

HYDROGEOLOGIE DES BASSINS DE LA SERRIERE ET DU SEYON

NEUCHÂTEL - SUISSE

THESE

présentée à la Faculté des Sciences de l'Université de Neuchâtel pour
obtenir le grade de Docteur ès Sciences.

par

Bernard MATHEY

Lic. ès Sciences de l'Université de Genève

Diplômé en Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel (3ème cycle)

1976

IMPRIMATUR POUR LA THÈSE

Hydrogéologie des bassins de la Serrière
et du Seyon (Neuchâtel, Suisse)

de M on sieur Bernard Mathey-Prévot

UNIVERSITÉ DE NEUCHÂTEL

FACULTÉ DES SCIENCES

La Faculté des sciences de l'Université de Neuchâtel,
sur le rapport des membres du jury,

Messieurs A. Burger, L. Kiraly, H. Jäckli
(EPF Zurich) et H. Paloc (Montpellier)

autorise l'impression de la présente thèse sans exprimer
d'opinion sur les propositions qui y sont contenues.

Neuchâtel, le 29 mars 1978

Le doyen :

J. P. Schaer

J.-P. Schaer

*Les personnes et institutions suivantes ont aidé l'auteur
à financer l'impression de la présente :*

- Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel*
- Département des Travaux publics de la République et
Canton de Neuchâtel*
- Département de l'Instruction publique de la République
et Canton de Neuchâtel*
- Entreprise Bernard Pillonel à Cortaillod*
- Les membres de sa famille.*

Qu'elles en soient remerciées.

**HYDROGEOLOGIE DES BASSINS DE
LA SERRIERE ET DU SEYON**

RESUME

Le bassin alimentaire de la source karstique de la Serrière (Neuchâtel - Suisse) est constitué par 2 segments des 2 premières chaînes anticlinales du Jura helvétique plissé. L'aquifère principal est constitué par des calcaires jurassiques. Le bassin du Seyon est formé par la couverture tertiaire et quaternaire du synclinal du Val de Ruz séparant les 2 anticlinaux précitées. Le bassin du Seyon recouvre totalement le bassin de la Serrière. Les limites des 2 bassins varient selon les conditions hydrologiques.

	Surface	Altitude moyenne	Module ¹⁾ pluviométrique	ETR	Débit ¹⁾		
					moyen	maximum	minimum
SEYON	40 km ²	780 m	1120 mm	470 mm	0,77	49	0,0
SERRIERE	88 km ²	1060 m	1346 mm	440 mm	2,50	10,9	0,19

Elles ont été vérifiées par 12 essais de traçage puis confirmées par le bilan. Les vitesses mesurées dans le karst sont comprises entre 3 et 300 mètres par heure. Les eaux de la Serrière sont de type bicarbonaté calcique. Les valeurs moyennes pour l'année 1970 sont: température: 8,8° C, pH: 7,25, K₂₀ Ca: 373 µmhos, dureté totale: 234 mg/l, Ca⁺⁺: 44,7 mg/l, Mg⁺⁺: 5,7 mg/l, Na⁺: 1,3 mg/l, Cl⁻: 3,5 mg/l, SO₄⁻⁻: 4,3 mg/l. Les analyses isotopiques donnent un temps de séjour moyen de 6 à 7 mois. La perméabilité des calcaires jurassiques mesurée dans les forages est comprise entre 2·10⁻⁷ et 5·10⁻⁷ m/s. Les fluctuations de la surface piézométrique à l'aplomb de la source du Torrent atteignent 200 mètres. L'analyse des courbes de tarissement de la Serrière conduit à envisager une fonction de type $Q = Q_0 e^{-Kt}$ avec $K = f(Q)$. Son intégration sur une période de 5 ans donne 12 à 16·10⁶ m³ pour les réserves régulatrices.

La couverture quaternaire peu perméable du bassin du Seyon détermine la forte variabilité des débits. Des accumulations morainiques plus perméables conduisent à la formation d'aquifères d'extension limitée, parfois en liaison avec le substratum crétacé (Fontaines, Valengin). A l'est du bassin du Seyon les aquifères des Prés Royer fournissent la majeure partie des ressources en eau potable du Val de Ruz. L'étude des fluctuations de la surface piézométrique, l'interprétation d'essai de pompage, l'hydrochimie ont révélé dans cette région d'importantes échanges hydrauliques entre le Malm, le crétacé et le Quaternaire.

