

Lac de Chalain

(Jura)



Apports en Fertilisants par ses Affluents

Stage effectué du 6 Mai au 31 Juillet 1985
au Service Régional d'Aménagement des Eaux
de Franche-Comté (Besançon)

Institut Universitaire de Technologie de Tours
Département Biologie Appliquée
Option Génie de l'Environnement

ROCHEROLLE
Marie - Hélène

Je remercie,

- Monsieur DEMANGELLE, Ingénieur en Chef du GREF, Chef du Service Régional de l'Aménagement des Eaux de Franche-Comté, pour m'avoir accueillie dans son Service.

- Monsieur MASSON, Maître de Stage, qui a mis à ma disposition de nombreuses sources d'informations. Je lui suis reconnaissante d'avoir lu et corrigé les textes.

Merci à l'ensemble des personnels du S.R.A.E., pour la gentillesse avec laquelle ils m'ont apporté les renseignements utiles à l'élaboration de ce rapport ;

- Messieurs REYLE, MARTIN, RUOTOLO, GAUTHIER, Hydrologues.
- Monsieur METTETAL, Géologue.
- Monsieur ROUAULT, Chimiste.
- Monsieur MOUSTACHE, Dessinateur.
- Madame GRAMMONT, Secrétaire.

Je retiendrai de ces trois mois passés en leur compagnie, un aperçu intéressant sur les problèmes de l'eau en Franche-Comté, et un contact positif avec le milieu professionnel.

Tous mes remerciements à Monsieur P. BALLAND D.D.P. au Ministère de l'Environnement, avec qui j'ai utilisé le matériel informatique pour une grande part des calculs mentionnés dans l'étude.

P R E S E N T A T I O N

L'organisme qui a bien voulu m'accueillir durant ce stage est le SERVICE REGIONAL DE L'AMENAGEMENT DES EAUX DE FRANCHE-COMTE (regroupant les Départements du Doubs, de la Haute-Saône, du Jura et du Territoire de Belfort), service d'état, qui dépend du Ministère de l'Agriculture et comprend plusieurs secteurs d'activités :

- **l'HYDROLOGIE QUANTITATIVE**, qui regroupe la climatologie, l'hydrométrie (essentiellement mesure des différents paramètres hydrologiques tels que débits des cours d'eau, vitesse du courant...) et la gestion d'un réseau de mesures limnigraphiques.
- **l'HYDROLOGIE QUALITATIVE**, qui comprend un secteur hydrobiologie et un secteur chimie et dont le rôle est de contrôler la qualité des eaux superficielles (rivières, lacs, opération "Sauvetage du Doubs et de son bassin" par exemple). Ce travail est effectué principalement au moyen d'analyses hydrobiologiques et physico-chimiques et aboutit notamment à la réalisation de cartes de qualité des eaux (procédure d'objectifs de qualité des cours d'eau).
- **l'HYDROGEOLOGIE**, qui s'attache plus particulièrement à la prospection de nouvelles ressources en eau, à l'étude des circulations souterraines et à la connaissance du réseau hydrographique karstique.
- **gestion des S.A.T.E.S.E.**, Services Départementaux placés sous l'autorité du Conseil Général et qui ont pour rôle de surveiller le fonctionnement des stations d'épuration des départements franc-comtois.

SOMMAIRE

INTRODUCTION

PREMIERE PARTIE : Le Lac et son Bassin Versant.

1 - Situation géographique	PAGES 1
2 - Géologie régionale	2
3 - Eléments d'hydrologie	4
a) alimentation	
b) émissaire	
c) pluviométrie	
4 - Profondeur et variation de niveau des eaux du lac	8
5 - Limites du Bassin Versant	10
6 - Occupation des sols - activités humaines	12

DEUXIEME PARTIE : Apports en fertilisants par le réseau hydrographique superficiel.

I - <u>DONNEES PHYSICO-CHIMIQUES ET HYDROMETRIQUES</u>	14
1 - Conditions de prélèvements	
2 - Mesure des débits	18
3 - Analyses chimiques	
a) résultats et interprétations	
b) conclusion	31
II - <u>METHODOLOGIE DE QUANTIFICATION DES APPORTS EN FERTILISANTS</u>	32
A - CALCUL THEORIQUE	33
1) Méthode sommaire, sans données sur C et Q	
B - CALCUL REEL	35
a) en série chronologique	
b) en débit croissant et à concentration constante.	36
2) Méthodes relationnelles	37
a) les lois exactes	
b) méthode en débit croissant et de la ligne brisée	39
c) méthode du polynôme d'interpolation	40
- avec les concentrations	
- avec le flux	
III - <u>APPLICATION AUX AFFLUENTS DU LAC DE CHALAIN</u>	42
1 - Méthode en série chronologique	43
2 - Méthode en débit croissant et à concentration constante	46
3 - Méthode de la ligne brisée	51
4 - Polynôme d'interpolation avec le flux	56

.../...

TROISIEME PARTIE : Apports en fertilisants et conséquences sur la qualité des plans d'eau.

1 - Bilan hydrologique	61
2 - Temps de renouvellement des eaux	62
3 - Calcul de la charge spécifique	63
4 - Détermination des charges limites	64

CONCLUSION GENERALE

ANNEXES :

1 - Bilan des précipitations	70
2 -)	
3 - { Tableaux des valeurs Q - C et F instantanées	
4 -) des trois affluents du lac de Chalain (71 - 72 - 73)	
5 - Fonctionnement d'un limnigraphe	74
6 - Limnigrammes des deux affluents du lac de Chalain	75
7 - Courbes de tarage	76
8 - Valeurs des paramètres physico-chimiques	77

◇ ◇ ◇ ◇ ◇ ◇ ◇ ◇

INTRODUCTION

Dans le cadre de l'opération "Protection et Restauration de la Qualité des Eaux du Bassin de l'Ain", un programme d'études des lacs du Bassin de l'Ain mis en place par l'Etablissement Public Régional depuis 1981 et pendant 5 ans, est réalisé avec le concours de différents chargés d'études :

- Le CEMAGREF
(Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Division Qualité des Eaux).
- Le Laboratoire Vétérinaire du Département du Jura.
- L'Université de Franche-Comté.
- Le Service Régional de l'Aménagement des Eaux
qui assure la coordination des opérations et la publication du rapport de synthèse.

Ces études aboutissent à la réalisation de monographies écologiques pour une dizaine de plans d'eau du Département du Jura.

L'objet du travail qui m'a été confié est de développer le problème des "Apports en Fertilisants à un lac par le réseau hydrographique superficiel" et concerne le lac de Chalain, grâce à des données recueillies du 05.01.84 au 08.01.85.

L'étude comporte une recherche bibliographique sur les méthodes employées pour la quantification des apports, et une application de ces méthodes aux affluents du lac pour l'azote minéral et les orthophosphates.

Cette application qui se voulait surtout "manuelle" a débouché sur l'utilisation de matériel informatique. Différents programmes mis au point par Monsieur BALLAND (Ministère de l'Environnement D.P.P.) nous ont permis, dans la première semaine de Juillet, de traiter sur ordinateur les données à notre disposition.

PREMIERE PARTIE

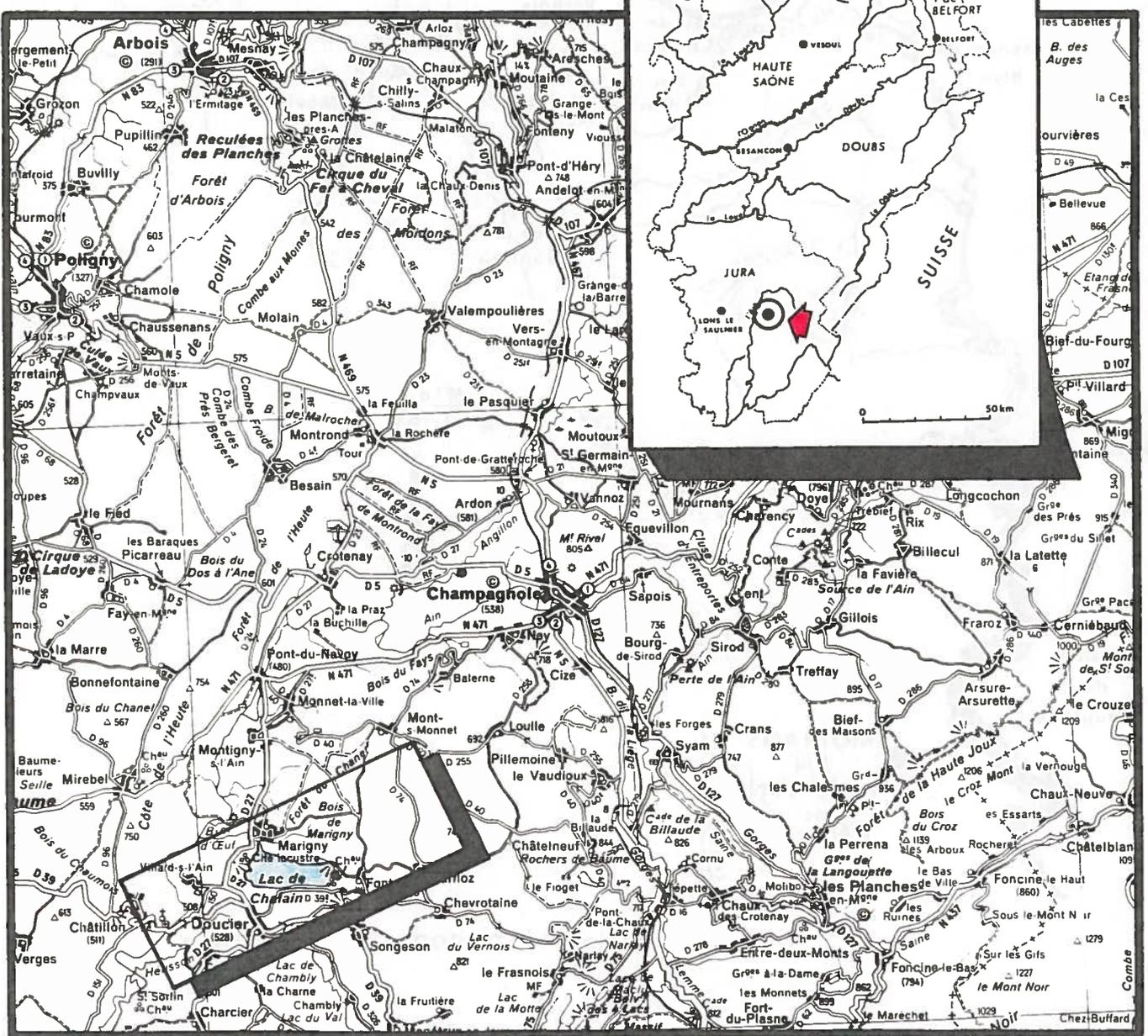
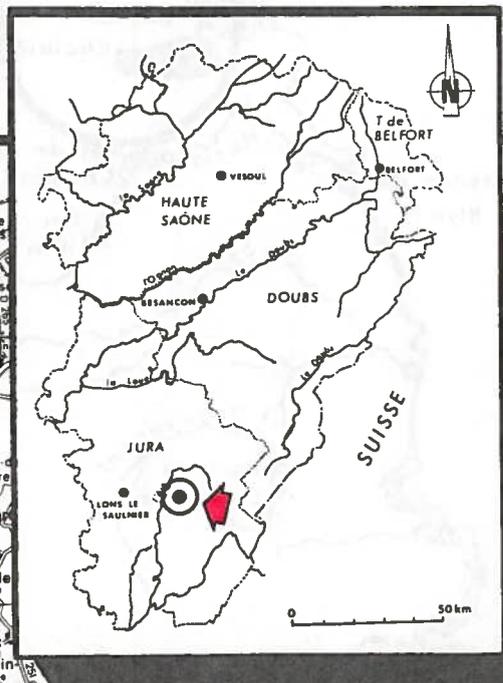
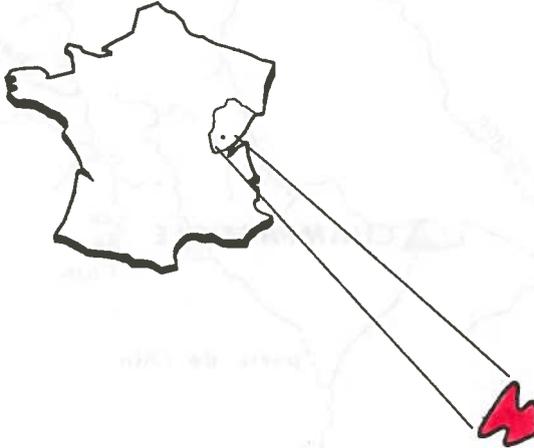
LE LAC ET SON BASSIN VERSANT

◇ ◇ ◇ ◇

Fig. 1

SITUATION

GEOGRAPHIQUE



1 - SITUATION GEOGRAPHIQUE : (Fig. 1 et 2)

Le Lac de Chalain appartient au groupe des plans d'eau de la Combe d'Ain. Il est situé sur le territoire de la commune de Fontenu à une vingtaine de kilomètres à l'Est de LONS LE SAUNIER au pied du plateau de CHAMPAGNOLE (deuxième plateau du Jura), à une altitude voisine de 490 m.

Sa superficie est d'environ 230 ha (6 % du bassin versant), sa longueur de 2700 m, sa largeur varie de 700 m dans la partie la plus étroite à 1100 m dans la partie la plus large.

Il est parmi les plus grands des lacs naturels jurassiens.

Sa forme est sensiblement rectangulaire, il pénètre en partie dans une échancrure du plateau jurassique de Fontenu, le reste de sa surface s'étalant entre les mamelons arrondis des collines glacières de Marigny, Villard sur l'Ain et de Doucier.

La moitié orientale, dominée par des falaises calcaires, boisées, forme une cuvette abrupte dont la profondeur maximale atteint 30 m à 32 m.

La moitié occidentale, de profondeur légèrement inférieure, creusée dans les alluvions glaciaires qui forment un barrage à l'extrémité dans la Combe d'Ain, à des bords souvent marécageux se prolongeant en une benne de 10 à 60 m d'étendue. (KREITMANN 1937).

.../...

2 - GEOLOGIE REGIONALE :

Le massif du Jura est caractérisé par la succession d'Ouest en Est, de plateaux d'altitudes croissantes, séparés par des plis marquant plus ou moins nettement le paysage.

A l'Est du lac dominant des formations calcaires du jurassique supérieur. Le plan d'eau est bordé d'alluvions fluvio-glaciaires à l'Est et d'alluvions quaternaires à l'Ouest. Le fond est constitué d'éléments morainiques imperméables

Le sous-sol calcaire fissuré du plateau (Karst) laisse facilement s'infiltrer l'eau de surface ce qui explique le faible développement du réseau hydrographique superficiel, et la prédominance des circulations souterraines. (Fig. 3)

L'une d'entre elles a été mise en évidence par une expérience de coloration réalisée en Novembre 1983 par le Service Régional de l'Aménagement des Eaux de Franche-Comté ; elle a consisté à injecter 2 kg de fluorescéine dans la perte du Lac de Narlay situé à 7 kilomètres à l'Est du Lac de Chalain.

L'utilisation de fluocapteurs à la résurgence du ruisseau du Moulin (affluent du lac) a révélé au bout de 90 h le passage du colorant.

Une seconde injection, effectuée à l'exutoire du Lac du Vernois a également abouti à la même résurgence.

Il existe donc une communication souterraine entre les Lacs de Narlay - du Vernois et de Chalain.

De nombreux gouffres, pertes et résurgences répertoriés dans la région témoignent de l'importance du Karst dans l'ensemble du plateau : gouffre d'une soixantaine de mètres entre Doucier et Songeson sur le Chemin de Chambly, gouffre du "Bois de la Fratte" exutoires souterrains des Lacs du Vernois, de Narlay et de la Motte, pertes du Lac du Fioget en communication avec les sources de la Balerne aux environs de CHAMPAGNOLE, etc ... (cf. Fig. 3)

REMARQUE :

Aucune donnée pédologique n'existe sur les sols du bassin versant concerné.

.../...

Lac de Chalain

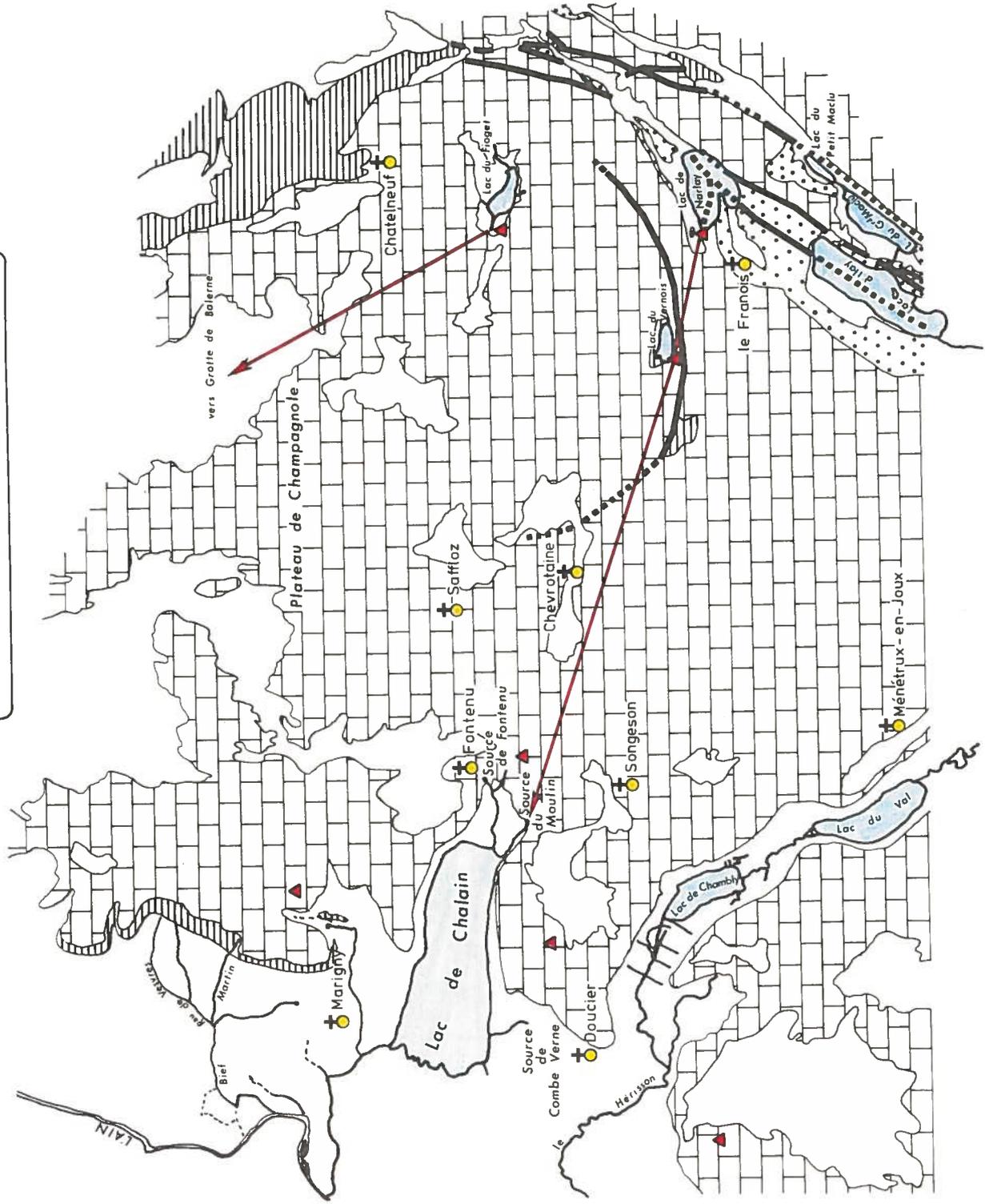


Fig. 3

Schéma Géologique

-  Alluvions et dépôts récents
-  Tertiaire et Crétacé Calcaires et marnes
-  Calcaires du Jurassique supérieur
-  Marnes et Marno-calcaires
-  Faille
-  Gouffre ou perte
-  Coloration
-  Commune
-  Réseau hydrographique

ECHELLE



3 - ELEMENTS D'HYDROLOGIE :

a) - ALIMENTATION :

Le Lac de Chalain est alimenté par plusieurs ruisseaux dont les principaux sont : (Fig. 7 p. 12)

- *Sur la côte Est, le Ruisseau de Fontenu et le Ruisseau du Moulin issus de deux résurgences qui jaillissent au pied des falaises calcaires.*
- *Sur la côte méridionale, le Ruisseau de Combe Verne émis par une zone humide bordant le Sud Est du lac.*

Tous trois ont des débits assez variables, la résurgence du Ruisseau de Fontenu étant d'ailleurs captée en partie pour l'alimentation en eau de la commune de Fontenu.

Il existe d'autres apports d'eau au lac, tels ceux des zones marécageuses de la bordure occidentale au lieu-dit "Les Vernois" ainsi que diverses émergences à très faibles débits et souvent temporaires du "Bois des Côtes" sur la bordure Nord

CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES DES AFFLUENTS

COMPOSANTES	RUISSEAU DU FONTENU	RUISSEAU DU MOULIN	RUISSEAU DE COMBE VERNE
Largeur moyenne (m)	1 à 5 m	4 à 5 m	1 à 2 m
Longueur totale (m)	600	200	200
Altitude des sources	530	520	510
Profondeur moyenne (cm)	250	350	200
Granulométrie F. lotique	Galets	Blocs	Galets
- F. lenticque	Graviers	Graviers	Graviers
Supports végétaux F. lotique	Algues	Bryophytes	Algues
- F. lenticque	Phanérogames	Algues	Phanérogames
Importance de la couverture végétale (% surface du fond)	-	15 à 40 %	-
Ensoleillement moyen	assez dégagé	couvert	couvert
Couleur de l'eau	vert	bleu - vert	incolore
Régime thermique			
T° maxi	15	11,2	16,7
(°C)			
T° mini	7,5	6	2,5

b) - EMISSAIRE :

L'ancien émissaire naturel du Lac, le "Bief de l'Oeuf" (Fig.7 p12) a été court-circuité depuis l'exploitation hydro-électrique, par une conduite souterraine dont l'entrée est située à la pointe Nord Ouest et qui achemine les eaux à une usine électrique installée en contre-bas, sur les bords de l'Ain.

c) - PLUVIOMETRIE :

Les renseignements pluviométriques concernant la région du lac sont fournis par deux stations d'observations :

- l'une installée à Marigny par E.D.F.
- l'autre située à Le Franois et exploitée par la Météorologie Nationale.

Tous les mois est fournie une fiche indiquant la hauteur des précipitations journalières en mm, par station.

THIESSEN a élaboré une méthode qui permet de répartir géographiquement, sur un bassin versant donné le total des précipitations enregistrées par une station pluviométrique. Appliquée ici, elle a permis de définir les proportions des précipitations intéressant chaque sous bassin versant.

SOUS BASSINS VERSANTS	FONTENU	MOULIN	COMBE VERNE ET LES VERNOIS
LE FRASNOIS	50 %	90 %	0 %
MARIGNY	50 %	10 %	100 %

La moyenne annuelle des précipitations sur le bassin versant du lac, est d'environ 1680 mm (cf.annexe 1 p.) d'eau avec des maxims en Janvier Septembre, et des minimas en Avril, Juillet et Août comme le montre le graphique ci-après. (Fig.4)

.../...

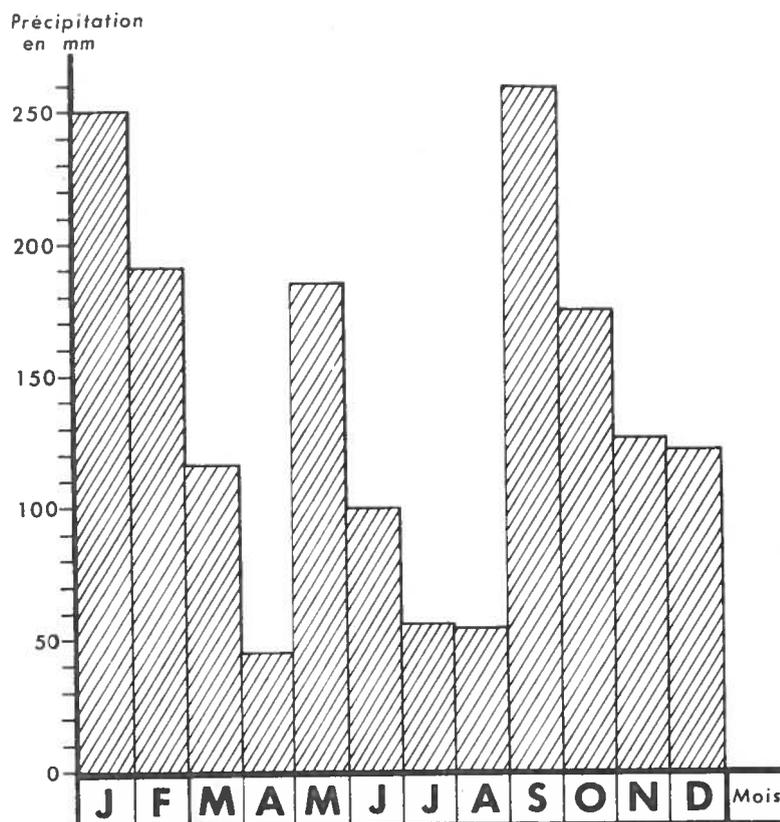


Fig.4 : Histogramme des précipitations (Données stations de Marigny et le Frasnais 1984).

Si l'on met en parallèle hydrogramme (débits en fonction du temps) et courbe de précipitations, les observations suivantes peuvent être formulées :

(Exemple du ruisseau du Moulin, pour la période du 1.01 au 18.02.84) - (Fig. 5).

- Pour des précipitations inférieures à 20 mm, le débit du ruisseau ne dépasse pas 3 m³/s. Mais au-delà de ce seuil le cours d'eau est en crue. Ceci est le cas pour la majorité des ruisseaux de la région.
- Les crues du 14.01 et 7.02 ont lieu 24 h après les plus fortes précipitations (cet écart se vérifie aussi pour le ruisseau de Fontenu).
- La quantité d'eau tombée les 11, 12, 13 Janvier caractérise les "pluies efficaces" et représente : 59 mm d'eau sur 28,12 km² (surface du sous bassin versant du Moulin) soit 1659080 m³.

.../...

Les 13, 14 et 15 Janvier le ruisseau a débité :
972 000 m³ soit environ 60 % du volume tombé.

Le même calcul peut être fait pour différents épisodes pluvieux :

FEVRIER : les 5, 6 et 7.02 il est tombé : 3 121 320 m³
les 6,7 et 8.02 il s'est écoulé du ruisseau : 1 589 760 m³
soit à peu près 50 % du volume d'eau tombé.

