'effectue dans le sens étang ---> nappe au cours du premier semestre et dans le sens nappe ---> étang au cours du second semestre.

Bilan : $\Delta V_T = (P-ETR)_{T-2} * S + Q_T + Ess_T$

SUMMARY

Dynamic functioning of the "Etang bleu" in Broceliande forest

The functioning of the "Etang bleu" at Paimpont was defined by the detailed analysis of the following elements:

- precipitations (inflow)
- the pond
- the production (outflow)
- the underground exchanges (outflow and inflow).

THE DIFFERENT TYPES OF EXCHANGES

- Precipitations: the precipitations that rightly concern the pond are those which can be applied on a watershed which surface is about 1km²; the vegetation transpiration applied on a same surface must be cut off the precipitations.

N.B.: 1) so the water that falls on this surface at a moment t will flow into the pond after a delay estimated at 2 months;

2) if the transpiration is bigger than the precipitations, there is no water coming in that way.

- Transpiration: According to Thornthwaite, the potential transpiration of the vegetation only depends on the useful ground water storage and the precipitation accumulate deficit, the monthly deficit is given by difference between precipitations and potential transpiration.

- Production

- Underground exchanges: It appears that the underground exchanges are function of the expression $(P-ETR) * S$, where P = precipitations) with a delay
ETR = real transpiration) of 2 months
S = surface of the watershed.

Observations during 35 months (january 77 to november 79):

- . If $(P-ETR) < 0$, there is an exchange in the way underground ---> pond
- . If $(P-ETR) \geq 0$, there is an exchange in the way pond ---> underground; in this last case, the exchange is an increasing function of $(P-ETR)$.
- . The exchange is made in the way pond ---> sheet of water during the first half-year and in the way sheet of water ---> pond during the last half-year of the year.

We'll try to stimulate this schedule:

$$\Delta V_T = (P-ETR)_{T-2} * S + Q_T + Ess_T$$

REMERCIEMENTS

Cette étude n'aurait pu être entreprise et menée à bien sans:

- M. Paul TREHEN et les Personnels de la Station Biologique de Paimpont,*
- Mme le Maire et le Personnel municipal de Paimpont,*
- toutes les personnes ou organismes que nous citons dans nos sources d'information,*

ainsi que ceux qui, sans pouvoir nous fournir d'information, ont bien voulu nous recevoir et distraire de leur temps pour nous écouter ou nous conseiller.

I. LE PROJET

I.1. Le P.I.R.E.N.

Le Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l'Environnement (PIREN), programme du C.N.R.S., se subdivise en différents groupes d'études définis par rapport à des thèmes précis comme l'eau, la végétation... La Station Biologique de Paimpont, qui constitue une antenne de ce programme, cherche à analyser les phénomènes biologiques, climatiques, géologiques et humains de la région. Ce travail de longue haleine peut mener à une modélisation globale du système constitué par la haute forêt de Paimpont.

I.2. Les objectifs

Monsieur Tréhen, Directeur de recherche et responsable de la Station Biologique de Paimpont, nous a proposé d'amorcer cette modélisation sur un système beaucoup plus restreint, "l'étang bleu de Paimpont". Les diverses questions auxquelles nous devons répondre peuvent s'énoncer comme suit:

- 1) analyse des phénomènes expliquant le fonctionnement de l'étang;
- 2) mesure de l'impact des pompages sur le fonctionnement de l'étang et par suite détermination des volumes pompables;
- 3) mise en évidence de phénomènes pouvant être développés dans l'étude de la haute forêt.

I.3. L'étang bleu

I.3.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE ET ELEMENTS GEOLOGIQUES

L'étang bleu est situé à 1,5km au nord du village de Paimpont, sur la route de la Ville Danet. Il fait partie intégrante de la zone forestière. A 160 mètres d'altitude, il subit un climat identique à celui de Paimpont (point de saisie des données météorologiques). Nettement moins étendu que l'étang de Paimpont, il ne dépasse pas 4 hectares au plus haut niveau.

Quant à l'aspect géologique, l'étang bleu a été creusé à l'intérieur d'une cuvette de grès bordée de schistes rouges. Le fond de cette cuvette est recouvert d'une couche argilo-limoneuse (pliocène).

I.3.2. HISTOIRE

"Dès 1663, les minières de la Prée, de la Gelée et du Grand Minerai occupées aujourd'hui par des étangs, alimentaient les fourneaux de Paimpont.

Etang Bleu & communes appartenant au réseau
(encadrées)



Ces exploitations furent successivement abandonnées, puis reprises en 1825, 1869 et 1900. Celles situées à 1500 mètres au nord de Paimpont furent définitivement abandonnées en 1908".

In "La sidérurgie armoricaine", Léon Puzenat (1939)

Dès l'arrêt de l'exploitation, la mine s'est remplie et a donné naissance à l'Etang bleu (qualificatif expliqué par la couleur de l'eau, liée à la nature même des roches). En 1972, le syndicat intercommunal des Eaux (lié à la CFCE, cf. sources) ont acheté cette réserve afin d'installer un réseau de distribution en eau potable.

I.3.3. LE POMPAGE

Le réseau installé à partir de l'étang bleu s'est progressivement étendu et alimente aujourd'hui 12 communes: Paimpont, Plélan-le-Grand, Saint Malon sur Mel, Saint Péran, Saint Thurial, Treffendel, Monterfil (approvisionnement partiel), Maure de Bretagne (approvisionnement partiel), Maxent, Loutehel, Iffendic, Campel.

Le niveau de l'étang bleu a subi une chute impressionnante en 1976 et 1979; la sécheresse de ces années n'a fait qu'amplifier les effets d'un pompage trop important (12 communes). D'ailleurs, dès 1977, l'étang bleu a dû être soulagé par le forage de Concoret (station de reprise 250m³/j); puis en août 1980, par le forage de la Ville Danet (600m³/j). L'eau de la réserve est d'une qualité remarquable, ainsi que le prouvent les résultats de l'analyse du 18 février 1981 effectuée par la DDA: l'eau est légèrement acide, peu minéralisée; elle contient de l'oxyde ferrique à l'origine de sa couleur et des déchets organiques.

oxygène	12,0mg/l
pH	6,25
Cations (+)	0,7 meg/l.
Anions (-)	0,82 meg/l.
Phénols	< 50 µg/l.

II. L'ÉCOSYSTÈME

II.1. La méthode d'approche

Le système est caractérisé par:

- un flux entrant au moins (précipitations)
- une réserve (l'étang)
- un flux sortant au moins (pompage).

Pour un tel problème, la méthode la plus appropriée est la dynamique des systèmes de Forrester (phénomène continu, variables d'état, variables de flux).

Cette méthode permettra de bâtir un modèle qui autorisera la simulation du fonctionnement de l'étang.

II.2. Le système, ses composantes et son environnement

II.2.1. SCHEMA (cf. page suivante)

II.2.2. LES ELEMENTS DU SYSTEME ET LES RELATIONS QUI LES LIENT

Plusieurs éléments interviennent dans ce système et leurs interactions régissent son fonctionnement:

- Précipitations

- Température

- Ecran de végétation: la végétation joue le rôle d'un filtre en retenant, puis en rejetant dans l'atmosphère une partie des précipitations. Cette partie peut se calculer; c'est l'évapotranspiration réelle, fonction des caractéristiques de la végétation, du sol, du climat (ensoleillement, vent, etc...). Seule, l'autre partie des précipitations est susceptible d'atteindre l'étang.

- Les eaux en surface du sol: Les précipitations (évapotranspiration retranchée) atteignent l'étang par ruissellement ou infiltration de surface. Toutefois, le ruissellement et l'infiltration ne peuvent expliquer totalement les variations importantes du volume de l'étang. Il est donc logique d'imaginer que ces précipitations (moins évapo réelle) transitent également par une nappe.

- La nappe: Il s'agit ici d'une réserve d'eau en sous-sol qui ne correspond pas forcément à la définition d'une nappe phréatique. L'influence de cette nappe sur l'étang reste difficile à mesurer puisque l'on ne connaît ni sa taille ni ses alimentations. Les flux "nappe-étang" (positifs ou négatifs) constituent ce que l'on appelle les échanges par le sous-sol.

- L'étang: C'est l'élément majeur du système dont on veut expliquer le fonctionnement; nous le caractérisons par son niveau, mesuré, selon la méthode adoptée par le syndicat des eaux, à partir du niveau supérieur de la passerelle de pompage (c'est une mesure différentielle). Il est bon d'introduire un niveau critique de l'étang correspondant à l'état d'équilibre avant débordement.

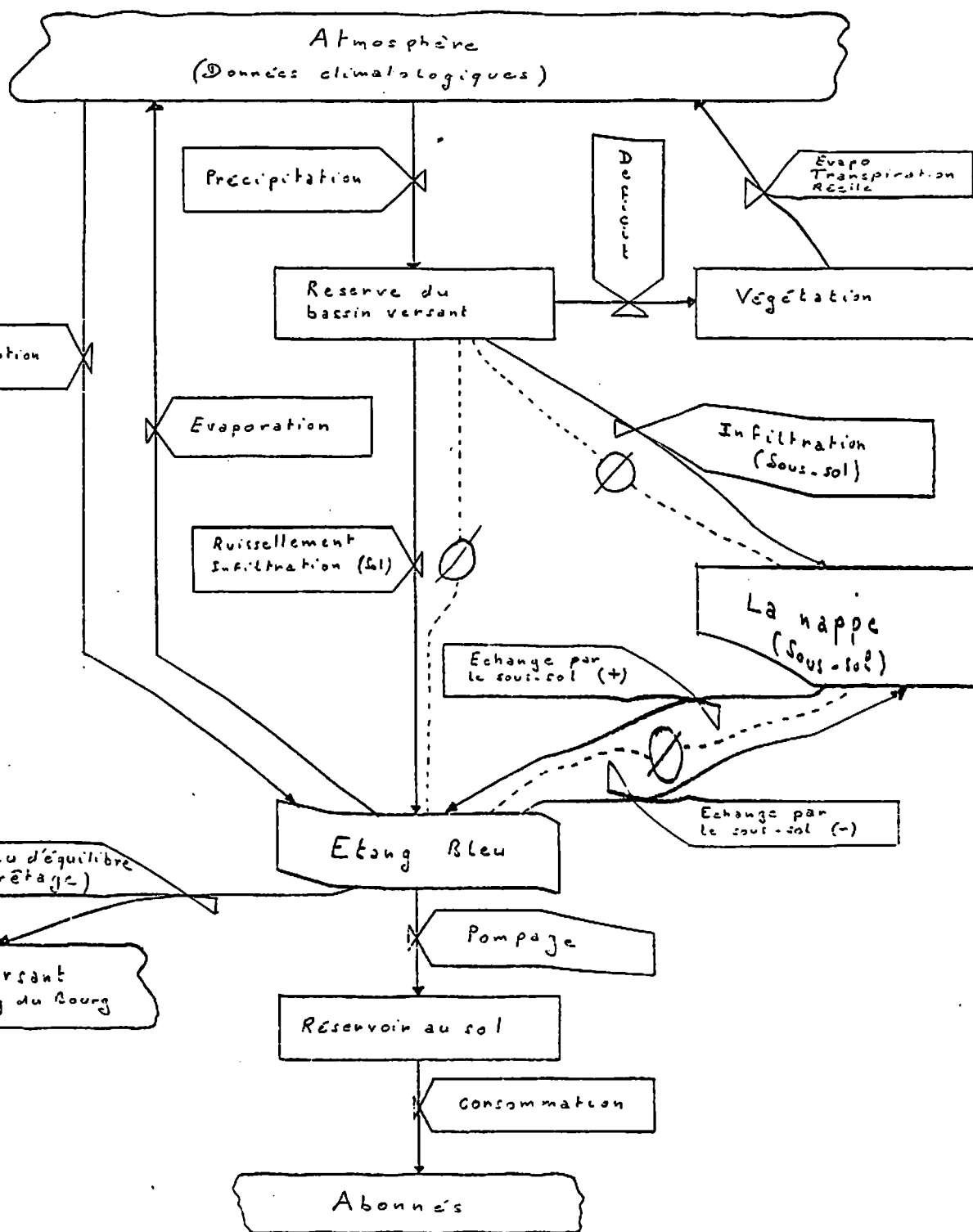
- Arrivée directe des précipitations sur l'étang: La surface de l'étang peut être considérée comme négligeable devant celle du bassin versant. Les précipitations et l'évaporation directe concernant l'étang seront prises en compte dans le problème des eaux en surface du sol.

- Le réseau de distribution: Il représente le support du flux de sortie et est caractérisé par le volume d'eau pompé par le syndicat des eaux.

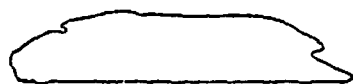
Trois approches différentes permettent d'expliquer le fonctionnement du système:

* approche n° 1 : il s'agit uniquement d'un phénomène de surface (il n'existe pas de relations avec une nappe).

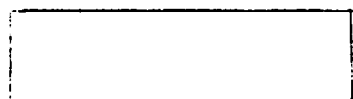
* approche n° 2 : la nappe existe mais s'alimente pour une grande partie sur une surface autre que celle du bassin versant. Donc 1) précipitations-évapotranspiration appliquées au bassin versant vont directement dans l'étang moyennant un temps de réponse, 2) une autre relation devra être considérée



Le système : L'étang Bleu et son environnement



Interface avec
un autre système



Niveau caractérisant
l'état d'un élément
du système



Taux
(Commande de flux entre
deux niveaux)



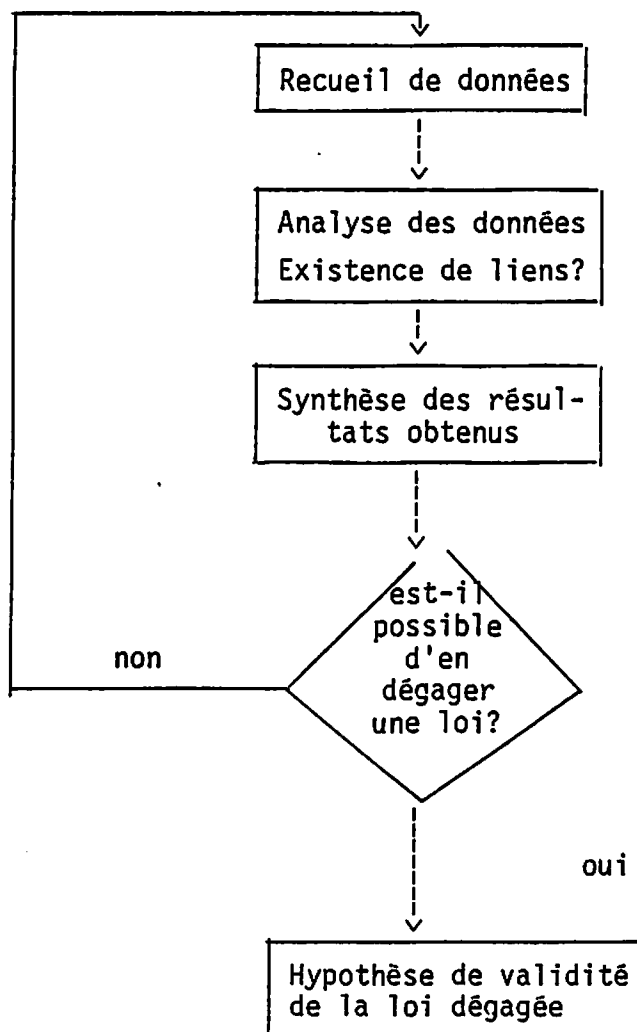
Délais agissant sur
un flux

- 1- Données climatologiques: ---> analyse des données passées
 ---> simulation des données à venir
- 2- Ecran de végétation : ---> évapotranspiration potentielle ETP
 ---> évapotranspiration réelle ETR
- 3- Mouvement d'eau en surface : ---> bassin versant
 ---> niveau d'équilibre de l'étang
- 4- Le transit par la nappe
- 5- Etude de l'étang
- 6- Le pompage (production).

III. ANALYSE DES ÉLÉMENTS

III.1. Introduction

Les éléments précédemment définis vont faire l'objet d'une analyse détaillée, suivant le schéma suivant:



Remarque: Cette dernière hypothèse sera testée dans la partie: "Etude des résultats".

III.2. Données climatologiques

III.2.1. INTRODUCTION

Les précipitations constituent le flux entrant le plus évident. Cependant, les plantes en absorbent une partie et il est nécessaire d'étudier les températures pour connaître leurs besoins en eau.

III.2.2. LES PRECIPITATIONS

La Météorologie Nationale (cf. sources) a pu nous fournir les données suivantes:

- précipitations mensuelles à Plélan-le-Grand de 1951 à 1979
- précipitations mensuelles à Paimpont de 1974 à 1979.

Les premières données recouvrent 29 années et nous ont permis d'établir une classification des années et des mois de précipitations, en utilisant l'algorithme de la vraisemblance des liens (cf. pages suivantes).

Cette classification dégage 3 types d'années; il y a alors 13 années de type 1, 8 années de type 2, et 8 années de type 3.

Les données relatives à Paimpont nous permettent d'étudier de façon détaillée la valeur des échanges entre l'atmosphère et l'étang, sur un nombre d'années relativement faible.

III.2.3. LES TEMPERATURES

Les températures ont été observées à Paimpont de 1959 à 1980. Toutefois, beaucoup de données manquent et seules les années comprises entre 1974 et 1979 sont directement exploitables.

Nous en ferons l'analyse mois par mois à partir des températures moyennes.

Remarque: la température moyenne d'un mois est obtenue à partir des températures minimale et maximale du mois.

III.3. L'écran de végétation

III.3.1. INTRODUCTION

Une partie des précipitations est absorbée par la végétation, qui la rejette dans l'atmosphère: ce phénomène est appelé évapotranspiration.

On distingue l'évapotranspiration potentielle, qui représente les besoins en eau des plantes, et l'évapotranspiration réelle, qui représente la part de ces besoins effectivement satisfaite.

CLASSIFICATION DES ANNEES DE PRECIPITATION DE PLELAN DE 1951 A 1979

Year	Age	Sex	Weight (kg)	Length (cm)	Condition
1951	> 2	I			
1954	> 1	I			
	> *9	I			
1963	> --*	I			
	>	I			
1952	> --*	I			
	> 10	I			*23
1956	> --*	I			
	>	19	I		
1962	> --*	I	I	I	I
	> 6	I	I	I	I
1965	> --*		21	I	I
	>		I	I	I
1960	> -----*		I	I	I
	>	15	I	I	I
1976	> -----*		I	I	I
	>		I	I	I
1967	> -----*		I	I	I
	>		*20	I	I
1969	> -----*		I	I	I
	>		*14	I	I
1971	> --*	I			27
	> 8	I			I
1975	> --*				I
	>				I
1953	> --*				I
	> 3	I			I
1973	> --* *12	I			I
	>	I			I
1968	> -----*		22	I	I
	>		I	I	I
1959	> -----*		I	I	I
	>	17	I	I	I
1961	> --*	I			24
	> 5	I			I
1966	> --*				I
	>				I
1964	> --*				28
	> 1	I			I
1979	> --*				I
	>				I
1955	> -----*				I
	>	13	I		I
1958	> --*	I			I
	> 7	I			I
1970	> --*				I
	>				*26
1957	> --*				I
	> 4	I			I
1977	> --*	16	I		I
	>	I	I		I
1978	> -----* *18	I			I
	>	I			I
1972	> --*	I			I
	> 11	I			I
1974	> --*				I

REPRESENTATION DE L'ARRE

CLASSIFICATION DES MOIS DE PRECIPITATION A TRAVERS 29 ANNEES - PLELAN-

JANVIER	>---*
DECEMBRE	> 5---*
MARS	>---* I
NOVEMBRE	> 3 I
MAI	>---* I
FEVRIER	> 11
JUIN	>---* I
AOUT	> 7 I---
AVRIL	>---* I
JUILLET	> 2 I
SEPTEMBRE	>---* I
OCTOBRE	>---* *8
	> 1
	>-----*

III.3.2. EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE

L'évapotranspiration potentielle des plantes est fonction de nombreux paramètres, tels que l'ensoleillement, l'humidité, les vents, les températures, etc...; elle est très différente d'un type de végétation à un autre, et varie suivant les saisons; c'est ainsi que l'évapotranspiration potentielle des arbres à feuilles caduques est quasiment nulle en hiver.

Plusieurs études ont été menées sur ce sujet et ont donné naissance à diverses formulations; trois d'entre elles nous ont été proposées:

- la formule de Rennman, complexe, qui tient compte de très nombreux paramètres liés au type de végétation et aux conditions météorologiques;
- la formule de Thornthwaite, qui utilise des paramètres faciles à obtenir; elle ne tient pas compte du type de végétation;
- une troisième formule, beaucoup plus approximative.

M. Hue, de la Météorologie nationale, a fait étudier pour nous les résultats comparatifs des diverses formules (cf. graphique page suivante); il ressort de cette étude que les deux premières formules donnent des résultats voisins.