L'analyse stochastique des débits a permis d'estimer les valeurs des crues décennales, centennales et millénaires du Seyon. Un modèle de type reinfall - runoff (CHYN1) établi pour la prévision des débits du Seyon durant la construction d'un tunnel de dérivation assure une excellente prévision des débits horaires. Les paramètres d'entrée du modèle sont: API, Semaine, Intensité de l'inverse, lame d'eau tombée. L'équation du bilan est obtenue par régression polynomiale multiple. La lame d'eau ruisselée est répartie dans le temps par l'hydrogramme unitaire. Le flot de base est traité par la méthode de Muskingum. Le modèle est présenté sous la forme d'un programme FORTRAN.

ZUSAMMENFASSUNG

Das Einzugsgebiet der Karstquelle von La Serrière (Neuchâtel, Schweiz) besteht aus zwei Abschnitten der 2 ersten Antiklinalketten des Faltenjura.

Der Hauptgrundwasserleiter besteht aus Jurakalk. Das Einzugsgebiet des Flusses Le Seyon ist aus tertiären und quartären Deckschichten des Synklinalis vom Val de Ruz gebildet, der die zwei oben erwähnten Antiklinalen trennt. Das Einzugsgebiet des Seyon bedeckt völlig jenes der Quelle von La Serrière. Die Grenze zwischen der zwei Becken verändert sich je nach hydrologischen Bedingungen.

	Oberfläche	Mittlere Höhe	Mittlere Niederschlagsmenge	Gesamt Verdunstung	Abfluss mittel	Abfluss maximum	Abfluss minimum
Seyon	40 km ²	780 m	1'120 mm	470 mm	0,77	49	0,00
Serrière	88 km ²	1'060 m	1'346 mm	440 mm	2,50	10,9	0,19

Die Grenzen wurden durch 12 Tracerteasts nachgeprüft und durch die Wasserbilanz bestätigt. Im Karst sind Fließgeschwindigkeiten von drei bis drei hundert Metern pro Stunde gemessen worden. Das Wasser von La Serrière enthält Kalium-Bicarbonat. Im Jahr 1970 betragen die Mittelwerte für die Temperatur 8,8° C, pH: 7,25, K₂CO₃ C: 373 µmho, Gesamthärte: 234 mg/l, Ca⁺⁺: 44,7 mg/l, Mg⁺⁺: 5,7 mg/l, Na⁺: 1,3 mg/l, Cl⁻: 3,5 mg/l, SO₄⁻⁻: 4,3 mg/l.

Isotopenanalysen ergeben eine mittlere Aufenthaltszeit des Quellwassers im Erdinneren von sechs bis sieben Monaten. Die in den Bohrungen gemessene Durchlässigkeit des Jurakalks beträgt zwischen $2 \cdot 10^{-7}$ und $5 \cdot 10^{-7}$ m/sec. Die Schwankungen des Grundwasserspiegels in der Gegend der La Torrent-Quelle können 200 Meter erreichen. Die Ganglinie des Trocken von La Serrière ist durch die Funktion $Q = Q_0 e^{-at}$ mit $a = f(Q)$ dargestellt. Die Integration dieser Funktion über 5 Jahre ergibt 12 bis $16 \cdot 10^6$ m³ für die regulierende Reserven.

Die wenig durchlässigen quartären Deckschichten des Seyon-Beckens erzeugen die grossen Schwankungen der Abflussmengen. Besser durchlässige Moränen bilden Grundwasserleiter beschränkten Ausmasses, die manchmal in Verbindung mit der Unterlage aus Kreidalkalen sind. (Fontaine, Valengin). Im Osten des Seyon Beckens liefern die Grundwasserleiter von Les Prés Royer den Hauptanteil an Trinkwasser für das Val de Ruz (5000 Einwohner).

Das Studium der Schwankungen des piezometrischen Niveaus, die Auswertung der Pumpversuche und die Hydrochemie haben ergeben, dass in dieser Region wichtige hydraulische Zusammenhänge zwischen Malm, Kreide und dem Quartär bestehen.