Ces deux résultats donnent pour la période hivernale un rapport entre précipitations et débits d'environ 55 %

SEPTEMBRE : les 14 et 15.09 il est tombé : 1 867 449 m³ d'eau
les 16 et 17 il s'est écoulé : 535 680 m³ soit
approximativement 30 % du volume d'eau tombé.

Le rapport "précipitations - débits" inférieur en été, met en évidence l'action des végétaux sur la rétention de l'eau, et l'on peut penser que le "réservoir" que constitue le sous-sol karstique se remplit essentiellement pendant les mois d'hiver.

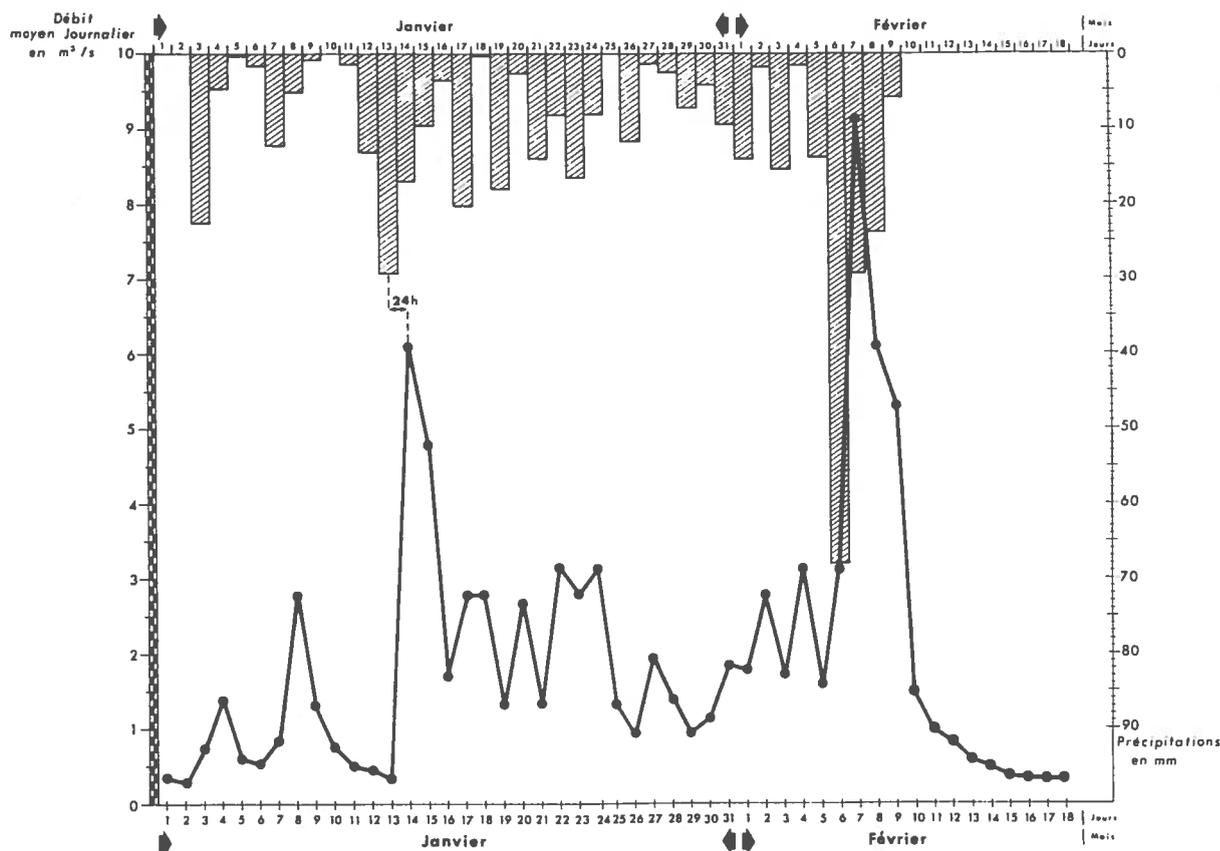


Fig.5 : Rapport entre précipitations et crues pour le Ruisseau du Moulin.

4 - PROFONDEUR ET VARIATION DU NIVEAU DES EAUX DU LAC :

L'exploitation hydroélectrique du lac entraîne des variations fréquentes du niveau des eaux.

Le schéma ci-après transmis, à la demande du Service Régional de l'Aménagement des Eaux, par E.D.F. (Groupe Régional de Production Hydraulique "Rhône") reproduit pour l'année 1984 les différentes fluctuations des hauteurs d'eau du lac, enregistrées par le limnigraphe installé à la pointe Nord Ouest au niveau de la prise d'eau.

Au cours de l'année 1984, le lac a atteint les cotes maximales de 488,9 m et minimale de 485,5 m, ce qui représente une amplitude de 3,4 m, égale à celle de 1983.

D'une façon générale le niveau d'eau est élevé en Janvier, baisse d'environ 2 m en Février pour varier légèrement jusqu'à mi-juin. Durant la période estivale il est maintenu constant et relativement bas (486,4 m) pour laisser la plage du Domaine de Chalain découverte aux baigneurs. A partir de mi-septembre, les eaux remontent et ce, pendant tout l'hiver.

On observe donc pendant une moitié de l'année des hauteurs élevées ou intermédiaires et pendant l'autre moitié des hauteurs voisines du minimum.

REMARQUES :

Les variations importantes et brutales du niveau des eaux sont préjudiciables au déroulement normal des cycles biologiques dans les zones de bordure.

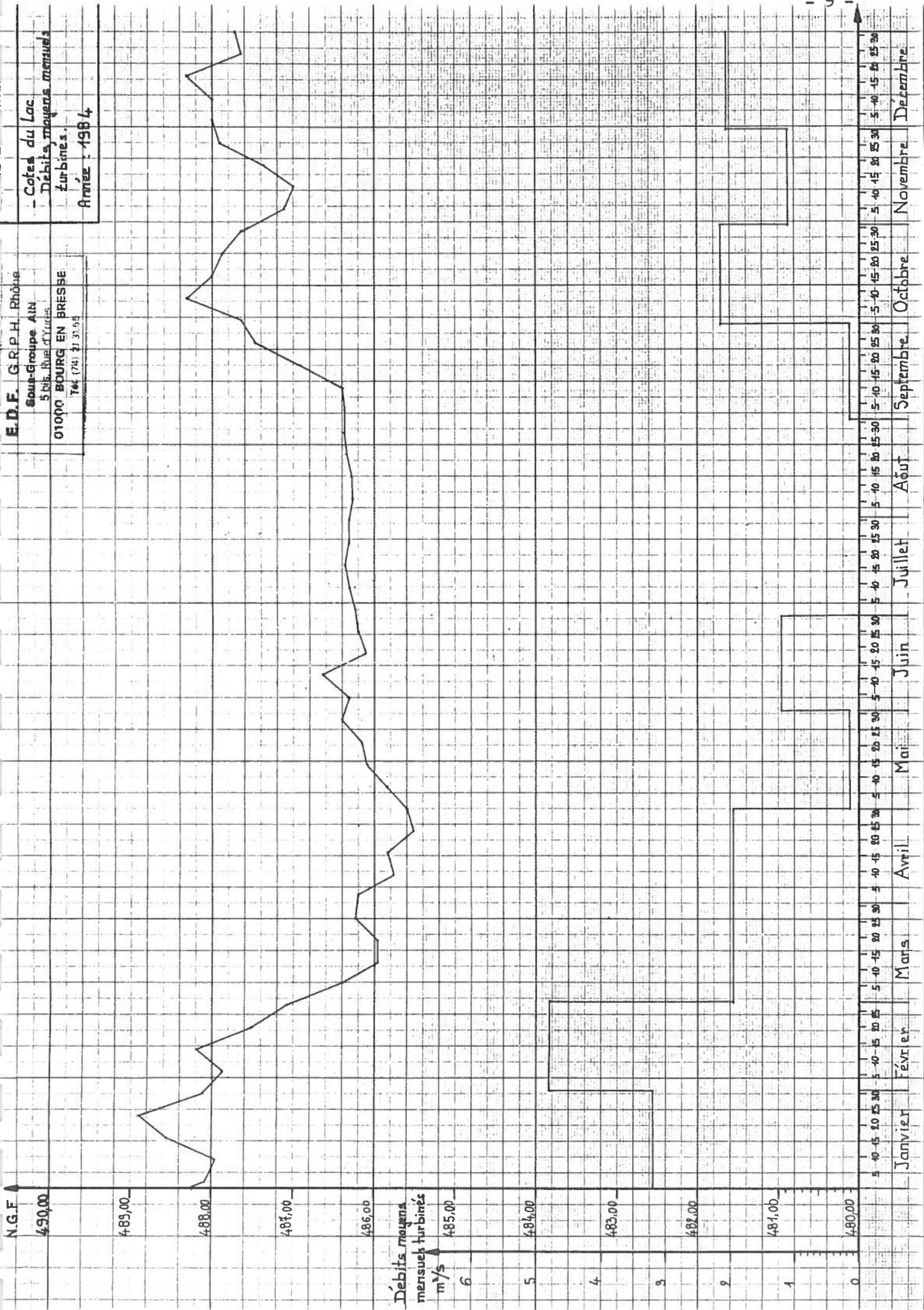
En ce qui concerne le Lac de Chalain, dès le début de l'exploitation hydroélectrique (1904), les auteurs ont noté une modification sensible de ses abords ; KREITMANN signale qu'à cette époque, le niveau a été abaissé brusquement de 6 m.

Outre, des effondrements en plusieurs points de la côte, il en est résulté des destructions importantes de la ceinture végétale et un anéantissement quasi total de la faune qu'elle abritait (Mollusques en particulier).

.../...

E.D.F. G.R.P.H. Rhône
 Sous-Groupe AIN
 5 bis, Rue d'Yverles
 01000 BOURG EN BRESSE
 Tél. (74) 31 31 59

- Cotes du Lac
 Débits moyens mensuels
 Turbines.
 Année : 1984



5 - LIMITES DU BASSIN VERSANT :

Le bassin versant du lac, représentant une surface sur laquelle l'eau tombée en tout point s'écoule vers le plan d'eau, a été délimité à l'aide d'une carte topographique au 1/25 000 (CHAMPAGNOLE 5.6. et LONS LE SAUNIER 7.8). Les points de crêtes ont été au mieux reliés en tenant compte de la circulation souterraine du Lac de Narlay - Lac du Vernois - Lac de Chalain, et de la géologie de la région.

Les sous bassins de Fontenu et Moulin ont été séparés assez arbitrairement en essayant toutefois d'imaginer la direction prise par les pluies dans le sous-sol karstique ; celui de Combe Verne isole le ruisseau, et une partie des falaises bordant le lac, la zone des marais de l'aval constituant le quatrième sous bassins dénomé "Les Vernois". Cette délimitation sera utile pour établir un bilan hydrologique du lac (traité dans la troisième partie).

Les surfaces respectives ont été précisées par planimétrie :

<u>BASSIN VERSANT</u> topographique total :	38,37 km ²
<u>SOUS BASSINS</u> :	
1 Les Vernois	: 4,81 km ²
2 Combe Verne	: 1 km ²
3 Fontenu	: 4,44 km ²
4 Moulin	: 28,12 km ²
<u>LE LAC</u>	2,3 km ² soit environ 1/17 de la surface totale du Bassin Versant.

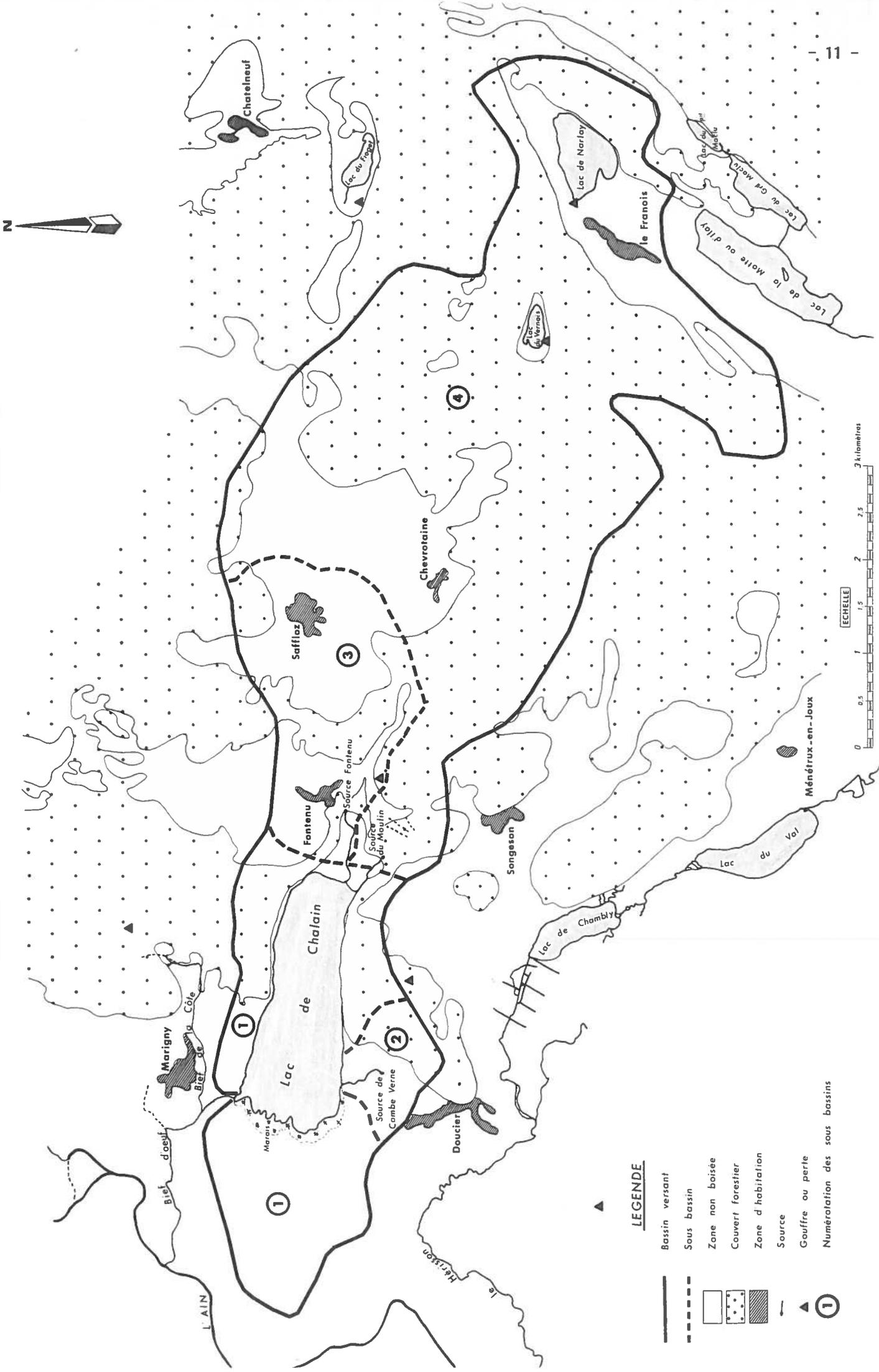
REMARQUES :

Compte-tenu de la géologie de la région il est probable que le bassin d'alimentation réel du lac soit plus vaste que celui délimité sur la Fig. 6.

Ce dernier est de forme allongée dans la direction Est-Ouest (sens de la longueur du lac) et s'étend pour 85 % de sa surface à l'Est du plan d'eau.

.../...

Fig. 6 : Bassin Versant du Lac de Chalain



LEGENDE

- Bassin versant
- - - Sous bassin
- Zone non boisée
- Couvert forestier
- ▨ Zone d'habitation
- ▲ Source
- Gouffre ou perte
- ① Numérotation des sous bassins

6 - OCCUPATION DES SOLS - ACTIVITES HUMAINES :

Le bassin versant superficiel est occupé sur 60 % de sa surface par des forêts de conifères, des bois de feuillus et des broussailles.

Les secteurs voués à l'agriculture sont peu étendus et surtout localisés autour des villages de Fontenu, Saffloz, Chevrotaine, le Franois, - qui sont les quatre communes comprises dans le périmètre du bassin. (Fig. 6 p.11 Leur population permanente est faible respectivement de 47, 75 18 et 114 habitants, soit un total de 254. (d'après un recensement de 1982).

A proximité immédiate du lac, quatre zones principales d'habitations sont à distinguer (Fig. 7 ci-dessous).

- le Domaine de Chalain (camping départemental).
- la Base Nautique (Secrétariat d'Etat à la Jeunesse, aux Sports et aux Loisirs) située sur le territoire communal de Doucier.
- la Pergola et son camping (commune de Marigny).
- le Bourg de Fontenu.

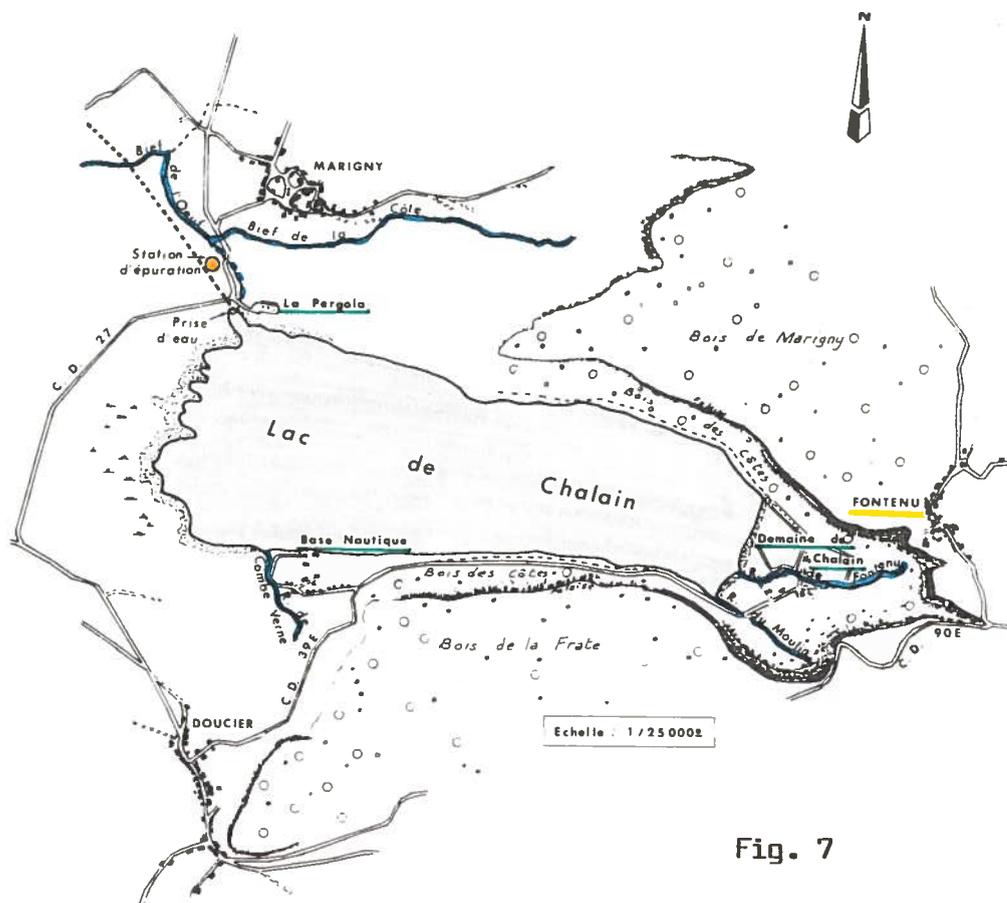


Fig. 7

En été, principalement en Juillet et Août, le Domaine de Chalain accueille entre 3 000 et 3 500 personnes.

Les eaux usées du camping et de tous les bâtiments annexes sont collectées par un réseau d'assainissement de type séparatif qui longe le lac par sa rive nord et aboutit à une station d'épuration située à l'aval.

La base de voile qui accueille 100 personnes 9 mois de l'année et dont certains bâtiments sont en cours de construction (extension du centre) sera dotée d'un dispositif d'assainissement autonome. (décanteur-digesteur et filtres à sable). Le dossier technique déposé pour instruction prévoit le rejet au lac des effluents ainsi traités.

Le secteur de Marigny, plus particulièrement "La Pergola" et son camping accueillant environ 400 personnes en pleine saison, sont raccordés depuis 1972 au collecteur évacuant les eaux usées du Domaine.

La commune de Fontenu a une population permanente de 47 habitants, qui est plus importante en été (colonies de vacances). L'ensemble ne possède ni réseau d'assainissement, ni station d'épuration, les eaux usées du village proprement dit étant évacuées dans un gouffre du plateau dominant le lac.

Au Sud Ouest du lac, au lieu-dit "Molard de la Reculée", se trouve une zone urbanisée comprenant une quarantaine de villas particulières. Chacune des habitations possède son propre système d'évacuation et de traitement de ses eaux usées (fosses septiques).

DEUXIEME PARTIE

APPORTS EN FERTILISANTS PAR LE RESEAU

HYDROGRAPHIQUE SUPERFICIEL

◇ ◇ ◇ ◇

I - DONNEES PHYSICO-CHIMIQUES ET HYDROMETRIQUES :

1 - CONDITIONS DE PRELEVEMENTS :

L'étude porte sur des données recueillies du 5.01.84 au 8.01.1985 à fréquences quasi hebdomadaires, sur les ruisseaux de Fontenu du Moulin et de Combe Verne. (au total 145 échantillons).

Les analyses physico-chimiques ont été faites sur des prélèvements instantanés et manuels effectués en fin de matinée sur les 3 affluents, aux points A B C figures ci-dessous.

La connaissance des débits a été satisfaite soit par l'installation de limnigraphes soit par évaluation directe à l'occasion des prélèvements.

2 - MESURE DES DEBITS :

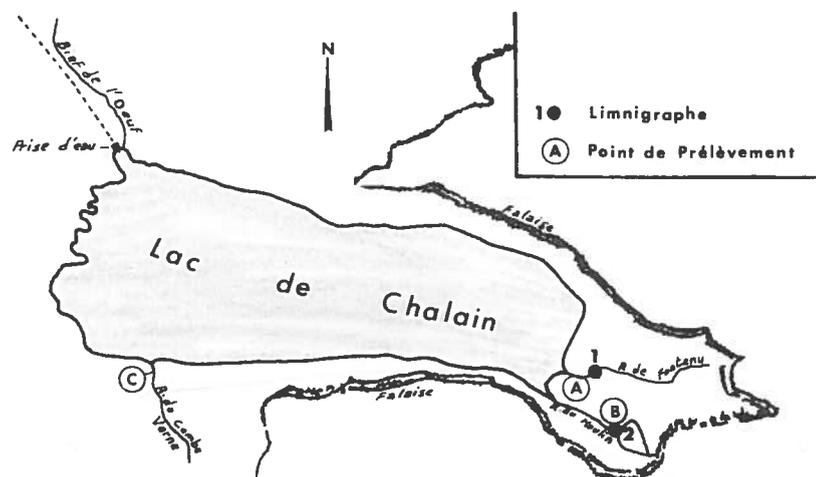
Deux stations limnigraphiques ont été installées : (principe de fonctionnement annexe 5 p. 74)

- l'une sur le ruisseau de Fontenu 1 , au premier tiers aval.

- l'autre sur le ruisseau du Moulin 2 .En raison des montées d'eau trop importantes à l'amont lorsque le lac est à son niveau maximum, la station a été placée vers le milieu de son cours.

En ce qui concerne le ruisseau de Combe Verne la trop faible profondeur de l'eau et l'écoulement en cascades n'ont pas permis d'installer de stations limnigraphiques. Les débits ont donc été estimés lors de chaque prélèvement. Les flux instantanés véhiculés par ce ruisseau ont pu ainsi être évalués grossièrement et pris en compte dans le calcul des apports totaux au lac.

(Les valeurs des débits instantanés pour les trois affluents sont données dans les tableaux annexes 2,3,4 p 71 - 72 - 73).



Les hydrologues établissent pour chaque ruisseau une courbe de tarage (annexe 7 p 76) pour cela ils mesurent au moyen d'un moulinet des vitesses de courant sur une section donnée du cours d'eau.

Par intégration, ils calculent le débit équivalent (Q en m³/s) et le relie à la hauteur d'eau (H) relevée au limnigraphe à l'instant de la mesure.

Chaque point $Q = f(H)$ permet de tracer une courbe de forme exponentielle qui donnera pour toutes hauteurs d'eau, le débit du ruisseau.

Un limnigramme convertit en débits en fonction du temps est un hydrogramme.

Les hydrogrammes de Fontenu et de Moulin (en moyennes journalières obtenues par dépouillement manuel des limnigrammes) font apparaître quatre grandes crues dans l'année :

- 14 Janvier, 7 Février, 6 Octobre et 17 Décembre. (cf pp 16 et 17)

D'une manière générale, le ruisseau du Moulin a un débit beaucoup plus irrégulier que le ruisseau de Fontenu et connaît des crues plus nombreuses, surtout pour les mois de printemps.