Nous avons donc choisi d'utiliser la formule de Thornthwaite pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle d'un mois i donné:

$$ETP_i = (10 * T_i / I_A)^A * 16 * K_i \quad , \text{ où:}$$

ETP_i = évapotranspiration potentielle du mois i ;

T_i = température moyenne du mois i ;

I_A = indice thermique annuel.

$$I_A = \sum_{i=1}^{12} I_M, \text{ où } I_M, \text{ indice thermique mensuel, a pour valeur:}$$

$$I_M = (T_i / 5)^{1,514}$$

K = coefficient de durée moyenne mensuelle d'illumination (cf. valeurs page suivante);

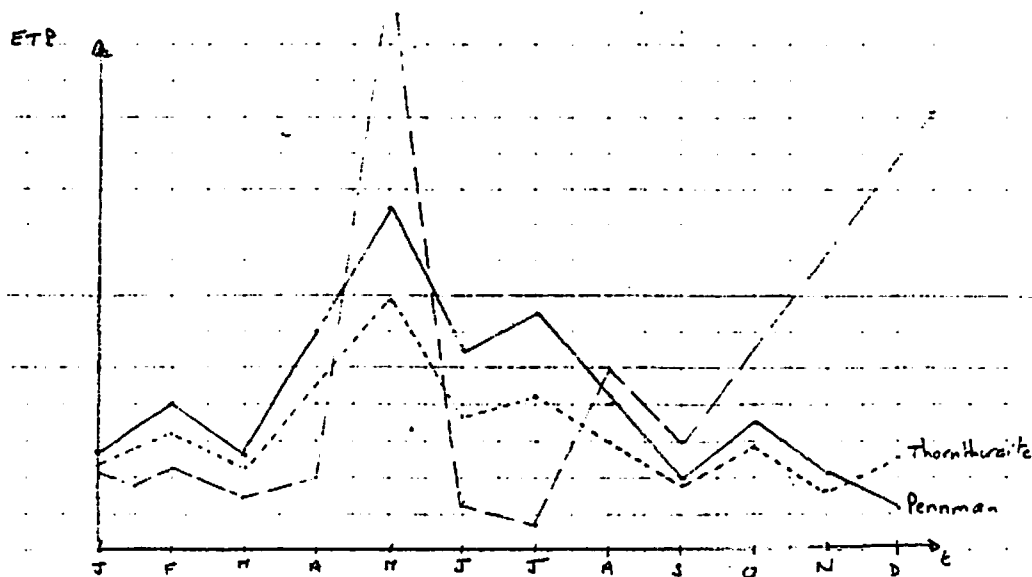
A est une fonction de I_A : $A = 6,75 \cdot 10^{-7} I_A^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I_A^2 + 1,792 \cdot 10^{-2} I_A + 9,4323$

III.3.3. EVAPOTRANSPIRATION REELLE

L'évapotranspiration réelle est fonction des précipitations et de la quantité d'eau contenue dans le sol.

Plusieurs cas peuvent se présenter (pour une période de un mois):

- si le sol est saturé, l'évapotranspiration réelle des plantes est égale à l'évapotranspiration potentielle: les plantes peuvent satisfaire leur besoin en eau: $ETR = ETP$
- si le sol n'est pas saturé:
 - . si le bilan de précipitations du mois est positif, il y a encore l'égalité: $ETR = ETP$;
 - . si le bilan est négatif, l'évapotranspiration réelle est fonction des précipitations et des réserves utiles initiale et finale du sol.



Résultats comparatifs des différentes formules de calcul
de l'évapotranspiration potentielle.

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
K	0,76	0,80	1,02	1,14	1,32	1,33	1,34	1,23	1,05	0,93	0,77	0,72

Coefficient de durée moyenne d'illumination sous 48 degrés de latitude
nord.

Définition : bilan de précipitations = précipitations-évapotranspiration potentielle.

Voir détail des calculs page suivante.

Etat initial du sol (i-1)	Bilan mm	DFP _i mm	RU _i mm	ETR _i mm
saturé	≥ 0 < 0	DFP _{i-1} - Bilan (mise à zéro si DFP _i < 0)	$e - \frac{RP}{0,98}$	ETP _i
non saturé	< 0			P _i + RU _{i-1} - RU _i
	≥ 0	- 0,98 RP $\text{Log}\left(\frac{RU_i}{RP}\right)$	RU _{i-1} + Bilan	ETP _i

CALCUL DE L'EVAPOTRANSPIRATION REELLE

Notations:

DFP_i = déficit cumulé de précipitations au mois i

RU_i = réserve utile du sol au mois i

RP = réserve potentielle du sol

ETP_i = évapotranspiration potentielle du mois i

ETR_i = évapotranspiration réelle du mois i.

Calcul de la réserve potentielle:

Réserve potentielle = $\frac{\text{volume d'eau dans le sol saturé}}{\text{surface du bassin versant}}$

Densité du sol en surface = 1,3g/cm³

Profondeur à considérer = 1m

Réserve en eau = 18g d'eau pour 100g de sol.

Surface du bassin versant = 1km²

Le sol sera donc saturé pour une hauteur de précipitations de 234mm.

III.4. Mouvements d'eau en surface

III.4.1. EN DIRECTION DE L'ETANG

Par hypothèse, les précipitations appliquées au bassin versant (desquelles on a retranché l'évapotranspiration des plantes) alimentent intégralement l'étang.

Avant d'atteindre l'étang, cette eau transite dans le sol pendant une durée évaluée à 2 mois.

Nous sommes donc en présence d'une réserve superficielle, qui peut présenter 2 états: saturée ou non saturée; dans le premier cas, l'eau s'écoule en surface; dans le deuxième, elle rejoindra l'étang après infiltration.

Remarque: La réserve superficielle ainsi définie n'est pas la même que la réserve utile qui a servi au calcul de l'évapotranspiration réelle. En effet, cette dernière ne tient pas compte du délai de transit de l'eau (sol-étang) et du bassin versant et ne représente donc pas l'élément du système que l'on veut décrire.

III.4.2. MOUVEMENTS D'EAU SORTANT DE L'ETANG

Les différents organismes ayant travaillé sur cet étang n'ont jamais constaté l'existence d'un exutoire. Cependant, nous devons considérer celle d'un niveau d'équilibre. Dès que la surface de l'étang dépasse ce niveau, le surplus s'évacue (débordement) et il y a donc création d'un exutoire. Une estimation grossière place le niveau critique à 2,90m de la passerelle, soit au niveau -1 des courbes de niveau.

III.5. Le transit par la nappe

A la suite d'une réunion avec Monsieur Roussel, pédologue, il a été décidé de tester l'hypothèse selon laquelle les échanges par la nappe (Ess) seraient négligeables par rapport aux échanges dus à la réserve du sol $(P-ETR) * S_{bv}$ (cf. approche n° 1, § II.2.2.).

En considérant qu'à deux niveaux égaux de l'étang, l'état du système est identique, nous pouvons calculer à partir des données recueillies entre ces deux instants (quantité pompée, précipitation moins ETR avec temps de réponse), la surface théorique du bassin versant, selon l'égalité suivante:

$$S_{bv \text{ theo}} = \frac{Q}{(P-ETR)}$$

Cette égalité est obtenue à partir de l'équation définie au chapitre II.2.3., en posant: $Ess \approx 0$

$\Delta v \approx 0$, variation globale nulle puisque l'on a deux niveaux identiques.

Après les tests, la surface théorique du bassin versant calculée pour tous les cas de niveaux identiques possibles avait un écart type important et une moyenne incohérente montrant ainsi qu'un autre phénomène intervenait dans le fonctionnement de l'étang. Dès lors, les échanges par la nappe devaient être pris en compte.

Comme il est impossible d'évaluer la taille de la nappe (surface, volume) et de la localiser (ce n'est pas forcément une nappe phréatique classique), on évaluera les échanges par le sous-sol, par différence avec les autres éléments du système.

$$Ess_T = \Delta v_T - (P-ETR)_{T-2} * S_{bv} - Q_T$$

Nous avons ainsi obtenu des valeurs d'Ess sur 3 années. Ces valeurs forment une courbe périodique, les échanges par la nappe étant négatifs les premiers mois de l'année, donc dans le sens étang-nappe et positifs ensuite. Nous avons enfin comparé la courbe des Ess avec celle des mouvements d'eau en surface $((P-ETR) * S_{bv})$. Le résultat montre que les deux types d'échanges

sont liés. En effet, plus l'étang reçoit de l'eau par les mouvements de surface, plus il en rejette par la nappe et réciproquement, mais de toute manière, les échanges naturels, c'est à dire $(P-ETR) * S_{bv} + Ess$, sont toujours positifs globalement.

Les différentes courbes citées sont en annexe.

III.6. La réserve

Le but principal de l'étude est de pouvoir déterminer l'évolution de la réserve.

Celle-ci peut être caractérisée, de façon la plus apparente, par son niveau.

Il est cependant nécessaire d'étudier les différents types d'échange entre la réserve et son environnement en termes de volume, de façon à pouvoir établir une relation directe entre variation de niveau et volume échangé; il nous faut donc impérativement connaître la forme de la réserve.

Notre première démarche fut de chercher à obtenir des plans de l'ancienne mine; nos recherches sont toujours restées infructueuses.

Nous avons donc été amenés à effectuer le sondage de l'étang à un moment où celui-ci était suffisamment haut pour nous permettre d'en connaître la forme dans sa quasi-totalité.

La méthode utilisée fut un sondage par quadrillage: tout d'abord, il fallut jalonner l'étang de façon à localiser sur la carte des points entre lesquels les sondages allaient être effectués.

La mesure de la distance entre les points et leur relevé à la boussole nous ont permis de retracer le contour de l'étang (la carte dont nous disposions datait de 1957) et de localiser les points sur la carte ainsi tracée.

Il nous a alors été possible d'établir les courbes de niveaux, avec un pas de 1 mètre.

La première courbe correspond à un niveau (en-dessous de la passerelle) de 2,9 mètres.

Les valeurs des surfaces de l'étang associées à chaque niveau sont les suivantes: (cf. page suivante)

N° de courbe de niveau	niveau par rapport à la passerelle	surface en hectares
-1	2,9	4,04
0	3,9	2,6
1	4,9	2,34
2	5,9	1,87
3	6,9	1,61
4	7,9	1,32
5	8,9	1,16
6	9,9	1,045
7	10,9	0,75
8	11,9	0,6
9	12,9	0,35
10	13,9	0,16
11	14,9	0,0023

Nous nous intéressons aux variations de niveau d'au moins 5cm; or, nous connaissons les surfaces associées aux niveaux pour des variations de niveau de 1 mètre.

- nous avons calculé les surfaces associées aux niveaux intermédiaires par interpolation linéaire.

- calcul du volume échangé pour chaque variation de niveau:

soit: S_1 la surface de l'étang au niveau N_1

S_2 la surface de l'étang au niveau N_2

ΔV le volume échangé quand l'étang passe du niveau N_1 au niveau N_2 .

$$\Delta V = (N_1 - N_2) * \frac{S_1 + S_2}{2}$$

Remarques:

1) Les niveaux sont mesurés par rapport à la passerelle (niveau 0); de ce fait, plus la valeur du niveau est grande, plus le volume de la réserve est faible.

C'est ce qui explique que ΔV soit du même signe que $N_1 - N_2$; en effet, $\Delta V < 0$ correspond à une diminution du volume de la réserve.

2) Réciproquement, la connaissance de la variation du volume nous permet de connaître la variation de niveau.

III.7. La production

Les données concernant la production de l'étang bleu depuis 1977 nous ont été communiquées par la CFCE (cf. sources).

Remarque: Suite à la baisse du niveau de l'étang en fin 1978 / début 1979, la croissance de la production a été arrêtée. Cependant, cette mesure n'a pas entraîné une remontée durable du niveau de l'étang.



Carte n° 2:

Evaluation de la profondeur
de l'étang bleu.

1/1250

La courbe de niveau 0 correspond à 3,9m par rapport à la passerelle.
La courbe de niveau 0 correspond à 3,9m par rapport à la passerelle

IV - RÉALISATION

IV.1. Introduction

Après avoir analysé les différents éléments qui composent le système, il faut maintenant dégager leurs lois de fonctionnement afin de les simuler sur l'avenir. Une fois ces lois définies, les éléments vont interagir entre eux suivant le schéma ci-après.

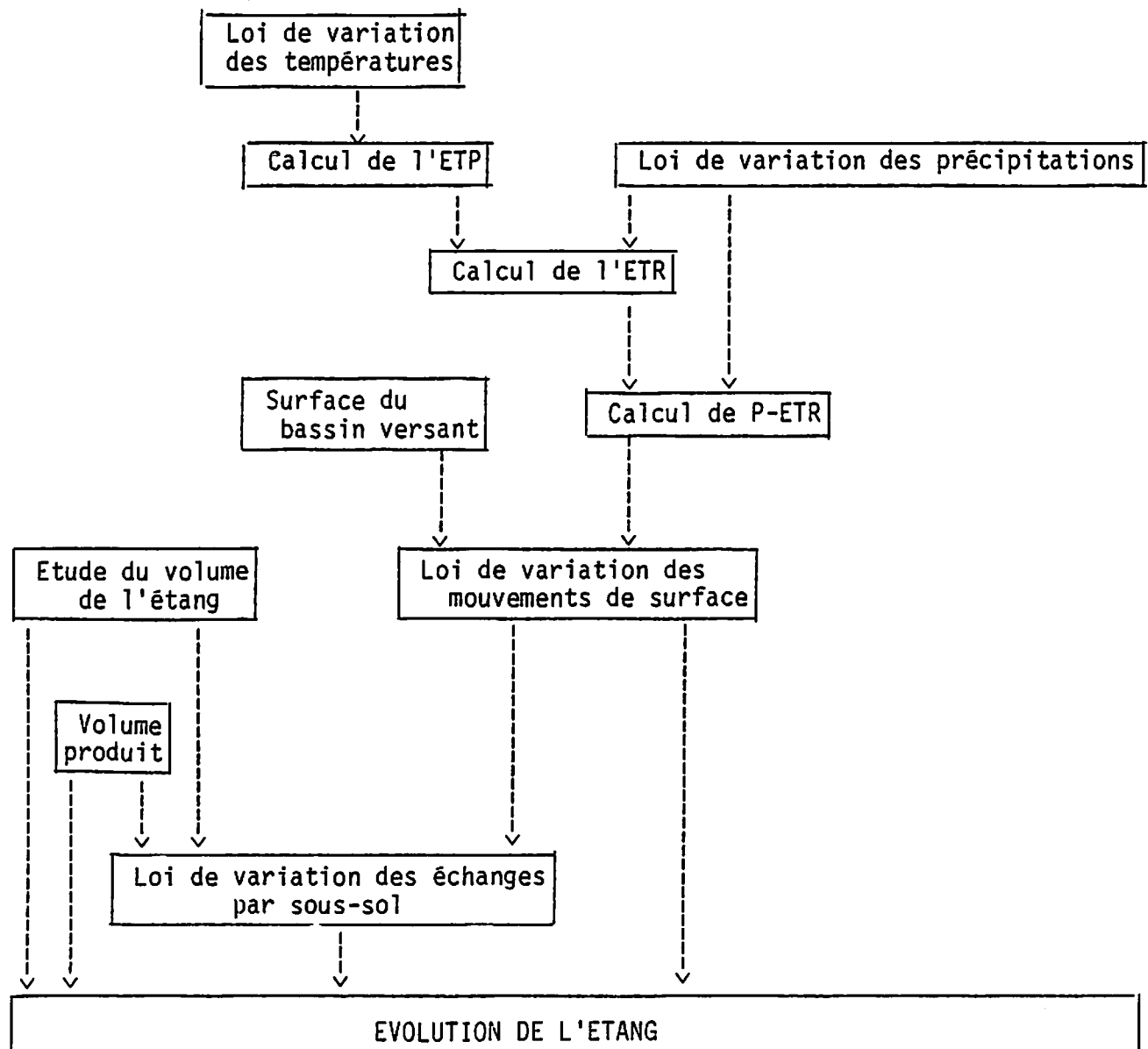


Diagramme de présentation du rôle des lois de variation des différents éléments et de leur interaction dans la détermination de l'évolution de l'étang.

ETP = évapotranspiration potentielle

ETR = évapotranspiration réelle

P = précipitations

Rappel du bilan : $\Delta V_T = (P - ETR)_{T-2} * S + Q_T + Ess_T$

ΔV_T = variation du volume de l'étang pendant la période T

P_T = précipitations de la période T

ETR_T = évapotranspiration réelle pendant la période T

S = surface du bassin versant

Q_T = production de la période T

Ess_T = volume des échanges par le sous-sol au cours de la période T.

IV.2. Lois de variations des températures

IV.2.1. INTRODUCTION

En s'appuyant sur le passé, on regroupe les températures moyennes observées pour chaque mois. On divise la plage des valeurs obtenues en quatre parties, on affecte une probabilité.

Il est nécessaire de déterminer des bornes à notre plage de valeurs en affectant à ces deux parties extrêmes (borne sup, borne min) une probabilité tenant compte du fait que ces valeurs n'ont jamais été observées, c'est à dire inférieur à 1/nb total de valeurs obtenues pour le mois.

IV.2.2. MISE EN FORME MATHEMATIQUE

En utilisant les tableaux ci-après, on peut tracer pour chaque mois une courbe qui permet d'associer à un nombre tiré aléatoirement entre 0 et 100, une température moyenne mensuelle. Chaque plage de valeur est caractérisée par une équation (voir ci-après).

<u>Janvier:</u>	-400 à -183		5%
	-183 à 57	--> 2 <-->	10%
	57 à 297	--> 3 -->	20%
	297 à 537	--> 8 -->	50%
	537 à 777	--> 2 -->	10%
	777 à 1000	-->	5%

<u>Février:</u>	-150	à	23		2,5%
	23	à	224,5	--> 1 <-->	5%
	224,5	à	425,5	--> 4 -->	25%
	425,5	à	626,75	--> 6 -->	40%
	626,75	à	826	--> 4 -->	25%
	826	à	1000	-->	2,5%

<u>Mars:</u>	150	à	433		2,5%
	433	à	537,5	--> 3 <-->	20%
	537,5	à	642	--> 7 -->	45%
	642	à	746,5	--> 2 -->	10%
	746,5	à	851	--> 3 -->	20%
	851	à	1200	-->	2,5%

<u>Avril:</u>	400	à	652		2%
	652	à	758,75	--> 2 <-->	10%
	758,75	à	865,5	--> 3 -->	23%
	865,5	à	972,25	--> 5 -->	40%
	972,25	à	1079	--> 3 -->	23%
	1079	à	1200	-->	2%

<u>Mai :</u>	800 à 987			5%
	987 à 1085	--> 4	↗	25%
	1085 à 1183	--> 1	-->	5%
	1183 à 1281	--> 6	-->	50%
	1281 à 1379	--> 2	-->	10%
	1379 à 1500		↘	5%

<u>Juin:</u>	1100 à 1330			2,5%
	1330 à 1508,5	--> 9	↗	70%
	1508,5 à 1687	--> 3	-->	20%
	1687 à 1865,5	--> 0	-->	2,5%
	1865,5 à 2044	--> 1	-->	2,5%
	2044 à 2200		↘	2,5%

<u>Juillet:</u>	1300 à 1471			2,5%
	1471 à 1674	--> 9	-->	60%
	1674 à 1877	--> 4	-->	25%
	1877 à 2080	--> 1	-->	5%
	2080 à 2283	--> 1	-->	5%
	2283 à 2500		↘	2,5%

<u>Août:</u>	1300 à 1472			2,5%
	1472 à 1647,75	--> 8	↗	60%
	1647,75 à 1819,5	--> 3	-->	20%
	1819,5 à 1993,25	--> 1	-->	5%
	1993,25 à 2167	--> 2	-->	10%
	2167 à 2300		↘	2,5%