Die statistische Analyse des Abflusses hat erlaubt, die Werte der zehn, hundert- und tausendjährigen Hochwasser des Le Seyon zu schätzen. Ein Rainfall-Runoff Modell (CHYN1) wurde für die Vorhersage des Abflusses des Le Seyon während des Baues eines Umleitungs-Tunnels erstellt. Dieses Modell ergibt eine gute Vorhersage der stündlichen Abflussmenge. Die Eintrittsparameter des Modells sind: API, Niederschlagsintensität, Niederschlagsmenge, Woche. Die Bilanzgleichung wird durch polynomielle multiple Regression erhalten. Der Oberflächenabfluss ist während der vorgegebenen Zeit durch den Einheitshydrographen verteilt. Die Trockenwetterkurve wird durch die Muskingum Methode behandelt. Das Modell wird als FORTRAN-Programm vorgestellt.

SUMMARY

North of Neuchâtel (Switzerland) between the two first anticlines of the Jura is enclosed the Val de Ruz. This synclinal zone with tertiary and quaternary cover contains two superposed and interconnected basins. a) The top one, Le Seyon, has a superficial river, the lower one, La Serrière is totally karstic with its karstic spring near and at the level of the lake of Neuchâtel.

The basin of Le Seyon completely covers the basin of La Serrière. The limit of the two basins varies according to the hydraulic conditions.

	Surface	Altitude average	Rainfall	ETP	Average	Discharge 1) maximum	minimum
SEYON	40 km ²	780 m	1'120 mm	470 mm	0,77	49	0,00
SERRIERE	88 km ²	1'060 m	1'346 mm	440 mm	2,50	10,9	0,19

The limits have been verified by 12 tracing tests and then confirmed by the water balance. The speed of displacement measured in the karst are in between 3, and 300 meters per hour. The waters of La Serrière are of calcium bicarbonate type. The mean value for the year 1970 are temperature: 8,8° C, pH: 7,25, $K_{20}^{\circ}C$: 373 μ hos, hardness: 234 mg/l, Ca^{++} : 44,7 mg/l, Mg^{++} : 5,7 mg/l, Na^{+} : 1,3 mg/l, Cl^{-} : 3,5 mg/l, SO_4^{--} : 4,3 mg/l. Isotopic analysis of La Serrière water give a mean time of residence of 6 to 7 months. The permeability of the Jurassic limestones measured in drillings is between $2 \cdot 10^{-7}$ and $2 \cdot 10^{-7}$ m/s. The fluctuations of the water table in the region of the source of Le Torrent attains 200 meters. The analysis of the recession curves of La Serrière makes one consider a function of the type $Q = Q_0 e^{-\alpha t}$ with $\alpha = f(Q)$. Integration over a period of 5 years gives 12 to $16 \cdot 10^6$ m³ for the hydraulic reserves.

The quaternary cover with low permeability of Le Seyon catchment determines the strong variability of the discharge. Glacial deposits which are more permeable form aquifers of limited extension, sometimes connected with the cretaceous substratum (Fontaines, Valangin). To the East of Le Seyon basin the Prés Royer aquifers supply the major part of the drinking water resources in the Val de Ruz. Study of the fluctuations of the water table, interpretation of the pumping tests, chemical analysis have shown in this area important hydraulic exchanges between the main and cretaceous limestones and quaternary deposits.

The stockastic analysis of the discharge have allowed us to estimate the maximum flow which appears once in ten hundred, and thousand years. A rainfall-runoff model (CHYN1) established to forecast the discharge of the Seyon during the construction of a derivation tunnel, assures an excellent prevision of the hourly discharge. Parameters of the model are: API, week, rainfall, rainfall intensity. Equation of the water balance for each rain is obtained by multiple polynomial regression. Direct runoff is distributed through a unit hydrograph. The basic flow is treated by the Muskingum method. The model is presented under the form of a FORTRAN programme.

CHAPITRE I

INTRODUCTION

1. BUT ET CADRE DE L'ETUDE

Si dans le Jura neuchâtelais, les bassins de l'Arreuse et de la Noiraigue ont déjà fait l'objet d'une étude hydrogéologique globale (BURGER 1959, TRIPET 1972), le présent travail veut combler une lacune qui subsistait pour les bassins de la Serrière et du Seyon. Ses objectifs sont donc de réaliser une première synthèse hydrogéologique des deux bassins sous la forme d'une monographie, d'où l'empieusement de la partie descriptive et la longueur du texte. Fixer les limites des bassins versants, compléter puis interpréter les données hydrométéorologiques nécessaires à l'établissement de bilans hydrologiques, définir les unités hydrogéologiques en accumulant les informations sur les facteurs hydrologiques, constituent le schéma général d'un travail dont l'objectif pratique était de réaliser une première estimation des ressources en eau du Val de Ruz.