Les débits et les volumes d'eau écoulé par les trois affluents sont :

	D E B I T S (m ³ /s)			VOLUMES SUR L'ANNEE (x 10 ⁶ m ³)
	moyennes annuelles	mini (moyennes journalières)	maxi (moyennes journalières)	
FONTENU :	0,26	0,016	4,41	8,5
MOULIN :	0,9	0,03	9,15	29,72
COMBE VERNE (d'après les évaluations instantanées)	0,008	0,003	0,04	0,26

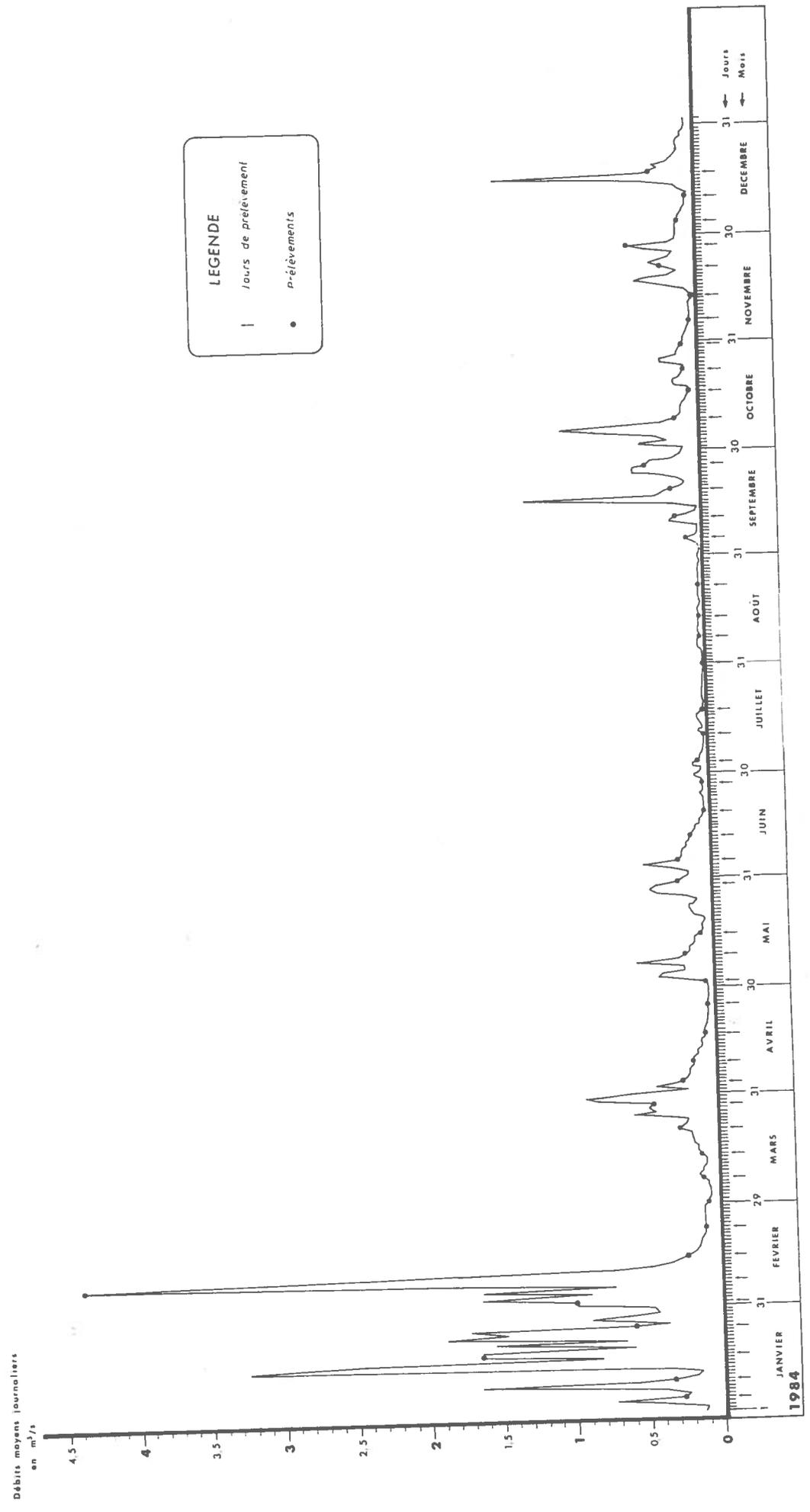
Ces résultats permettent d'apprécier la part prise par le ruisseau du Moulin dans l'alimentation en eau du Lac de Chalain : 75 % environ des volumes écoulés par les affluents et près de 60 % du volume total d'eau arrivant au lac .

.../...

HYDROGRAPHE EN MOYENNES JOURNALIERES (DEPOUILLEMENT MANUEL)

DU RUISSEAU DE :

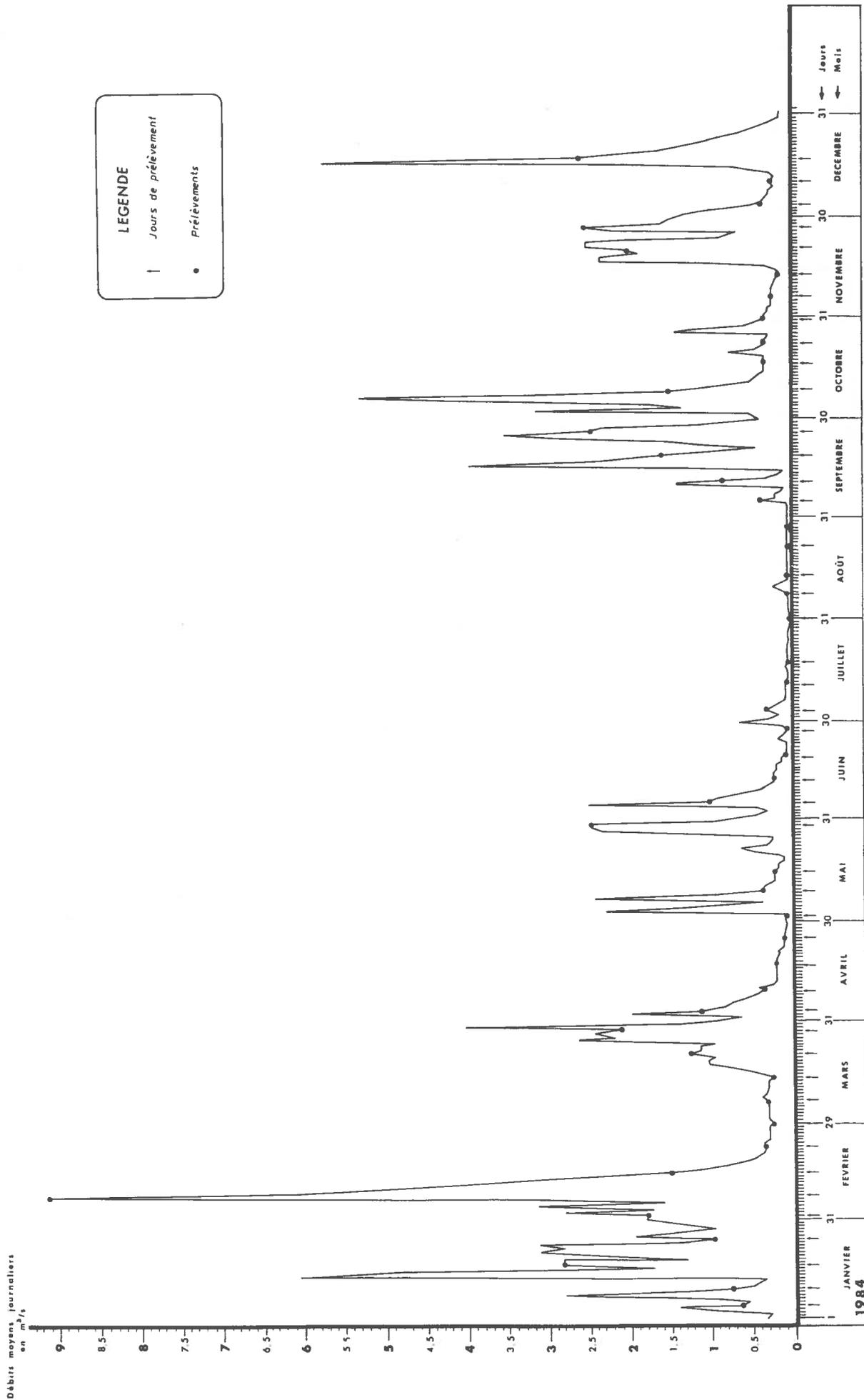
FONTENU



HYDROGRAMME EN MOYENNES JOURNALIERES (DEPOUILLEMENT MANUEL)

DU RUISSEAU DE :

MOULIN



3 - ANALYSES CHIMIQUES :

Elles ont porté sur :

- la température, le pH, l' O_2 dissous, la conductivité.
- les trois formes de l'azote : NH_4^+ - NO_3^- - NO_2^- .

(le dosage de l'azote Kjeldall se prête mal aux eaux peu concentrées des cours d'eau).

- Les orthophosphates : PO_4^{3-}

La température, le pH et l' O_2 dissous ont été relevés sur le terrain à l'aide d'appareils portatifs (thermomètre à mercure - pH mètre - oxymètre).

La conductivité a été mesurée au laboratoire.

Les substances azotées ont été dosées selon des méthodes d'analyses conformes aux normes AFNOR :

- . NH_4^+ : méthode au "bleu d'Indophénol".
- . NO_2^- : méthode au "réactif de Griess".
- . NO_3^- : méthode de "Caron et Pacquet".

qui font appel à des dosages colorimétriques.

Les orthophosphates ont été mesurés par la méthode au "Chlorure stanneux" (méthode non normalisée AFNOR).

a) - RESULTATS ET INTERPRETATION :

La discussion porte sur des résultats ramenés aux moyennes mensuelles.

.../...

- L'OXYGENE :

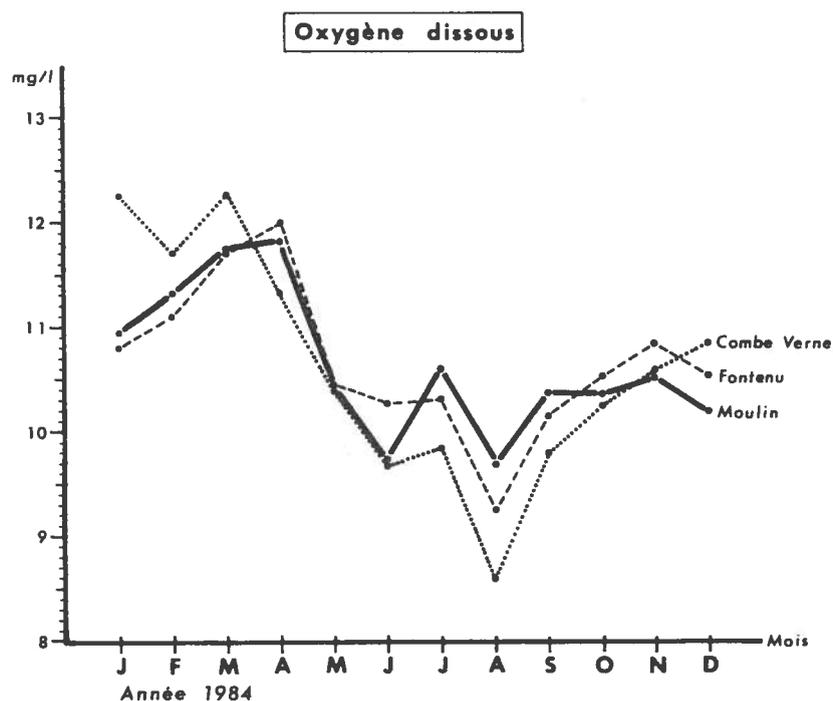
Pour les trois affluents du lac, les variations de la teneur en O₂ des eaux, suivent un schéma semblable qui est :

- une baisse d'avril à octobre (minimum en août ce qui coïncide avec une remontée de la température).
- une augmentation en hiver lors des températures les plus basses.

Ces teneurs sont très satisfaisantes toute l'année et se situent autour du point de saturation (100 %) même pendant l'étiage ; en août :

- Moulin 95 %
 - Fontenu 97 %
 - Combe Verne 88 %
- (valeurs calculées d'après l'abaque de C.H. MORTIMER).

O ₂ mg/l	MINI	MOYENNE ANNUELLE	MAXI
FONTENU	9,25	10,65	11,7
MOULIN	9,7	10,6	11,83
C.VERNE	8,6	10,63	12,27



- TEMPERATURE :

Les trois ruisseaux présentent toute l'année des températures assez basses, la plus forte enregistrée étant de 16,7°C dans le ruisseau de Combe Verne en juillet.

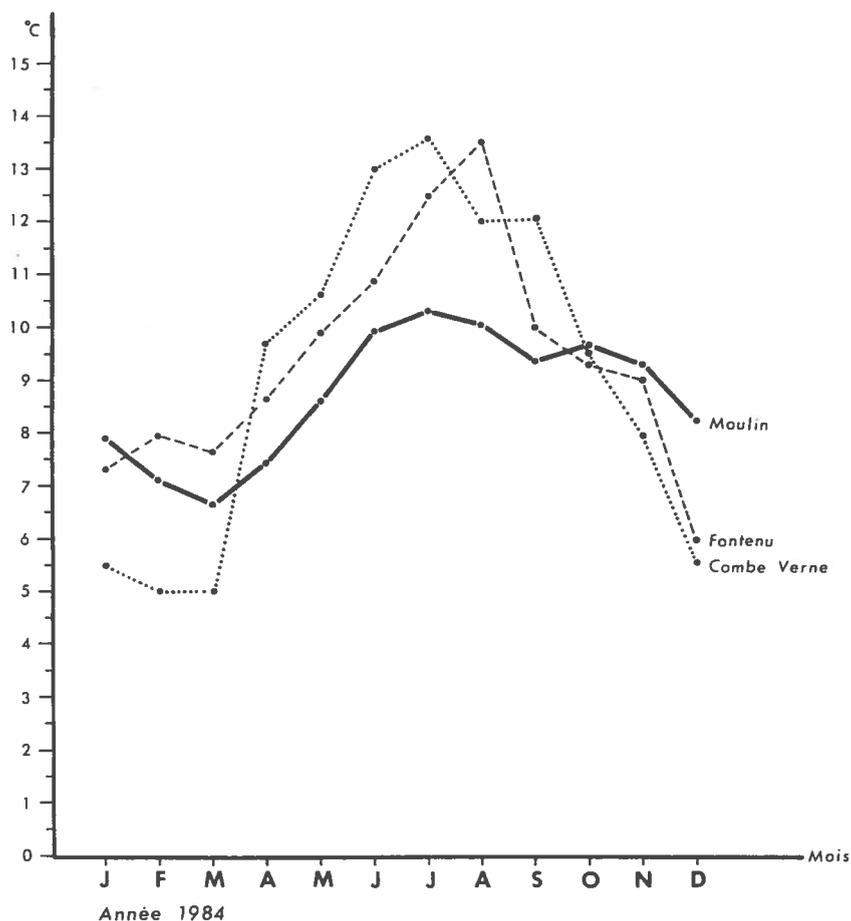
C'est dans ce même affluent que les écarts de températures sont les plus importants (de 2,5°C en février à 16,7°C en juillet) phénomène probablement lié à l'origine superficielle des eaux (marécageuses).

En revanche, pour les ruisseaux de Moulin et de Fontenu, la température est plus constante au cours de l'année et dépasse rarement 13°C en moyenne mensuelle.

Ceci constitue un atout important pour la conservation de la qualité des eaux du lac de Chalain, les deux ruisseaux évoqués constituant sa principale alimentation.

T° - °C	MINI	MOYENNE ANNUELLE	MAXI
FONTENU	7,5 (janvier)	11,3	15 (août)
MOULIN	6 (février)	8,72	11,2 (juillet)
C.VERNE	2,5 (février)	9,12	16,7 (juillet)

Température



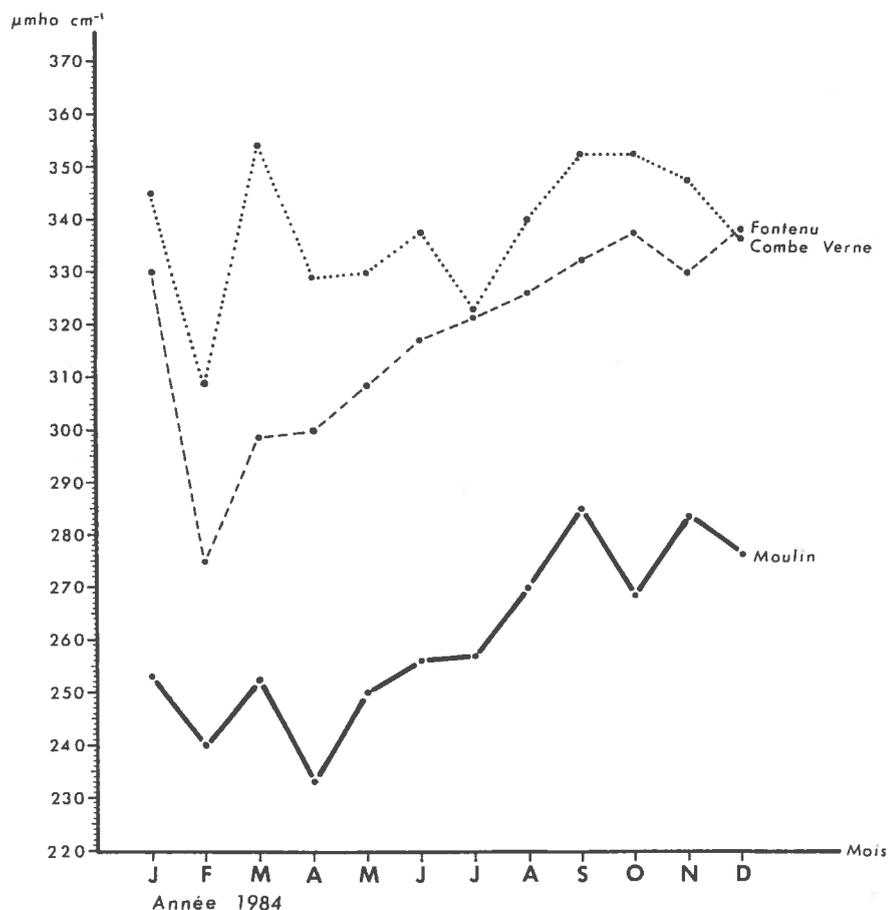
- CONDUCTIVITE :

Elle est le reflet de la composition générale d'une eau, et permet d'évaluer la minéralisation totale.

Dans le cas présent les 3 affluents présentent une eau fortement minéralisée, caractéristique des régions à substratum calcaire.

On note toutefois une conductivité plus faible pour le Ruisseau du Moulin comme le montre le graphique suivant :

MS/cm	MINI	MOYENNE ANNUELLE	MAXI
FONTENU	205	319	345
MOULIN	185	260	300
C.VERNE	185	337	360



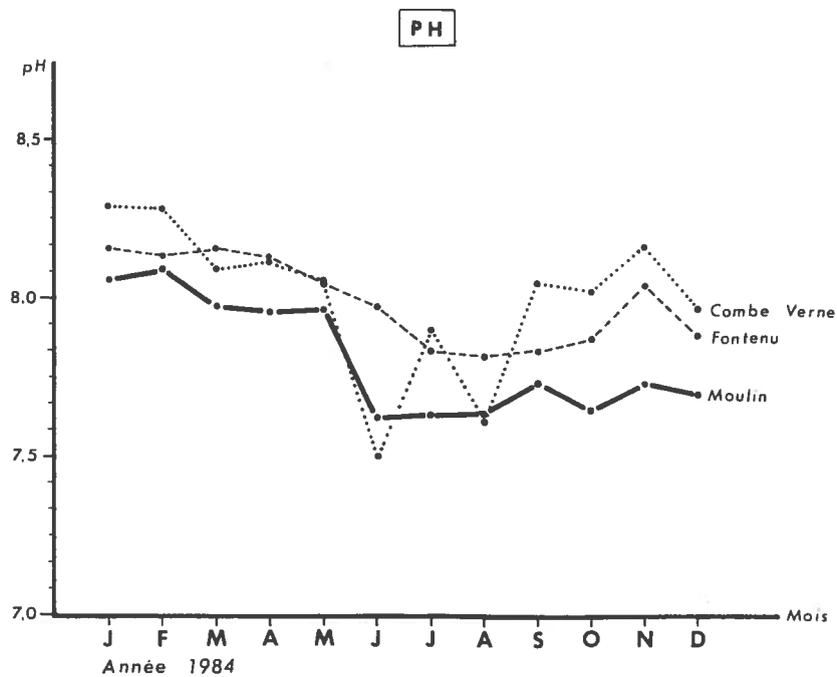
L'évolution de la conductivité de l'eau durant l'année, semble spécifique à chaque ruisseau.

- pH :

Dans chacun des cas, le pH varie de janvier à mai entre 8 et 8,5 et de juin à décembre entre 7,5 et 8,2.

Ces pH, qui montrent le caractère alcalin des eaux, sont fréquents dans les ruisseaux Jurassiens.

pH	MINI	MOYENNE ANNUELLE	MAXI
FONTENU	7,45	7,98	8,37
MOULIN	7,53	7,8	8,22
C.VERNE	7,32	8	8,48



- LES TROIS FORMES DE L'AZOTE : NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- .

D'une manière générale, les résultats obtenus sur l'année et ramenés en concentrations moyennes mensuelles, ne laissent apparaître sur aucun des ruisseaux une pollution nette : NH_4^+ rarement $> 0,1$ mg/l ; $\text{NO}_2^- < 0,02$ mg/l ; NO_3^- le plus souvent < 5 mg/l.

Les substances azotées subissent des variations de concentration que l'on peut approximativement séparer en deux épisodes :

- l'un discontinu, s'étalant de janvier à juin puis d'octobre à décembre
- l'autre comprenant les mois d'été de juillet à septembre (cf graphiques 1,2,3 P.24).

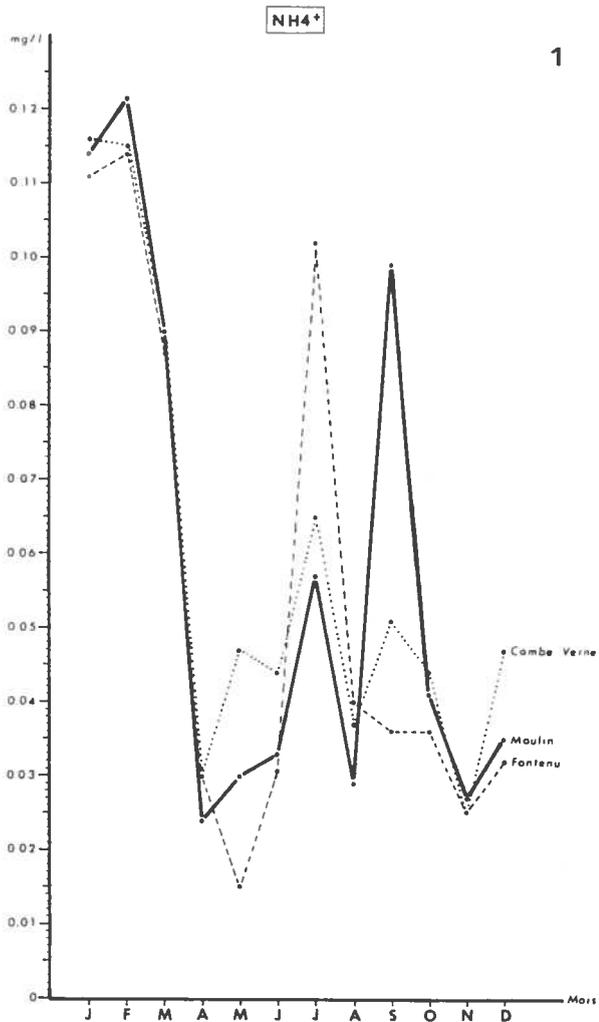
Pour les ions ammonium (NH_4^+), la saison froide ralentit le processus de transformation en ions nitrites (NO_2^-) ; ce phénomène est vérifié par les faibles teneurs en NO_2^- durant les 2 ou 3 premiers mois de l'année.

C'est aussi durant ces mois que l'apport par les pluies, des produits de décomposition des matières organiques végétales est le plus fort (lessivage du bassin versant).

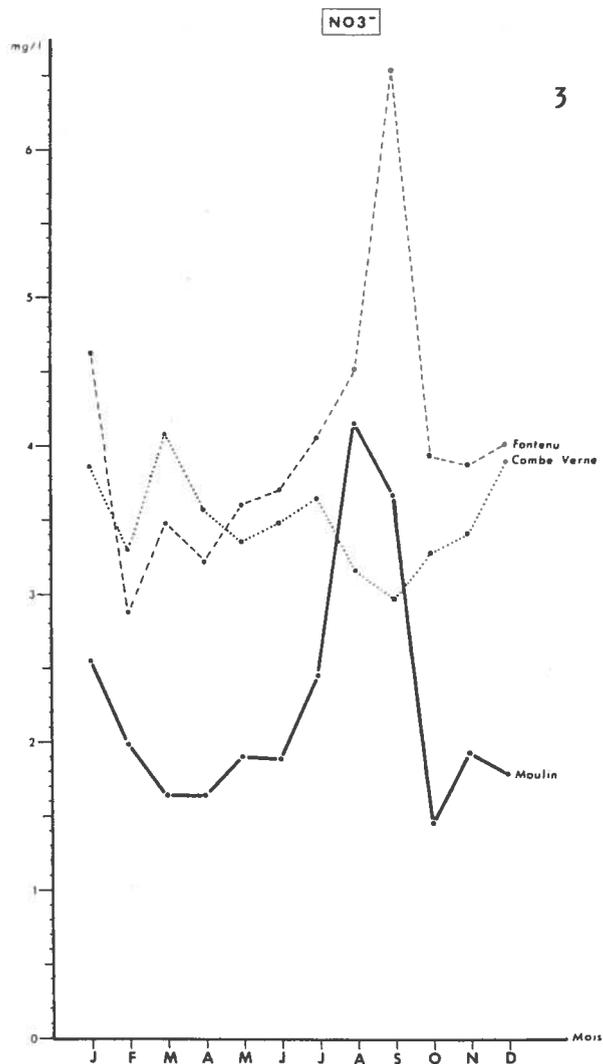
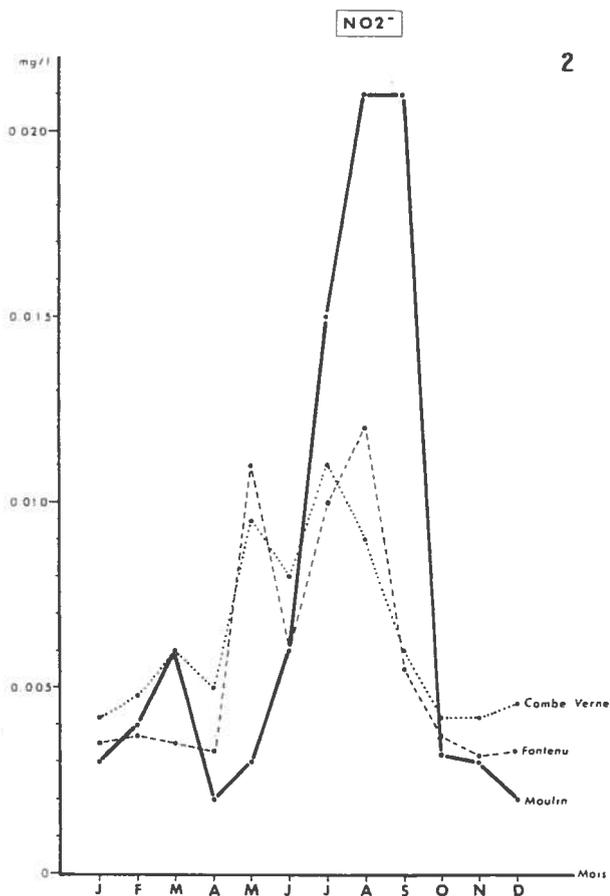
Les ions NO_3^- ont également des teneurs plus élevées que la moyenne en hiver, mais les maximums de concentrations pour l'azote en général, (notamment pour les ruisseaux de Fontenu et du Moulin), se situent dans la période de l'année la plus chaude, lorsque la fréquentation touristique est la plus dense et les conditions d'étiage les plus sévères (pollution d'origine humaine dominante).