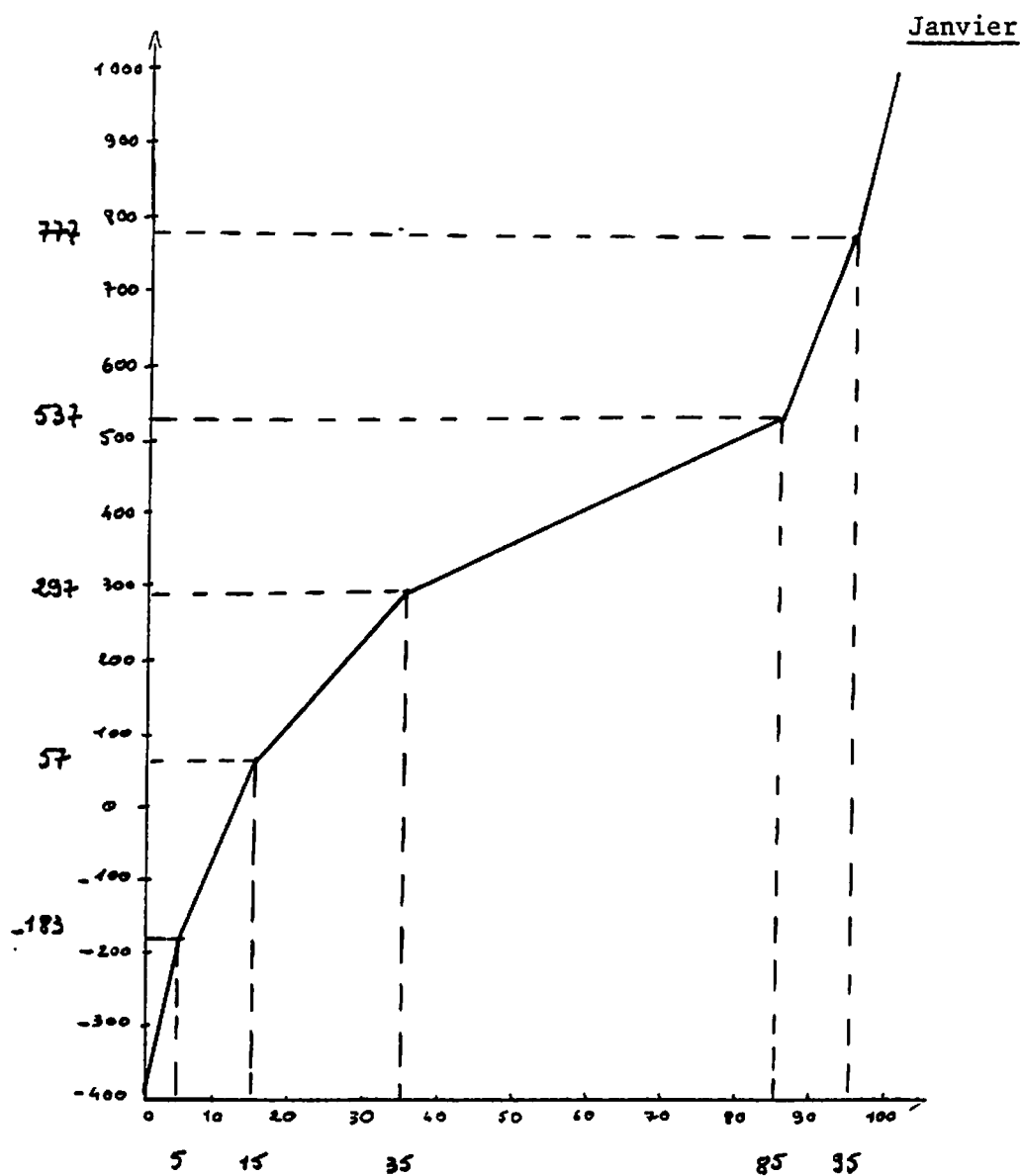
<u>Septembre:</u>	1200 à 1317			5%
	1317 à 1450	--> 8	↗	50%
	1450 à 1583	--> 3	-->	20%
	1583 à 1796	--> 2	-->	10%
	1796 à 1849	--> 2	-->	10%
	1849 à 2000		↘	5%

<u>Octobre:</u>	700 à 804			2,5%
	804 à 922,5	--> 1	↗	5%
	922,5 à 1041	--> 2	-->	10%
	1041 à 1159,5	--> 8	-->	60%
	1159,5 à 1278	--> 3	-->	20%
	1278 à 1400		↘	2,5%

<u>Novembre:</u>	500 à 607			5%
	607 à 675	--> 5	↗	30%
	675 à 743	--> 2	-->	15%
	743 à 811	--> 5	-->	30%
	811 à 879	--> 2	-->	15%
	879 à 1000		↘	5%

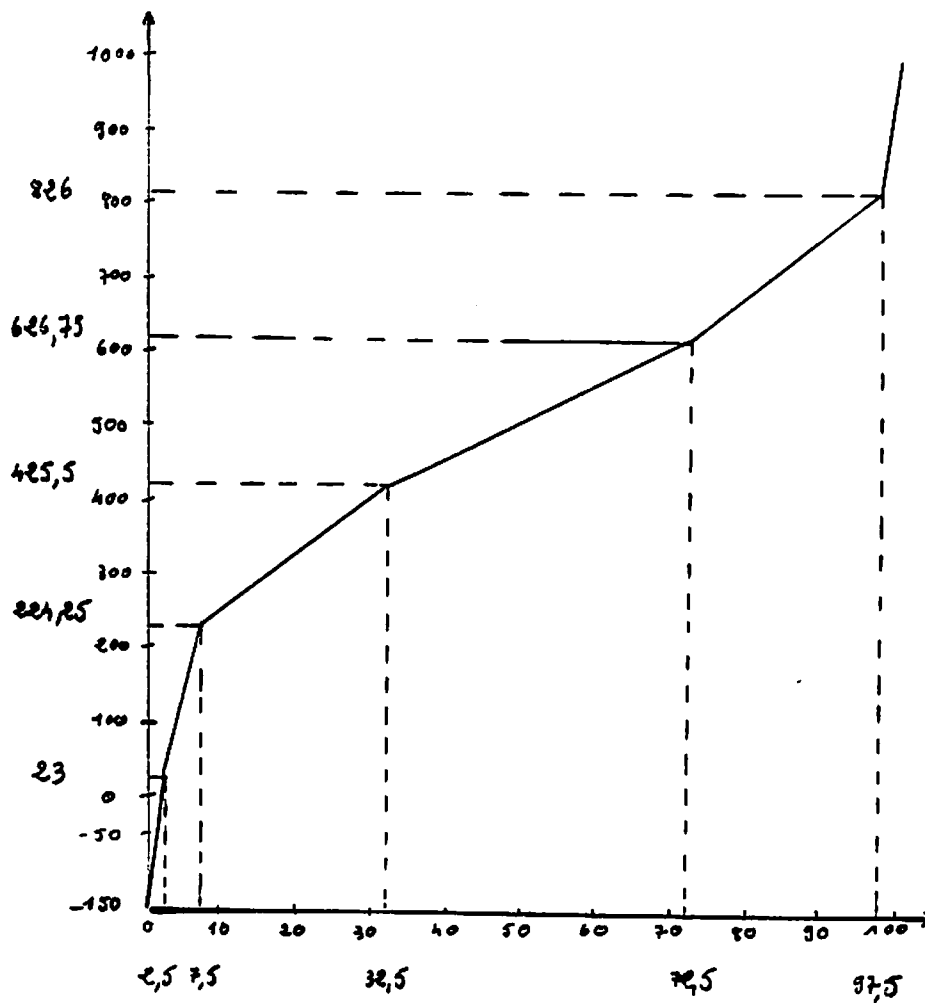
<u>Décembre:</u>	100 à 291			5%
	291 à 424,5	--> 5	↗	30%
	424,5 à 558	--> 3	-->	20%
	558 à 691,5	--> 5	-->	30%
	691,5 à 825	--> 1	-->	10%
	825 à 900		↘	5%

DETERMINATION DES TEMPERATURES MOYENNES MENSUELLES



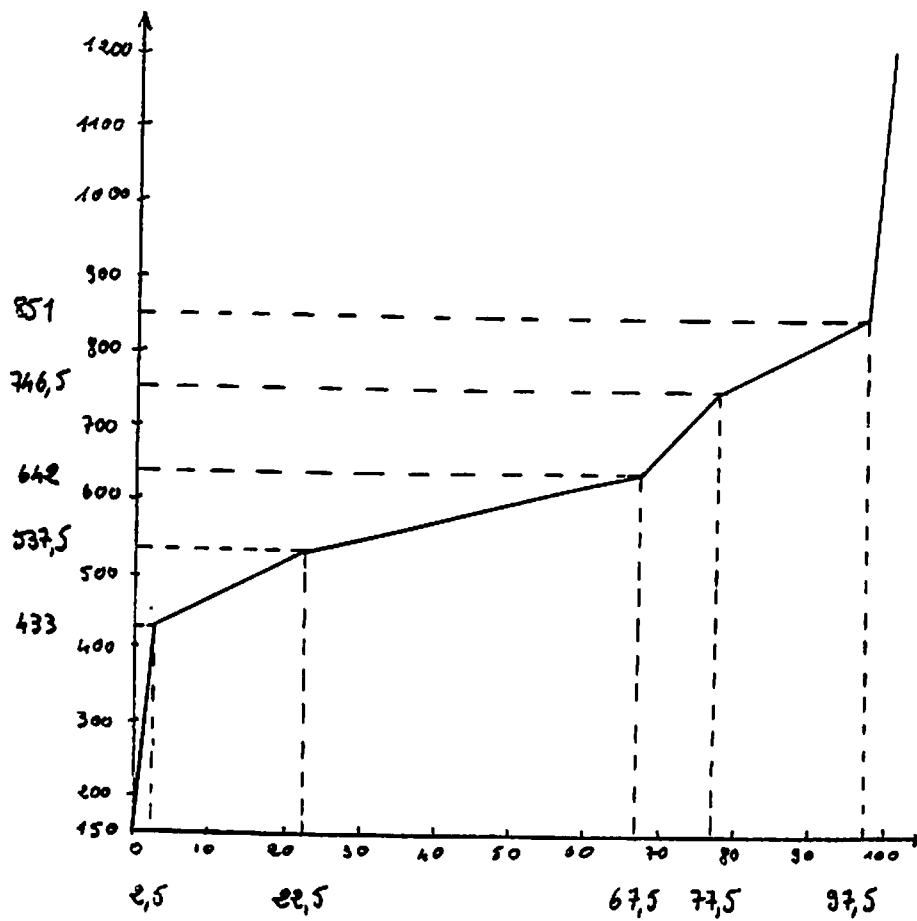
$$\begin{aligned}
 x \leq 5 & \quad y = \frac{217}{5}x - 400 \\
 5 < x \leq 15 & \quad y = 24x - 303 \\
 15 < x \leq 35 & \quad y = 12x - 123 \\
 35 < x \leq 85 & \quad y = 4,8x + 129 \\
 85 < x \leq 95 & \quad y = 24x - 1503 \\
 95 < x \leq 100 & \quad y = 44,6x - 3460
 \end{aligned}$$

Février



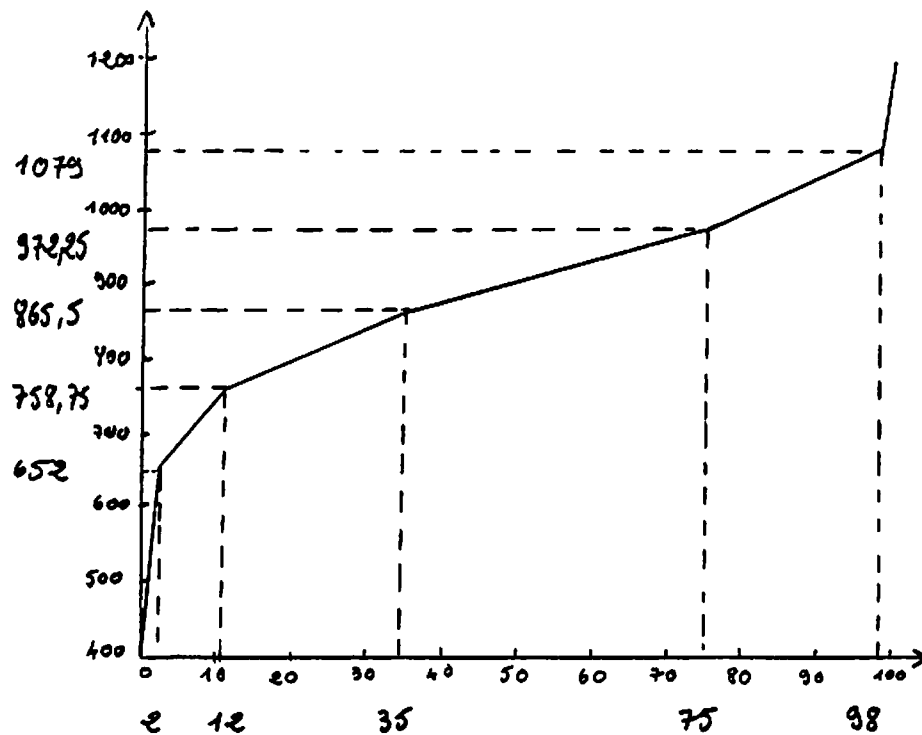
$$\begin{array}{ll}
 x \leq 2,5 & y = 69,2x - 150 \\
 2,5 < x \leq 7,5 & y = 40,25x - 77,6 \\
 7,5 < x \leq 32,5 & y = 8,06x + 163,53 \\
 32,5 < x \leq 72,5 & y = 5,03x + 261,98 \\
 72,5 < x \leq 97,5 & y = 7,97x + 48,9 \\
 97,5 < x \leq 100 & y = 69x - 5960
 \end{array}$$

Mars



$$\begin{array}{ll}
 x \leq 2,5 & y = 113,2x + 150 \\
 2,5 < x \leq 22,5 & y = 5,225x + 420 \\
 22,5 < x \leq 67,5 & y = 1,6x + 533,5 \\
 67,5 < x \leq 77,5 & y = 10,45x - 63,375 \\
 77,5 < x \leq 97,5 & y = 5,25x + 341,56 \\
 97,5 < x \leq 100 & y = 139,6x - 12760
 \end{array}$$

Avril



$$x \leq 2 \quad y = 400 + \frac{252}{2} \cdot x$$

$$2 < x \leq 12 \quad y = \frac{106,75}{10} \cdot x + \left(652 - \frac{106,75}{10} \cdot 2\right)$$

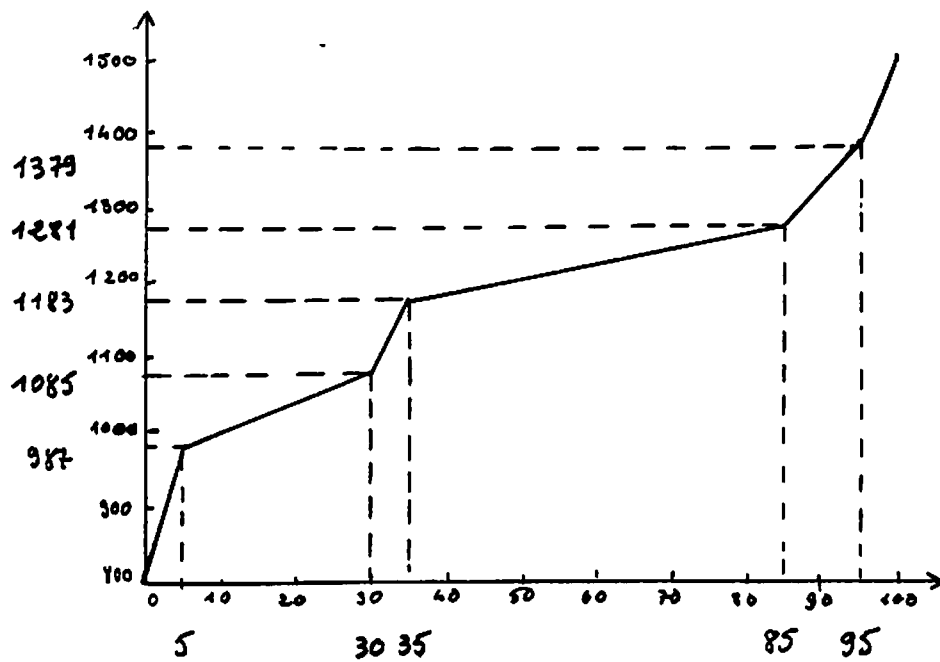
$$12 < x \leq 35 \quad y = \frac{106,75}{23} \cdot x + \left(758,75 - \frac{106,75}{23} \cdot 12\right)$$

$$35 < x \leq 75 \quad y = \frac{106,75}{40} \cdot x + \left(865,5 - \frac{106,75}{40} \cdot 35\right)$$

$$75 < x \leq 98 \quad y = \frac{106,75}{23} \cdot x + \left(972,25 - \frac{106,75}{23} \cdot 75\right)$$

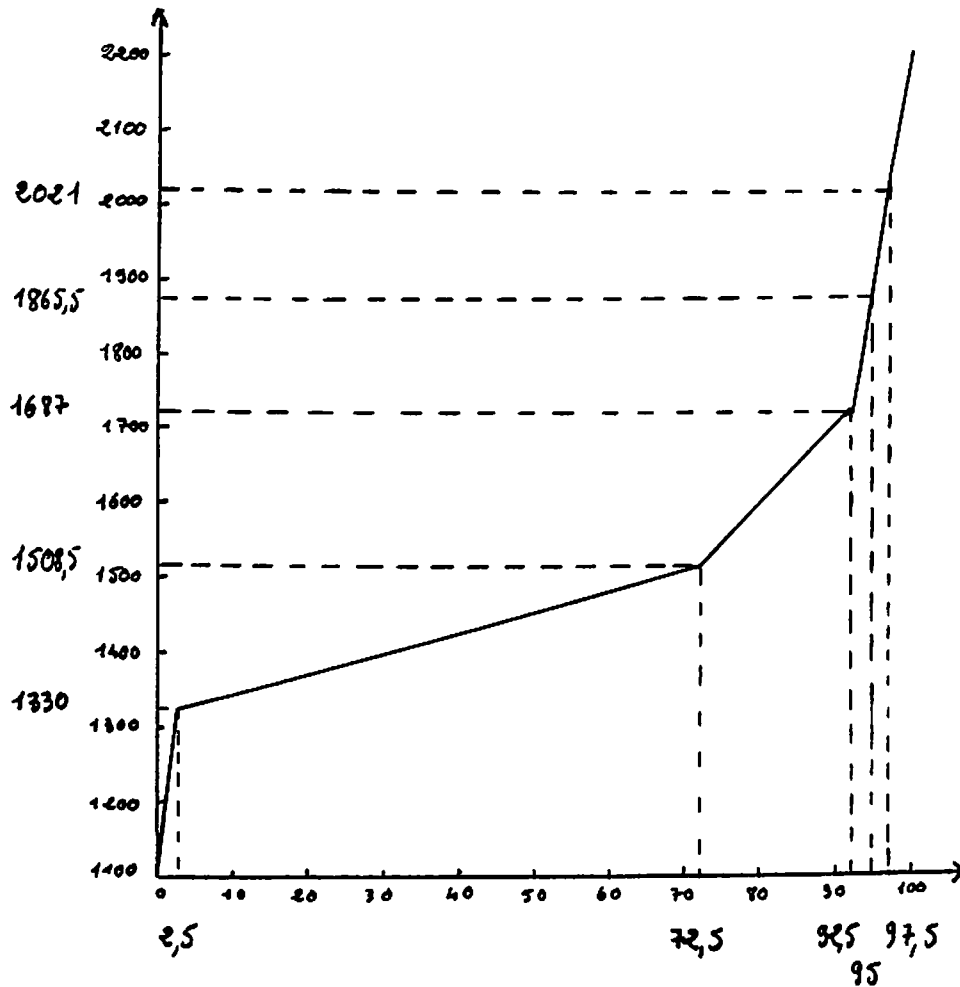
$$92 < x \leq 100 \quad y = \frac{121}{2} \cdot x + \left(1079 - \frac{121}{2} \cdot 98\right)$$

Mai



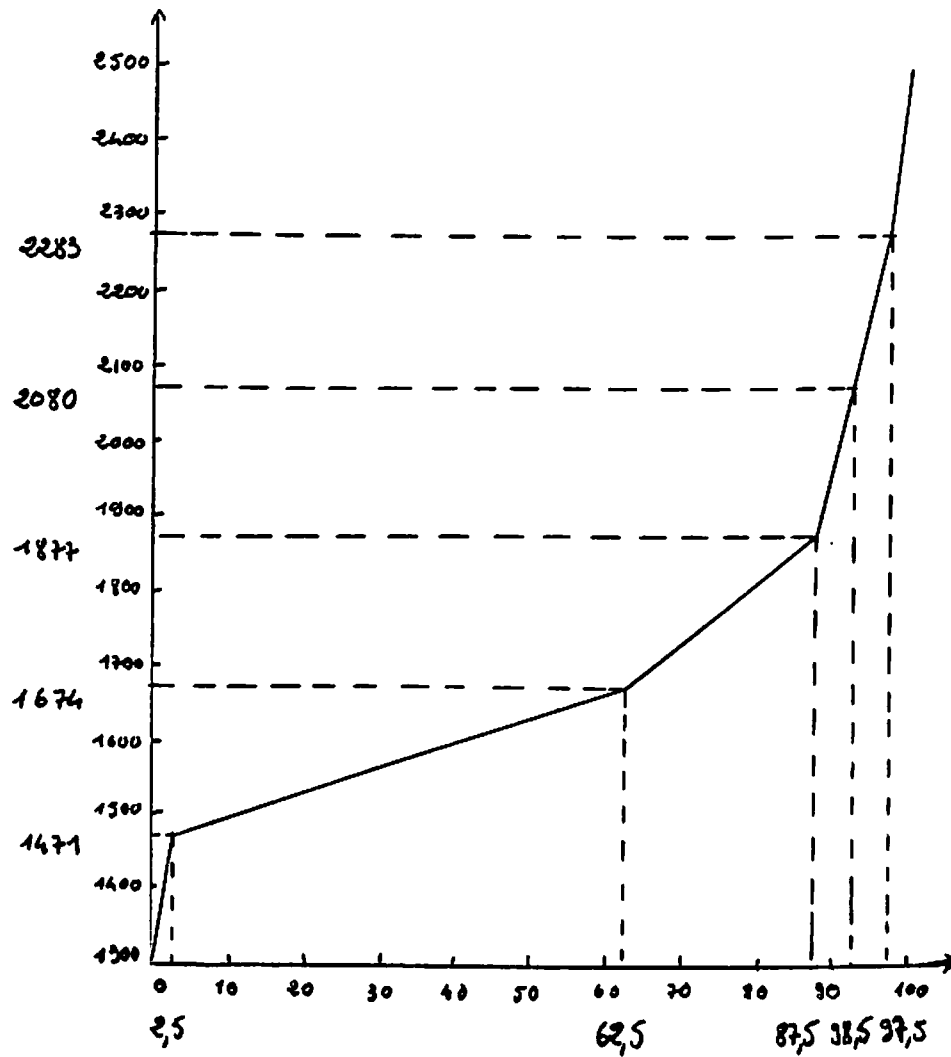
$$\begin{aligned}
 x \leq 5 & \quad y = 37,4x + 800 \\
 5 < x \leq 30 & \quad y = 3,92x + 967,4 \\
 30 < x \leq 35 & \quad y = 19,6x + 497 \\
 35 < x \leq 85 & \quad y = 1,96x + 1114,4 \\
 85 < x \leq 95 & \quad y = 9,8x + 448 \\
 95 < x \leq 100 & \quad y = 24,2x - 920
 \end{aligned}$$