La réalisation, en cours de travail, d'ouvrages de génie civil (tunnel du Seyon à Valangin, station d'épuration du Haut Val de Ruz) et des recherches hydrogéologiques (Les Prés Royer, Fontaines) devaient être, grâce à la compréhension des maîtres d'oeuvre, une source d'information considérable autorisant l'application de méthodes analytiques plus spécifiques.

Enfin cette étude veut s'intégrer dans le programme de recherches du Centre d'Hydrogéologie dont il est une étude appliquée. Si celui-ci est essentiellement axé sur l'étude des roches fissurées, c'est la présence d'une vaste couverture quaternaire dans le bassin du Seyon qui justifie l'importance accordée aux phénomènes de ruissellement et aux circulations souterraines en milieu à porosité d'interstice.

2. DONNEES A DISPOSITION

Le présent travail n'a pas comporté de levé géologique inédit. Seuls les documents à disposition (publiés ou non) ont été étudiés (Chap. II). Des observations inédites lors de fouilles, de forages ou de recherches géophysiques, ont cependant fourni d'utiles indications sur la nature géologique des terrains rencontrés.

Les données météorologiques officielles ont été complétées par des stations pluviométriques (Chap. VI).

Les débits de la Serrière et du Seyon (1901 - 1925) mesurés et publiés par DE PERROT ont été complétés par des mesures récentes effectuées dans le cadre du présent travail (Chap. VII, VIII).

Les archives des communes du Val de Ruz, le casier sanitaire cantonal, les archives des Services cantonaux des Eaux et des Améliorations foncières ont constitué une source d'information précieuse à laquelle s'ajoute une campagne d'observation de mesures et d'analyses comblant les lacunes, effectuée par nos soins.

3. SITUATION

3.1. Le bassin de la Serrière.

Le bassin alimentaire de la source karstique de la Serrière (canton de Neuchâtel / Suisse) est constitué par 2 segments des deux premières chaînes anticlinales du Jura helvétique plissé : anticlinal de Chaumont et anticlinal de Mont Racine - Tête de Ran - Mont d'Amin. Sa superficie est d'environ 88 km² et ses limites déterminées dans le cadre de cette étude seront discutées au Chapitre IV.

La source de la Serrière jaillit à la base des calcaires de l'Hauterivien supérieur au fond d'une reculée à 475 mètres d'altitude, soit à 45 mètres au-dessus du niveau du lac de Neuchâtel et à 600 mètres de ce dernier, dans lequel elle se jette.

3.2. Le bassin du Seyon.

Le champ collecteur du Seyon (~40 km²) est déterminé par la couverture tertiaire et quaternaire du synclinal du Val de Ruz. La surface alimentaire de la rivière recouvre entièrement le bassin souterrain de la Serrière (SCHARDT 1906). Le Seyon prend sa source au SE de Villiers au pied de l'anticlinal de Chaumont. En période de crue il reçoit une partie des eaux qui ruissellent sur les marno-calcaires de l'Argovien depuis les combes Mauley, Berthière et Blosse, dont le débit n'est pas totalement absorbé vers la Serrière au passage des chutes calcaires. Il reçoit également les eaux de la source temporaire du Torrent qui, entre St Martin et Dombresson, jaillit au pied de l'anticlinal des Planches. Autrefois le Seyon traversait la basse ville de Neuchâtel, établie sur son delta, qu'il inondait périodiquement. En 1839 la rivière fut détournée peu après la sortie des gorges par un canal de dérivation de 250 mètres à travers la colline du Château.

4. HISTORIQUE DES RECHERCHES HYDROLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES DANS LES BASSINS DE LA SERRIERE ET DU SEYON

En 1906, dans le dictionnaire géographique de la Suisse, SCHARDT (op cit.), sous les exceptions Serrière, Seyon et Val de Ruz, donne une première description des 2 bassins en les délimitant, qui garde son actualité. Jointe à d'autres notes (SCHARDT 1908), ces documents montrent que l'auteur distinguait parfaitement les systèmes d'écoulement en présence et leurs relations.