La hausse de la teneur en substances azotées se poursuit en septembre mois caractérisé par un retour des pluies. Compte tenu de la mobilité des ions NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ et de l'étendue du bassin versant, il est normal de les retrouver en plus grande quantité dans les eaux à l'entrée de l'automne.

.../...



VARIATION DES CONCENTRATIONS
 EN NH₄⁺, NO₂⁻ et NO₃⁻
 DANS LES TROIS AFFLUENTS DU
 LAC DE CHALAIN
 (Moyennes mensuelles pour
 l'année 1984)



Les tableaux ci-après regroupent pour le 3 ruisseaux étudiés, les concentrations minimales, maximales et moyennes des formes minérales azotées sur l'année 84.

NH_4^+

NH_4^+ (mg/l)	Moyenne Annuelle	Mini	Maxi
MOULIN	0,058	0,02	0,255 en sept.
FONTENU	0,055	0,012	0,266 en juil.
C.VERNE	0,06	0,017	0,122 en janv.

NO_2^-

NO_2^- (mg/l)	Moyenne Annuelle	Mini	Maxi
MOULIN	0,0074	0	0,028 en août
FONTENU	0,0057	0	0,015 en août
C.VERNE	0,0063	0	0,018 en juil.

NO_3^-

NO_3^- (mg/l)	Moyenne Annuelle	Mini	Maxi
MOULIN	2,25	1,11	5,09 en août
FONTENU	4,03	1,81	8,28 en sept.
C.VERNE	3,49	2,44	4,38 en déc.

Pour le calcul des apports, les concentrations en ions ammonium, nitrites, nitrates ont été exprimées en N de la façon suivante :

$$\frac{M M N}{M M \text{ ions considérés}} \times [\text{ion considéré}]$$

exemple : NH_4^+ en N : $\frac{14}{18} \times [\text{NH}_4^+]$

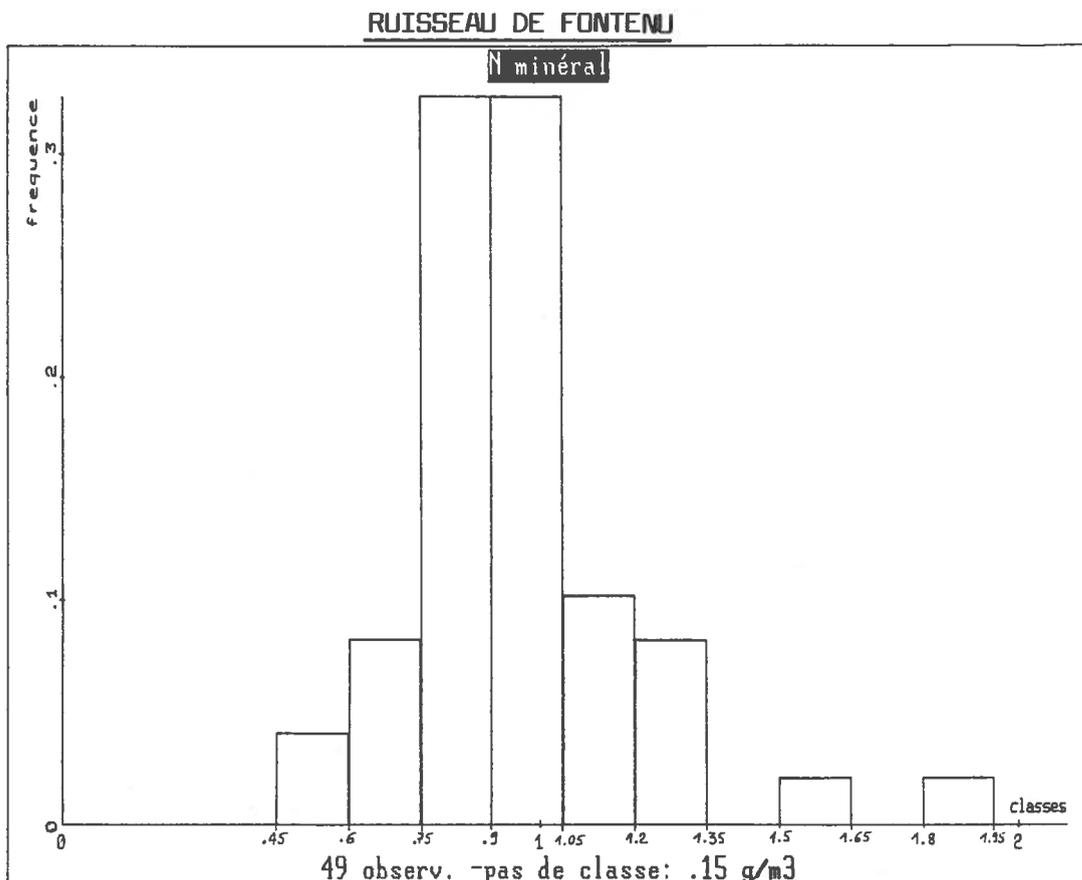
NO_2^- en N : $\frac{14}{46} \times [\text{NO}_2^-]$

NO_3^- en N : $\frac{14}{62} \times [\text{NO}_3^-]$

Toutes les concentrations ainsi converties sont additionnées pour obtenir une valeur globale d'azote minéral, la part prise par les Nitrates étant la plus importante (en moyenne 75 % de la valeur N min).

Ces données sont regroupées en annexe (tableaux P. 71 - 72 - 73).

Les histogrammes des concentrations qui donnent la répartition des valeurs en N minéral sur une base de 100 % ont été tracés pour les Ruisseaux du Moulin et de Fontenu.

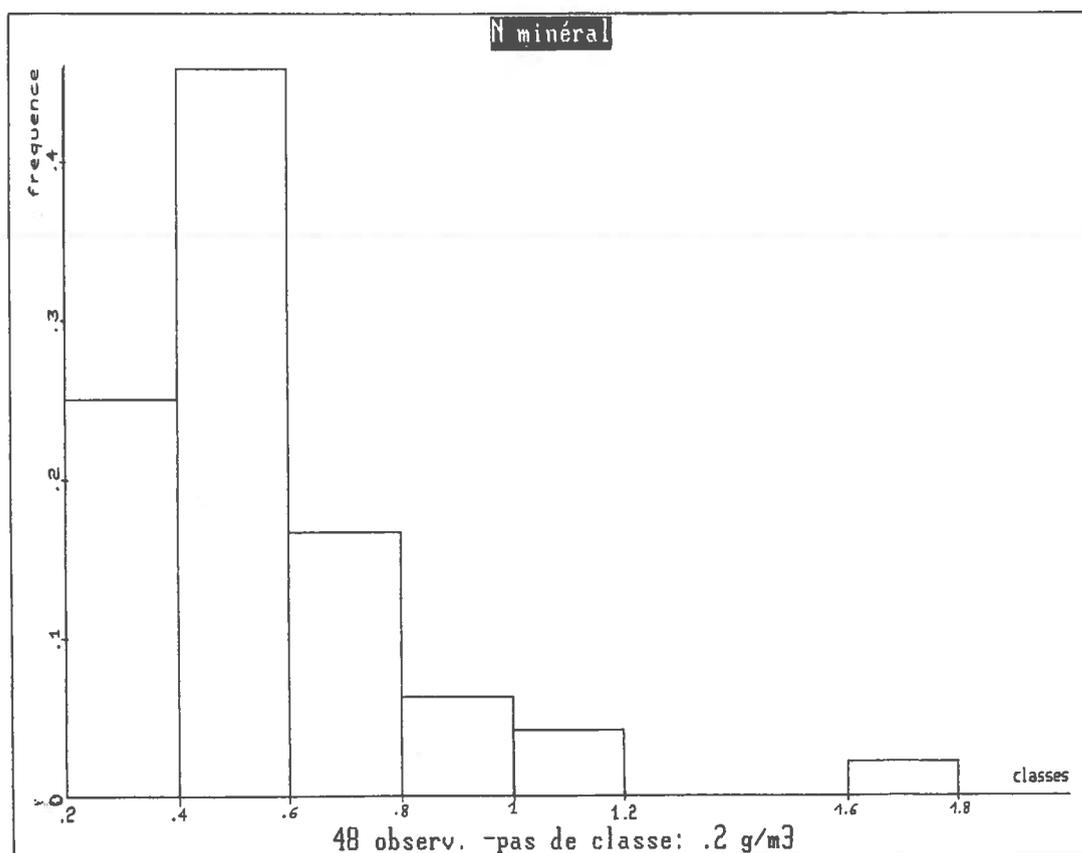


Pour le Ruisseau de Fontenu la distribution des valeurs est typiquement gaussienne ; elle montre que la majorité des teneurs (environ 60 %) se situent entre 75 mg/l et 1,05 mg/l, le maximum de fréquence intéressant donc les valeurs moyennes.

Cette forme de répartition ne se retrouve pas dans le Ruisseau du Moulin où près de 50 % des concentrations sont comprises entre 0,4 et 0,6 mg/l, les valeurs les plus faibles étant les mieux représentées. (70 % sont inférieures à 0,6 mg/l).

De ces deux affluents, le Ruisseau de Fontenu a des eaux plus riches en substances azotées.

RUISSEAU DU MOULIN



.../...

- ORTHOPHOSPHATES : PO_4^{3-}

Le phosphore soluble (sous forme d'orthophosphate) existe naturellement dans les eaux, en très faible quantité. Les concentrations, inférieures presque toute l'année à 0,1 mg/l dans les trois ruisseaux, sont le signe d'aucun apport artificiel important.

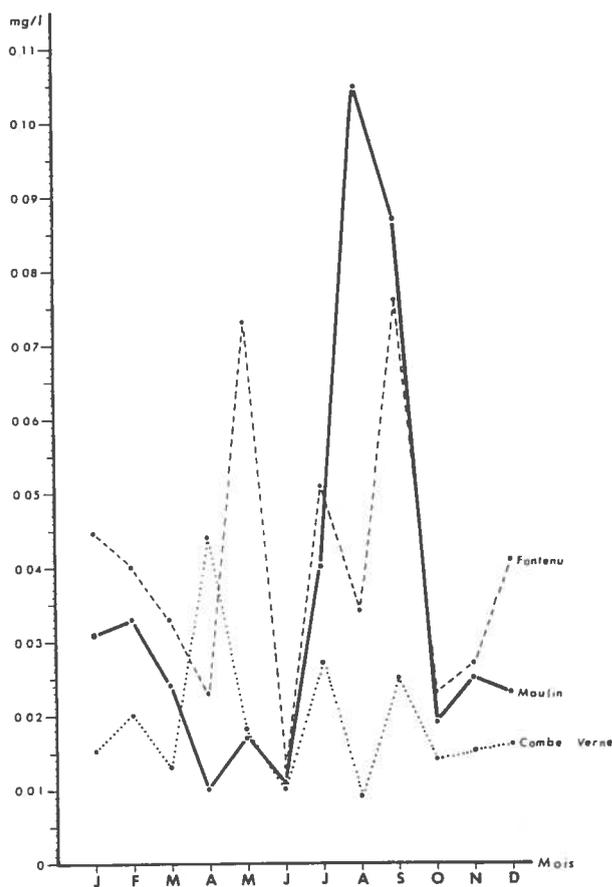
Les pointes enregistrées sur 12 mois sont observées durant les épisodes de crues et de fortes pluies, ce qui met en évidence le rôle primordial du lessivage des sols dans l'apport en substances phosphatées (phénomène caractéristique en mai et septembre pour le Ruisseau de Fontenu, cf. graphique ci-dessous)

La chute de la teneur en PO_4^{3-} dans les eaux des trois ruisseaux, au mois de juin, peut être reliée au développement de la végétation du bassin versant.

PO_4^{3-}

PO_4^{3-} (mg/l)	Moyenne Annuelle	Mini	Maxi
MOULIN	0,035	< 0,01	0,24 en sept.
FONTENU	0,04	< 0,01	0,111 en sept.
C.VERNE	0,019	< 0,01	0,038 en sept.

PO4³⁻



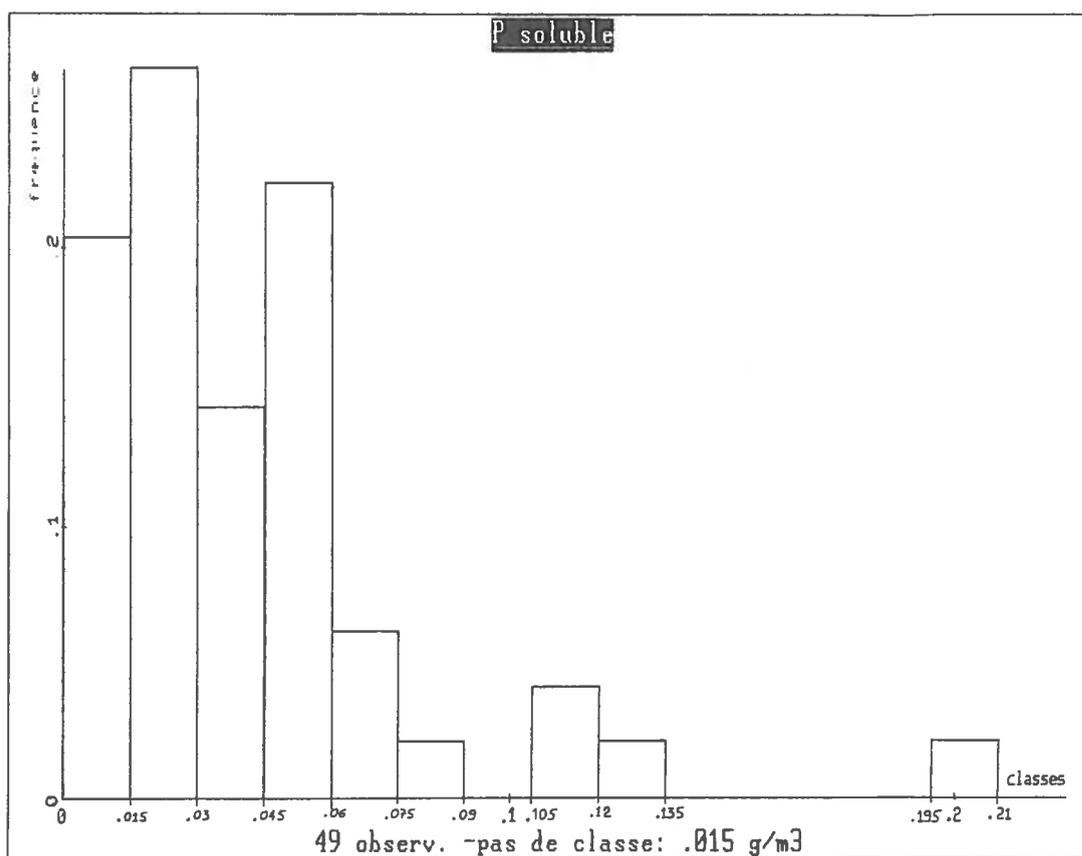
REMARQUE :

Le phosphore total est souvent pris en compte dans l'étude des lacs et de leurs apports. Toutefois, ce dosage qui se fait après minéralisation des échantillons, n'a pas été effectué sur les affluents du lac de Chalain.

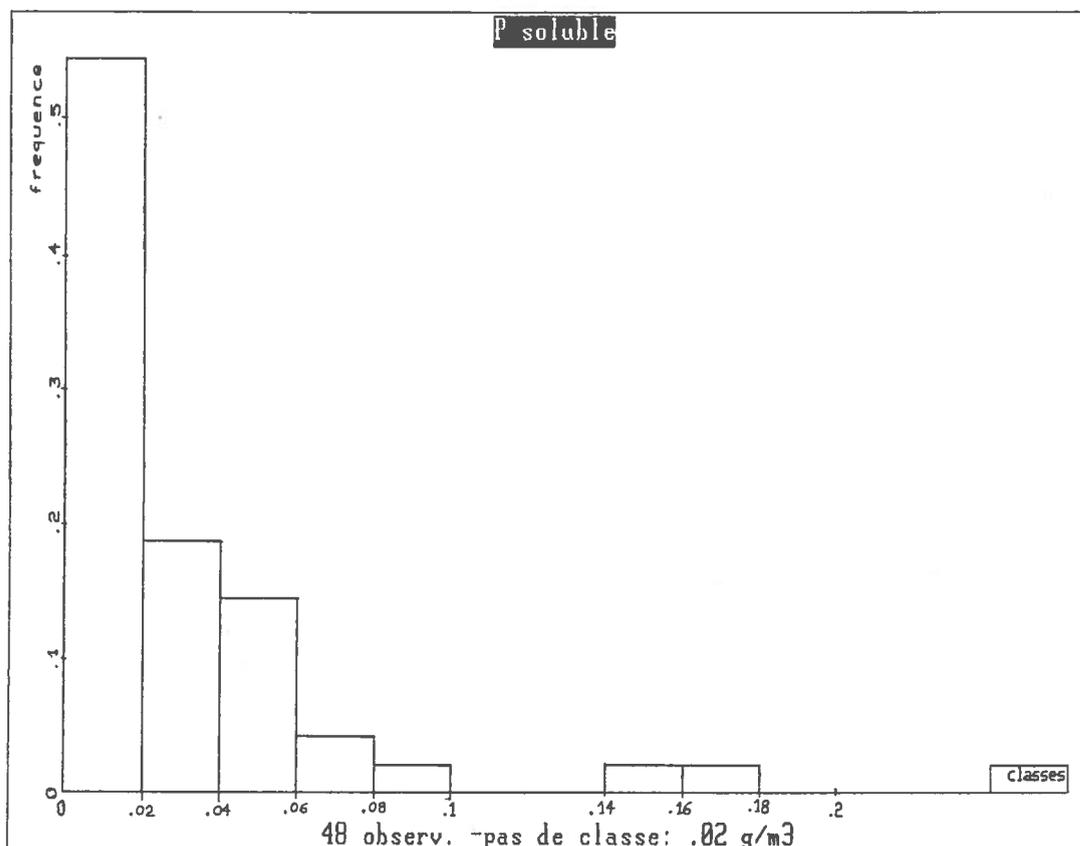
Le flux en phosphore total sera évalué en considérant que les teneurs en orthophosphates représentent entre 35 et 50 % du P total, pourcentage souvent indiqué dans la bibliographie.

La répartition des concentrations en PO_4^{3-} dans les deux ruisseaux est visualisée par les histogrammes ci-dessous.

RUISSEAU DE FONTENU



RUISSEAU DU MOULIN



Celui obtenu pour le Ruisseau du Moulin montre que la classe la plus représentée (54 %) est celle comprise entre 0 et 0,02 mg/l, et que la fréquence diminue avec la croissance des concentrations.

La répartition est moins nette pour le ruisseau de Fontenu : la fréquence maximale est de 25 % et concerne la plage de concentrations de 0,015 à 0,03 mg/l. C'est jusqu'à 0,06 mg/l que sont distribuées environ 80 % des valeurs.

Les concentrations les plus élevées sont donc le plus fréquemment rencontrées dans ce ruisseau.

b) - CONCLUSION :

Dans leur état actuel et d'après les résultats physico-chimiques connus, les 3 principaux affluents du Lac de Chalain sont d'une qualité satisfaisante. Leurs eaux renferment des concentrations acceptables en éléments fertilisants (N minéral et PO_4^{3-}) et ne laissent à priori prévoir aucun inconvénient grave pour le milieu récepteur (lac).

Les eaux du Ruisseau de Fontenu sont les plus concentrées en N minéral et PO_4^{3-} mais, en contre partie, le Ruisseau du Moulin a le plus fort débit toute l'année.

La conséquence de ces deux tendances sur les apports en substances nutritives sera révélée dans le paragraphe 3.

II - METHODOLOGIE DE QUANTIFICATION DES APPORTS EN FERTILISANTS :

L'eutrophisation, qui signifie "bien nourrir" correspond à un état de production maximale à tous les niveaux de l'édifice trophique. Cet état d'équilibre peut être modifié par des apports excessifs en substances nutritives qui se traduisent, dans la masse d'eau, par une augmentation de la production primaire ; celle-ci, à son tour, induit en cascade une série de processus le plus souvent reconnus comme néfastes aux différents usages de l'eau (touristique, halieutique, alimentaire). Il y a alors pollution du plan d'eau.

Pour apprécier l'importance de la charge polluante des apports et prévoir un plan d'abattement conséquent, il faut en premier lieu la chiffrer.

Les méthodes utilisables selon la quantité d'informations existantes et leur possibilité d'exploitation, sont exposées ci-après :

Quelles que soient les méthodes utilisées on définit :

C = concentration de l'élément considéré en g/m^3
 Q = débit du cours d'eau en m^3/s
 v = volume d'eau écoulée en m^3

En partant de l'hypothèse de conservativité de tous les éléments (eau et éléments chimiques) entre l'amont et l'aval d'une rivière on peut écrire :

$L = C \times V$ où L est la charge en éléments drainés au lac pendant un temps quelconque (exprimé en g)

$F = C \times Q$ où F est la charge par unité de temps ou flux, exprimé en g/s.

Le flux total de l'élément considéré est exprimé en tonne par an et calculé par différentes méthodes.

.../...

A - CALCUL THEORIQUE :

1) - Méthode sommaire, sans données sur C et Q :

Il s'agit de recenser toutes les sources ponctuelles et diffuses de pollution situées sur le bassin versant, et de sommer les flux de pollution que chacune peut fournir, pour obtenir le flux annuel approché de l'élément nutritif.

Sont pris en compte :

- les pertes spécifiques (E_{cf}) en $kg/km^2/an$ et la superficie (A) en km^2 :
 - des sols forestiers (f)
 - des sols agricoles (ag)
 - des zones urbaines (u)
- les pertes spécifiques (E_{cp}) des précipitations sur le lac et la superficie (A_o) du lac en km^2 .
- le nombre d'unités d'habitations (N_o) possédant un système d'assainissement qui empêche les eaux usées de retourner directement dans le milieu récepteur liquide, exprimé en "tête-an".
- l'apport spécifique (E_{cfs}) de la pollution créée par les unités d'habitations.
- le coefficient de rétention exercé par le sol (RS).
- l'apport de pollution provenant de l'ensemble des sources ponctuelles (SP).

Le flux théorique est :

$$F = (E_{cf} \times A_f) + (E_{cag} \times A_{ag}) + (E_{cu} \times A_u) + (E_{cp} \times A_o) + (E_{cfs} \times N_o(1-RS)) + SP$$

Ce calcul fait par exemple intervenir les données suivantes :

.../...

LES APPORTS D'AZOTE ET DE PHOSPHORE (d'après une étude effectuée dans les Préalpes Suisses)

	N	P
Habitants	13,5 g/hab/j	1,5g/hab/j
Bovins	150 kg/T poids vif/an	20 kg/T poids vif/an
Porcs	150 kg/T poids vif/an	45 kg/T poids vif/an
Ordures	10 g/hab/j	2 g/hab/j
Arbres	0,05 à 0,09 g/m ² /an	0,03 à 0,012 g/m ² /an
Prés, Pâturages	1,5 à 1,8 g/m ² /an	0,030 à 0,070 g/m ² /an
Engrais	1,9 à 2,1 g/m ² /an	0,08 à 0,11 g/m ² /an
Epandage	25 g/m ² /an	1 g/m ² /an

Les résultats obtenus par cette méthode permettent de situer l'état de pollution des cours d'eau, mais ne peuvent être les seuls pris en compte pour l'étude des apports fertilisants.

.../...

B - CALCUL REEL :

1) - Méthodes faisant intervenir C et Q sans liaison entre eux :

L'application de telles méthodes suppose d'avoir des relevés de concentrations fréquents (hebdomadaires), associés à la valeur du débit au moment du prélèvement. Ce sont des données discontinues.

- a) En série chronologique (ou temporelle ou selon le flux)

On trace le diagramme : $C \times Q = f(t)$

Chaque point (flux instantané) correspond à un jour de prélèvement. Cette représentation permet de visualiser l'ensemble des observations faites sur une période donnée en faisant apparaître :

- soit des cycles : flux plus ou moins grand selon les saisons.
- soit des périodes de durée déterminée pour lesquelles le flux instantané ne varie pas ou peu.

Le flux moyen de tous ces événements est :

$$F_m = \sum_i^n \frac{C_i \cdot Q_i}{n} \quad \begin{array}{l} \text{(flux instantanés)} \\ \text{(nombre de déterminations)} \end{array} \quad \text{en g/s}$$

qui, ramené en tonne/an, donne le flux annuel apporté par le cours d'eau.

$$F = F_m \times 0,0864 \times 369 \quad \begin{array}{l} \text{(nombre de jours entre le premier} \\ \text{et le dernier jour de prélèvement)} \end{array}$$

La situation est d'autant plus défavorable que l'intervalle de temps entre 2 mesures est long.

Une telle méthode sous-estime systématiquement les flux pour les éléments dont la concentration augmente avec le débit (effet de lessivage) et en revanche les surestime lorsque C décroît quand Q augmente (effet de dilution).

.../...

- b) En débit croissant et à concentration constante :

En plus des valeurs de C et Q instantanés (en discontinu), il est nécessaire, pour appliquer cette méthode, d'avoir des relevés en continu des débits sur toute la période d'étude. (fournis par les hydrogrammes).

On part du diagramme : $C = f(Q)$ en valeurs instantanées. On choisit un pas de débit ΔQ , déterminant ainsi des classes rassemblant un nombre choisi de valeurs et dans lesquelles la distribution des concentrations n'est pas trop incohérente. Pour cela on utilise l'hydrogramme sur lequel apparaissent trois plages de débits : les faibles débits - les débits moyens - les forts débits.

REMARQUE :

Il est important de pouvoir collecter le maximum de données sur C au moment des forts débits, afin d'avoir une bonne répartition de C en fonction de Q.

Pour chaque classe de débit de bornes (i-1, i) on calcule la concentration moyenne C_i

et le volume V_i écoulé qui est :

$$V_i = \left(\sum_{i-1}^i Q_i \right) \times 86400 \quad \text{m}^3/\text{s}$$

Qi étant la valeur du débit moyen journalier tiré de l'hydrogramme en moyennes journalières.

Le Flux F_i par classe s'écrit ainsi :

$$F_i = C_i \times V_i$$

et le flux total pour n classes de débits :

$$F = \sum_{i=1}^{i=n} C_i \times V_i$$

.../...

S'il existe des possibilités de dépouillement automatique des limnigrammes, les volumes d'eau ayant transité pendant un temps donné peuvent être calculés avec précision.

Cette pratique utilise des pas de temps variables Δt qui séparent deux hauteurs d'eau H_1 et H_2 consécutives.

Grâce à la courbe de tarage, le débit Q correspondant à cette variation est calculé, multiplié par Δt pour donner le volume équivalent.