Juin



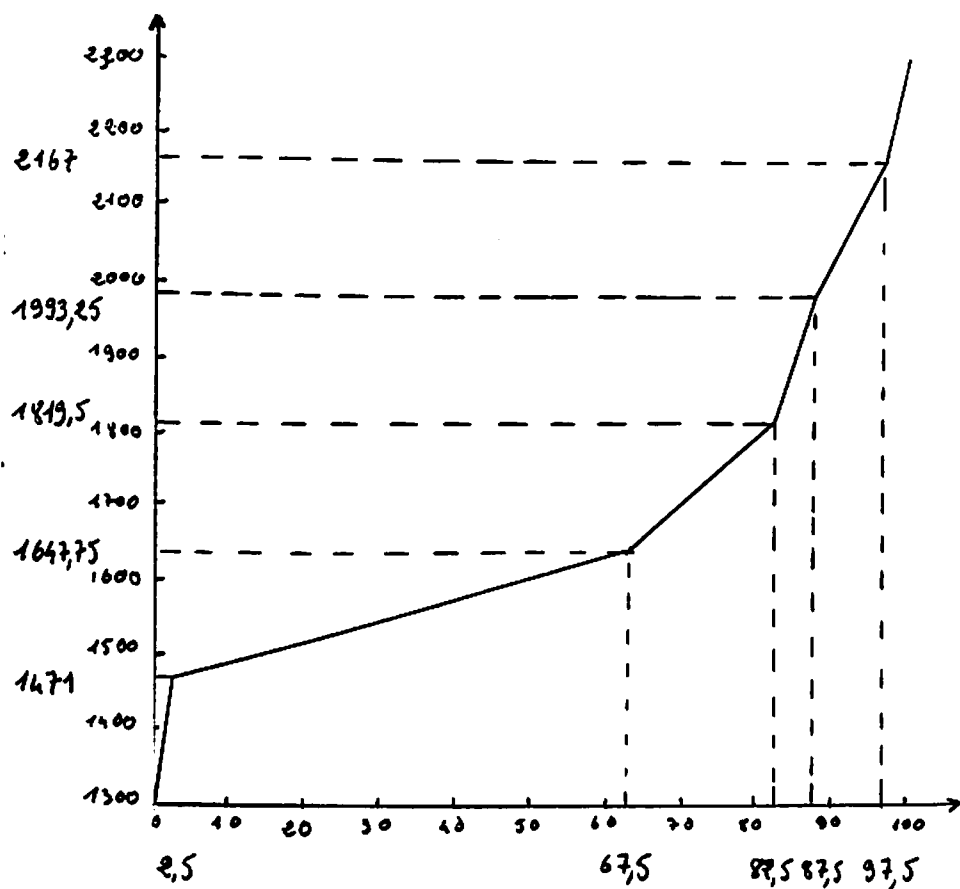
$$\begin{aligned}
 x \leq 2,5 & \quad y = \frac{230}{2,5} \cdot x + 1100 \\
 2,5 < x \leq 72,5 & \quad y = \frac{178,5}{70} \cdot x + \left(1330 - \frac{178,5}{70} \cdot 2,5\right) \\
 72,5 < x \leq 92,5 & \quad y = \frac{178,5}{20} \cdot x + \left(1508,5 - \frac{178,5}{20} \cdot 72,5\right) \\
 92,5 < x \leq 95 & \quad y = \frac{178,5}{2,5} \cdot x + \left(1687 - \frac{178,5}{2,5} \cdot 92,5\right) \\
 95 < x \leq 97,5 & \quad y = \frac{178,5}{2,5} \cdot x + \left(1865,5 - \frac{178,5}{2,5} \cdot 95\right) \\
 97,5 < x \leq 100 & \quad y = \frac{156}{2,5} \cdot x + \left(2044 - \frac{156}{2,5} \cdot 97,5\right)
 \end{aligned}$$

Juillet



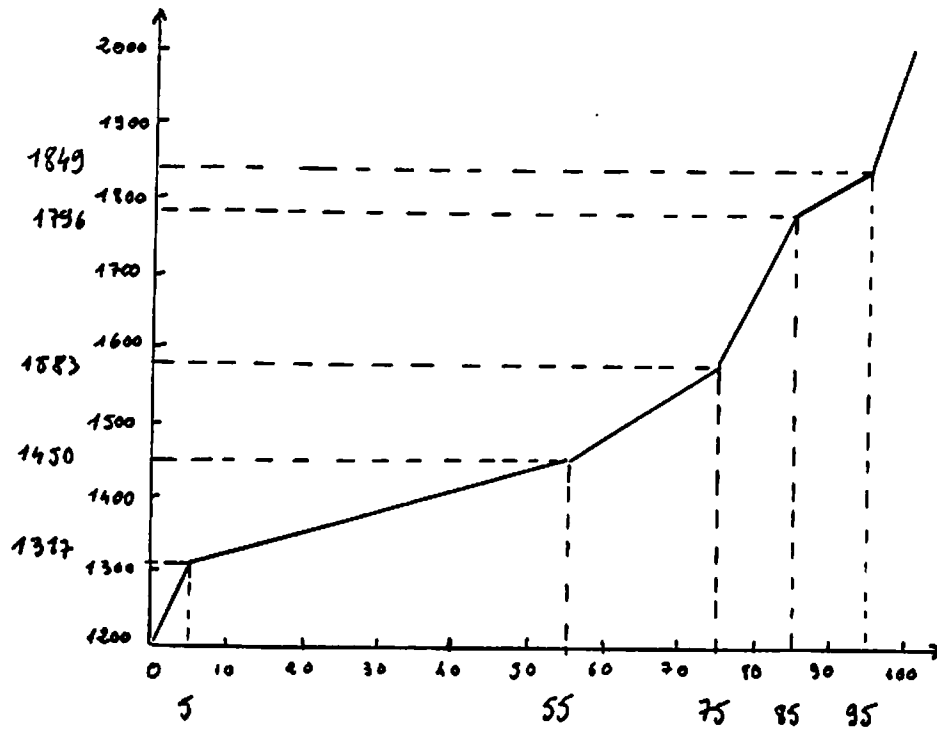
$x \leq 2,5$	$y = 68,4x + 1300$
$2,5 < x \leq 62,5$	$y = 3,38x + 1462,5$
$62,5 < x \leq 87,5$	$y = 8,12x + 1166,5$
$87,5 < x \leq 92,5$	$y = 40,6x - 1675,5$
$92,5 < x \leq 97,5$	$y = 40,6x - 167,5$
$97,5 < x \leq 100$	$y = 86,8x - 6180$

Août



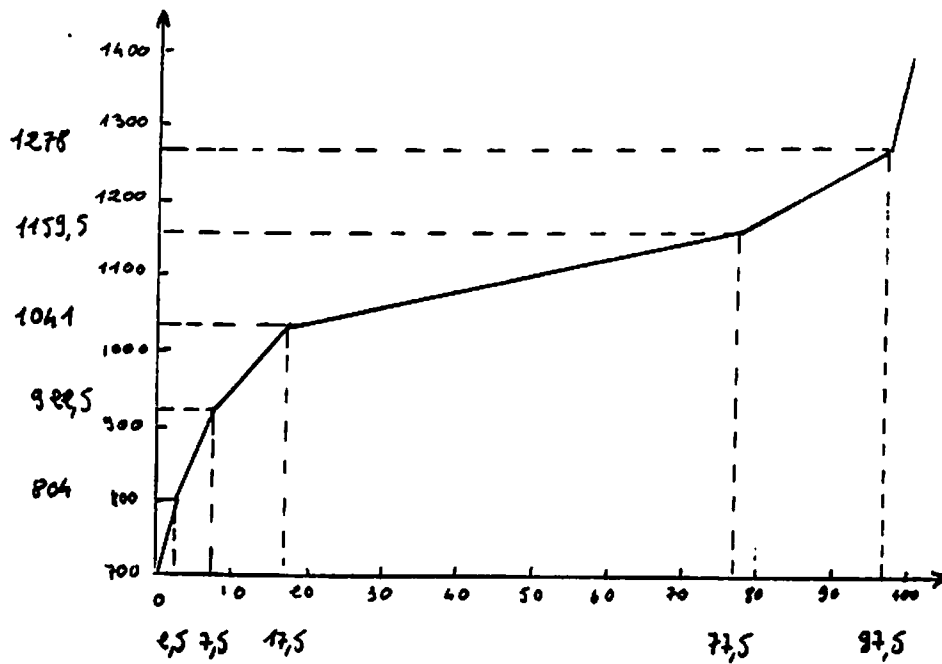
$$\begin{array}{ll}
 x \leq 2,5 & y = 68,8x + 1300 \\
 2,5 < x \leq 62,5 & y = 2,93x + 1464,68 \\
 62,5 < x \leq 82,5 & y = 8,59x + 1111,03 \\
 82,5 < x \leq 87,5 & y = 38,65x - 1388,63 \\
 87,5 < x \leq 97,5 & y = 17,38x + 472,94 \\
 97,5 < x \leq 100 & y = 52,2x - 3020
 \end{array}$$

Septembre



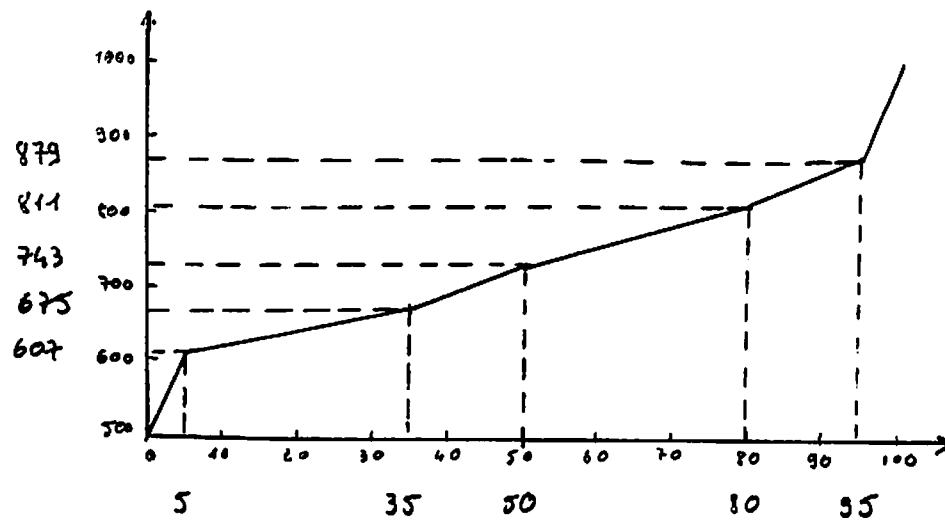
$$\begin{aligned}
 x \leq 5 & \quad y = 23,4x + 1200 \\
 5 < x \leq 55 & \quad y = 2,66x + 1303,7 \\
 55 < x \leq 75 & \quad y = 6,65x + 1084,25 \\
 75 < x \leq 85 & \quad y = 21,3x - 14,5 \\
 85 < x \leq 95 & \quad y = 5,3x + 1345,5 \\
 95 < x \leq 100 & \quad y = 30,2x - 1020
 \end{aligned}$$

Octobre



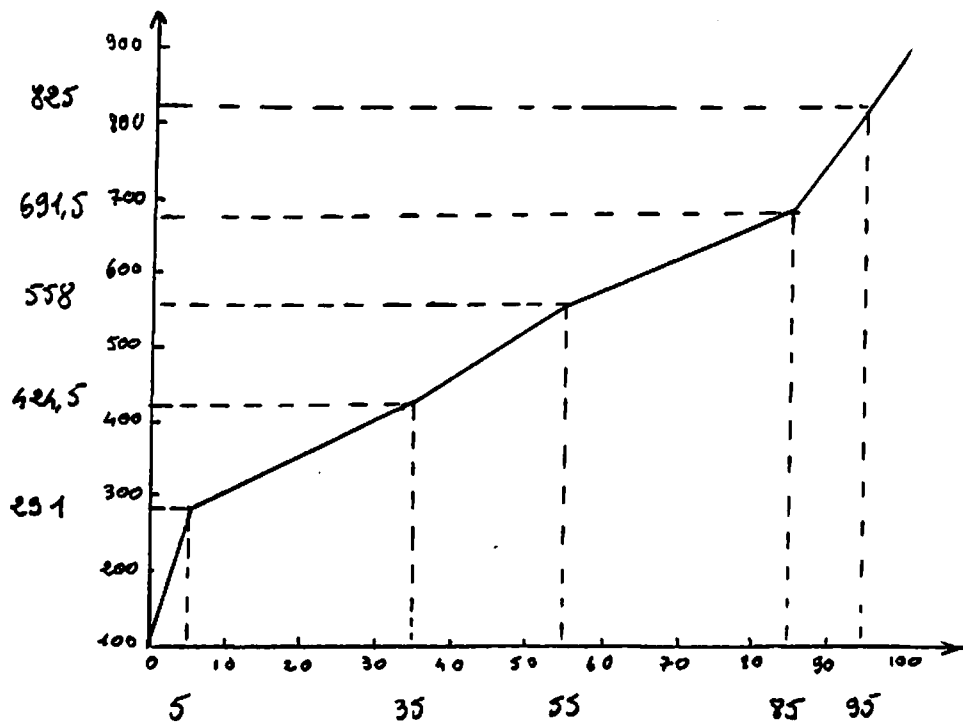
$$\begin{array}{ll}
 x \leq 2,5 & y = 41,6x + 700 \\
 2,5 < x \leq 7,5 & y = 23,7x + 744,75 \\
 7,5 < x \leq 17,5 & y = 11,85x + 833,6 \\
 17,5 < x \leq 77,5 & y = 1,97x + 1006 \\
 77,5 < x \leq 97,5 & y = 5,925x + 700,3 \\
 97,5 < x \leq 100 & y = 48,8x - 3480
 \end{array}$$

Novembre



$$\begin{aligned}
 x \leq 5 & \quad y = 21,4x + 500 \\
 5 < x \leq 35 & \quad y = 2,26x + 595,6 \\
 35 < x \leq 50 & \quad y = 4,5x + 516,33 \\
 50 < x \leq 80 & \quad y = 2,26x + 529,6 \\
 80 < x \leq 95 & \quad y = 4,53x + 448,33 \\
 95 < x \leq 100 & \quad y = 24,2x - 1420
 \end{aligned}$$

Décembre



$$x \leq 5 \quad y = 100 + \frac{191}{5} x$$

$$5 < x \leq 35 \quad y = \frac{133,5}{30} \cdot x + \left(291 - \frac{133,5}{30} \cdot 5\right)$$

$$35 < x \leq 55 \quad y = \frac{133,5}{20} \cdot x + \left(424,5 - \frac{133,5}{20} \cdot 35\right)$$

$$55 < x \leq 85 \quad y = \frac{133,5}{30} \cdot x + \left(558 - \frac{133,5}{30} \cdot 55\right)$$

$$85 < x \leq 95 \quad y = \frac{133,5}{10} \cdot x + \left(691,5 - \frac{133,5}{10} \cdot 85\right)$$

$$95 < x \leq 100 \quad y = \frac{75}{5} \cdot x + \left(825 - \frac{75}{5} \cdot 95\right)$$

IV.3. Lois de variations des précipitations

IV.3.1. INTRODUCTION

En reprenant la classification effectuée sur les années, on établit les tableaux de fréquence des passages d'un type d'année vers un autre type d'année.

Dans chaque type, on définit 4 classes de précipitations annuelles et suivant le nombre d'occurrences observées, on effectue une probabilité.

Il faut donner une probabilité aux bornes de chaque plage de valeurs. Cette probabilité devra être inférieure à 1/nombre total de valeurs obtenues dans le type d'année.

Il n'est pas possible d'attribuer de probabilités aux précipitations mensuelles, seuls un niveau de précipitation mensuelle maximum et un niveau de précipitation minimum sont définissables. Ceci dans chaque type d'année et pour chaque mois.

IV.3.2. DETERMINATION DU TYPE D'ANNEE

a) Si on est dans une année de type 1 (13 occurrences):

Valeurs observées:

Type de passage	Nombre d'occurrences	Probabilité
1 --> 1	3	0,24
1 --> 2	5	0,38
1 --> 3	5	0,38
	<u>13</u>	

Simulation

Soit le tirage d'un nombre aléatoire x compris entre 1 et 100.

si $x < 24$, l'année suivante est de type 1

si $24 < x \leq 62$, l'année suivante est de type 2

si $62 < x \leq 100$, l'année suivante est de type 3.

b) Si on est dans une année de type 2 (7 occurrences):

Valeurs observées

Type de passage	Nombre d'occurrences	Probabilité
2 --> 1	6	0,85
2 --> 2	0	0,01
2 --> 3	1	0,14
	<u>7</u>	

De même, si $x < 85$, l'année suivante est de type 1

si $x = 86$, l'année suivante est de type 2

si $86 < x \leq 100$, l'année suivante est de type 3.

c) Si on est dans une année de type 3:

Valeurs observées

Type de passage	Nombre d'occurrences	Probabilité
3 --> 1	3	0,38
3 --> 2	3	0,38
3 --> 3	2	0,24
	<u>8</u>	

Si $x \leq 38$, l'année suivante est de type 1

Si $38 < x \leq 76$, l'année suivante est de type 2

Si $76 < x \leq 100$, l'année suivante est de type 3.

IV.3.3. DETERMINATION DE LA HAUTEUR D'EAU ANNUELLE

a) La démarche

Soit P le niveau de précipitations annuelles; suivant le type d'année, P appartient à une plage de valeurs différente; pour chaque type d'année, nous découpons la plage de valeurs en 4 classes d'égale amplitude, et affectons à chaque classe le nombre d'occurrences observées sur le passé.

Cependant, nous ne pouvons pas négliger l'éventualité de dépasser les bornes observées.