Quelques années auparavant GUILLAUME (1861) et JACCARD (1883 I, 1883 II) reconnaissent l'existence du bassin de la Serrière et JACCARD signale que la source du Torrent représente un exutoire temporaire en relation avec la source de la Serrière. Très tôt cette résurgence temporaire intrigue les naturalistes (AMIET, 1693). DE CHAMBRIER (1795) émet l'hypothèse vérifiée récemment (MATHEY, SIMEONI 1972), que l'eau qui circule au fond du gouffre de Pertuis ressort à la source du Torrent dont il décrit bien le régime.

En 1856 KNAB (1864) réalise les premiers jaugeages de la Serrière et du Seyon qui seront poursuivis plus tard par DE PERROT (1896). En 1868 GUILLAUME décrit la nappe du delta du Seyon, signale la présence d'une zone noyée dans les calcaires de l'Hauterivien supérieur du littoral et met en évidence le rôle d'imperméable des marnes hauteriviennes.

Dans les années 1880 le Seyon est utilisé pour l'alimentation en eau de la ville de Neuchâtel mais NICOLAS (1883) constate que le nombre de cas de fièvre typhoïde à Neuchâtel est directement proportionnel à ceux du Val de Ruz! Cette solution sera rapidement abandonnée et bien que l'ingénieur ROVEREAZ (in JAUN, 1924) propose de capter les eaux de la Serrière, cette