2) - Méthodes relationnelles :

Ces méthodes reposent sur le principe de la détermination d'une relation entre la concentration et le débit, du type $C = f(Q)$.

En reportant cette expression dans l'équation du flux : $F = C \times Q$, on obtient $F = f(Q) \times Q$, ce qui permet de calculer un flux à partir de la seule connaissance des débits. Ceux-ci doivent être relevés de manière continue.

Des lois concentrations-débits obtenues au départ par pure spéculation mathématique, trouvent une réalité physique lorsqu'on les applique à des mesures sur le terrain.

- a) Les lois exactes :

Elles sont déduites de l'équation $F = C \times Q$ suivant les variations des deux paramètres C et Q .

- La loi puissance : $C = a Q^b$ avec $a = \text{constante}$, b souvent égal à 1 dans le cas où F est constant.

- La loi logarithmique : $C = a + b \text{ Log } Q$

$$a = C_0 \text{ Log } \lambda \quad (\lambda = \text{cste})$$

$$\text{et } b = -C_0$$

si F varie peu et C est presque constant ($C = C_0 = \text{cste}$)

- La loi exponentielle : $C = a \exp(bQ)$ $a = \lambda$ ($\lambda = \text{cste}$)

$$b = \frac{1}{Q_0}$$

quand F varie peu et $Q = Q_0 = \text{constante}$.

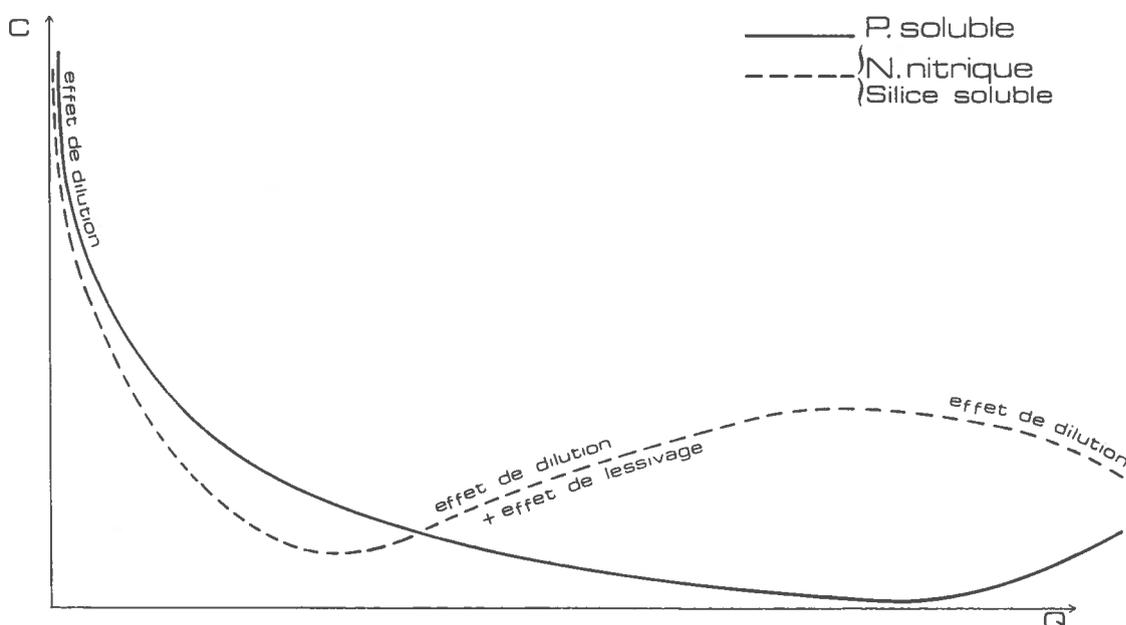
- Une loi linéaire : $C = a + bQ$

.../...

D'après le diagramme de WAGNER établi en 1970 sur le lac de Constance, on remarque que la variation de C en fonction de Q évolue suivant trois plages de débit :

- les faibles débits (inférieurs à Q_1)
- les débits intermédiaires (entre Q_1 et Q_2)
- les forts débits (supérieurs à Q_2)

Diagramme de WAGNER
[Lac de Constance]



La forme de ces courbes, caractéristiques pour des apports ponctuels en Phosphore soluble et en azote nitrique, répond à une suite de phénomènes qui sont :

- si $Q < Q_1$: la loi $C = f(Q)$ est décroissante :
C baisse quand Q augmente.

C'est l'effet de dilution.

- Si $Q_1 < Q < Q_2$: la loi $C = F(Q)$ est :

soit décroissante si l'effet de dilution l'emporte.
soit constante si les effets se contrebalancent
soit croissante si l'effet de lessivage l'emporte.

.../...

C'est la conjugaison des effets de dilution
et de lessivage :

Les eaux de pluies entraînent les éléments minéraux du sol.

- si $Q > Q_2$: la loi $C = f(Q)$ est décroissante.

Il n'y a plus de proportionalité entre la concentration et le débit car les disponibilités du sol en éléments fertilisants ne sont pas infinies. C'est à nouveau l'effet de dilution qui domine.

Dans le cas du phosphore soluble on constate que l'effet de dilution est prépondérant jusque dans les très forts débits, cet élément étant moins facilement lessivé que l'azote minéral.

Il convient dès lors de scinder le graphique, C en fonction de Q, en 3 classes de débits et de chercher dans chacune, laquelle des quatre lois énoncées précédemment convient le mieux (par appréciation du coefficient de corrélation). Pour calculer le flux total, on applique à chaque valeur de Q de l'hydrogramme, la relation $C = f(Q)$ correspondante, puis on somme les flux $C \times Q$ ainsi déterminés.

- b) Méthode en débit croissant et de la ligne brisée :

Elle peut être adoptée lorsque la dispersion des observations (C,Q) est grande, empêchant ainsi la prise en compte des lois exactes.

On adopte une partition en Q identique à celle utilisée pour la méthode en "débit croissant et à concentration constante" ; on représente la variation de chaque classe par une droite, l'ensemble constituant une ligne brisée. Les relations ainsi dégagées sont purement artificielles ; néanmoins, la possibilité offerte de restreindre à volonté le pas de débit est favorable à une diminution de l'erreur commise.

Pour chaque tronçons de la courbe, sont fournis :

- les coefficients de la droite d'équation $C = a_0 + a_1 \times Q$, utiles pour calculer les valeurs de C correspondant aux valeurs de Q de l'hydrogramme.

Ainsi, sur une année d'étude, sont connus les flux journaliers et par extension le flux total de l'élément considéré qui s'écrit :

$$F = \sum_{i=1}^{365} Q_j \quad f_i \quad (Q_j)$$

où i est la classe adéquate du débit

et Q_j le débit moyen journalier du jour de rang j.

.../...

Une approche par les débits instantanés est plus précise mais moins simple. Elle nécessite un mode de dépouillement automatique des limnigrammes [$H = j(t)$], qui utilise la relation de tarage $Q = g(H)$ et les relations de dépendances $C = f(Q)$.

Sur un intervalle de temps $t_1 - t_2$, séparant deux hauteurs d'eau H_1 et H_2 , est calculé le flux instantané qui par intégration donne la charge de l'élément.

La charge totale est la somme de toutes les charges ainsi calculées.

- c) Méthode du polynôme d'interpolation :

- avec les concentrations :

Il s'agit de chercher une relation et une seule qui relie l'ensemble des points $C = f(Q)$.

S'il existe N valeurs moyennes de C sur la totalité des classes de débit, il passera 1 polynôme et un seul de degré $(N-1)$ par ces N points.

Compte tenu de la répartition très irrégulière des valeurs sur le graphique, il est préférable d'effectuer un tri statistique afin d'éliminer les points aberrants. Malgré cela, il n'est pas toujours possible d'appliquer une relation mathématique à des phénomènes naturels, ce qui rend cette méthode rarement utilisable.

- avec le flux :

C'est sur les valeurs de flux en fonction du débit que l'on teste une fonction de degré deux ou trois suivant la validité du coefficient de détermination et de la courbe reliant les points du graphique.

L'avantage de cette méthode qui utilise deux fois la variable Q , est, dans le cas d'un polynôme de degré 2, de rassembler en une seule fonction les lois mathématiques représentatives des relations entre C et Q .

En effet le polynôme s'écrit :

$$CQ = a + bQ + cQ^2.$$

S'il est divisé par Q , il devient :

$$C = \frac{a}{Q} + b + cQ$$

.../...

avec le terme $\frac{a}{Q}$ qui rend compte de l'influence des sources ponctuelles d'apports : quand le débit augmente le rapport $\frac{a}{Q}$ diminue représentant ainsi l'effet de dilution.

Le terme $b + cQ$ qui est une relation linéaire entre C et Q .
A la concentration naturelle d'éléments fertilisants dans les eaux vient s'ajouter l'apport des sources diffuses.

Comme pour les autres méthodes, la connaissance de la relation entre CQ et Q (et par extension entre C et Q), permet d'associer à chaque valeur de débit sur l'hydrogramme une valeur de C , et de calculer le flux total sur la période d'étude.

III - APPLICATION AUX AFFLUENTS DU LAC DE CHALAIN :

Le choix des méthodes a été déterminé suivant la quantité d'informations disponibles, leur possibilité d'exploitation et en essayant d'obtenir des résultats de plusieurs façons différentes.

Ainsi la méthode sommaire (calcul théorique) n'a pas été appliquée d'une part en raison du manque d'informations concernant les divers paramètres à prendre en compte, et d'autre part du plus grand intérêt d'utiliser les données chimiques et hydrologiques mises à notre disposition.

Seuls des calculs réels de charge ont donc été réalisés par les méthodes suivantes :

- en série chronologique,*
- en débit croissant et à concentration constante,*

toutes deux utilisables avec une calculatrice de bureau.

- de la ligne brisée*
- du polynôme d'interpolation avec le flux.*

Ces deux dernières ont pu être appliquées grâce au concours de Monsieur P. BALLAND qui a mis à notre disposition les programmes informatiques conçus à cet effet.

La faible quantité de relevés pendant les forts débits a conduit à des extrapolations représentant une source d'erreurs non négligeable.

La méthode des lois exactes n'a pu trouver une application dans les cas présents, car l'origine diffuse des apports entraîne une grande dispersion des points sur les graphiques $C = f(Q)$.

.../...

1 - METHODE EN SERIE CHRONOLOGIQUE :

Comme le montrent les graphiques (Fig. 1 à 4) les variations du flux en fonction du temps sont semblables pour chaque élément (N minéral et PO_4^{3-}) et sur les deux ruisseaux.

L'augmentation du flux en N minéral coïncide avec les périodes de crues alors que pour le phosphore, seules les fortes précipitations entraînant une réponse importante des ruisseaux, influent sur sa croissance (caractéristique au début février, à la fin septembre et en décembre. cf. hydrogrammes p. 16 et 17)

On constate qu'en juillet et en août (environ 1/6 de l'année) le flux est très faible et relativement constant sur les deux ruisseaux :

0,01 g/s en PO_4^{3-}

et 0,1 g/s en N minéral.

La charge en fertilisants drainée au lac durant cette période est de :

0,1 t de PO_4^{3-} soit 7,8 % de la charge totale.

et 1 t de N minéral soit 4,7 % de la charge totale.

REMARQUE :

La moyenne mobile permet de concentrer les valeurs autant de fois que l'ordre est grand.

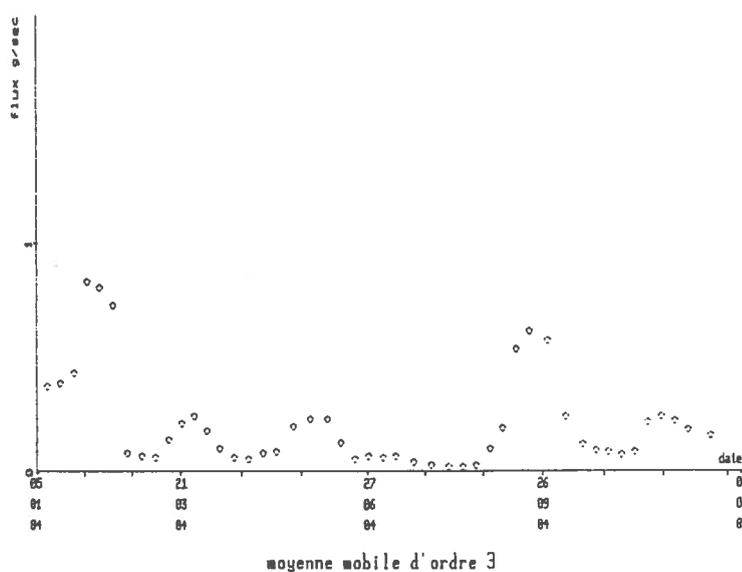


Fig. 1 : N minéral - Ruisseau de FONTENU.

VARIATIONS DU FLUX EN FONCTION
DU TEMPS

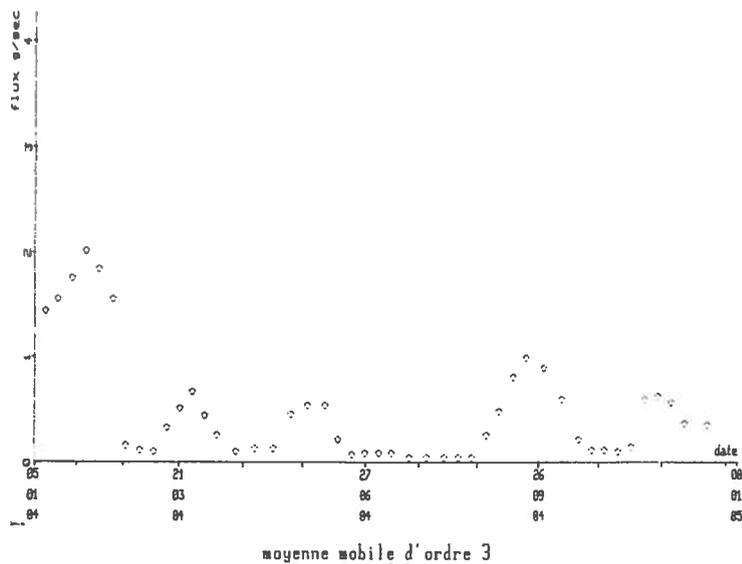


Fig.2 : N minéral - Ruisseau du Moulin.

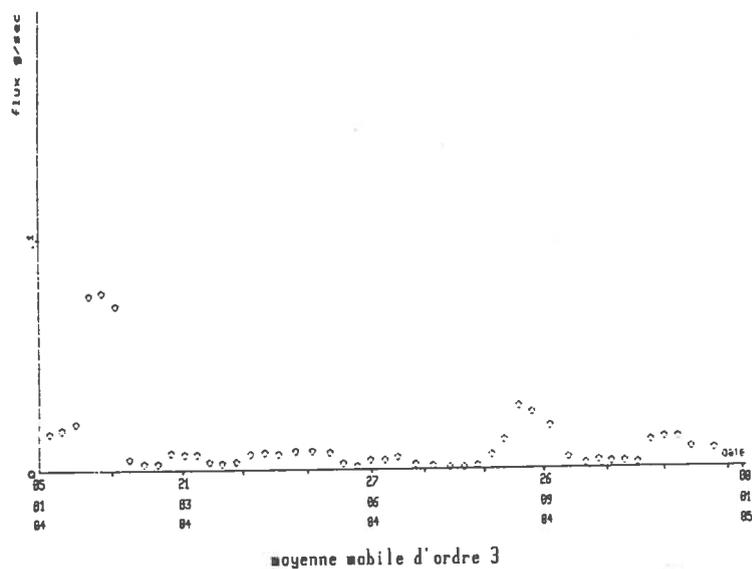


Fig.3 : PO_4^{3-} - Ruisseau de Fontenu.

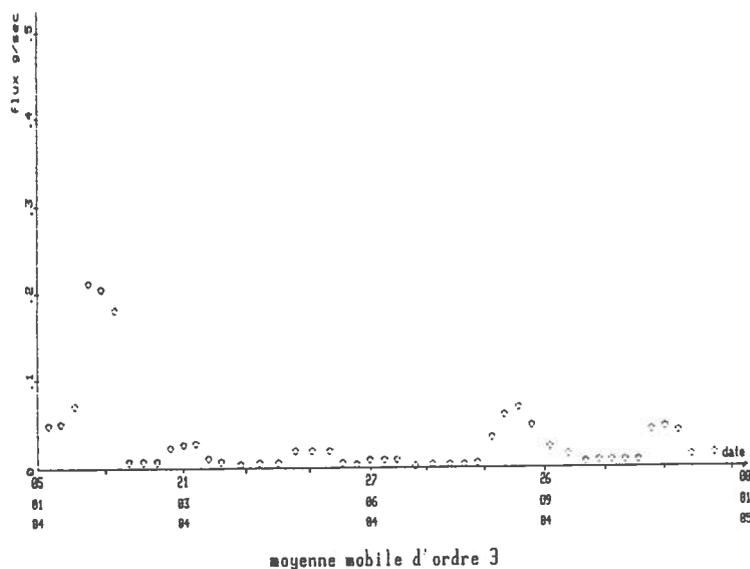


Fig.4 : PO_4^{3-} - Ruisseau du Moulin.

Pour l'année 1984 les valeurs de la charge en N minéral et en PO_4^{3-} sont les suivantes :

RUISSEAUX	NOMBRE D'OBSERVATIONS	N minéral		PO_4^{3-}	
		F moyen(g/s)	F t/an	F moyen(g/s)	F t/an
FONTENU	49	0,201	6,4	0,01	0,349
MOULIN	48	0,478	15,2	0,03	0,969
COMBE VERNE	40	0,0075	0,236	0,00014	0,0044
TOTAUX			22		1,33

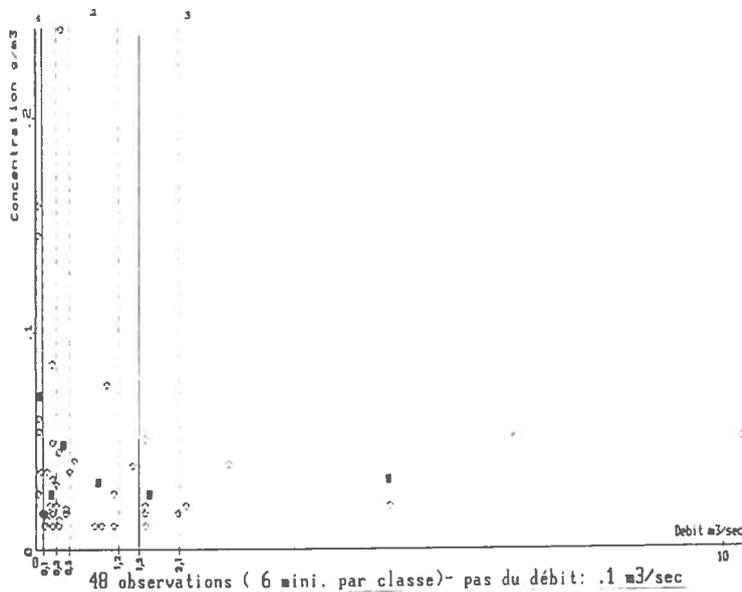
REMARQUE :

Le calcul sur COMBE VERNE a été fait avec les estimations de débits instantanés, ce qui permet d'arrondir les résultats de charge totale.

2 - METHODE EN DEBIT CROISSANT ET A CONCENTRATION CONSTANTE :

Les diagrammes figurant la partition en classes de débits ne seront pas tous donnés ci-après puisqu'ils seront repris au § 3. (méthode des lignes brisées).

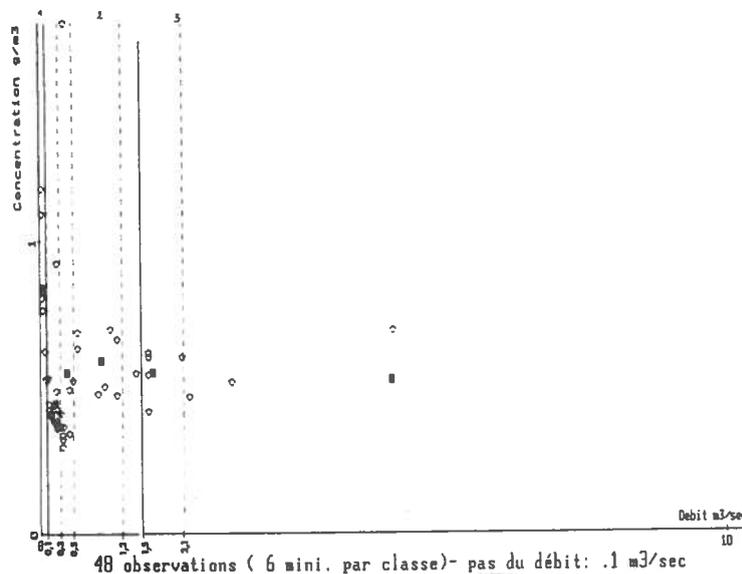
Les exemples du ruisseau du Moulin illustrent les répartitions de C en fonction de Q. On note une plus grande dispersion des points pour le P soluble, (cela se vérifie aussi sur le Ruisseau du Fontenu).



RUISSEAU DU MOULIN :
diagramme C = f (Q) avec
partitions en classes de
débits



- : limite des débits 1 faibles
- : limite des débits 2 moyens
- : limite des débits 3 forts
- : limites de classes
- : concentrations moyennes



N minéral

A partir des hydrogrammes ont été dégagées trois plages de débits, fondamentales pour orienter la division en classes.

Elles sont pour les ruisseaux de Fontenu et du Moulin

- faibles débits	$Q \leq 0,05 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q \leq 0,1 \text{ m}^3/\text{s}$
- débits moyens	$0,05 < Q < 0,3 \text{ m}^3/\text{s}$	$0,1 < Q < 1,5 \text{ m}^3/\text{s}$
- forts débits	$Q \geq 0,3 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q \geq 1,5 \text{ m}^3/\text{s}$

Ainsi les pas de classes choisis sont de :

- 0,05 m³/s pour le Ruisseau de Fontenu
et de 0,1 m³/s pour le Ruisseau de Moulin.

L'application de cette méthode, a permis d'évaluer la charge totale véhiculée par les deux affluents en utilisant certaines limites de classe de débit fixées arbitrairement en fonction de la répartition des points, (regroupement de classes dans les forts débits) et en calculant le volume d'eau écoulée pour chacune d'elles à partir des débits moyens journaliers.

Lors de l'utilisation de l'ordinateur, le pas de débit a été conservé mais le regroupement des classes a été fait en se fixant un nombre limite (6) de valeurs par classe.

Dans ce cas, le volume d'eau écoulé est obtenu par dépouillement automatique des limnigrammes.

Les résultats par les deux démarches de calculs sont les suivants :

.../...

**RESULTATS OBTENUS PAR LE CALCUL SUR LES DEBITS
MOYENS JOURNALIERS DETERMINES MANUELLEMENT**

◇ ◇ ◇ ◇

RUISSEAU DU FONTENU

Nombre de couples : C - Q = 49

CLASSES	V (m ³)	Ci (g/m ³)		Fi (t)	
		NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻
0 0,05	158 112	1	0,034	0,158	0,0054
0,05 0,1	462 240	0,84	0,044	0,34	0,02
0,1 0,15	680 486,4	1,089	0,047	0,741	0,032
0,15 0,2	623 458,6	1,14	0,045	0,71	0,028
0,2 0,6	2 407 968	0,88	0,035	2,12	0,084
0,6 3,91	3 978 720	0,96	0,05	3,82	0,2
V.TOTAL	8 310 985 m³		flux annuels	7,889 t	0,37 t

RUISSEAU DU MOULIN

Nombre de couples : C. Q = 48

CLASSES	V (m ³)	Ci (g/m ³)		Fi (t)	
		NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻
0 0,1	234 921,6	0,83	0,071	0,2	0,016
0,1 0,5	4 149 360,4	0,48	0,03	2	0,124
0,5 1	1 848 076	0,56	0,027	1,035	0,05
1 1,5	4 362 336	0,59	0,037	2,57	0,16
1,5 2,5	5 901 120	0,53	0,022	3,2	0,13
2,5 10,3	8 439 552	0,54	0,036	4,55	0,3
V.TOTAL	24 935 366 m³		flux annuels	13,55 t	0,78 t

**TOTAL pour les
deux affluents**

21,4 t

1,15 t

RESULTATS OBTENUS PAR ORDINATEUR :

Pour le ruisseau de Fontenu, le calcul de charges est fait sur la totalité de l'année 1984.

En revanche, pour Moulin, en raison de l'absence d'informations sur les limnigrammes dépouillés automatiquement, les charges sont calculées du 24.12.1983 au 20.12.1984 soit 363 jours. Cette modification n'est pas importante si l'on considère que d'une année à l'autre, le régime hydraulique du cours d'eau, varie peu.