Il nous faut donc définir nous-mêmes les bornes, ce qui constitue 2 nouvelles classes, auxquelles nous devons également affecter une probabilité d'occurrence.

b) Valeurs observées

Type 1 -

Classe	Nombre d'occurrences	Probabilité
686,9 --> 825,4	6	0,46
825,4 --> 964,0	3	0,23
964,0 --> 1102,5	2	0,155
1102,5 --> 1241,0	2	0,155

Type 2 -

Classe	Nombre d'occurrences	Probabilité
599,1 --> 741,8	2	0,25
741,8 --> 884,6	4	0,50
884,6 --> 1027,3	1	0,125
1027,3 --> 1170,0	1	0,125

Type 3 -

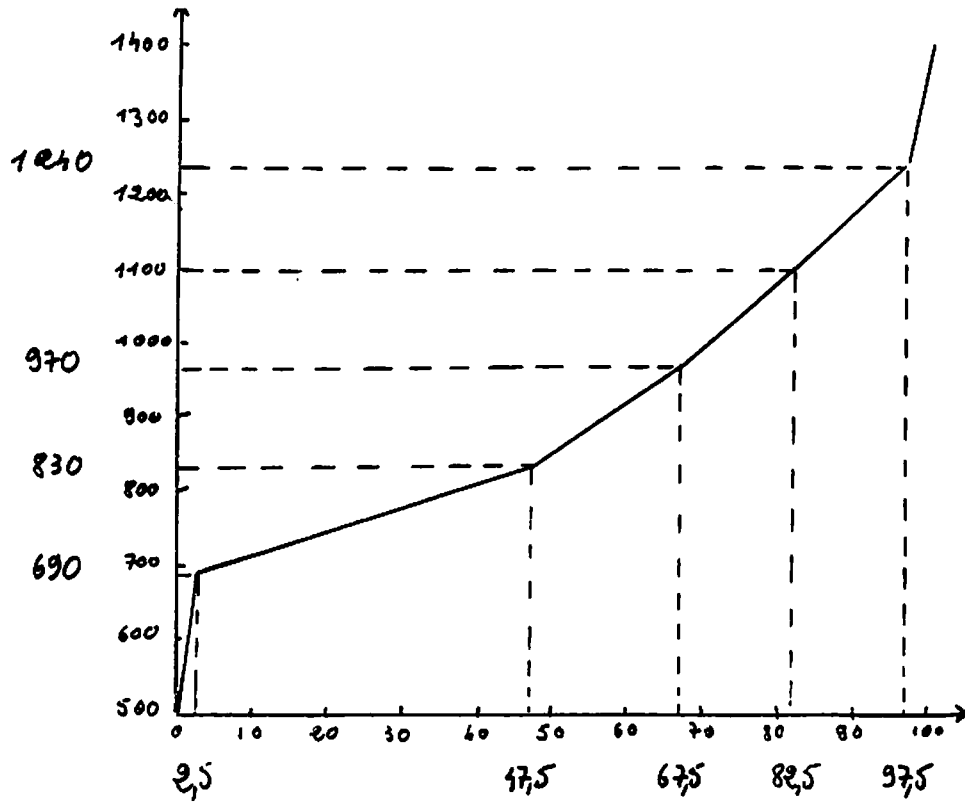
Classe	Nombre d'occurrences	Probabilité
660,4 --> 749,5	3	0,375
742,5 --> 838,6	1	0,125
838,6 --> 927,6	2	0,25
927,6 --> 1016,7	2	0,25

c) Définition des bornes et probabilités pour chaque classe

- type 1 :	500 -->	690	2,5%
	690 -->	830	45%
	830 -->	970	20%
	970 -->	1100	15%
	1100 -->	1240	15%
	1240 -->	1400	2,5%
- type 2 :	400 -->	600	5%
	600 -->	740	20%
	740 -->	880	50%
	880 -->	1030	10%
	1030 -->	1170	10%
	1170 -->	1300	5%
- type 3 :	500 -->	660	5%
	660 -->	750	40%
	750 -->	840	10%
	840 -->	930	20%
	930 -->	1020	20%
	1020 -->	1200	5%

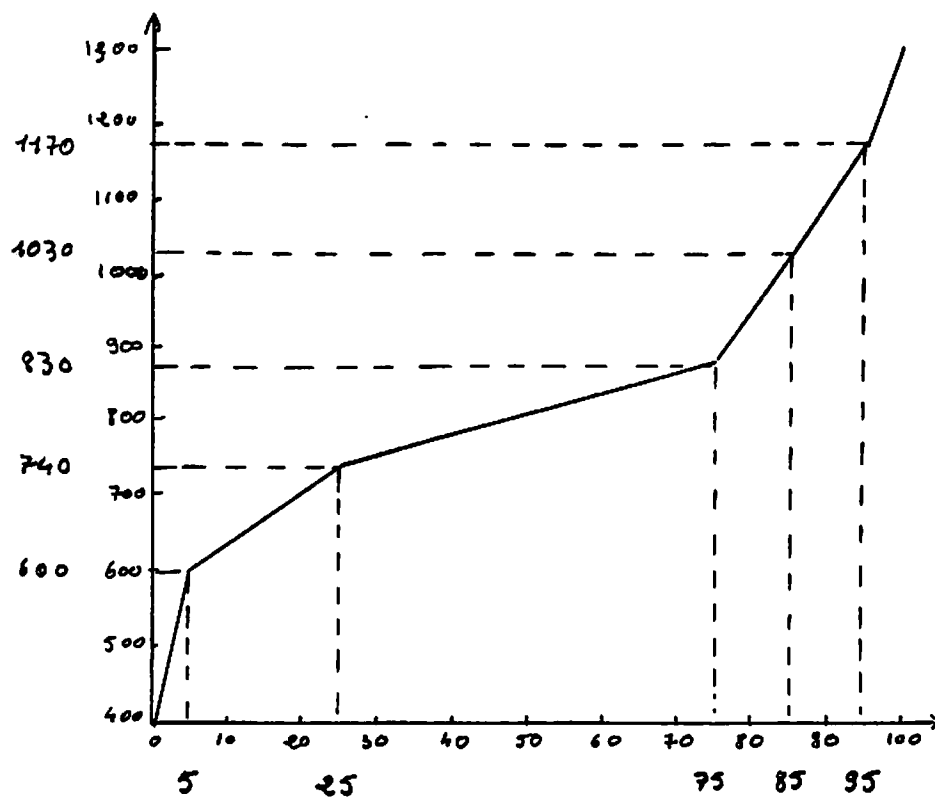
Le tirage d'un nombre aléatoire x compris entre 1 et 100 nous permet, compte tenu des chiffres précédents, de déterminer le niveau de précipitations annuelles.

Détermination de la hauteur d'eau annuelle, type 1



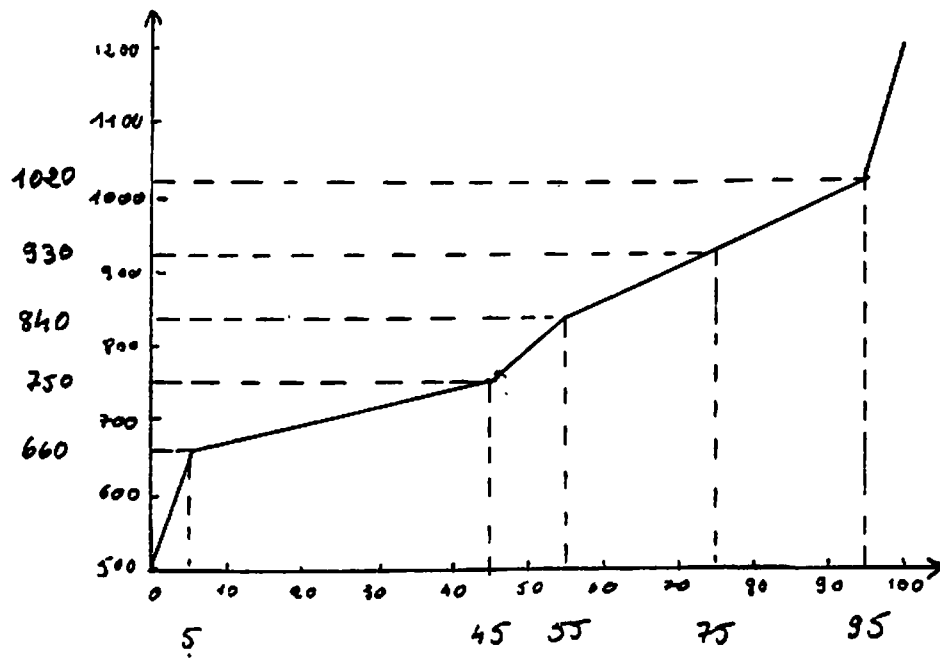
$x < 2,5$	$y = 76x + 500$
$2,5 \leq x \leq 47,5$	$y = \frac{28}{9}x + \frac{70}{9}$
$47,5 \leq x \leq 67,5$	$y = 7x + 497,5$
$67,5 \leq x \leq 82,5$	$y = \frac{26}{3}x + 385$
$82,5 \leq x \leq 97,5$	$y = \frac{28}{3}x + 330$
$97,5 \leq x \leq 100$	$y = 64x - 5000$

Détermination de la hauteur d'eau annuelle, type 2



$$\begin{array}{ll} x \leq 5 & y = 40x + 400 \\ 5 \leq x \leq 25 & y = 7x + 565 \\ 25 \leq x \leq 75 & y = \frac{14}{5}x + 670 \\ 75 \leq x \leq 85 & y = 15x - 245 \\ 85 \leq x \leq 95 & y = 14x - 160 \\ 95 \leq x \leq 100 & y = 26x - 1300 \end{array}$$

Détermination de la hauteur d'eau annuelle, type 3



$$\begin{aligned}
 x \leq 5 & \quad y = 500 + 92x \\
 5 \leq x \leq 45 & \quad y = \frac{9}{4}x + \frac{2595}{4} \\
 45 \leq x \leq 55 & \quad y = 9x + 345 \\
 55 \leq x \leq 75 & \quad y = \frac{9}{2}x + 592,5 \\
 75 \leq x \leq 95 & \quad y = \frac{9}{2}x + 592,5 \\
 95 \leq x \leq 100 & \quad y = 36x - 2400
 \end{aligned}$$

III.3.4. REPARTITION DANS LES DIFFERENTS MOIS DE LA HAUTEUR D'EAU ANNUELLE

a) Valeurs observées (cf. courbes pages suivantes)

Toutes les valeurs sont données en pourcentage cumulé du niveau annuel.

- type 1:	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Mini	4,5	8	18	18,5	19,5	19,5	26	30,5	47,5	64,5	77,5	100
Maxi	15	21	33,5	37,5	53	57	62	69	80	83	97	100
- type 2:	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Mini	2,4	12,5	12,8	24,5	36,9	41,5	47,5	54,1	55,1	70,1	79,3	100
Maxi	17,3	22,4	35,5	43	55,5	56,5	62,6	67,2	80	90,3	96,5	100
- type 3:	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Mini	6,5	24,5	32,5	36	40,5	53,5	58	59,5	65,5	74	79	100
Maxi	19	32,5	41,5	50	61,5	68,5	74	76,5	81	84	97,5	100

b) Génération des précipitations mensuelles

Le type étant connu, nous utilisons l'un des tableaux précédents pour répartir la hauteur d'eau dans les différents mois:

- . Soit j le mois considéré:
 - $b_i(j)$ = borne minimum du tableau pour le mois j ;
 - $b_a(j)$ = borne maximum du tableau;
 - $p(j)$ = précipitations jusqu'au mois j (en pourcentage de l'année).
- . Soit x nombre aléatoire tiré entre 1 et 100:
 - si $j = 1$: $p(1) = b_i(1) + x * \frac{b_a(1) - b_i(1)}{100}$
 - si $2 \leq j \leq 11$: $p(j) = \text{Max}(b_i(j), p(j-1)) + x * \frac{b_a(j) - \text{Max}(b_i(j), p(j-1))}{100}$
 - si $j = 12$: $p(j) = 100$
- . Soit $P(j)$ le niveau absolu des précipitations du mois j :
 - $j = 1$: $P(1) = \frac{p(1)}{100} * \text{précipitations annuelles}$
 - $j \neq 1$: $P(j) = \frac{p(j)}{100} * \text{précipitations annuelles} - \sum_{i=1}^{j-1} P(i)$

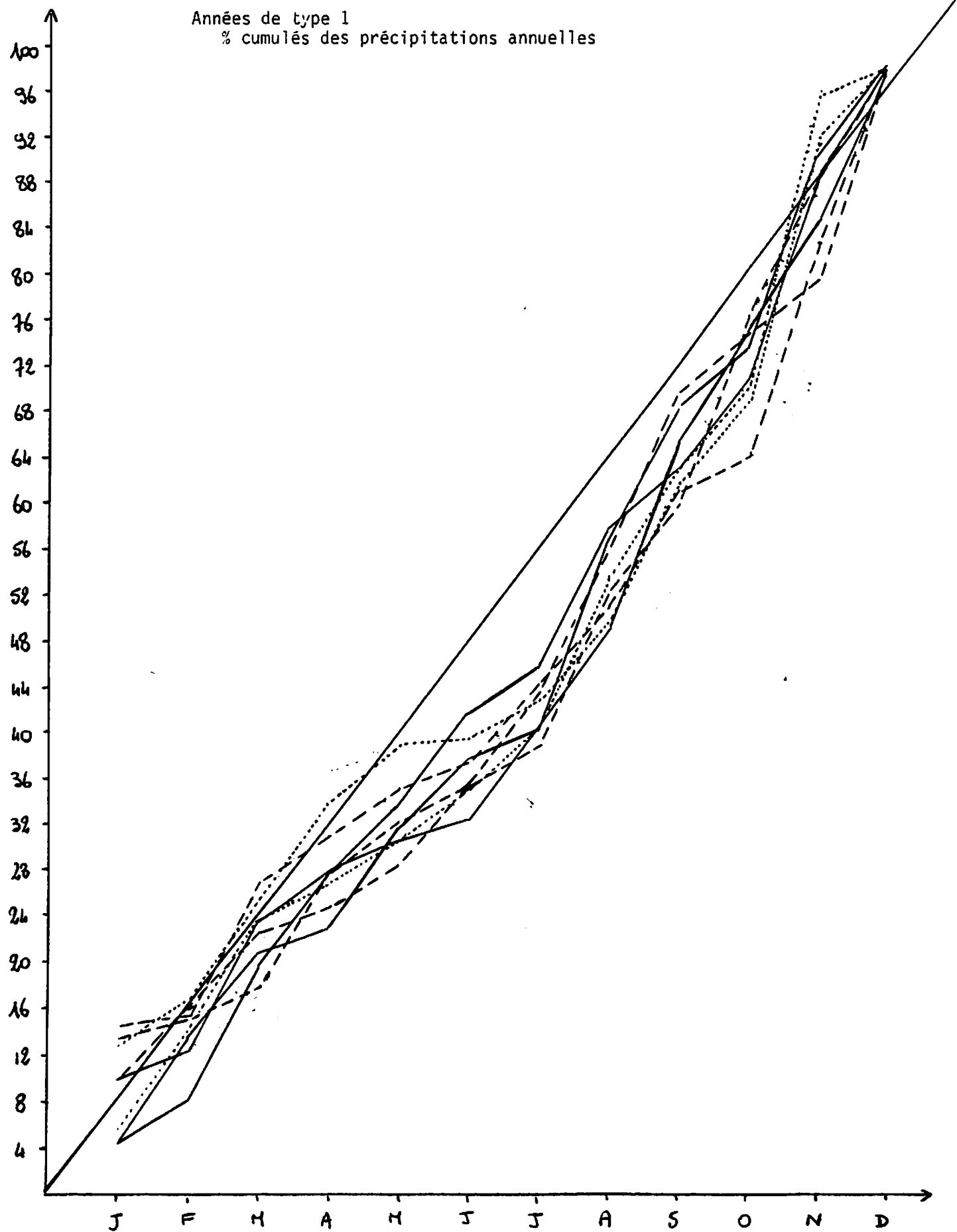
IV.4. Lois d'évolution des échanges par le sous-sol

L'analyse des échanges par la nappe (Ess) a montré que ceux-ci étaient fortement liés aux mouvements d'eau en surface. Pour déterminer une éventuelle fonction, nous avons tracé la courbe $\text{Ess} = f(P - \text{ETR})$ (voir ci-après).
 . (P-ETR avec temps de réponse de 2 mois).

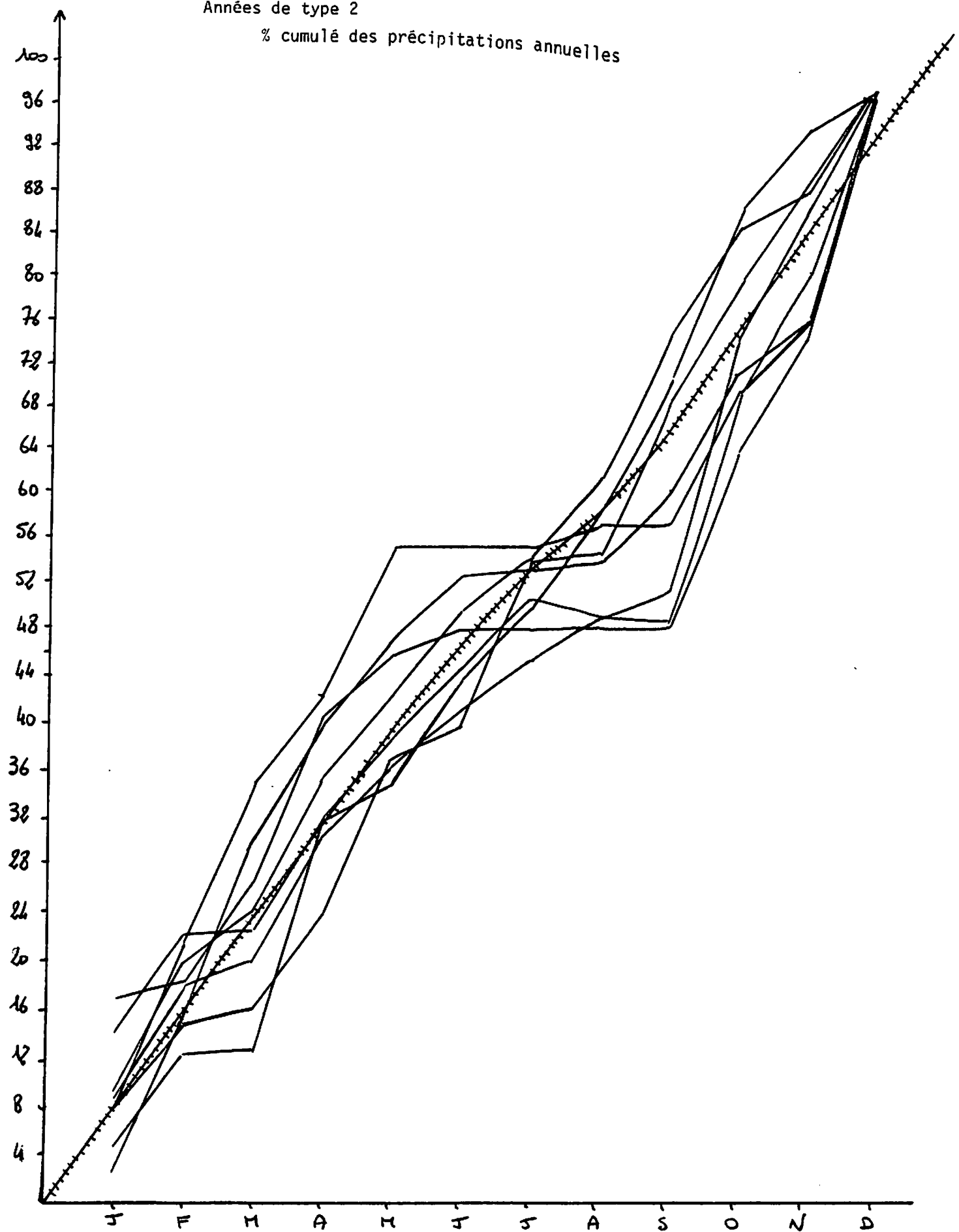
La courbe obtenue permet de définir cette fonction puisque nous obtenons deux droites correspondant l'une aux (P-ETR) négatifs, l'autre aux (P-ETR) positifs. Bien que la courbe n'utilise que des données sur trois années, les coefficients de corrélation sont assez importants pour que l'on puisse être sûr des résultats.