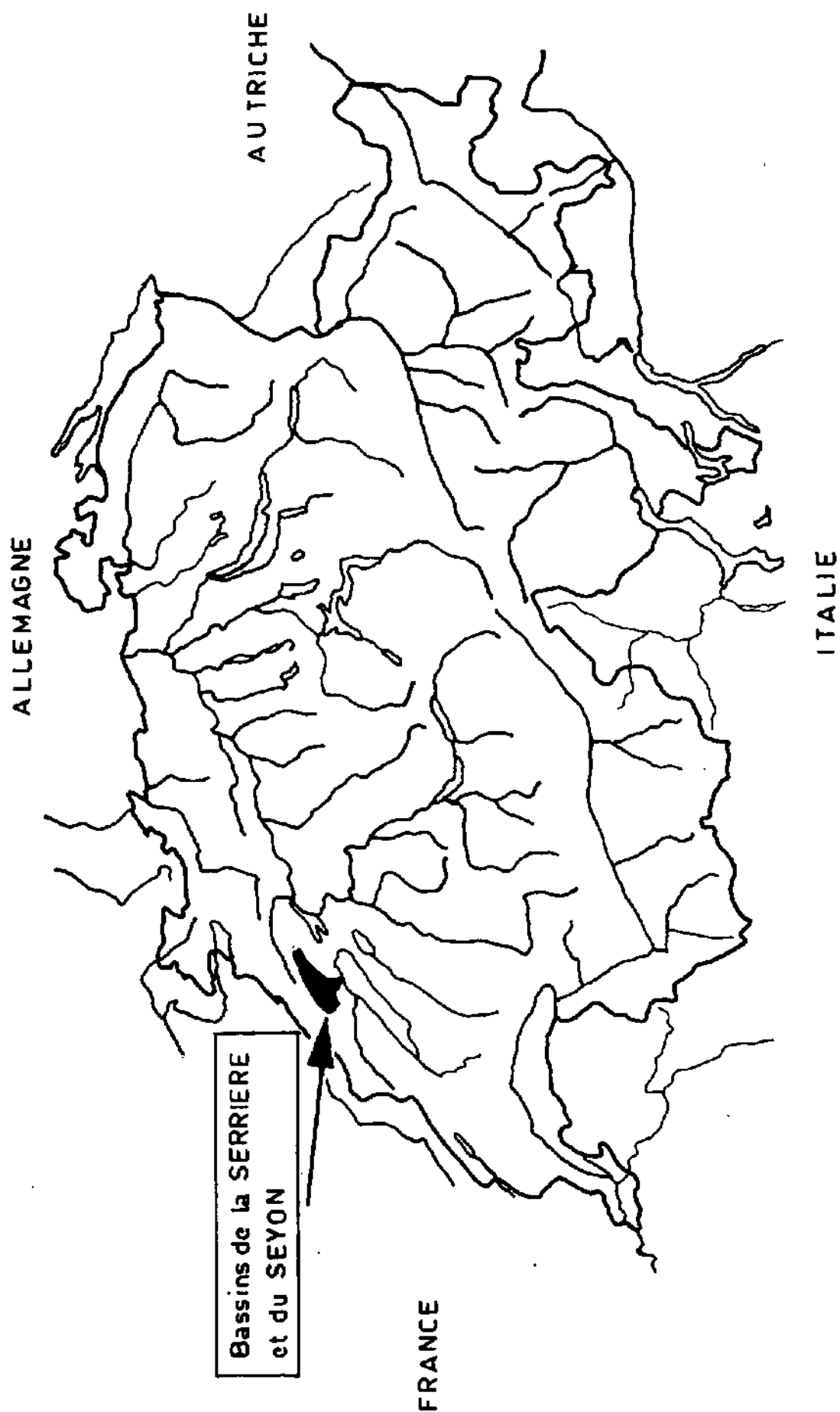


Figure I - 1 Situation géographique des bassins de la Serrière et du Seyon

solution est délaissée pour un captage des sources des gorges de l'Arause. Le motif : il aurait fallu installer une station de pompage à Serrière! RITTER (in JACCARD 1876), ingénieur visionnaire mais pragmatique, se proposait déjà d'élever les eaux de la Serrière jusqu'à La Chaux-de-Fonds grâce à la force hydraulique de l'Arause. C'est également RITTER (1899) qui cherche à convaincre les autorités de réaliser une retenue artificielle des eaux du Seyon près d'Engollon pour alimenter en électricité la ville de Neuchâtel, projet qui ne verra jamais le jour, comme celui dû à DE PERROT d'un bassin de retenue des eaux du Seyon dans la combe Perroud à l'Ouest de Valengin.

C'est à partir du 15^{me} siècle surtout que la Serrière voit se développer de nombreuses industries : métier à tisser, teinturerie, papeterie (1477), scierie, huilerie, mouline, puis plus tard chocolaterie HABICHT (1922). Neuchâtel leur doit encore aujourd'hui une grande part de sa prospérité, et bien que la chute utilisable ne dépasse pas 40 mètres, ces industries profitaient d'un débit plus régulier que celui du Seyon.

Parmi les études hydrogéologiques récentes relevons celles de FREI (1925, 1943 inédit), les recherches géoélectriques de POLDINI, et l'établissement entre 1949 et 1955 du casier sanitaire cantonal.

5. STATISTIQUE ET ANALYSE NUMERIQUE

On trouvera au tableau I-I un rappel succinct de la définition mathématique des paramètres statistiques utilisés pour ce travail. Les notations et définitions sont pour la plupart tirées des ouvrages suivants :

- M.R. SPIEGEL : Theory and Problems of statistics
- Documenta GEIGY : Mathématique et Statistique
- IBM Application Program : 1130 Scientific Subroutine Package Programmer's Manual.

Ce dernier ouvrage décrit les programmes de calcul dont on a fait largement usage ici pour la résolution des régressions multiples et polynomiales (programmes REGRE et POLRG), la recherche des histogrammes (programme DASCN) et le calcul des covariances (programme CROSS).

Des adaptations ne modifient généralement pas l'organigramme de calcul leur ont été apportées : modification des "FORMAT" d'entrée et de sortie, augmentation des "DIMENSION" de certains paramètres, création d'un sous-programme de sortie sur traceur de courbe (POPOL) pour POLRG, etc.

Les valeurs limites t_{lim} , F_{lim} et r_{lim} sont tirées des Tables scientifiques GEIGY.

L'estimation des paramètres statistiques a été effectuée sur l'ordinateur IBM 1130 du Centre de Calcul de l'Université de Neuchâtel dont nous remercions vivement le directeur et ses collaborateurs de leurs conseils et l'aide apportée à la recherche de solutions numériques appropriées aux besoins de ce travail.

6. REMERCIEMENTS

Le présent travail a été réalisé grâce à la collaboration de l'équipe de chercheurs réunie au Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel et dirigée par le professeur A. Burger, excellent connaisseur de l'hydrogéologie du Val de Ruz. Qu'il soit, avec tous nos collègues de travail, remercié de son aide et ses conseils pertinents. Les communes du Val de Ruz, le Laboratoire cantonal, le Service des Eaux et le Service des Améliorations foncières de l'Etat de Neuchâtel ont mis à notre disposition une documentation abondante, nous les remercions vivement.

Nous exprimons également notre gratitude aux observateurs des stations météorologiques, aux employés des communes qui nous ont accompagné sur le terrain, au personnel de l'Institut de Géologie et à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Le fonds "Jeunes Chercheurs" du Fonds national de la recherche scientifique et l'Etat de Neuchâtel par leur aide financière ont permis la réalisation de ce travail, nous leur disons notre reconnaissance.