Elément: N minéral

RUISSEAU DE FONTENU

Période du 01 01 1984 00he 00mi au 31 12 1984 24he 00mi soit 527040 minutes

classe	intervalle	nombre d'observations	Q moyen	T écoule min	Q moyenne g/m3	V écoule m3	charge kg
1	0-.05	4	0.029	52560	0.038	20796	78
2	.05-.1	15	0.073	38874	0.044	17745	110
3	.1-.15	6	0.121	73548	0.047	54007	78
4	.15-.25	7	0.178	173178	0.038	2115670	2973
5	.25-.4	6	0.352	105153	0.038	1937618	2842
6	.4-	4	1.499	83930	0.051	3831808	3417
total				527040		3501972	8174

Elément: P soluble

Période du 01 01 1984 00he 00mi au 31 12 1984 24he 00mi soit 527040 minutes

classe	intervalle	nombre d'observations	Q moyen	T écoule min	Q moyenne g/m3	V écoule m3	charge kg
1	0-.05	4	0.029	52560	0.038	20796	78
2	.05-.1	15	0.073	38874	0.044	17745	110
3	.1-.15	6	0.121	73548	0.047	54007	78
4	.15-.25	7	0.178	173178	0.038	2115670	2973
5	.25-.4	6	0.352	105153	0.038	1937618	2842
6	.4-	4	1.499	83930	0.051	3831808	3417
total				527040		3501972	373

Elément: N minéral

RUISSEAU DU MOULIN

Période du 24 12 1983 00he 00mi au 20 12 1984 24he 00mi soit 522720 minutes

classe	intervalle	nombre d'observations	Q moyen	T écoule min	Q moyenne g/m3	V écoule m3	charge kg
1	0-.1	7	0.053	131154	0.830	413436	343
2	.1-.3	14	0.216	102548	0.441	1415938	325
3	.3-.5	8	0.391	60487	0.547	1414011	773
4	.5-1.2	7	0.873	77253	0.687	3798841	2231
5	1.2-2.1	6	1.848	80917	0.850	7733547	4284
6	2.1-	4	5.113	70352	0.521	14688714	7764
total				522720		29724087	16020

Elément: P soluble

Période du 24 12 1983 00he 00mi au 20 12 1984 24he 00mi soit 522720 minutes

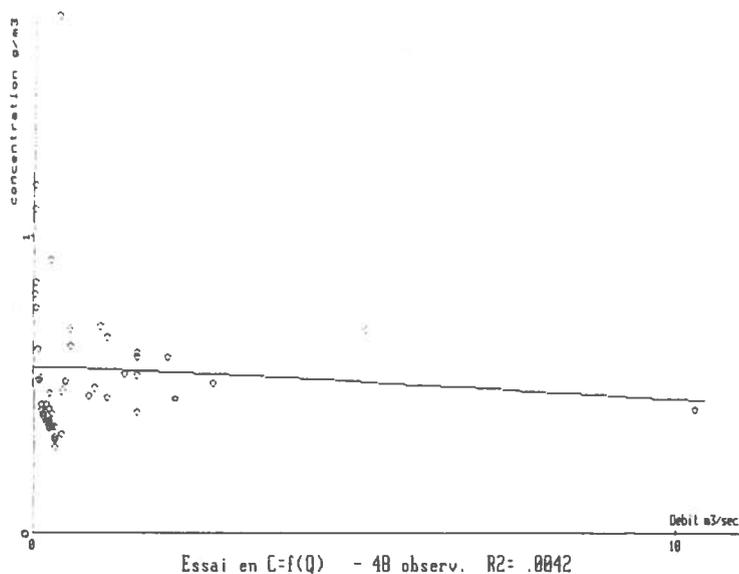
classe	intervalle	nombre d'observations	Q moyen	T écoule min	Q moyenne g/m3	V écoule m3	charge kg
1	0-.1	7	0.053	131154	0.071	413436	29
2	.1-.3	14	0.216	102548	0.025	1415938	35
3	.3-.5	8	0.391	60487	0.048	1414011	68
4	.5-1.2	7	0.873	77253	0.030	3798841	116
5	1.2-2.1	6	1.848	80917	0.025	7733547	195
6	2.1-	4	5.113	70352	0.032	14688714	476
total				522720		29724087	920

Bien que la méthode traitée par informatique apporte des résultats plus précis, les charges obtenues par les deux techniques de calcul, ne sont pas sensiblement différentes et restent dans une même fourchette de valeurs ; les chiffres suivants peuvent être retenus :

CHARGES EN TONNE/AN	FONTENU	MOULIN	TOTAL
N minéral	8,1	16	24,1
PO_4^{3-}	0,373	0,9	1,273
P TOTAL si l'on prend PO_4^{3-} = 40 % x P total (valeur estimée)	0,93	2,25	3,18

3 - METHODE DE LA LIGNE BRISEE :

Pour montrer que la concentration et le débit ne sont pas liés par une seule relation, l'essai a été fait pour l'azote minéral sur le Ruisseau du Moulin.



Ruisseau du Moulin : relation C - Q pour l'azote minéral.

Le coefficient de détermination R^2 , indiqué au bas des graphiques est une valeur statistique comprise entre 0 et 1, qui mesure l'intensité de la relation entre plusieurs points. Plus R^2 est proche de 1, plus la liaison est forte.

On remarque que sur l'ensemble des points, la relation entre C et Q est très mauvaise. Il convient donc de calculer des ajustements linéaires sur chaque classe de débits délimitée au § 2.

.../...

Les résultats obtenus à partir des programmes informatiques donnent :

- les graphiques en $C = f(Q)$ sur lesquelles sont tracées les droites d'ajustement. (fig.1 à 4)
- les coefficients a_0 et a_1 de la droite de régression pour chaque classe.
- le calcul du flux en N minéral et PO_4^{3-} pour les deux ruisseaux.

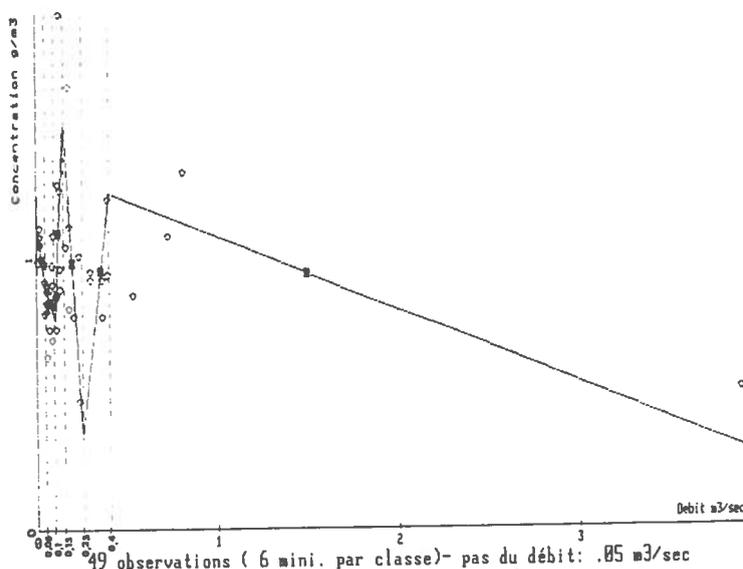


Fig.1:
Ruisseau de Fontenu
Azote minéral.

```

*****
* classe * intervalle de la classe * nombre d'observations * sigma C * sigma Q * C moyen * a_1 C *
-----
* 1 * 0-.05 * 9 * 0.029 * 0.014 * 0.796 * 0.009 *
* 2 * .05-.1 * 13 * 0.073 * 0.014 * 0.844 * 0.104 *
* 3 * .1-.15 * 8 * 0.121 * 0.010 * 1.007 * 0.351 *
* 4 * .15-.25 * 7 * 0.176 * 0.029 * 0.980 * 0.327 *
* 5 * .25-.4 * 6 * 0.352 * 0.058 * 0.954 * 0.108 *
* 6 * .4-3.949997 * 4 * 1.499 * 1.376 * 0.941 * 0.294 *
*****

```

coefficients des lignes brisées

classe n°	a_0	a_1
1	1.116967	-4.357642
2	1.02007	-0.463712
3	-0.6809502	14.58047
4	3.234221	-11.51865
5	-1.113435	5.871974
6	1.342606	-1.2681274

Elément: N minéral

Période du 01 01 1984 00he 00mi au 31 12 1984 24he 00mi soit 52.044 minutes

Flux total écoulé: 7951 kilos

CALCULS DES CHARGES PAR LA METHODE DES LIGNES BRISEES

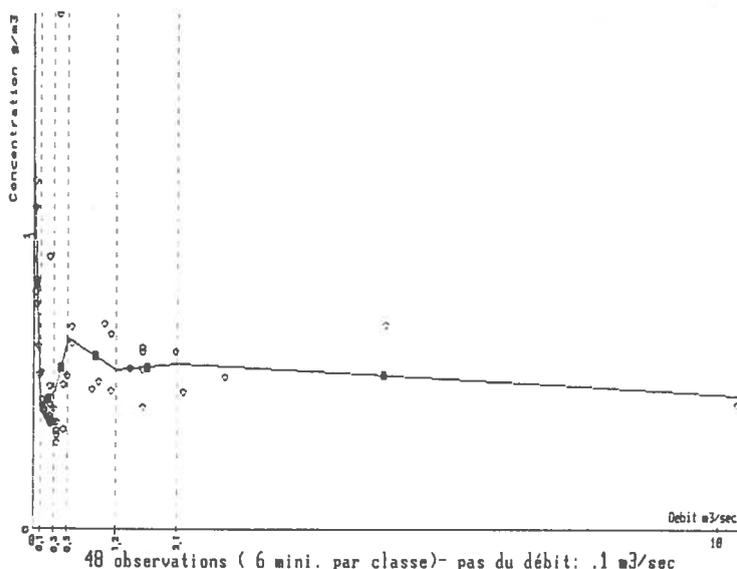


Fig.2: Ruisseau du Moulin
Azote minéral.

48 observations (6 mini. par classe)- pas du débit: .1 m3/sec

```

*****
* classe * intervalle de la classe * nombre d'observations * Q moyen * sigma Q * C moyen * sigma C *
-----
* 1 * 0-.1 * 7 * 0.053 * 0.021 * 0.830 * 0.217 *
* 2 * .1-.3 * 16 * 0.216 * 0.055 * 0.441 * 0.131 *
* 3 * .3-.5 * 8 * 0.391 * 0.059 * 0.547 * 0.457 *
* 4 * .5-1.2 * 7 * 0.893 * 0.230 * 0.587 * 0.096 *
* 5 * 1.2-2.1 * 6 * 1.648 * 0.205 * 0.550 * 0.067 *
* 6 * 2.1-10.3 * 4 * 5.113 * 3.191 * 0.521 * 0.102 *
*****
    
```

coefficients des lignes brisées

classe n°	a ₀	a ₁
1	1.29899	+8.870084
2	.3868318	.2514996
3	.1845471	.7057817
4	.7239953	-1.1331148
5	.5150733	2.096692E+02
6	.5853665	-1.247854E+02

Elément: N minéral

Période du 24 12 1983 00he 00mi au 20 10 1984 24he 00mi soit 50200 minutes

Flux total écoulé: 16249 kilos

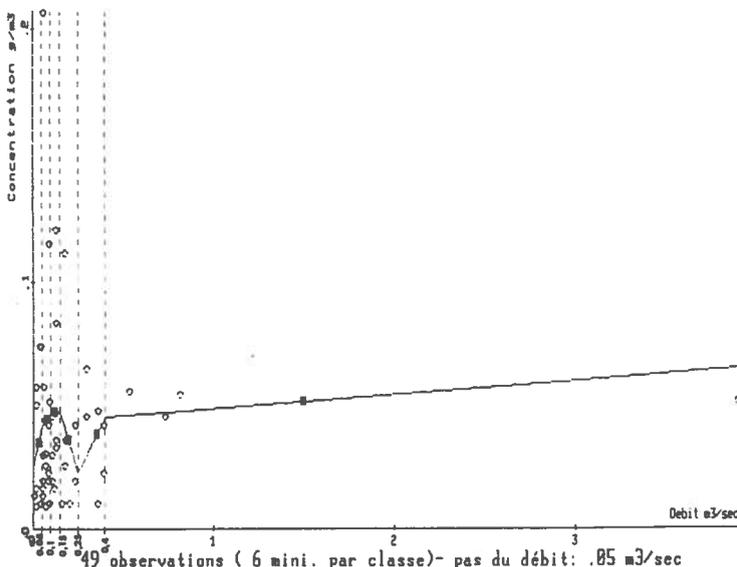


Fig.3: Ruisseau de Fontenu
Phosphore soluble (PO₄³⁻)

49 observations (6 mini. par classe)- pas du débit: .05 m3/sec

CALCULS DE CHARGES PAR LA METHODE DES LIGNES BRISEES

```

*****
* classe * intervalle de la classe * nombre d observations * Q moyen * sigma Q * C moyen * sigma C *
*****
* 1 * 0-.05 * 7 * 0.013 * 0.014 * 0.035 * 0.027 *
* 2 * .05-.1 * 15 * 0.013 * 0.014 * 0.044 * 0.051 *
* 3 * .1-.15 * 8 * 0.111 * 0.010 * 0.047 * 0.054 *
* 4 * .15-.25 * 7 * 0.171 * 0.019 * 0.030 * 0.033 *
* 5 * .25-.4 * 6 * 0.211 * 0.037 * 0.038 * 0.018 *
* 6 * .4-3.94997 * 7 * 1.479 * 1.370 * 0.051 * 0.004 *
*****
    
```

```

coefficients des lignes brisees
classe n° 1      a0              a1
                2.532765E-02      .3169872
classe n° 2      .0344695              .134152
classe n° 3      5.026932E-02      -2.384605E-02
classe n° 4      8.224568E-02      -.2370217
classe n° 5      -1.420684E-02      .1487684
classe n° 6      4.314552E-02      5.407491E-03
    
```

Elément: P soluble

Période du 01 01 1984 00he 00mi au 31 12 1984 24he 00mi soit 527040 minutes

Flux total écoulé: 345 kilos

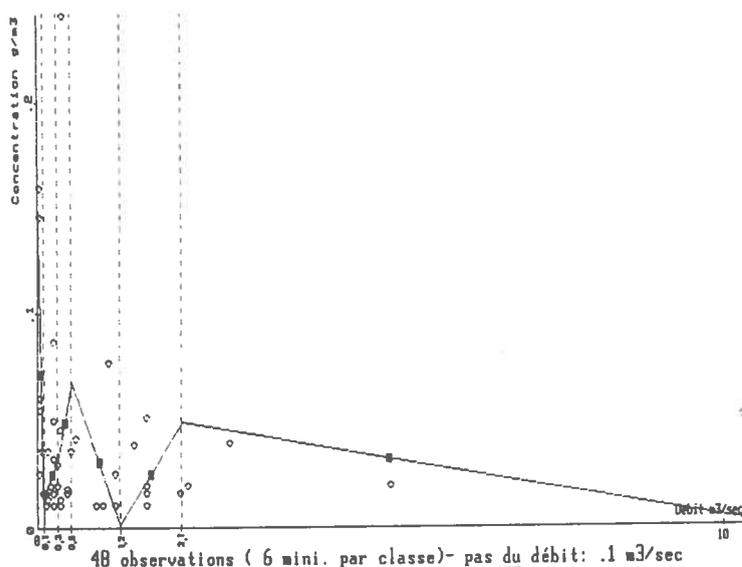


Fig.4: Ruisseau du Moulin
Phosphore soluble
(PO_4^{3-})

```

*****
* classe * intervalle de la classe * nombre d observations * Q moyen * sigma Q * C moyen * sigma C *
*****
* 1 * 0-.1 * 7 * 0.043 * 0.021 * 0.071 * 0.054 *
* 2 * .1-.3 * 15 * 0.213 * 0.055 * 0.025 * 0.017 *
* 3 * .3-.5 * 8 * 0.341 * 0.057 * 0.048 * 0.010 *
* 4 * .5-1.2 * 7 * 0.823 * 0.230 * 0.030 * 0.023 *
* 5 * 1.2-2.1 * 6 * 1.643 * 0.205 * 0.025 * 0.015 *
* 6 * 2.1-10.3 * 4 * 5.113 * 3.191 * 0.032 * 0.014 *
*****
    
```

```

coefficients des lignes brisees
classe n° 1      a0              a1
                .1606578              -1.698931
classe n° 2      5.551763E-03      8.843783E-02
classe n° 3      -2.140601E-02      .178297
classe n° 4      .115253              -9.498092E-02
classe n° 5      -6.229733E-02      5.296097E-02
classe n° 6      6.071608E-02      -5.816838E-03
    
```

Elément: P soluble

Période du 24 12 1983 00he 00mi au 20 12 1984 24he 00mi soit 522720 minutes

Flux total écoulé: 1020 kilos

Les résultats obtenus par cette méthode peuvent aussi bien être surestimés que sous estimés puisque les droites d'ajustement dans les classes contenant peu de valeurs (surtout les forts débits) sont très aléatoires.

Elle est plus intéressante comme méthode comparative que comme référence dans les calculs de charges.

En résumé, les valeurs de charges en éléments fertilisants obtenus par cette méthode sont :

CHARGES EN TONNE	FONTENU	MOULIN	TOTAL
N minéral	7,951	16,249	24,2
PO ₄ ³⁻	0,345	1,020	1,365
P TOTAL (estimé)	0,86	2,55	3,41

4 - POLYNOME D'INTERPOLATION AVEC LE FLUX :

Les courbes ci-dessous montrent bien que la fonction qui lie CQ à Q n'est pas linéaire.

Les résultats obtenus dans les quatre cas sont, au regard des coefficients de détermination, très proche de 1, tous satisfaisants.

Dans les forts débits on remarque que la courbe n'est guidée que par très peu de points (surtout pour Fontenu). La relation entre C et Q dans cette partie du graphique est donc très incertaine.

Ceci permet de souligner une fois de plus l'importance des informations dans les forts débits indispensables à l'établissement d'une bonne relation entre C et Q.

Graphiques CQ = f(Q) et calculs de flux en N minéral

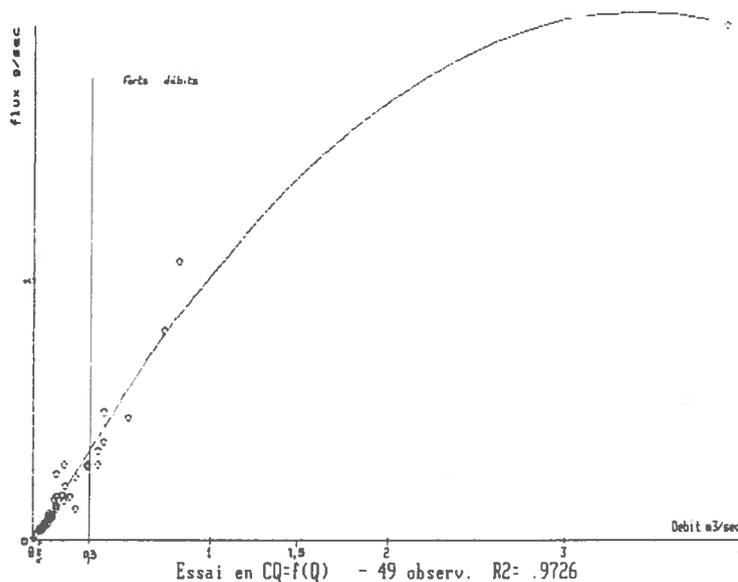


Fig.1 : Ruisseau de Fontenu

ajustement : $CQ = 2,62 \cdot 10^{-2} + 1,223 \times Q + 0,18 \times Q^2$

période du 01.01.1984 00he 00 mi au 31.12.1984 24 he 00 mi soit 527040 minutes

Flux total écoulé : 8,722 Tonnes/an

Graphiques CQ = f (Q) et calculs de flux

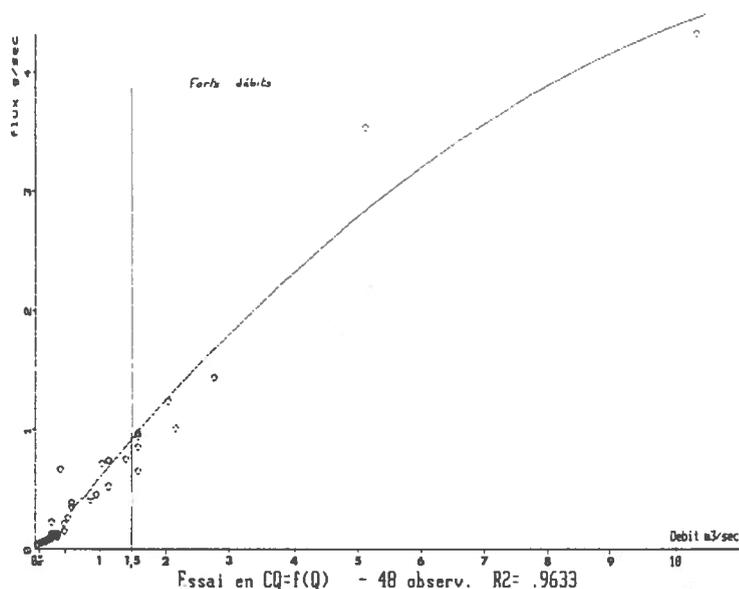


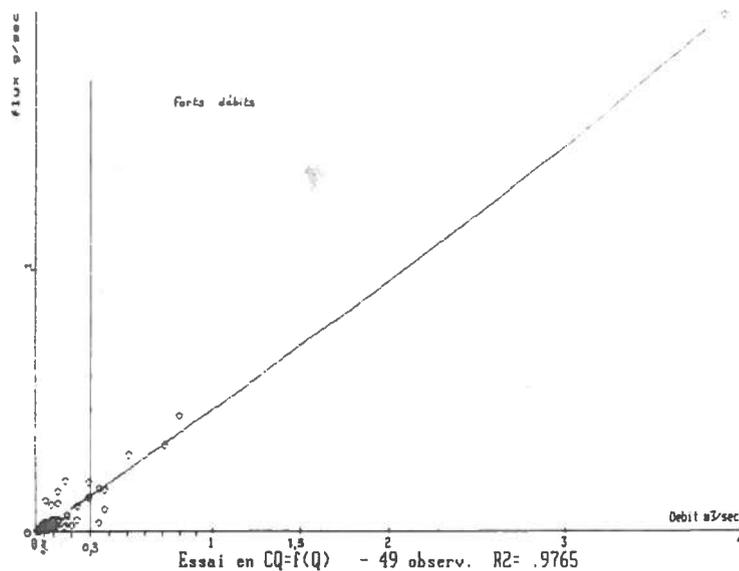
Fig.2 : Ruisseau du Moulin
Azote minéral

Ajustement : $CQ = - 0,0586 + 0,684 \times Q - 2,393 \cdot 10^{-2} \times Q^2$

Période du 24.12.83 00he 00 mi au 20.12.84 24he 00 mi soit 522720 min.

Flux total écoulé : 16,857 tonnes/an.

Fig.3 : Ruisseau de Fontenu
Phosphore soluble
(PO_4^{3-})



Ajustement : $CQ = - 4,745 \cdot 10^{-4} + 0,045 \times Q + 1,55 \cdot 10^{-3} \times Q^2$

Période du 01.01.84 00he 00 mi au 31.01.84 24he 00 mi soit 527040 min.

Flux total écoulé : 0,375 tonnes/an.

Graphique CQ = f(Q) et calcul de flux

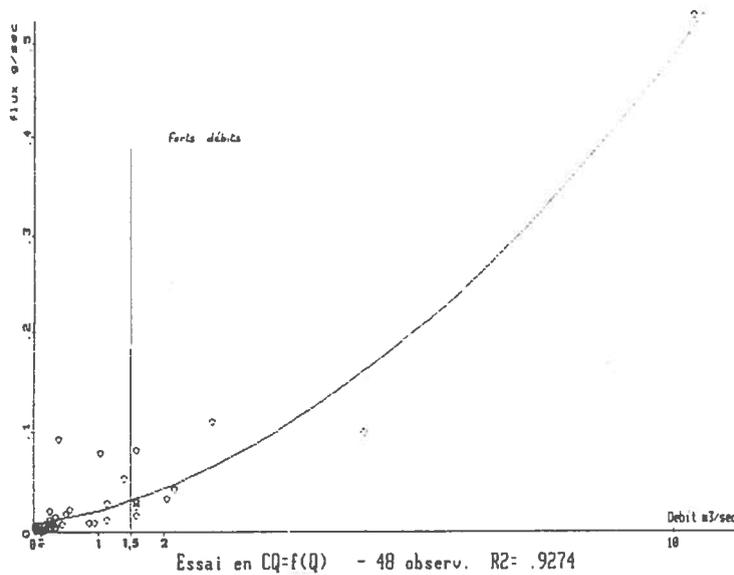


Fig.4 : Ruisseau du Moulin
Phosphore soluble
(PO_4^{3-})

Ajustement : $C \times Q = 8,208 \cdot 10^{-3} + 9,46 \times 10^{-3} \times Q + 3,848 \cdot 10^{-3} \times Q^2$

Période du 24.12.83 00he 00 min au 20.12.84 24he 00 min soit 522720 min.

Flux total écoulé : 0,834 tonnes/an.

La bonne relation établie entre (C - Q) et Q permet de considérer les résultats obtenus comme guides et certainement les plus proches de la réalité.

Le tableau suivant regroupe les valeurs de charges obtenues ici :

CHARGE EN TONNE	FONTENU	MOULIN	TOTAL
N minéral	8,722	16,857	25,58
PO_4^{3-}	0,375	0,834	1,209
P TOTAL (estimé)	0,93	2,08	3,01

- CONCLUSION : Résumé des flux (t/an) en N min et PO_4^{3-} selon les méthodes employées.

METHODES DE CALCUL	RUISSEAU DE FONTENU			RUISSEAU DU MOULIN		
	N min	PO_4^{3-}	P Total (estimé)	N min	PO_4^{3-}	P Total (estimé)
Selon le flux	6,4	0.349	0,87	15,2	0,969	2,42
à concentration constante	8,1	0.373	0,93	16	0,9	2,25
Ligne brisée	7,95	0,345	0,86	16,249	1,02	2,55
Polynôme avec le flux	8,722	0.375	0,93	16,857	0,834	2,08
Valeurs retenues	8	0,37	0,9	16	0,85	2

Les quatre méthodes employées pour la quantification des apports permettent d'avoir une estimation correcte des flux en N min et P soluble apportés au lac de Chalain par ses deux principaux affluents. Il est difficile de juger laquelle fournit le plus juste résultat puisque chacune contient une source d'imprécision :

- la méthode en valeurs instantanées (1.a dans l'ordre des méthodes) dépend de la diversité d'échantillonnage sur les concentrations et les débits.
- la méthode 1.b, ne prend en compte que la concentration moyenne par classe de Q, et suppose une bonne partition des débits.
- les méthodes 2.b et 2.c sont très artificielles mais associent à chaque valeur de Q une valeur de C, ce qui tend à augmenter la précision du calcul du flux annuel.

Toutefois, en pesant l'importance des inexactitudes de chacune et en observant le tableau ci-dessus, on peut prétendre que les calculs effectués par les concentrations moyennes et par le polynôme avec le flux sont les plus fiables ; ceci n'empêche toutefois pas de prendre en compte les autres résultats pour adopter les valeurs de charge en N minéral et Phosphore apportées au lac en 1984, à savoir :

24 tonnes de N minéral
1,22 de PO_4^{3-}

et environ : 2,9 tonnes de P total.

Dans ce total, le Ruisseau du Moulin prend la plus grande part :

66 % dans les apports en N min.
et 70 % dans les apports en PO_4^{3-}

TROISIEME PARTIE

APPORTS EN FERTILISANTS ET CONSEQUENCES SUR LA QUALITE

DES PLANS D'EAU

◇ ◇ ◇ ◇

Parmi les travaux de synthèse réalisés ces quinze dernières années sur les problèmes d'eutrophisation, différents auteurs, parmi lesquels Volleweider, ont tenté de définir les limites "admissibles" et "dangereuses" des apports en fertilisants aux plans d'eau.

Le dernier rapport de l'OCDE (1982) fait état de la complexité du problème et incite à la prudence, en particulier dans l'interprétation des relations charges nutritives - réponse trophique du lac. La prise en compte de nombreuses données sur les eaux lacustres proprement dites (teneurs moyennes en azote, en phosphore, en chlorophylle, transparence etc...) s'avèrent alors nécessaires, de façon à pouvoir faire des recoupements.

Toutefois, les valeurs limites de charges, fournis pour l'azote et le phosphore ont été jusqu'ici largement utilisés ; leur application au lac de Chalain est discutée ci-après.