On peut donc simuler les échanges par le sous-sol en utilisant les équations suivantes:

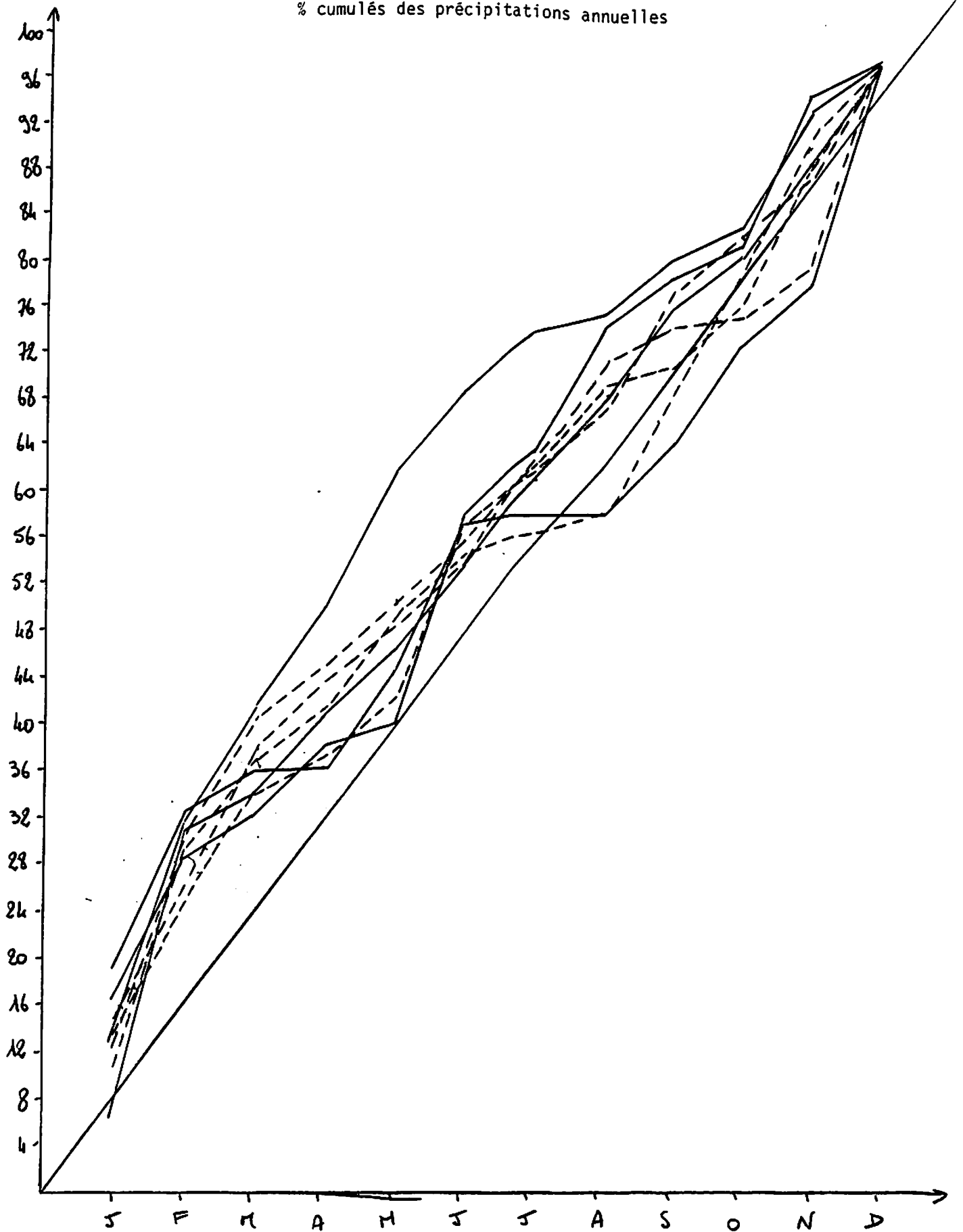
Années de type 1
% cumulés des précipitations annuelles



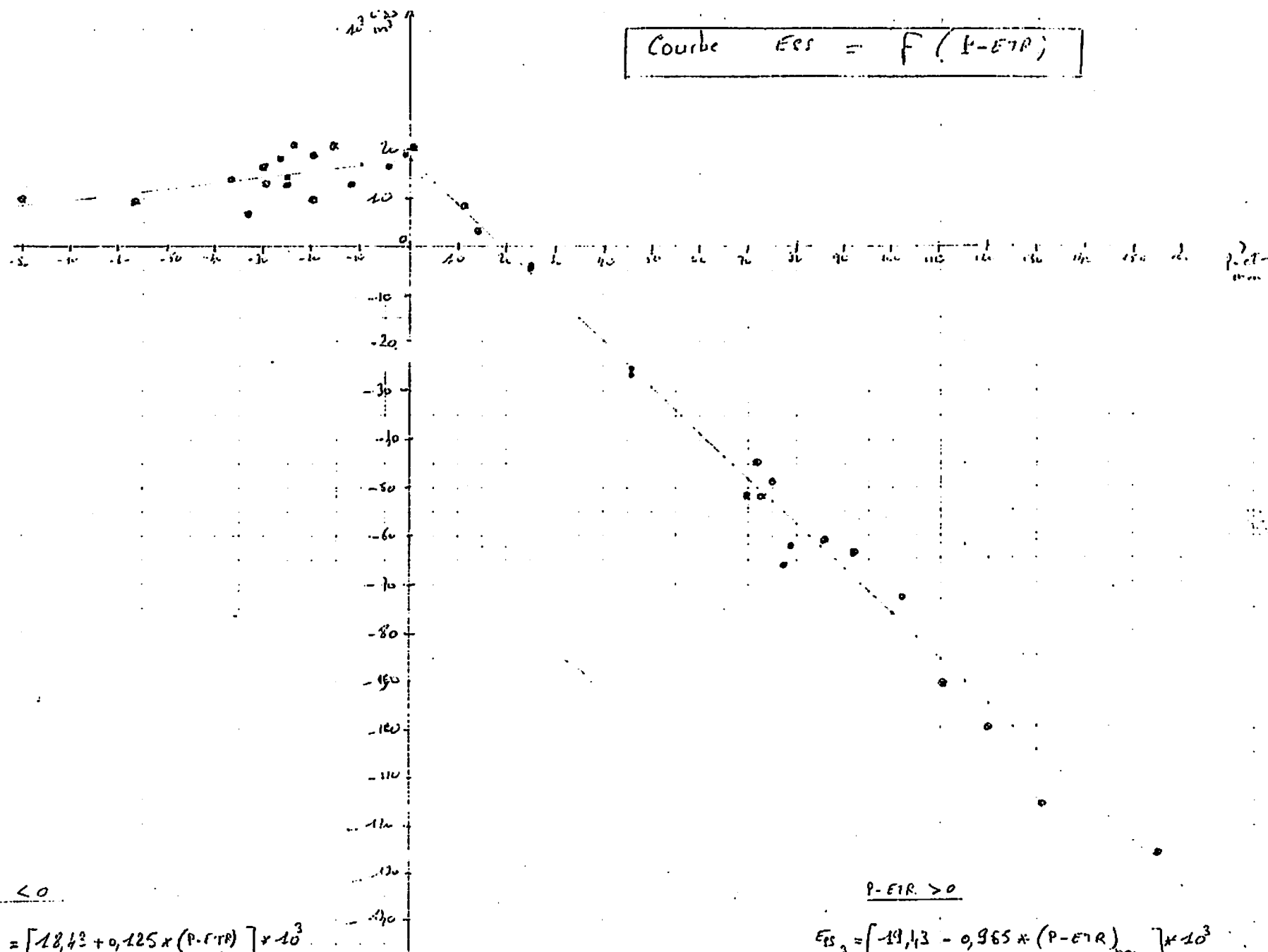
Années de type 2
% cumulé des précipitations annuelles



Années de type 3
% cumulés des précipitations annuelles



$$\text{Courbe } ESS = f(P - ET_R)$$



$$P - ET_R < 0$$

$$ESS_{\text{m}^3} = [18,43 + 0,125 \times (P - ET_R)_{\text{mm}}] \times 10^3$$

$$\text{correlation} = 0,54$$

$$ESS(0) = 18,43 \times 10^3 \text{ m}^3$$

$$P - ET_R > 0$$

$$ESS_{\text{m}^3} = [-19,13 - 0,965 \times (P - ET_R)_{\text{mm}}] \times 10^3$$

$$\text{correlation} = 0,99$$

- $(P-ETR)_{(T-2)} > 0 \implies Ess_{m^3(T)} = (19,43 - 0,965 * (P-ETR)_{mm(T-2)}) * 10^3$
- $(P-ETR)_{(T-2)} < 0 \implies Ess_{m^3(T)} = (18,43 + 0,125 * (P-ETR)_{mm(T-2)}) * 10^3$
- $(P-ETR)_{(T-2)} = 0 \implies Ess_{(T)} = 19 * 10^3 m^3$

N.B.: En ce qui concerne le $P-ETR > 0$, le coefficient de corrélation est élevé puisqu'égal à 0,99.
 Pour les $P-ETR < 0$, le coefficient de corrélation n'étant que de 0,54, il sera bon d'utiliser les données à venir afin d'affiner les résultats.

IV.5. L'évolution de l'étang

Après avoir défini les différentes lois de fonctionnement des éléments du système, il faut rassembler toutes les parties de manière à générer le comportement de l'étang.

Ce comportement est défini par l'équation du chapitre II.2.2.

$$\Delta v(T) = \frac{(S_T + S_{T-1}) (\text{niveau}(T-1) - \text{niveau}(T))}{2} = (P(T-2) - ETR(T-2)) * S + Q(T) + Ess(T)$$

S_T : surface de l'étang correspondant au niveau du mois T.

Il est étudié par période de 1 mois et pour une durée déterminée ($DT=1$ mois).

Donc pour chaque période:

- 1) nous déterminons les états des différents éléments:
 - . précipitations
 - . températures
 - . $ETR = f(\text{précipitations, températures})$
 - . mouvement d'eau en surface = $P-ETR$
 - . échanges par la nappe: $Ess = f(SURF(T))$
 - $P-ETR$ avec temps de réponse de 2 mois
 - . niveau production: Q
 - . niveau de l'étang: $f(\text{niveau}(T-1), SURF(T), Q(T), Ess(T))$
- 2) nous définissons les nouvelles valeurs des taux et variables intermédiaires:

exemple: $SURF(T) = (P-ETR)(T-2)$ influence retardée.

Cette approche permet donc de déterminer les niveaux de l'étang suivant la politique de pompage adoptée. Cette politique est le seul élément apporté par l'utilisateur, en plus de la détermination de l'état initial.

V - CONCLUSION

V.1. Résultats

Nous avons réussi à décrire de la manière la plus fidèle possible, le fonctionnement de l'écosystème en déterminant les lois qui régissent ses différents éléments. Néanmoins, il convient de tester le modèle ainsi défini sur le passé pour savoir s'il respecte bien les tendances antérieures.

La validation du modèle peut se faire de deux façons:

- par partie: on reprend les données exactes du passé pour l'un des éléments et on simule les autres;
- globalement: on simule en même temps tous les éléments pour voir le comportement du système.

Si le modèle donne satisfaction sur le passé, et seulement à ce moment là, nous pouvons alors l'utiliser pour la simulation proprement dite. L'utilisateur définit alors une politique de pompage sous une forme qui reste à définir (définition sur une année puis génération automatique pour les suivantes, avec taux de progression éventuel ou alors définition totale de la politique sur la durée de la simulation, ou encore, possibilités d'interventions en cours de simulation, etc...) et le modèle lui fournit l'évolution de l'étang correspondant à cette politique.

V.2. Limites et critiques

Un modèle n'indique qu'une tendance; il ne faut donc pas attacher d'importance aux valeurs en elles-mêmes, mais plutôt à leurs variations dans le temps.

D'autre part, le modèle a été élaboré grâce à des informations passées. Si l'on s'écarte trop des valeurs observées, les risques de voir le modèle donner des informations non correctes, augmentent. Néanmoins, l'étang étant une fosse creusée sur un support de grès, on peut considérer que le modèle restera fiable jusqu'au niveau de débordement de l'étang.

V.3. Remarques générales

Il reste une hypothèse à tester: est ce qu'à P-ETR égal, les échanges par la nappe (Ess) augmentent lorsque le niveau de l'étang augmente? P-ETR doit être positif et relativement important sinon l'étang prend de l'eau par la nappe de toute manière. Si cette hypothèse s'avérait exacte, cela expliquerait le fait que le niveau de l'étang soit resté stable à une certaine valeur par le passé. Il rejetait par la nappe ce qu'il prenait par P-ETR.

VI - ANNEXES

SOURCES

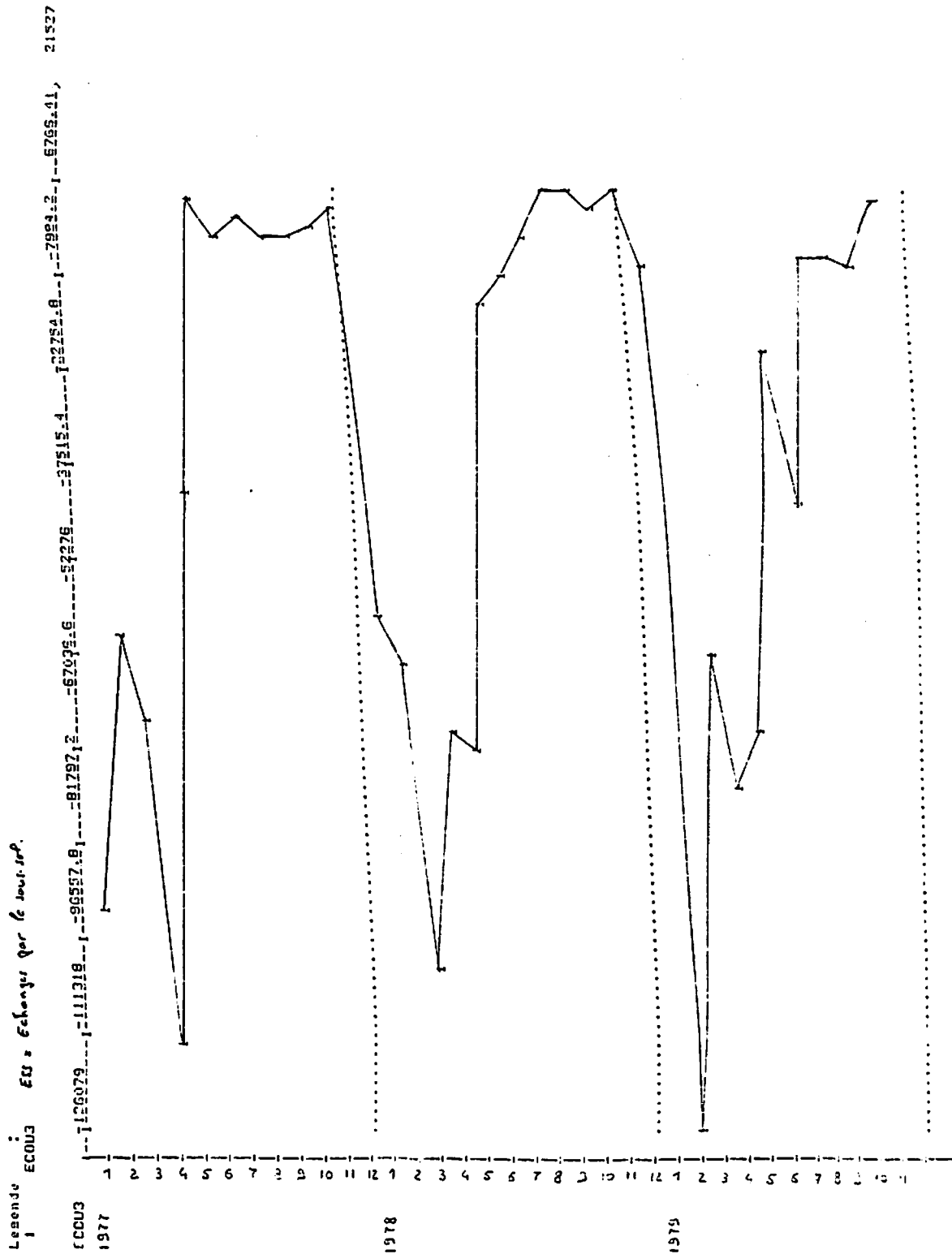
- * Météorologie Nationale: Aéroport Rennes St Jacques.
tel.: 50-80.39 (régional)
50.43.48 (direction)
Correspondant: M. HU.
Données sur précipitations, températures et ETP.
 - * D.D.A. (direction départementale de l'agriculture):
Cité administrative
tel.: 30.37.80
Correspondant: M. HAUDEBERT
Renseignements sur le réseau d'eau potable.
 - * D.D.A.S.S. (direction départementale de l'action sanitaire et sociale)
Villejean
tel.: 30.03.18
02.82.22
Correspondant: VAN KELLEF
Renseignements sur la qualité de l'eau.
 - * C.F.C.E. (compagnie française des conduites d'eau)
24, rue du Manoir de Servigné. Rennes.
tel.: 59.17.69
59.61.37
Correspondants: MM. LUTINIER, GOURIO
Hauteur d'eau et volumes pompés.
 - * B.R.G.M. (bureau de recherche géologique et minière)
Vendée Bretagne à Nantes
tel.: (40) 29.36.00
Le service de la banque du sous-sol: Mme LIMASSET
à Rennes, tel.: 30.94.51
 - * Service des Mines: Rennes
tel.: 30.96.02
MM. KOWALICK, LEDUC, BAUHIN
- ** PERSONNES ****
- * M. CHAUVEL (laboratoire géologie Beaulieu)
tel.: poste 20.97
Calcul surface bassin versant
 - * M. ROUSSEL (CRPF centre régional de la propriété forestière)
tel.: 30.00.30
n° pers.: 62.55.18
Nature du terrain, carte pédologique, coefficient de saturation du sol.
 - * M. MARCHAND (géographie UMB), 32, rue Poincaré
Calcul ETP, ETR.

- * M. LECAMUS (géographie UHB), poste 494 (59.20.33)
M. BARIOU 496
- * Mme CHANTOUX (maire de Paimpont), tel.: 06.80.13
- * Mme PASDELOUP (conseillère municipale, secrétaire du syndicat des eaux),
route de Gaël, Paimpont, tel.: 06.86.42
- * M. DROUIN (ancien secrétaire de mairie), tel.: 06.80.37
Accès aux archives municipales, procès mine-commune.

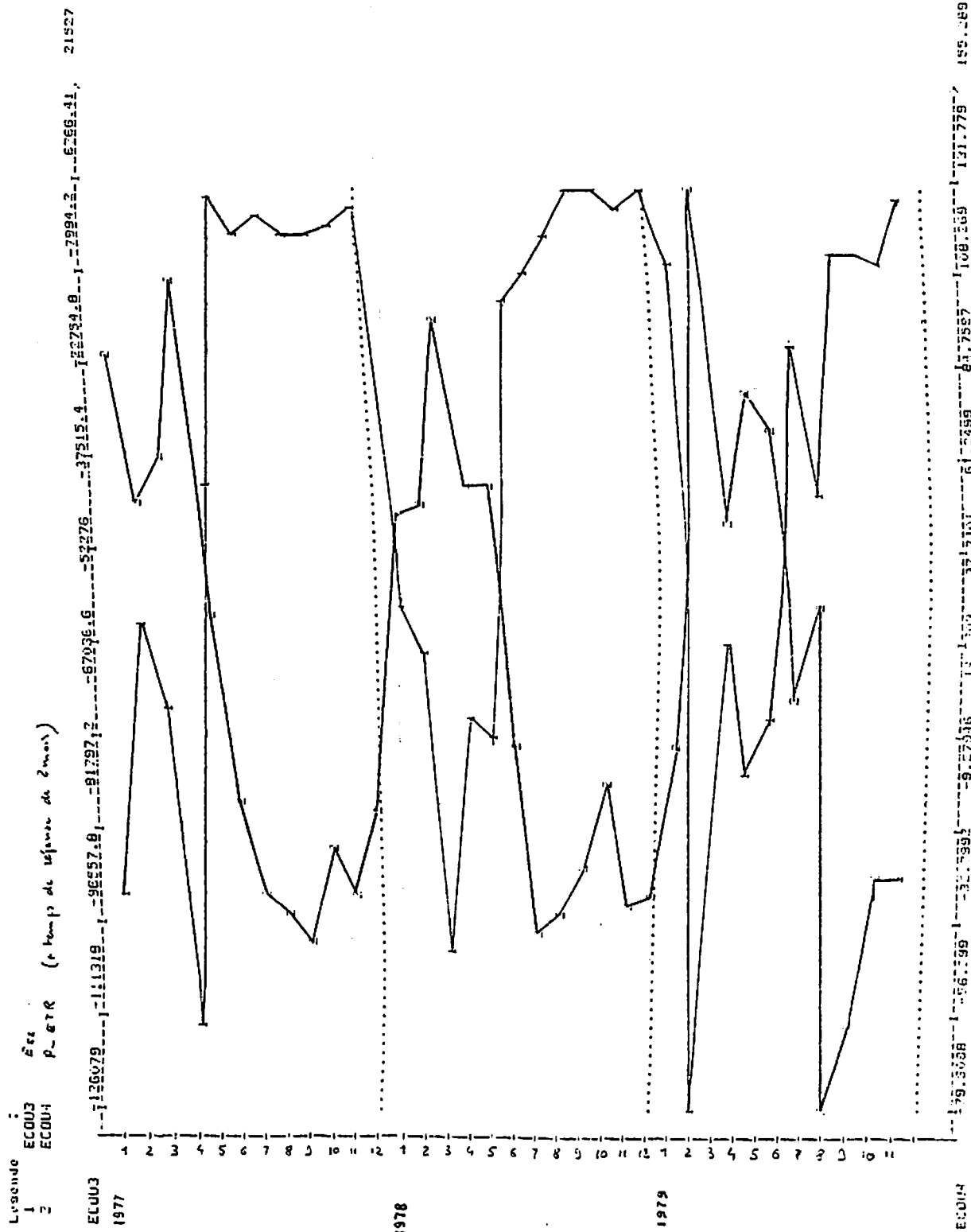
COURBES, TABLEAU, FICHIERS UTILISÉS

(cf. pages suivantes).