Les Papeteries de Serrières et les Chocolats Suchard en nous mandant pour déterminer les limites du bassin de la Serrière sont très certainement à l'origine du choix du sujet. Une aide financière appréciable de ma famille a permis l'achèvement de ce travail.

TABLEAU I-1

RAPPEL STATISTIQUE

PARAMETRE	1 OU 2 VARIABLES.	PLUS DE 2 VARIABLES NOTATION GENERALE
VARIABLES	$X_1, X_2, X_3, \dots, X_i, \dots, X_n$ $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_i, \dots, Y_n$	$X_{11}, X_{12}, \dots, X_{1j}, \dots, X_{1m}$ $\vdots$ $X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ij}, \dots, X_{im}$ $\vdots$ $X_{n1}, X_{n2}, \dots, X_{nj}, \dots, X_{nm}$
MOYENNE	$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad \bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n}$	$\bar{X}_j = \frac{\sum_{i=1}^n X_{ij}}{n} \quad \text{où } j = 1, 2, \dots, m$
SOMME QUADRATIQUE	$S_x = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad S_y = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2$	$S_j = \sum_{i=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_j)^2 \quad \text{où } j = 1, 2, \dots, m$
VARIANCE	$s_x^2 = \frac{S_x}{n-1} \quad s_y^2 = \frac{S_y}{n-1}$	$s_j^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_j)^2}{n-1} = \frac{S_j}{n-1}$
ECART TYPE	$\sigma_x = \sqrt{s_x^2} \quad \sigma_y = \sqrt{s_y^2}$	$\sigma_j = \sqrt{\frac{S_j}{n-1}} = \sqrt{s_j^2} \quad \text{où } j = 1, 2, \dots, m$
DEGRE DE LIBERTE	$\nu_x \quad \nu_y$	ν_j
COVARIANCE	$s_{yx} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{n-1}$	$s_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_j)(X_{ik} - \bar{X}_k)}{n-1}$ $\text{où } j = 1, 2, \dots, m \text{ et } k = 1, 2, \dots, m$
REGRESSION LINEAIRE	$\hat{Y} = a_{yx} + b_{yx} X$	$\hat{X}_k = a_k + b_{kj} X_j$
coefficient de régression	$\text{où } b_{yx} = \frac{s_{xy}}{s_x^2} = \frac{S_{xy}}{S_x}$	$\text{où } b_{kj} = \frac{s_{jk}}{s_j^2} = \frac{S_{jk}}{S_j}$

Tableau 1-1 (suite)

PARAMETRE	1 OU 2 VARIABLES	PLUS DE 2 VARIABLES
ordonnée à l'origine	$a_{yx} = \bar{y} - a_{yx} \bar{x}$	$a_k = \bar{x}_k - b_{kj} \bar{x}_j$
somme quadratique résiduelle	$S_{y \cdot x} = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2$	$S_{k \cdot j} = \sum_{i=1}^n (\hat{x}_{ki} - x_{ki})^2$
variance résiduelle	$s_{y \cdot x}^2 = \frac{S_{y \cdot x}}{n-1}$	$s_{k \cdot j}^2 = \frac{S_{k \cdot j}}{n-1}$
écart type résiduel	$s_{y \cdot x} = \sqrt{s_{y \cdot x}^2} = \sqrt{\frac{S_{y \cdot x}}{n-1}}$	$s_{k \cdot j} = \sqrt{s_{k \cdot j}^2} = \sqrt{\frac{S_{k \cdot j}}{n-1}}$
coefficient de corrélation	$r = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_x \cdot S_y}} = \frac{a_{xy}}{s_x \cdot s_y}$	$r_{kj} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{x}_{ki} - \bar{x}_k)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_k)^2}} = \frac{S_{k \cdot j}}{\sqrt{S_k \cdot S_j}} = \frac{a_{kj}}{s_k \cdot s_j}$
écart type du coefficient de régression	$s_{b_{yx}} = \sqrt{\frac{s_{y \cdot x}^2}{S_x}}$	$s_{b_{kj}} = \sqrt{\frac{s_{k \cdot j}^2}{S_k}}$
<u>REGRESSION MULTIPLE</u>		$\hat{x}_k = a_k + \sum_{j=1}^p b_{kj} x_j$ où $k = 1, 2, \dots, 1$ indice de la variable dépendante $j = 1, 2, \dots, P$ indice de la variable indépendante
coefficients angulaires β		$\beta_{kj} = \sum_{i=1}^p r_{ik} \cdot r_{ij}^{-1}$
coefficients de régression		$b_{kj} = \beta_{kj} \cdot \frac{s_k}{s_j}$
ordonnée à l'origine		$a_k = \bar{x}_k - \sum_{j=1}^p b_{kj} \cdot \bar{x}_j$
coefficient de corrélation multiple		$R_k^2 = \sum_{j=1}^p \beta_{kj} \cdot r_{jk} \quad R_k = \sqrt{R_k^2}$
variance résiduelle		$s_{k \cdot 1, 2, \dots, P}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{x}_{ki} - x_{ki})^2}{n - P - 1}$