1 - BILAN HYDROLOGIQUE :

Le bilan hydrique du lac sur l'année met en jeu les volumes d'eau apportés :

- par les affluents : (V_A)
- par les précipitations tombant directement sur le réservoir : (V_p) et celles tombant sur le bassin versant qui ne comporte pas d'affluents : (V_b) .

Les volumes d'eau évacués - par l'émissaire : V_E (calculé à partir des données d'E D F sur les volumes d'eau turbinés en moyennes mensuelles).
- par l'évaporation : E

Ce dernier paramètre peut être évalué à condition de posséder suffisamment de données climatiques sur le plan d'eau étudié.

Dans notre cas, l'évaporation sera assimilée au "déficit d'écoulement" D en mm, calculé par la formule de TURC, et ramené à la surface du lac.

$$D = \frac{P}{0,9 + \frac{P^2}{L^2}} \quad \text{avec } L = 300 + 25 T + 0,05 T^3$$

P étant la valeur des précipitations annuelles en mm = 1680 mm

et T la température moyenne annuelle en °C.
= 10,5 °C

soit $D = 204$ mm et
 $E = 0,204 \text{ m} \times 2,3 \cdot 10^6 \text{ m}^2$

.../...

Le bilan s'écrit :

$$V_A + V_p + V_b = V_E + E.$$

Application au Lac de Chalain pour l'année 1984 :

ENTREES (10 ⁶ m ³)		SORTIES (10 ⁶ m ³)	
V _A = FONTENU	= 8,5	V _E =	48,7
MOULIN	= 29,72		
COMBE VERNE	= 0,26		
V _b = (sous bassin "LES VERNOIS")	= 5	E = 0,47	soit 12 % des précipitations
V _p =	3,9		
	47,38		49,17

Ce bilan montre que la somme de tous les apports superficiels pris en compte ne représente que 96 % du volume d'eau exporté par le lac. Or, dans la logique des choses, la quantité d'eau entrante doit au moins être égale à celle évacuée par l'émissaire et l'évaporation.

L'hypothèse d'arrivées d'eaux sous lacustres est donc à envisager, soit à partir de la nappe découverte dans les alluvions glaciaires de la partie amont de la reculée (profondeur 15 m et niveau d'eau proche de celui du lac) soit par l'intermédiaire d'exurgences karstiques profondes.

Ces apports pourraient correspondre à environ 2.10⁶ m³/an.

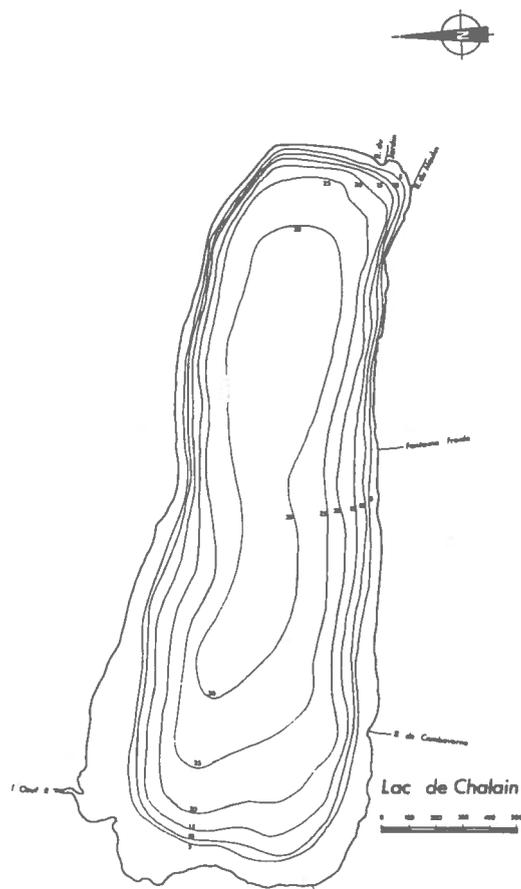
2 - TEMPS DE RENOUVELLEMENT DES EAUX :

Si le bilan hydrologique a permis de préciser les modalités d'alimentation du lac, il est surtout utile pour calculer le temps moyen de renouvellement des eaux égal à :

$$t = \frac{V}{V_E + E} \quad \begin{array}{l} \text{(volume du lac)} \\ \text{(volume d'eau exporté)} \end{array}$$

.../...

Le volume du lac est déterminé à partir de la carte bathymétrique publiée en 1898 par DELEBECQUE et représentant avec une bonne précision la forme de la cuvette (les tracés à l'échosondeur ont permis de la vérifier) ;



Celui-ci est d'environ :
 44.10^6 m^3 et $t = \frac{44}{49} = 0,9$
soit environ 11 mois.

Cette durée apparaît relativement courte, comparée par exemple aux temps de renouvellement des eaux du Lac d'Annecy : 3,8 ans ou du Bourget : entre 6 et 7 ans.

Pour le Lac de Chalain, un temps de séjour d'environ 1 an est un élément favorable à la conservation de son équilibre trophique.

3 - CALCUL DE LA CHARGE SPECIFIQUE :

La valeur absolue des apports est peu informative en soi, car la charge n'a pas les mêmes effets sur des lacs de surface et de profondeur différentes.

Une unité commune de mesures, la charge spécifique, a donc été adoptée, qui représente la quantité d'apports par unité de surface lacustre ; elle est exprimée en g/m²/an.

Pour le Lac de Chalain, la valeur de la charge totale en N minéral et P total, correspond à une charge spécifique de :

.../...

(pour une surface de $2,3 \text{ km}^2$) :

en Azote minéral : $10,4 \text{ g/m}^2/\text{an}$.

en PO_4^{3-} : $0,53 \text{ g/m}^2/\text{an}$.

en P total (estimé) : si $\text{PO}_4^{3-} = 50 \% \times \text{P total}$: $1,06 \text{ g/m}^2/\text{an}$
 si $\text{PO}_4^{3-} = 40 \% \times \text{P total}$: $1,26 \text{ g/m}^2/\text{an}$
 soit une valeur moyenne admise de $1 \text{ g/m}^2/\text{an}$.

A titre indicatif, les charges spécifiques de différents lacs français sont les suivantes : (résultats de 1977 pour le phosphore total uniquement).

LACS	SUPERFICIE EN km^2	VOLUME km^3	PROFONDEUR MOYENNE m	TEMPS DE RENOUVEL- LEMENT ANNÉE	CHARGE SPECIFIQUE $\text{g/m}^2/\text{an}$
LEMAN	586,36	89	152,7	11	$2 < L < 2,5$
BOURGET	44,62	3,62	81,13	6 - 7	7,6
ANNECY	26,5	1,123	42,38	3,3	0,275

4 - DETERMINATION DES CHARGES LIMITES :

Depuis 1970, la littérature propose des graphiques pour situer la charge spécifique en phosphore total et en azote total dans des limites admissibles ou dangereuses pour le lac. (cf. fig. 1, 2 et 3 ci-après).

Elles utilisent différemment :

- la charge spécifique (L) en $\text{g/m}^2/\text{an}$.
- la profondeur moyenne du lac (\bar{z}) en m.
- le temps de renouvellement des eaux (t_w) en année.
- le coefficient de rétention R ($R = \frac{\text{Charge entrante} - \text{Charge évacuée}}{\text{Charge entrante}}$).

Fig. 1
LARSEN-MERCIER

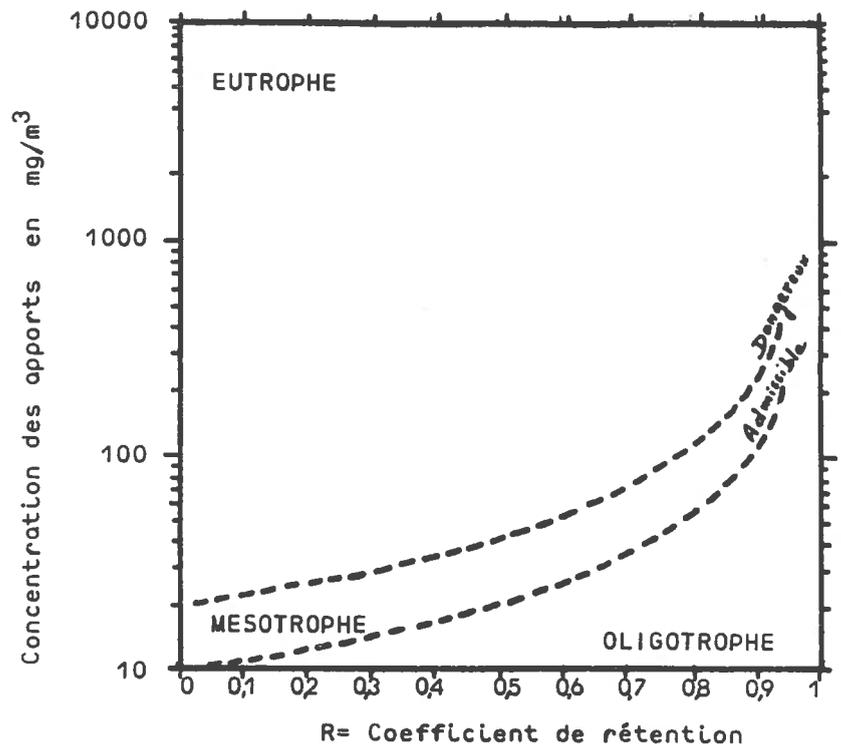


Fig. 2
DILLON

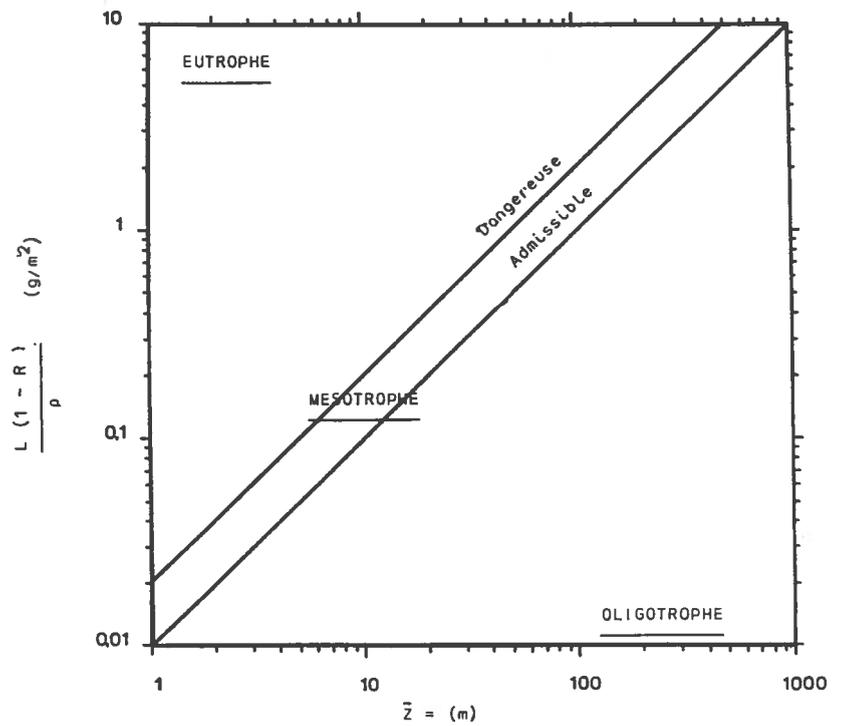
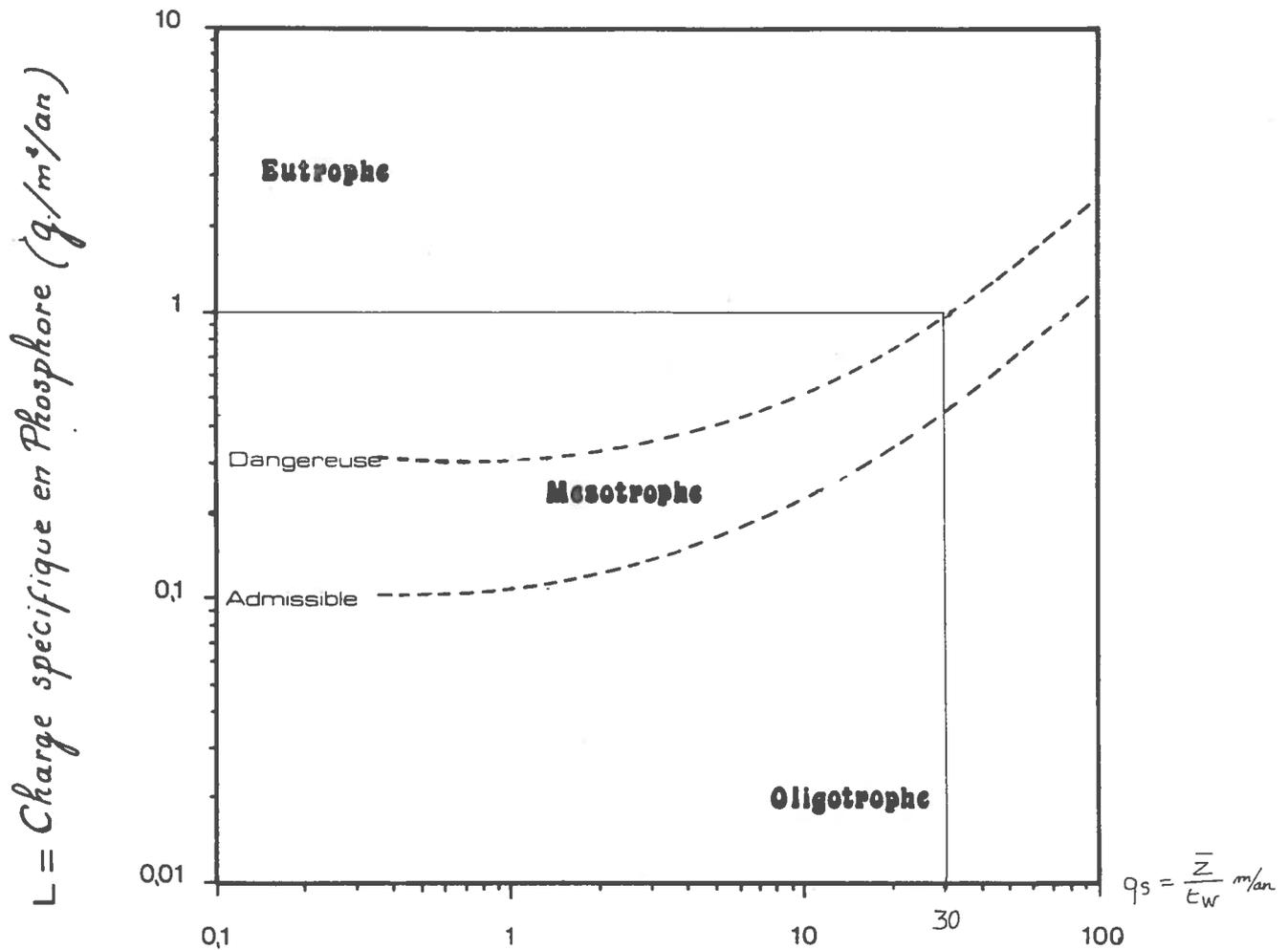


Fig. 3 : VOLLENWEIDER (1973)



On se propose d'appliquer le graphe VOLLENWEIDER 1973 dans le cas du P total à Chalain, les autres méthodes (DILLON et LARSEN MERCIER) qui font intervenir R et supposent des relevés de concentrations à l'exutoire du lac (données inexistantes pour Chalain) n'étant pas utilisables.

Les valeurs portées en abscisse et en ordonnées sont :

$$q_s = \frac{\bar{Z}}{t_w} = \frac{30}{1} = 30 \text{ m/an}$$

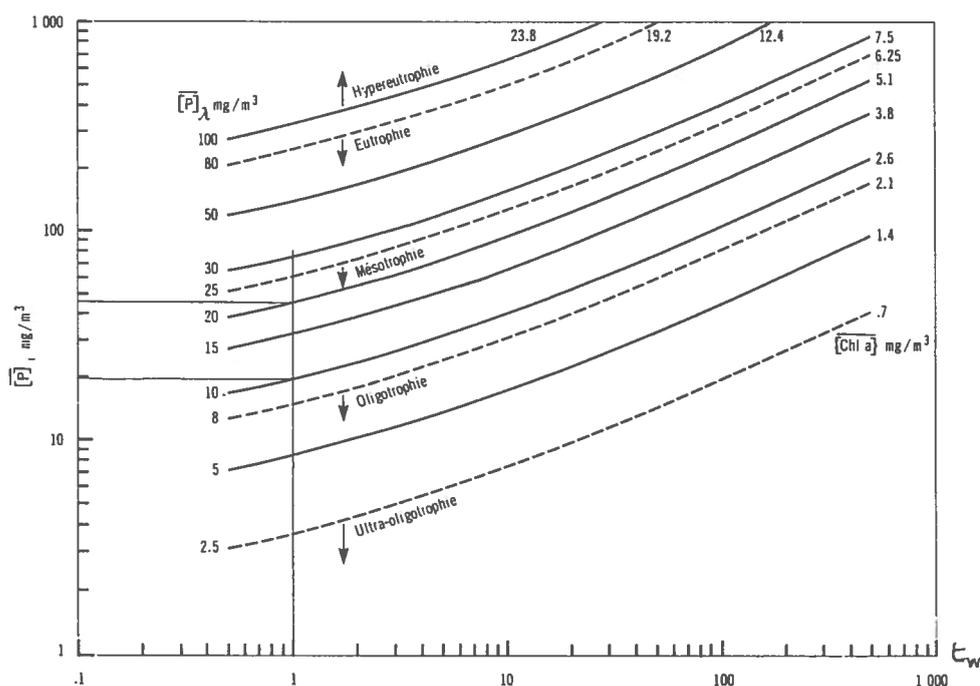
et $L = 1 \text{ g/m}^2/\text{an}$.

ce qui situe la charge actuelle en phosphore à la limite de la charge dangereuse.

Ce résultat doit toutefois être modulé compte tenu de l'approximation faite pour évaluer la valeur en P total et de la validité souvent remise en cause, du graphique employé.

Le rapport de l'OCDE (1982) fournit par ailleurs une autre démarche qui consiste à se demander qu'elles devraient être les concentrations maximales des apports pour obtenir une qualité du lac donné, estimée par les teneurs en P et chlorophylle-a, des eaux lacustres. Le problème est en quelque sorte pris à l'envers. Le graphique correspondant est le suivant (fig. 4)

Fig. 4 : Tirée du Rapport O C D E sur l'eutrophisation des eaux. (1982)



Le flux en P est donnée par la formule :

$$L_P = \frac{[P] \text{ mg/m}^3 \times \bar{Z} \times S \times 10^6 \text{ m}^2}{t_w \text{ an}}$$

.../...

Dans le cas du Lac de Chalain, en se fixant des concentrations limites pour les eaux lacustres comprises entre 10 et 20 mg/m³ P et 2,6 et 5,1 mg/m³ Chl.a.

(soit un état trophique correspondant à la mésotrophie)

La charge totale admissible en P serait comprise entre 1,4 et 3 t/an.

En ce qui concerne l'azote, des graphiques semblables à ceux du phosphore n'apparaissent pas dans les récentes publications. Aussi, et uniquement à titre indicatif, nous avons utilisé le graphe ci-dessous (Fig. 5) tiré du premier rapport OCDE sur l'eutrophisation (1970).

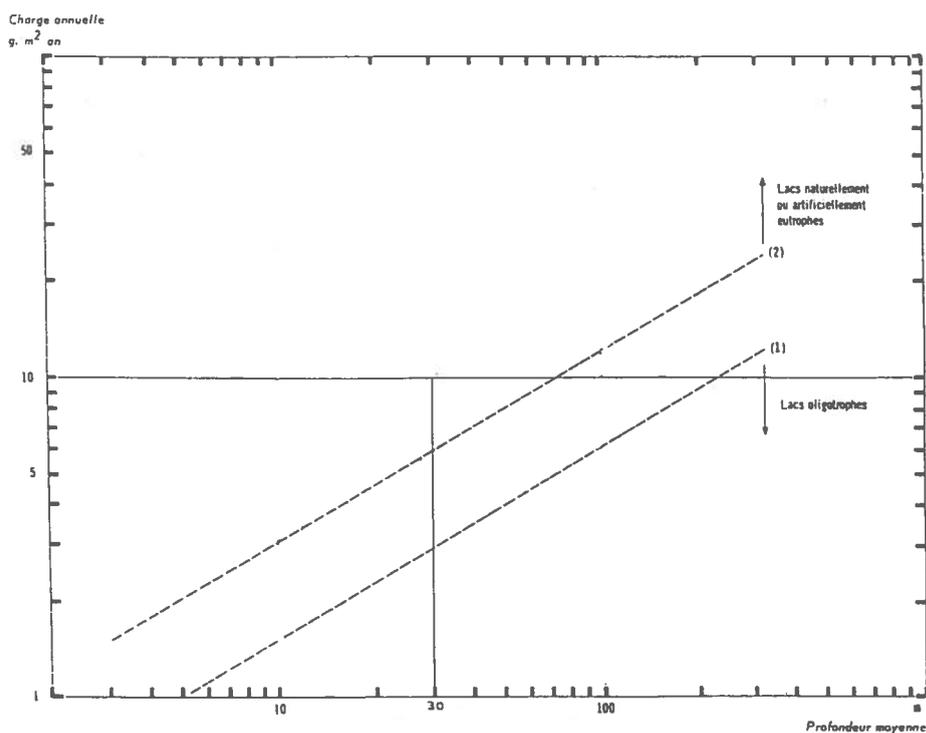


Fig.5

Contrairement à l'exemple du phosphore, seule la profondeur moyenne est prise en compte (en abcisse) ; ceci augmente l'approximation de la méthode puisque le temps de renouvellement est un élément déterminant dans les effets de la charge nutritive sur la masse d'eau.

Pour une profondeur moyenne de 30 m et une charge spécifique de 10,4 g N, le lac de Chalain se situerait en état d'eutrophie ce qui ne semble pas confirmé par les premiers résultats obtenus par le S.R.A.E. (étude du lac en cours).

Même si les indications fournies par l'application de telles méthodes sont approximatives, elles constituent un élément précieux pour évaluer le degré d'eutrophisation d'un lac en prenant en compte :

- ses caractéristiques morphométriques : profondeur moyenne, volume du lac et des apports annuels.*
- les flux d'apports annuels en fertilisants.*

Mais il ne faut pas perdre de vue que le processus d'eutrophisation est complexe et demande une étude approfondie des eaux et sédiments lacustres. Néanmoins, l'approche qui en est faite ici offre la possibilité de tirer un signal d'alarme.

CONCLUSION GENERALE

Afin de pouvoir procéder au calcul le plus précis possible d'apports en fertilisants parvenant à un lac par son réseau hydrographique superficiel, il est nécessaire de posséder une quantité suffisante de données analytiques et de mesures sur les débits.

Le meilleur compromis semble être une fréquence hebdomadaire de prélèvements (qui représente déjà quelques contraintes matérielles) et un relevé en continu des hauteurs d'eau par l'installation d'un limnigraphe sur les points de mesures.

Pour traiter toutes ces informations, le matériel informatique s'avère être un bon outil, car il permet d'alléger et d'affiner les calculs de flux.

D'un point de vue méthodologique, l'établissement d'une bonne relation entre concentration et débit demande de collecter le maximum de valeurs au moment des crues, ce qui n'est pas toujours évident à satisfaire.

Les données concernant les affluents du lac de Chalain correspondaient à ces exigences (même si les informations dans les forts débits étaient peu nombreuses) et ont permis de calculer la charge en azote minéral et en orthophosphates drainée pendant l'année 1984.

Les résultats obtenus ont abouti à préciser les relations existantes (à l'aide de schémas théoriques) entre la qualité des eaux du lac et celle des apports externes sans présumer du degré de trophie réel du plan d'eau qui nécessite l'utilisation de nombreuses données complémentaires propres au système lacustre.

On peut tout de même estimer que, par comparaison avec des plans d'eau jurassiens voisins et compte tenu des données déjà recueillies, le Lac de Chalain se situe dans un état de trophie peu élevé (mésotrophie).

Toutefois, connaissant sa relative fragilité, il faut tenter de réduire au maximum les apports polluants qui s'ajouteraient à ceux d'origine naturelle. Il convient donc dans les limites du bassin versant, de contrôler la pratique de l'épandage et l'utilisation d'engrais ; il paraît également bénéfique de préserver le plus possible la forêt qui couvre actuellement de larges étendues et constitue une protection naturelle non négligeable (atténuation des phénomènes d'érosion, de lessivage, rôle de filtre). D'autre part, il faut se prémunir contre une urbanisation intensive surtout aux abords du lac et exiger que les rejets d'eaux usées épurées (contenant toujours nitrates et phosphates) ne soient pas évacués directement dans le plan d'eau.

C'est certainement aux prix de ces conditions que pourra être maintenue la bonne qualité du site et des eaux qui représentent un grand attrait touristique.