Courbe

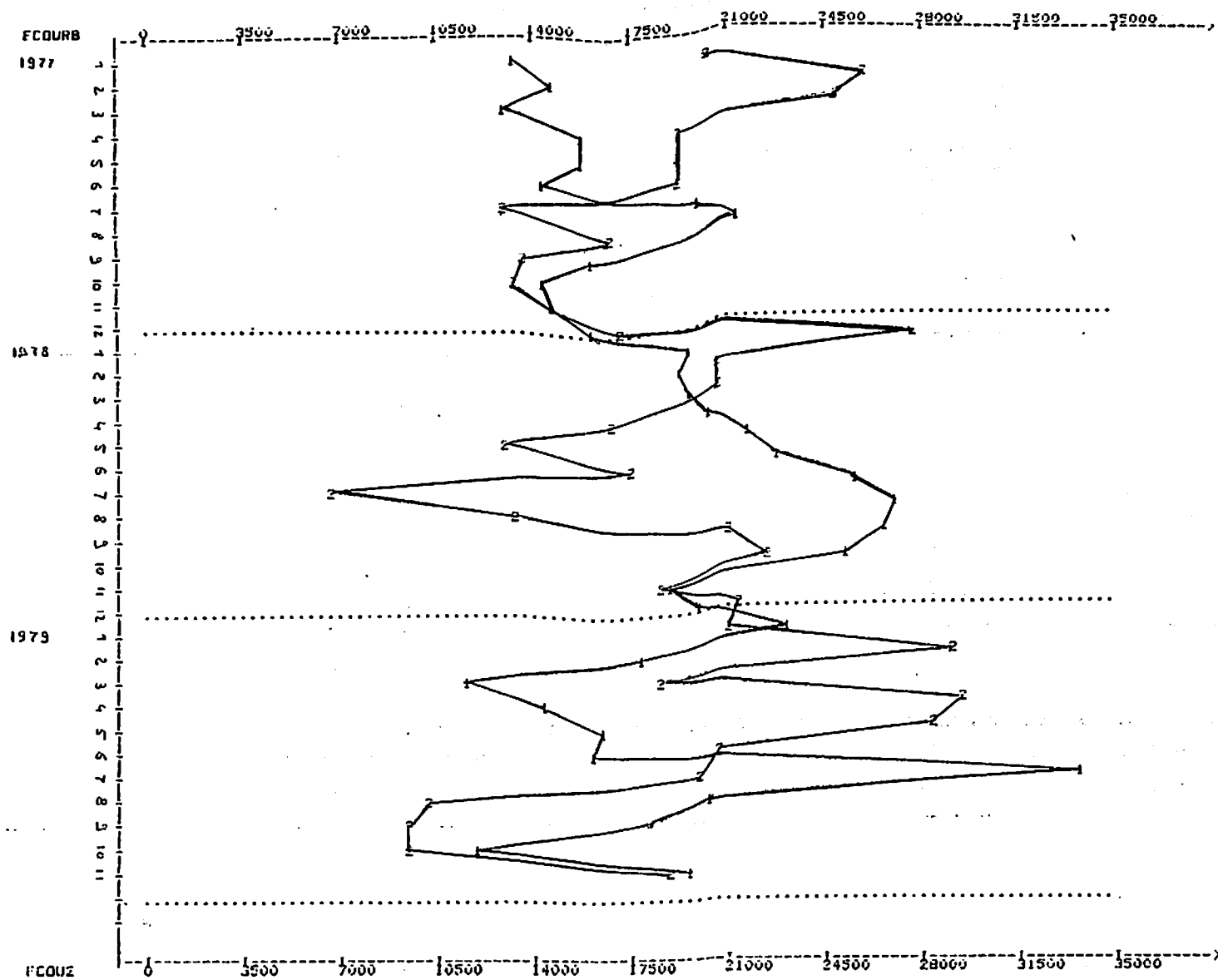


Courbes



Courbes

Legende :
 1 ECDURB Q
 2 ECDU2 Q_{AV}



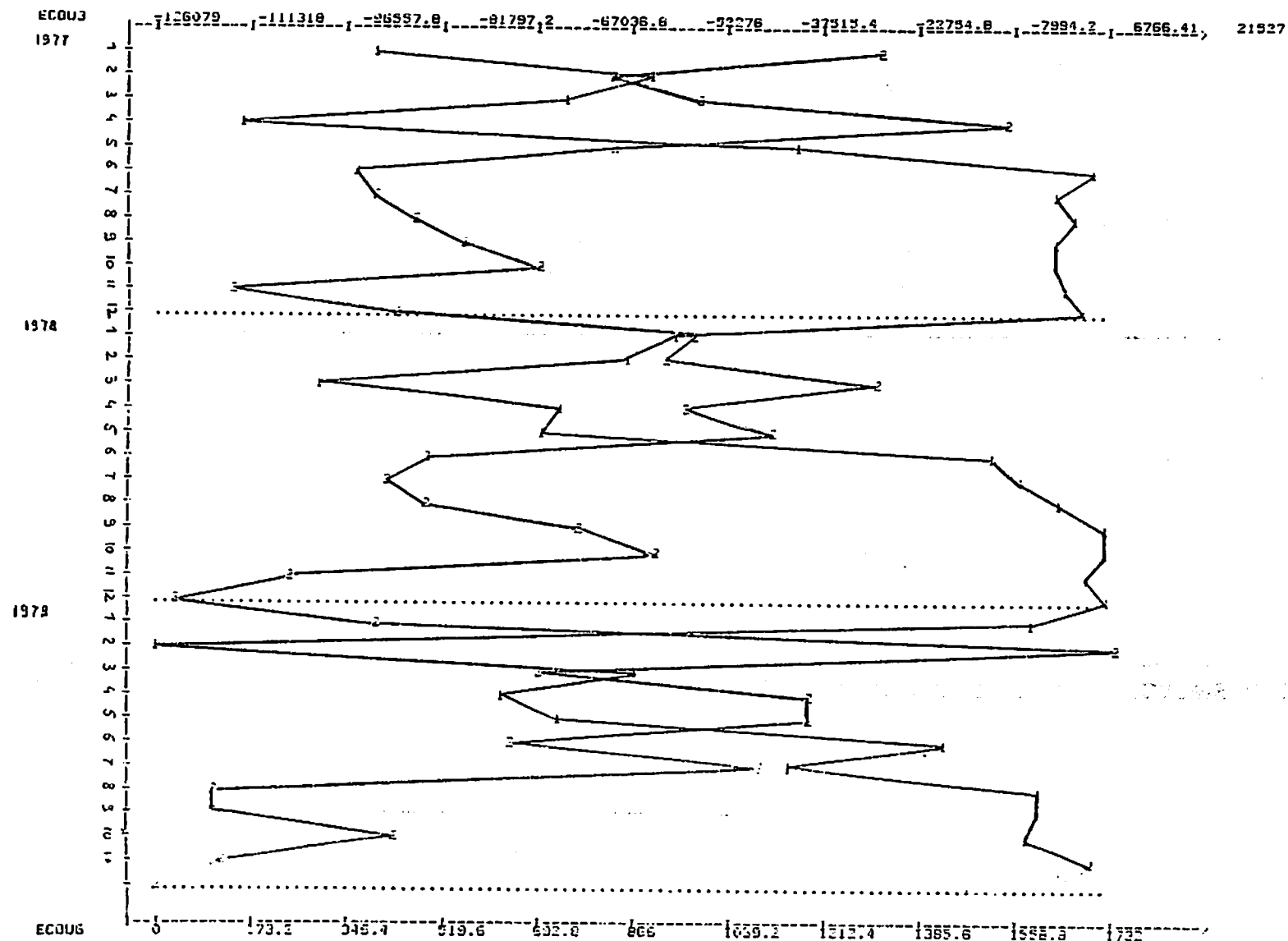
Courbes

Legende :

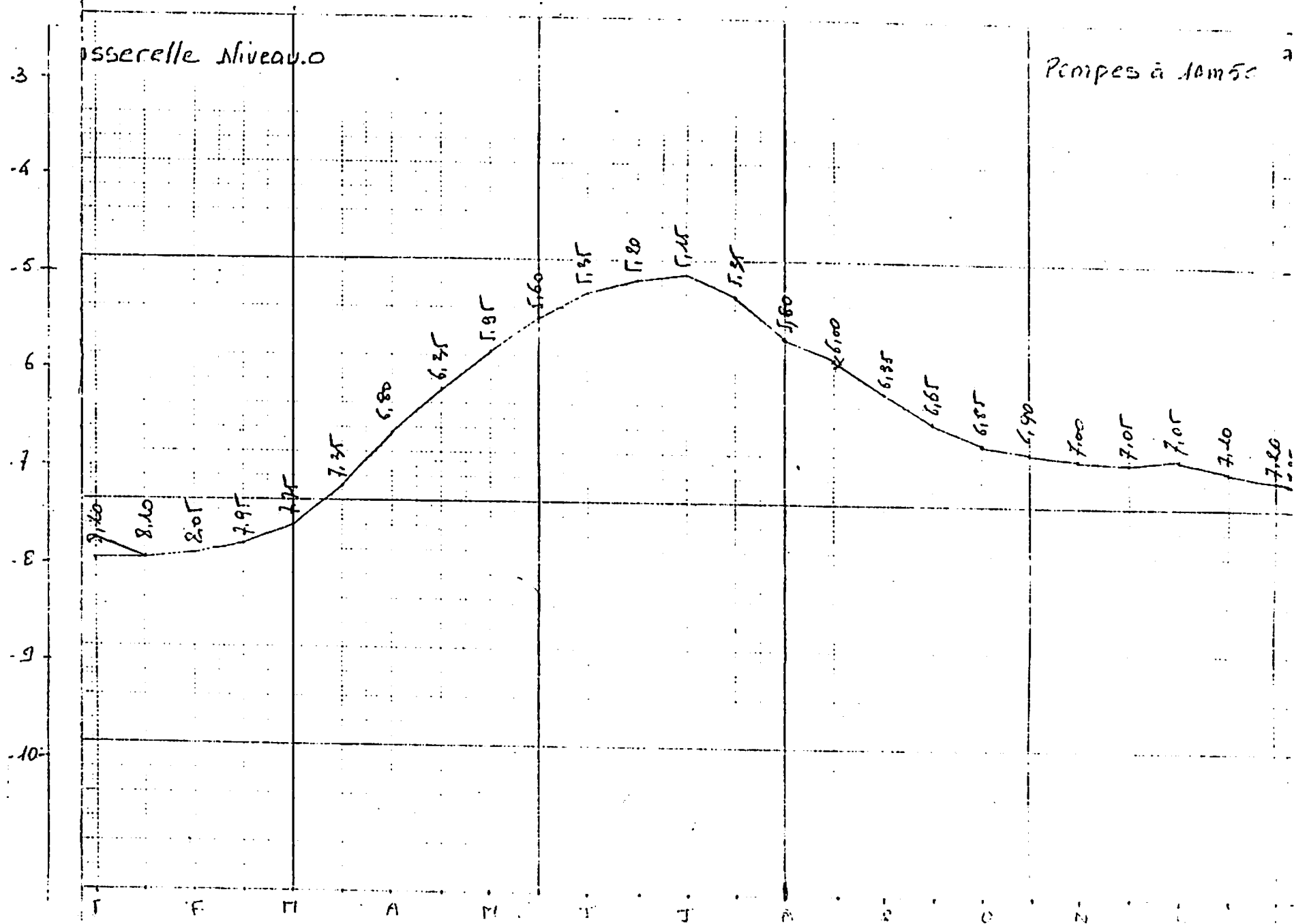
1
2

ECOU3
ECOU6

600
participation (en dollars en millions)