PRECIPITATIONS

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
TOTAL MENSUEL (mm)	250,7	202,1	121,5	41,4	185,2	109,5	54,1	64	279,5	179,9	128,2	131,3
MARIGNY (Chalain EDF)	252	182	114,2	29,9	185	93	56	45	241	169	127	114
Précipitations sur les sous bassins	125,35 + 126 251,35	101,05 + 91 192,05	60,75 + 57,1 117,85	20,7 + 19,95 40,65	92,6 + 92,5 185,1	54,75 + 46,5 101,25	27,05 + 28 55,05	32 + 22,5 54,5	139,75 + 120,5 260,25	89,95 + 84,5 174,45	64,1 + 63,5 127,6	65,65 + 57 122,65
versants (mm)	225,63 + 25,2 250,83	181,89 + 18,2 200,09	109,35 + 11,42 120,77	37,26 + 29,9 67,16	166,68 + 18,5 185,18	98,55 + 9,3 107,85	48,69 + 5,6 54,29	57,6 + 4,5 62,1	251,55 + 24,1 275,65	161,91 + 16,9 178,81	115,38 + 12,7 128,08	118,17 + 11,4 129,57
C.VERNE ET LES VERNOIS	252	182	114,2	29,9	185	93	56	45	241	169	127	114
MOYENNES SUR LES SOUS BASSINS VERSANTS	251,39	191,38	117,6	45,9	185	100,7	55,1	54,2	258,96	174,08	127,56	122,07

Total annuel 1 683,75 mm

par sous bassins versants 1 760,38 mm

C. VERNE + LES VERNOIS 1 608,1 mm

sur tout le Bassin Versant environ 1680 mm d'eau

ANNEXE 2

		Q	N min	C x Q N min	PO ₄ ³⁻	C x Q PO ₄ ³⁻
JANVIER (84)	5	0,12	1,267	0,152	0,016	0,0019
	10	0,131	1,243	0,162	0,083	0,01
	17	0,735	1,075	0,79	0,045	0,033
	25	0,18	1,114	0,2	0,035	0,006
FEVRIER	1	0,3	0,95	0,285	0,064	0,019
	7	3,91	0,51	1,99	0,051	0,2
	14	0,237	0,482	0,114	0,041	0,0097
	22	0,071	0,886	0,063	0,025	0,0017
	29	0,056	0,836	0,047	0,019	0,001
MARS	7	0,09	0,825	0,074	0,051	0,0046
	14	0,056	0,883	0,05	0,029	0,0016
	21	0,3	0,92	0,276	0,045	0,0135
	28	0,362	0,782	0,283	0,01	0,0036
AVRIL	3	0,206	0,785	0,16	0,01	0,002
	9	0,109	0,735	0,08	0,029	0,003
	17	0,071	0,732	0,052	0,03	0,002
	25	0,06	0,637	0,038	0,057	0,0034
MAI	2	0,06	0,832	0,05	0,207	0,012
	9	0,175	0,817	0,143	0,025	0,004
	15	0,087	0,694	0,06	0,022	0,002
	29	0,394	0,938	0,37	0,041	0,016
JUIN	5	0,237	1,004	0,238	0,019	0,0045
	12	0,09	0,833	0,075	0,01	0,0009
	19	0,056	0,807	0,045	0,016	0,0009
	27	0,046	0,796	0,036	0,01	0,00046
JUILLET	3	0,09	1,078	0,097	0,115	0,01
	11	0,046	0,916	0,042	0,01	0,00046
	17	0,046	0,974	0,045	0,073	0,003
	31	0,021	1,045	0,022	0,009	0,0002
AOUT	7	0,008	0,983	0,0078	0,013	0,0001
	13	0,021	1,072	0,022	0,016	0,0003
	22	0,018	1,042	0,018	0,05	0,0009
	28	0,016	1,108	0,017	0,057	0,0009
SEPTEMBRE	5	0,131	1,894	0,248	0,12	0,016
	11	0,175	1,623	0,284	0,111	0,019
	19	0,815	1,31	1,067	0,054	0,044
	26	0,394	1,211	0,477	0,022	0,0086
OCTOBRE	9	0,16	1,034	0,165	0,01	0,0016
	17	0,087	0,906	0,078	0,019	0,0016
	23	0,109	0,861	0,093	0,019	0,002
	30	0,109	0,865	0,094	0,045	0,005
NOVEMBRE	6	0,071	0,842	0,06	0,009	0,0006
	13	0,056	0,901	0,05	0,013	0,0007
	20	0,131	0,96	0,125	0,032	0,004
	27	0,535	0,868	0,464	0,055	0,029
DECEMBRE	4	0,131	0,887	0,116	0,035	0,045
	11	0,087	0,971	0,084	0,041	0,0035
	18	0,362	0,92	0,333	0,047	0,017
JANVIER (85)	8	0,04	0,975	0,039	0,073	0,0029

. Débits instantanés m³/s : Q

. Concentrations en éléments fertilisants : (N minéral mg/l et
PO₄³⁻ mg/l)

. Flux instantanés en N min et PO₄³⁻ (g/s) : C x Q

49 couples C - Q en valeurs instantanées année 1984 (du 5.01.84 au 8.01.85).

ANNEXE 3

		Q	N min	C - Q N min	PO_4^{3-}	C - Q PO_4^{3-}
JANVIER (84)	5	0,56	0,631	0,35	0,041	0,023
	10	0,56	0,686	0,384	0,041	0,023
	17	5,15	0,688	3,54	0,019	0,098
FEVRIER	25	1,14	0,661	0,75	0,025	0,028
	1	1,6	0,597	0,95	0,051	0,08
	7	10,3	0,42	4,32	0,051	0,525
MARS	14	0,25	0,92	0,23	0,032	0,008
	22	0,295	0,408	0,12	0,019	0,005
	29	0,25	0,357	0,089	0,016	0,004
	7	0,295	0,361	0,106	0,029	0,0085
AVRIL	14	0,205	0,439	0,09	0,019	0,0038
	21	1,41	0,542	0,764	0,038	0,053
	28	1,6	0,414	0,662	0,01	0,0144
MAY	3	1,14	0,467	0,532	0,01	0,011
	9	0,34	0,329	0,111	0,01	0,0034
	17	0,25	0,361	0,09	0,01	0,0025
JUIN	2	0,138	0,489	0,067	0,016	0,002
	9	0,443	0,487	0,215	0,016	0,007
	15	0,205	0,377	0,077	0,019	0,0038
JUILLET	29	2,2	0,463	1,01	0,019	0,041
	5	0,95	0,496	0,471	0,01	0,0095
	12	0,25	0,37	0,092	0,01	0,0025
AOUT	19	0,138	0,417	0,057	0,01	0,0013
	27	0,116	0,526	0,06	0,016	0,001
	3	0,25	0,48	0,12	0,086	0,002
SEPTEMBRE	11	0,094	0,521	0,049	0,016	0,0015
	17	0,072	0,621	0,044	0,035	0,002
	31	0,037	0,803	0,03	0,025	0,0009
OCTOBRE	7	0,05	0,843	0,042	0,054	0,0027
	13	0,05	0,76	0,038	0,06	0,003
	22	0,03	1,09	0,032	0,146	0,004
NOVEMBRE	28	0,037	1,173	0,043	0,16	0,006
	5	0,385	1,738	0,67	0,24	0,092
	11	1,04	0,696	0,723	0,076	0,079
DECEMBRE	19	1,6	0,613	0,98	0,019	0,03
	26	2,08	0,596	1,24	0,016	0,033
	9	0,86	0,474	0,407	0,01	0,0086
JANVIER (85)	17	0,34	0,315	0,107	0,01	0,0034
	23	0,34	0,29	0,098	0,013	0,0044
	30	0,34	0,363	0,123	0,045	0,015
FEBRUER	6	0,25	0,381	0,095	0,016	0,004
	13	0,16	0,395	0,063	0,013	0,002
	20	0,5	0,516	0,258	0,035	0,017
MARS	27	2,8	0,515	1,442	0,039	0,109
	4	0,443	0,337	0,149	0,018	0,008
	11	0,16	0,409	0,065	0,035	0,0056
AVRIL	18	1,6	0,536	0,085	0,016	0,0025
	8	0,25	0,42	0,105	0,049	0,012

. Débits instantanés en m³/s : Q

. Concentrations en éléments fertilisants N minéral mg/l et

PO_4^{3-} mg/l

. Flux instantanés en N min et PO_4^{3-} (g/s) C x Q

48 couples C - Q en valeurs instantanées année 1984 (du 5.01.84 au 8.01.85)

RUISSEAU DE COMBE VERNE

- 73 -

ANNEXE 4

		Q	N _{min}	C x Q _{N min} (10 ⁻³)	PO ₄ ³⁻	C x Q _{PO₄³⁻} (10 ⁻³)
JANVIER 1984	25	0,012	0,91	10	0,016	0,2
FEVRIER	1	0,012	0,715	8,5	0,025	0,3
	7	0,04	0,342	13	0,035	1,4
	14	0,0035	1,033	3,6	0,013	0,04
	22	0,01	1,047	10	0,025	0,2
	29	0,005	1,051	5	0,006	0,03
MARS	7	0,002	1,062	2	0,016	0,03
	14	0,002	1,09	2	0,01	0,02
	21	0,005	1,046	5	0,016	0,08
	28	0,01	0,79	8	0,01	0,01
AVRIL	3	0,005	0,763	4	0,01	0,05
	9	0,003	0,952	3,4	0,01	0,03
MAI	17	0,0035	0,954	3,3	0,01	0,03
	2	0,01	1,044	10	0,035	0,35
	9	0,005	0,688	3,4	0,01	0,05
JUIN	15	0,005	0,862	4,3	0,019	0,1
	29	0,012	0,582	70	0,01	0,12
	12	0,003	0,841	2,5	0,01	0,03
	27	0,007	0,878	6	0,01	0,07
JUILLET	3	0,0075	0,755	5,6	0,025	0,18
	11	0,0035	0,959	3,3	0,01	0,035
	17	0,003	0,905	2,7	0,1	0,03
	31	0,003	0,852	2,5	0	0
AOUT	22	0,0035	0,731	2,5	0,013	0,045
	5	0,0065	0,582	3,8	0,032	0,2
	11	0,007	0,59	4	0,038	0,26
	19	0,0085	0,898	7,6	0,022	0,18
SEPTEMBRE	26	0,01	0,766	7,6	0,01	0,1
	9	0,012	0,728	8,7	0,01	0,12
	17	0,006	0,808	4,8	0,01	0,06
	23	0,006	0,896	5,3	0,01	0,06
	30	0,006	0,758	4,5	0,029	0,17
OCTOBRE	6	0,007	0,704	5	0,013	0,09
	13	0,005	0,937	4,7	0,01	0,05
	20	0,0075	0,753	5,6	0,019	0,14
	27	0,01	0,578	5,8	0,019	0,19
NOVEMBRE	4	0,006	0,932	5,6	0,012	0,14
	11	0,02	1,054	20	0,022	0,4
	18	0,0085	0,787	6,7	0,015	0,13
JANVIER 1985	8	0,005	1,147	6	0,032	0,16

. Débits instantanés estimés en m³/s : Q

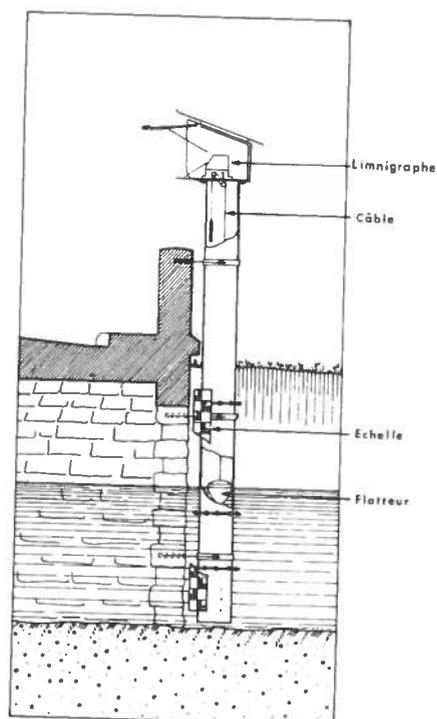
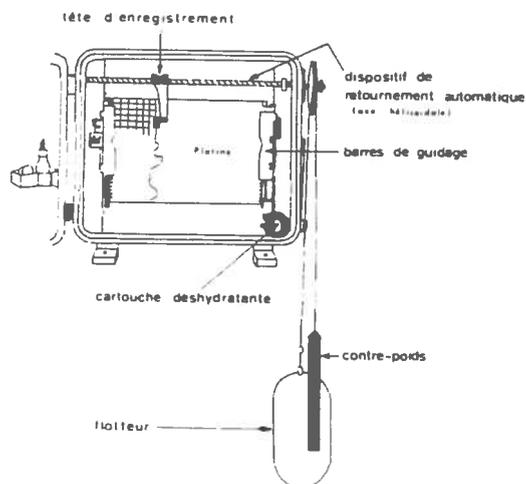
. Concentrations en éléments fertilisants : N minéral en mg/l et PO₄³⁻ en mg/l.

. Flux instantanés en N min et PO₄³⁻ (g/s) : C x Q

40 couples (C,Q) en valeurs instantanées année 1984 (du 25.01.84 au 8.01.85).

FONCTIONNEMENT D'UN LIMNIGRAPHE

Le papier gradué se déroule sur la platine à une vitesse donnée (2 mm/h le plus souvent). Les mouvements verticaux du flotteur sont transmis au stilet enregistreur qui inscrit horizontalement les variations de hauteurs d'eau



L'autonomie du limnigraphe d'une durée de 6 mois permet d'obtenir un tracé continu des H (hauteurs) = f (temps) appelé limnigramme.

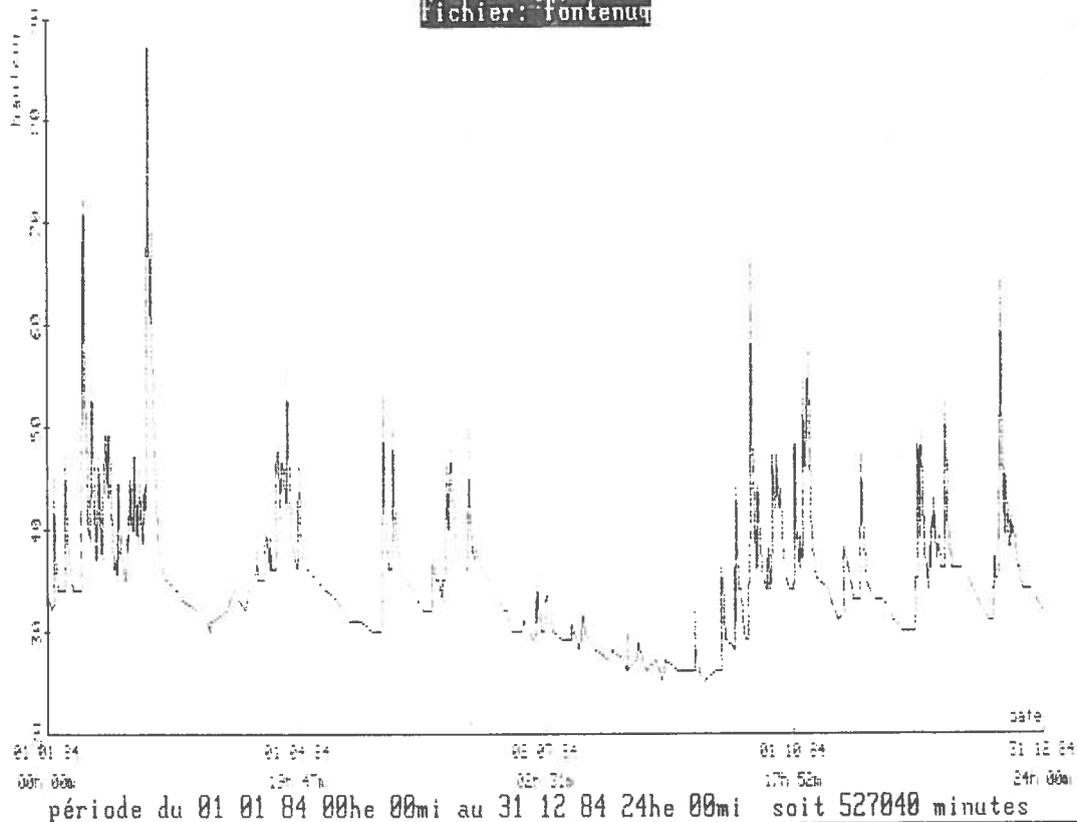
L'échelle graduée placée le long de la station permet de lire les hauteurs d'eau à tout instant.

STATION LIMNIGRAPHIQUE

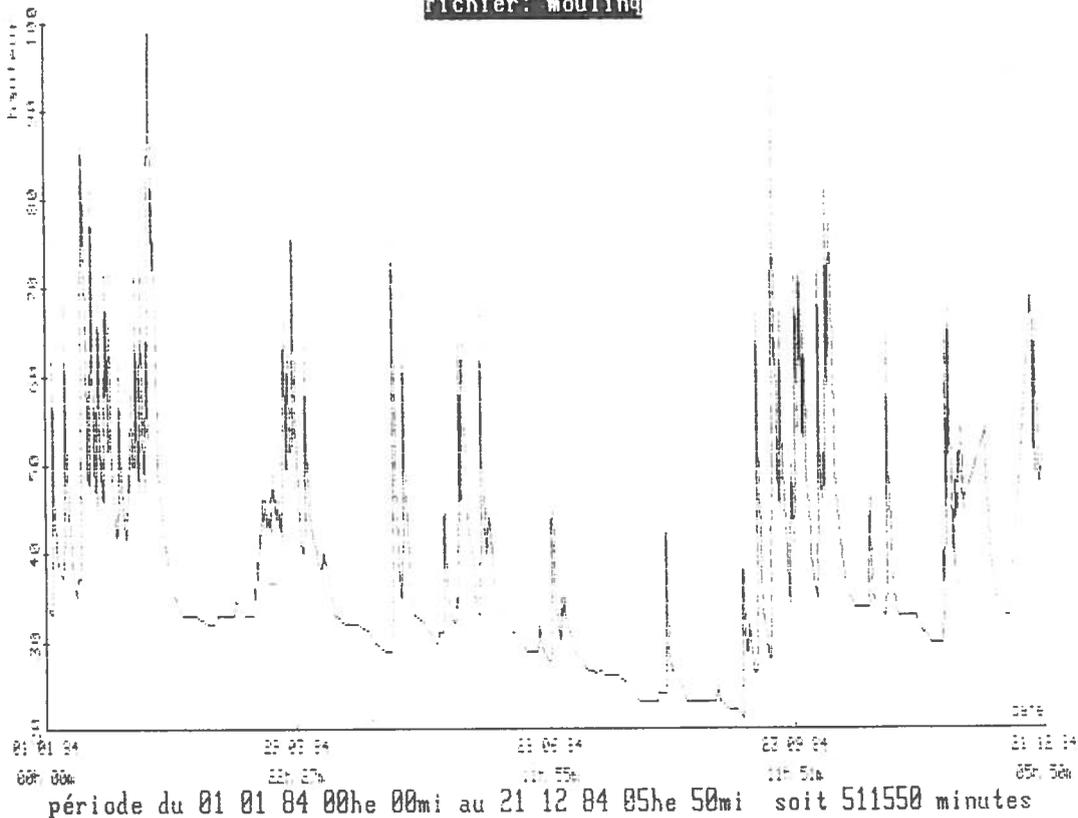
LIMNIGRAMMES DES DEUX AFFLUENTS DU LAC DE CHALAIN

POUR 1984

Fichier: fontenuq



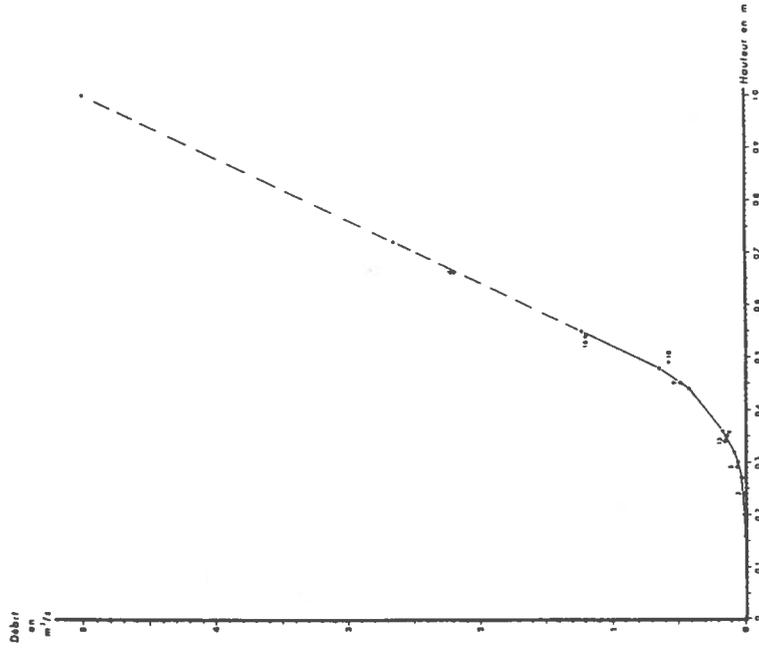
Fichier: mouling



ANNEXE 7

COURBES DE TARAGE

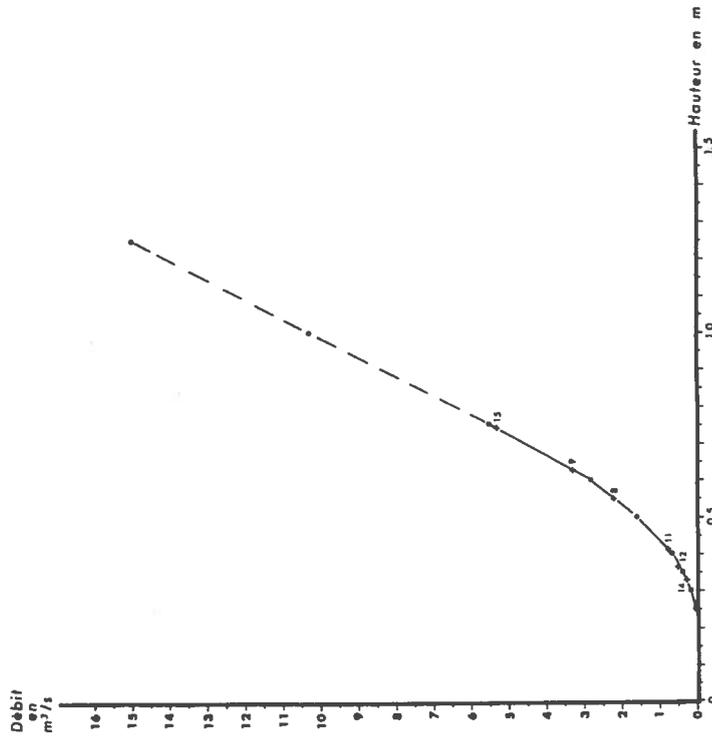
Ruisseau de Fontenu



LEGENDE

- Valeurs de l'ajustement
- Valeurs exactes
- - - Extrapolation
- ? Numéro de Jaugeage

Ruisseau du Moulin



RELATIONS DE TARAGE :

$$Q = 9,76 \cdot 10^{-3} - 1,624 \cdot 10^{-2} \times H + 6,755 \cdot 10^{-4} \times H^2$$

$$Q = - 1,405 + 2,179 \cdot 10^{-2} \times H + 8,955 \cdot 10^{-4} \times H^2$$

COMPOSANTES CHIMIQUES : VALEURS MOYENNES MENSUELLES PAR RUISSEAU

	RUISSEAU DE FONTERU												RUISSEAU DU MOULIN												RUISSEAU DE COMBE VLARNE											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N
O ₂ (mg/l)	10,8	11,1	11,7	12	10,4	10,27	10,32	9,25	10,15	10,52	10,85	10,55	10,49	11,37	11,75	11,83	10,45	9,75	10,6	9,7	10,37	10,37	10,32	10,2	12,25	11,7	12,77	11,37	10,4	9,7	9,85	8,6	9,8	10,25	10,6	10,85
T° (°C)	7,5	7,82	7,65	8,66	9,9	10,87	12,5	13,5	10	9,3	9	6	7,9	7,12	6,85	7,53	8,6	9,97	10,32	10,07	9,38	9,67	9,33	8,76	5,5	5	5	9,7	10,6	13	13,37	12	12,07	9,52	7,98	5,56
pH	8,19	8,16	8,19	8,16	8,06	7,97	7,8	7,78	7,8	7,85	8,05	7,86	8,07	8,13	7,87	7,95	7,96	7,66	7,66	7,66	7,78	7,68	7,78	7,78	8,35	8,34	8,13	8,16	8,07	7,5	7,88	7,63	8,06	8,03	8,2	7,96
Conductivité umm/cm	330	275	298,75	300	308,75	317,5	321,7	326,25	332,5	337,5	330	338,5	253,5	40	292,5	353,5	450	256,2	257,3	270	285	288,75	283,7	276,6	345	309	349	329	330	337,5	323	340	352,5	357,5	347,5	336,6
NO ₃ ⁻ (mg/l)	0,111	0,114	0,087	0,05	0,0752	0,0707	0,102	0,04	0,036	0,056	0,025	0,032	0,116	0,123	0,09	0,026	0,05	0,053	0,057	0,079	0,099	0,041	0,077	0,045	0,116	0,115	0,09	0,03	0,047	0,044	0,065	0,037	0,071	0,04	0,025	0,047
NO ₂ ⁻ (10 ⁶ mg/l)	0,35	0,37	0,35	0,33	1,1	0,6	1,2	0,25	0,25	0,37	0,32	0,33	0,3	0,4	0,6	0,2	0,3	0,6	1,5	2,1	2,1	0,32	0,3	0,7	0,42	0,48	0,6	0,5	0,39	0,8	1,1	0,9	0,6	0,42	0,42	0,46
PO ₄ ³⁻ (mg/l)	4,635	2,874	3,47	3,21	3,6	3,71	4,05	4,32	6,54	3,93	3,87	4,82	2,55	1,98	1,6	1,84	1,9	1,88	2,47	4,15	3,67	1,46	1,95	1,78	3,86	3,3	4,108	3,37	3,35	3,48	3,64	3,16	2,96	3,77	3,4	3,9
PO ₄ ³⁻ (10 ⁶ mg/l)	4,47	4	3,3	2,3	7,3	1,3	5,1	3,4	7,6	2,3	2,7	4,1	3,1	3,3	2,4	3	1,7	1,1	4	10,5	8,7	1,9	2,5	2,4	3,58	2	1,3	3,4	3,8	1	2,7	0,9	2,5	1,4	1,5	1,6

MOYENNES ANNUELLES

N min	0,95	0,56	0,84
PO ₄ ³⁻	0,04	0,037	0,017
(en mg/l)			

A. MAGNIN.

*"Monographies Botaniques de 74 lacs jurassiens",
suivies de considérations générales sur la végétation lacustre.
Les Lacs du Jura : N° IV. - Paris 1898.*

MASSON (J.P.).

*Ministère de l'Agriculture - S.R.A.E. de Franche-Comté.
Rapport : "Le Lac de Chalain (Jura) : Aspect général,
caractéristiques physico-chimiques et biologiques". - Janvier 1974.*

NISBET (M.) et VERNEAUX (J.).

*Composantes chimiques des eaux courantes.
Discussion et proposition de classes en tant que bases
d'interprétation des analyses chimiques.*

ASSOCIATION FRANCAISE POUR L'ETUDE DES EAUX (AFEE).

Synthèse Bibliographique 1975. - "l'Eutrophisation des Lacs".

O C D E.

*Rapport 1982. - "Eutrophisation des eaux, méthodes de surveillance,
d'évaluation et de lutte".*

O C D E.- 1971.

*"Les bases scientifiques de l'eutrophisation des lacs et eaux
courantes sous l'aspect particulier du phosphore et de l'azote
comme facteurs d'eutrophisation".*

*Commission internationale pour la protection des eaux du Lemman
contre la pollution (CIPEL).*

Sous commission technique.

*"Rapport sur les études et recherches entreprises dans le bassin
lemanique". - Programme quinquenal 1981 - 1985. - Campagne 1983
et "Le Lemman" - Synthèse 1957 - 1952.*

CEMAGREF. *"Apports au Lac du Bourget (Savoie). - Etude 1983.*

- Rapport et annexes - Février 1985.

Synthèse des études CEMAGREF - Mars 1985.