Niveau Etang Bleu 1979

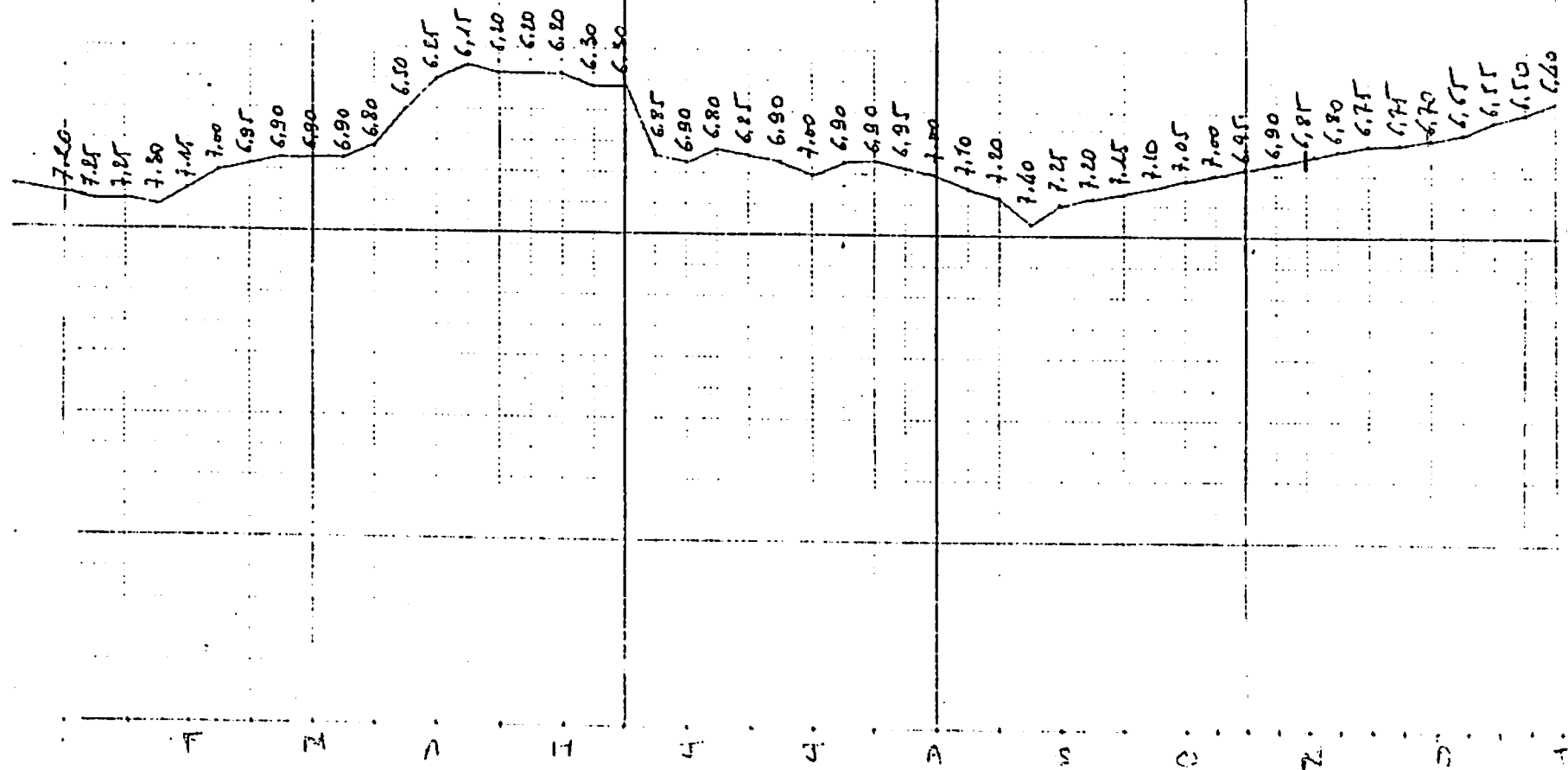


Etang Bleu. 1980

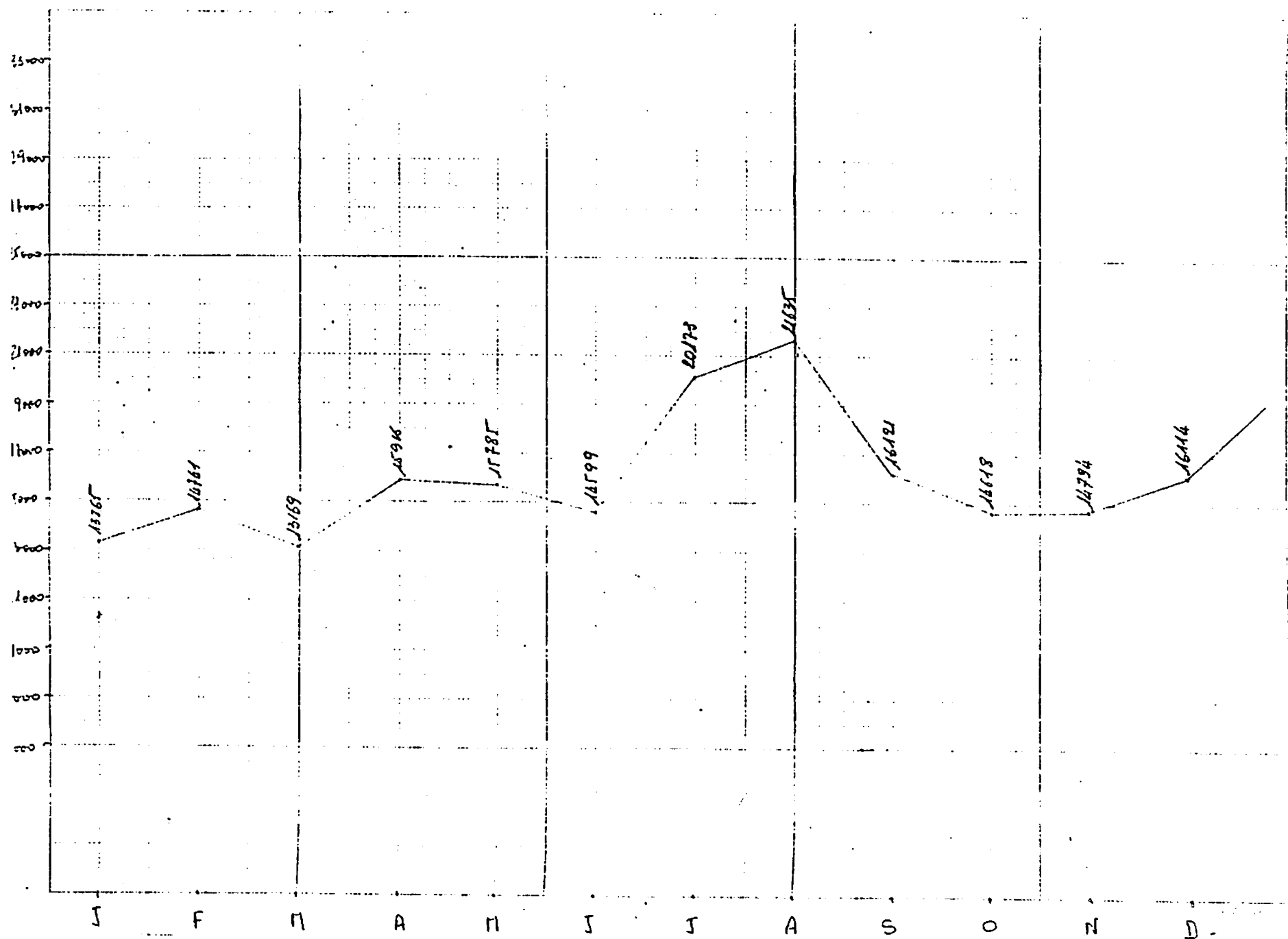
50

asserelle Niveau 0

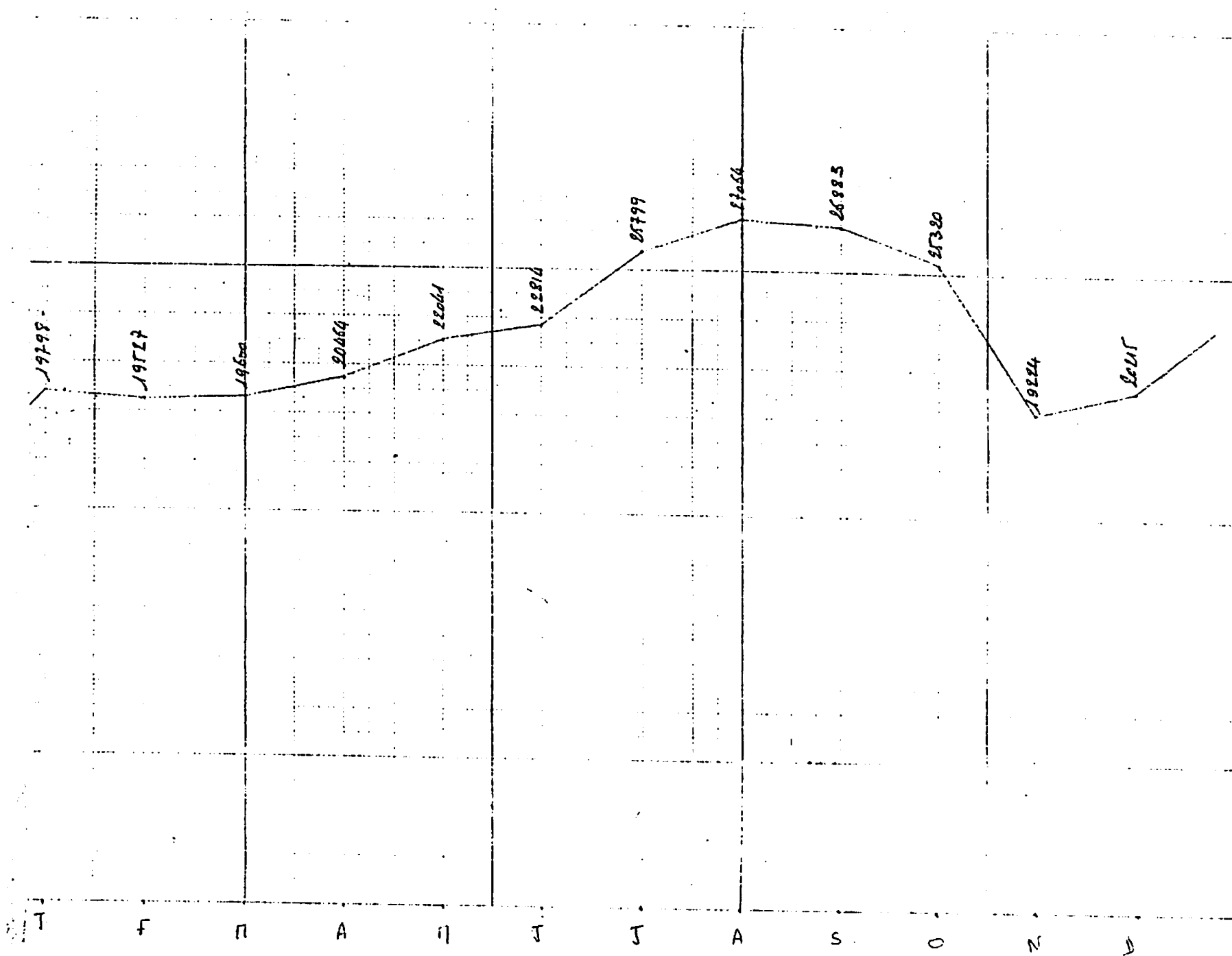
Pompes à 10m 50.-



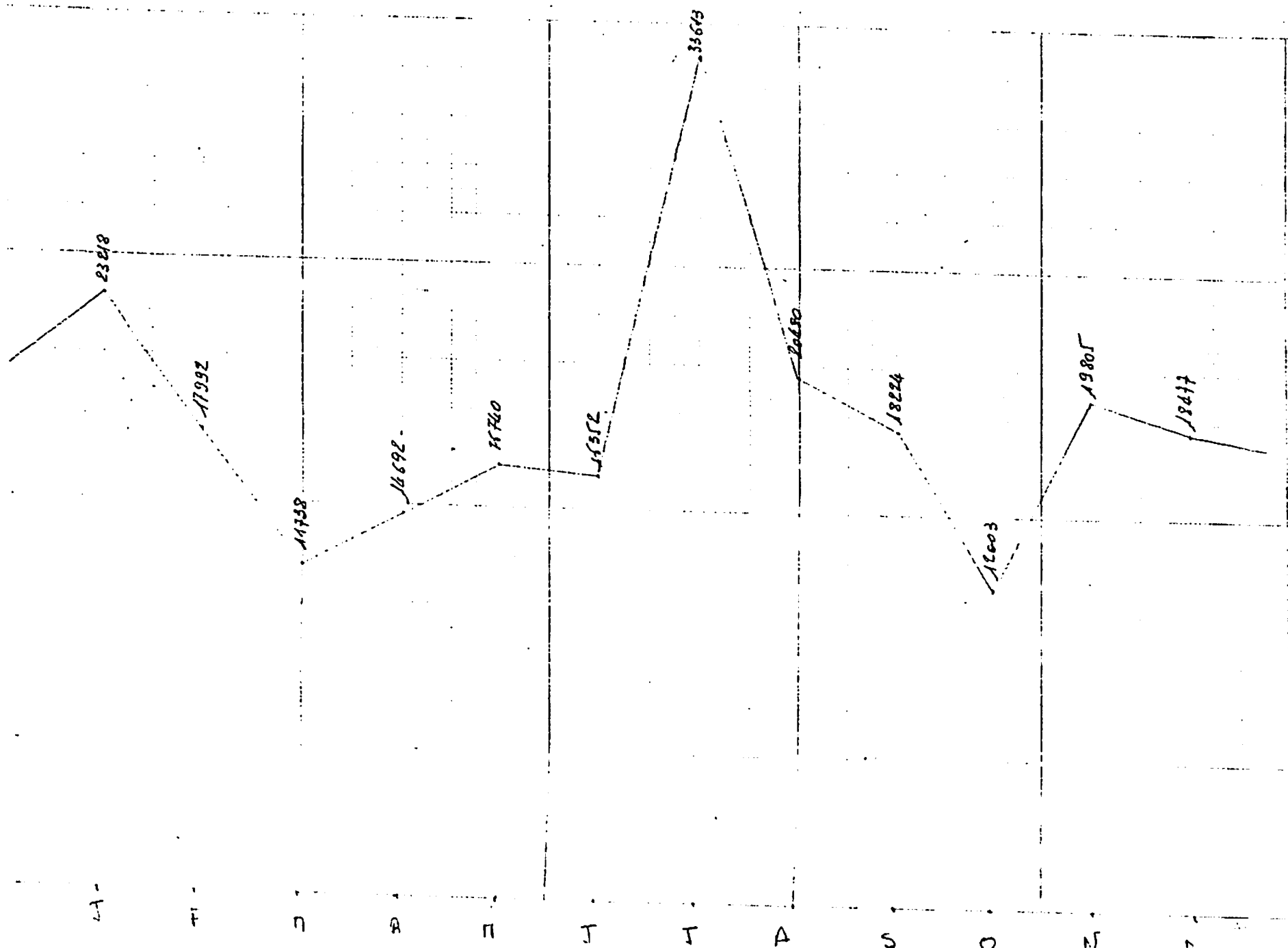
Production Etang bleu 1977.



Production Etang Bleu 1978

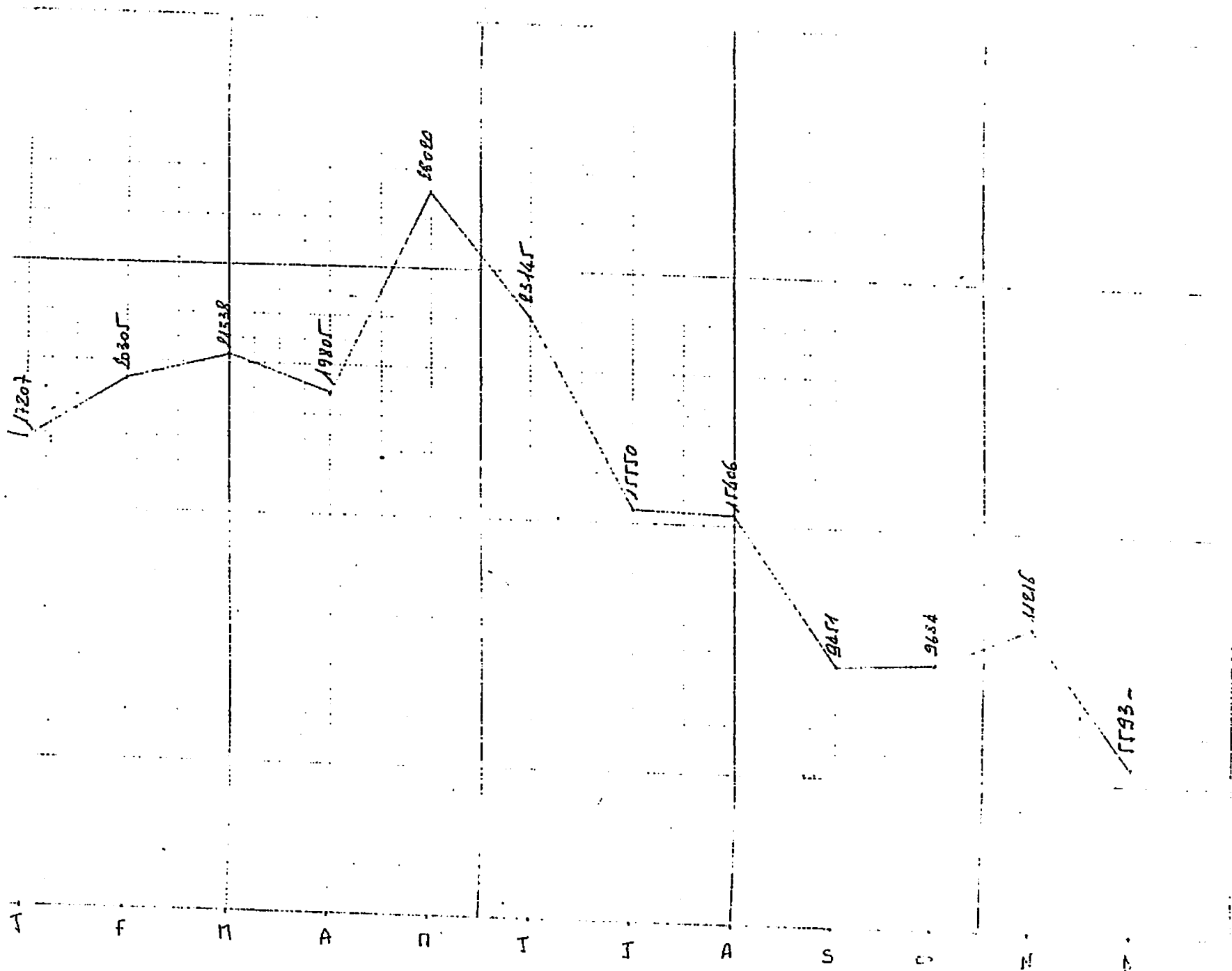


Production Along Slew 1979.



Production along S'ew 1980

10



MOIS	INIVE-DEB	SURF-DEB	INIVE-FIN	SURF-FIN	PRODUCTION	P-ETR	AV	E/SS
1977	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.00	0.000	0.000
1	630.00	1.6860	620.00	1.7920	13365.00	111.13	6960.000	90809.000-
2	620.00	1.7920	560.00	2.0110	14751.00	75.11	11409.000	48954.400-
3	550.00	2.0110	505.00	2.2695	13169.00	66.52	11771.400	61581.200-
4	505.00	2.2695	490.00	2.3400	15916.00	131.55	3457.130	112176.000-
5	490.00	2.3400	475.00	2.3790	15785.00	46.34	3539.250	27014.200-
6	475.00	2.3790	455.00	2.4310	14599.00	1.51-	4810.000	19409.000
7	455.00	2.4310	485.00	2.3530	20172.00	25.54-	7176.000-	12997.000
8	425.00	2.3530	505.00	2.2695	21635.00	30.09-	4622.500-	17012.500
9	505.00	2.2695	515.00	2.2225	16121.00	37.26-	2246.000-	13875.000
10	515.00	2.2225	520.00	2.1990	14618.00	12.59-	1105.370-	13512.600
11	520.00	2.1990	520.00	2.1990	14754.00	25.38-	0.000	14794.000
12	520.00	2.1990	515.00	2.2225	16114.00	4.49-	1105.370	17219.400
1978	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.00	0.000	0.000
1	515.00	2.2225	480.00	2.3660	19798.00	72.82	8029.880	44993.500-
2	490.00	2.3660	475.00	2.3790	19527.00	73.15	1186.250	52439.500-
3	475.00	2.3790	470.00	2.3920	15600.00	120.69	1192.750	99896.200-
4	470.00	2.3920	485.00	2.3530	20464.00	79.58	3558.750-	62679.300-
5	485.00	2.3530	525.00	2.1755	22041.00	78.80	9057.000-	65812.400-
6	525.00	2.1755	550.00	2.0580	22814.00	14.22	5291.880-	3298.820
7	550.00	2.0580	650.00	1.7140	25799.00	33.39-	18860.000-	6939.000
8	650.00	1.7140	735.00	1.4795	27064.00	29.56-	13572.400-	13491.600
9	735.00	1.4795	775.00	1.3635	26883.00	16.36-	5686.000-	21197.000
10	775.00	1.3635	795.00	1.3120	25320.00	2.52	2675.500-	20122.500
11	795.00	1.3120	800.00	1.3040	19224.00	27.00-	654.000-	18570.000
12	800.00	1.3040	790.00	1.3200	30215.00	24.24-	1312.000	21927.000
1979	0.00	0.0000	0.00	0.0000	0.00	0.00	0.000	0.000
1	790.00	1.3200	805.00	1.2960	23218.00	12.84	1962.000-	8419.600
2	805.00	1.2960	725.00	1.5085	17322.00	155.29	11218.000	126079.000-
3	725.00	1.5085	680.00	1.6360	11739.00	70.60	7075.120	51786.900-
4	680.00	1.6360	595.00	1.8570	14692.00	102.41	14845.300	72871.700-
5	595.00	1.8570	535.00	2.1285	16740.00	92.52	11956.500	63819.700-
6	535.00	2.1285	515.00	2.2225	15352.00	25.40	4351.000	4701.600-
7	515.00	2.2225	580.00	1.9170	33613.00	47.55	13453.400-	27389.400-
8	580.00	1.9170	635.00	1.7530	20460.00	79.91-	10092.500-	10387.500
9	635.00	1.7530	635.00	1.6230	18224.00	57.15-	8440.000-	9784.000
10	685.00	1.6230	700.00	1.5210	12002.00	20.80-	2403.000-	9800.000
11	700.00	1.5210	705.00	1.5665	19805.00	19.44-	786.975-	19018.100

PRECIPITATIONS MENSUELLES A PAIMPONT , EN
DIXIEMES DE MM , DE 1974 A 1979

<u>1974</u>	<u>1977</u>
1163	996
1752	1556
742	844
428	376
832	413
549	469
201	558
266	
1043	708
1029	146
1568	438
418	981
<u>1975</u>	919
1006	<u>1978</u>
232	1312
838	961
588	1110
830	498
226	424
655	494
259	768
1013	903
241	253
983	45
205	399
<u>1976</u>	<u>1732</u>
407	<u>1979</u>
472	706
434	1182
49	1179
78	647
6	1094
461	112
348	110
1247	435
1687	131
1331	916
844	478
	1695

PRODUCTIONS MENSUELLES DE L'ETANG BLEU
en m³ , de 1977 à 1980

1977

13365
14751
13169
15916
15785
14599
20173
21635
16121
14618
14794
16114

1978

19798
19527
19600
20464
22041
22814
25739
27064
26883
25320
19224
20215

1979

23218
17992
11738
14692
16740
16352
33613
20480
18224
12003
19805
18477

1980

17807
20305
21338
19805
28020
23145
15550
15406
9451
9684
11216
5593

VALEURS * DE L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE , EN MM ,
DE 1974 A 1979 , A PAIMPONT

19 74
20.7304
19.7073
27.8557
46.8844
70.2159
101.604
104.024
98.183
64.6807
31.8778
27.969
25.5694
19 75
23.6904
19.9739
23.3185
42.8343
67.3247
100.219
118.84
118.734
66.5994
40.2938
23.2346
8.72031
19 76
13.6349
14.9606
24.889
40.1397
77.2789
125.672
121.959
110.495
65.5062
46.5208
21.9664
9.28563
19 77
13.0784
24.0509
38.0615
39.1056
67.9914
92.9292
110.053
92.461
65.7338
54.1746
25.2786
18.7472

19 78
10.5106
16.5154
32.2036
35.5767
75.7877
85.6285
99.6184
87.778

68.0141
51.0675
27.0636
17.9109
19 79
0
15.791
25.3838
39.2954
61.851
91.0088
108.335
92.5109
70.8659
51.8592
23.8890
20.7523

SURFACE DE L'ETANG , EN HECTARES ,

POUR CHAQUE NIVEAU PAR RAPPORT A LA PASSERELLE

NIVEAU	SURFACE	NIVEAU	SURFACE
		5.25	2.1755
		5.3	2.152
		5.35	2.1285
		5.4	2.105
		5.45	2.0815
		5.5	2.058
		5.55	2.0345
		5.6	2.011
		5.65	1.9875
		5.7	1.964
		5.75	1.9405
		5.8	1.917
		5.85	1.8935
		5.9	1.87
		5.95	1.857
		6	1.844
		6.05	1.831
		6.1	1.818
		6.15	1.805
		6.2	1.792
		6.25	1.779
		6.3	1.766
		6.35	1.753
		6.4	1.74
		6.45	1.727
		6.5	1.714
		6.55	1.701
		6.6	1.688
		6.65	1.675
		6.7	1.662
		6.75	1.649
		6.8	1.636
		6.85	1.623
		6.9	1.61
		6.95	1.5955
		7	1.581
		7.05	1.5665
		7.1	1.552
		7.15	1.5375
		7.2	1.523
		7.25	1.5085
		7.3	1.494
		7.35	1.4795
		7.4	1.465
		7.45	1.4505
		7.5	1.436
		7.55	1.4215
		7.6	1.407
		7.65	1.3925
		7.7	1.378
		7.75	1.3635
		7.8	1.349
		7.85	1.3345
		7.9	1.32
		7.95	1.312
		8	1.304
		8.05	1.296
		8.1	1.288
		8.15	1.28
		8.2	1.272
		8.25	1.264
2.9	4.04		
2.95	3.968		
3	3.896		
3.05	3.824		
3.1	3.752		
3.15	3.69		
3.2	3.608		
3.25	3.536		
3.3	3.464		
3.35	3.392		
3.4	3.32		
3.45	3.248		
3.5	3.176		
3.55	3.104		
3.6	3.032		
3.65	2.96		
3.7	2.888		
3.75	2.816		
3.8	2.744		
3.85	2.672		
3.9	2.6		
3.95	2.587		
4	2.574		
4.05	2.561		
4.1	2.548		
4.15	2.535		
4.2	2.522		
4.25	2.509		
4.3	2.496		
4.35	2.483		
4.4	2.47		
4.45	2.457		
4.5	2.444		
4.55	2.431		
4.6	2.418		
4.65	2.405		
4.7	2.392		
4.75	2.379		
4.8	2.366		
4.85	2.353		
4.9	2.34		
4.95	2.3165		
5	2.293		
5.05	2.2695		
5.1	2.246		
5.15	2.2225		
5.2	2.199		

VALEURS MENSUELLES EN TERME "PRECIPITATIONS - ENNE" EN MM,
DE 1974 A 1979 A PAIMPONT.

1974

95.5096
155.493
46.3443
-4.0844
12.9841
-46.704
-38.9006
-14.8844
39.6193
71.0222
128.831
16.2306
1975
76.9096
3.2261
60.4815
15.9657
15.6753
-77.619
-19.0112
-15.8794
32.7006
-6.56502
75.0654
11.7797
1976
27.0651
32.2394
18.511
-35.2397
-35.4459
-24.7638
-5.16592
-2.37876
59.1938
122.179
111.134
75.1144

1977

86.5216
131.549
46.3385
-1.5056
-23.4786
-23.0718
-22.0746

-5.91958
-3.72868
-1.42667
72.8214
73.1528

1978

-120.689
79.5846
78.7964
14.2233
-33.3877
-21.9816
-10.2087
2.522
-14.6473
-10.1411
12.8364
155.289

1979

70.6
102.409
92.5162
25.4046
47.549
-79.8068
-27.8867
-6.45594
-4.43094
39.7408
23.9104

TEMPERATURES MOYENNES A PAINPONT DE 1971 A 1979
(CENTIGRADES DEGRES CELSIUS).

1974

656.5
597.5
655.5
947
1201.5
1652
1676
1718.5
1361.5
804
847
830

1975

777
641.5
594.5
913
1196.5
1665
1916.5
2032
1472
1032.5
755.5
343.5

1976

510.5
528.5
660
896.5
1379.5
2044.5
1981.5
1960
1445.5
1202
752
387.5

1977

419.5
698.5
851
788
1150.5
1360.5
1750

1614
1365.5
1278.5
757

612.5

1978

292.5
434
659.5
652
1197.5
1330.5
1533
1472.5
1338.5
1137.5

733

521.5

1979

-17.5
420.5
527.5
725.5
987
1419
1670.5
1556.5
1400
1161.5
654.5
609

NIVEAU	SURFACE	NIVEAU	SURFACE
8.3	1.256	11.35	.6825
8.35	1.248	11.4	.675
8.4	1.24	11.45	.6675
8.45	1.232	11.5	.66
8.5	1.224	11.55	.6525
8.55	1.216	11.6	.645
8.6	1.208	11.65	.6375
8.65	1.2	11.7	.63
8.7	1.192	11.75	.6225
8.75	1.184	11.8	.615
8.8	1.176	11.85	.6075
8.85	1.168	11.9	.6
8.9	1.16	11.95	.5875
8.95	1.15425	12	.575
9	1.1485	12.05	.5625
9.05	1.14275	12.1	.55
9.1	1.137	12.15	.5375
9.15	1.13125	12.2	.525
9.2	1.1255	12.25	.5125
9.25	1.11975	12.3	.5
9.3	1.114	12.35	.4875
9.35	1.10825	12.4	.475
9.4	1.1025	12.45	.4625
9.45	1.09675	12.5	.45
9.5	1.091	12.55	.4375
9.55	1.08525	12.6	.425
9.6	1.0795	12.65	.4125
9.65	1.07375	12.7	.4
9.7	1.068	12.75	.3875
9.75	1.06225	12.8	.375
9.8	1.0565	12.85	.3625
9.85	1.05075	12.9	.35
9.9	1.045	12.95	.3405
9.95	1.03925	13	.331
10	1.0155	13.05	.3215
10.05	1.00075	13.1	.312
10.1	.986	13.15	.3025
10.15	.97125	13.2	.293
10.2	.9565	13.25	.2835
10.25	.94175	13.3	.274
10.3	.927	13.35	.2645
10.35	.91225	13.4	.255
10.4	.8975	13.45	.2455
10.45	.88275	13.5	.236
10.5	.868	13.55	.2265
10.55	.85325	13.6	.217
10.6	.8385	13.65	.2075
10.65	.82375	13.7	.198
10.7	.809	13.75	.1885
10.75	.79425	13.8	.179
10.8	.7795	13.85	.1695
10.85	.76475	13.9	.16
10.9	.75	13.95	.152115
10.95	.7425	14	.14423
11	.735	14.05	.136345
11.05	.7275	14.1	.12846
11.1	.72	14.15	.120575
11.15	.7125	14.2	.11269
11.2	.705	14.25	.104805
11.25	.6975	14.3	.09692
11.3	.69	14.35	.089035

NIVEAU

SURFACE

14.4	.00115
14.45	.073265
14.5	.06536
14.55	.057495
14.6	.04961
14.65	.041725
14.7	.03384
14.75	.025955
14.8	.01807
14.85	.010185
14.9	2.30000E-03