Tableau I-1 (suite)

PARAMETRE	1 OU 2 VARIABLES	PLUS DE 2 VARIABLES																																
écart type résiduel		$\sigma_k = 1, 2, \dots, p = \sqrt{s^2_k} \quad 1, 2, \dots, p$																																
<u>REGRESSION POLYNOMIALE</u> simple	$\hat{Y} = a_y + \sum_{j=1}^q b_{y,j} X^j$ le nombre de variables est $> 2 \implies$	$\hat{X}_k = a_k + \sum_{j=1}^q b_{k,j} X^j \quad \text{où } q = \text{degré du polynôme}$ Si $X^j = X_j$ on est ramené au cas de la régression multiple																																
multiple		$\hat{X}_k = a_k + \sum_{l=1}^p \sum_{j=1}^q b_{k,l,j} X^j_l$																																
TEST DE L'HYPOTHESE ZERO POUR LE COEFFICIENT DE REGRESSION	Hypothèse $b_{yx} = 0$ $\text{Si } t = \frac{b_{yx}}{s_{b_{yx}}} \gg \text{limite de signification } t_{lim}$ alors l'hypothèse est rejetée $b_{yx} \neq 0$	Hypothèse $b_{kj} = 0$ $\text{Si } t = \frac{b_{kj}}{s_{b_{kj}}} \gg \text{limite de signification } t_{lim}$ alors l'hypothèse est rejetée																																
TEST DE L'HYPOTHESE ZERO POUR LE COEFFICIENT DE CORRELATION	Hypothèse : $r = 0$ $s^2_r = \frac{1 - r^2}{n - 1}$ $\text{Si } \frac{ r }{s_r} \gg \text{valeur limite } r_{lim}$ alors l'hypothèse est rejetée, $r \neq 0$	Hypothèse $R = 0$ $s^2_R = \frac{1 - R^2_k}{n - p - 1}$ $\text{Si } \frac{ R }{s^2_R} \gg \text{valeur limite } R_{lim}$ alors l'hypothèse est rejetée, $R \neq 0$																																
ANALYSE DE VARIANCE DE LA REGRESSION	<table><tr><th>DESIGNATION</th><th>SOMME QUADRATIQUE</th><th>D.L.</th><th>VARIANCE</th></tr><tr><td>Variance due à la régression</td><td>$S_y^2 = \sum (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$</td><td>1</td><td>$S_y^2$</td></tr><tr><td>Variance résiduelle</td><td>$S_{y \cdot x} = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2$</td><td>$n - 2$</td><td>$s^2_{y \cdot x}$</td></tr><tr><td>Total</td><td>$S_T = \sum (Y_i - \bar{Y})^2$</td><td>$n - 1$</td><td>$S_T / (n - 1)$</td></tr></table>	DESIGNATION	SOMME QUADRATIQUE	D.L.	VARIANCE	Variance due à la régression	$S_y^2 = \sum (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$	1	S_y^2	Variance résiduelle	$S_{y \cdot x} = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2$	$n - 2$	$s^2_{y \cdot x}$	Total	$S_T = \sum (Y_i - \bar{Y})^2$	$n - 1$	$S_T / (n - 1)$	<table><tr><th>DESIGNATION</th><th>SOMME QUADRATIQUE</th><th>D.L.</th><th>VARIANCE</th></tr><tr><td>Variance due à la régression</td><td>$S_k^2 = \sum (\hat{X}_{ki} - \bar{X}_k)^2$</td><td>$p$</td><td>$S_k^2 / p$</td></tr><tr><td>Variance résiduelle</td><td>$S_k^2 \cdot 1, 2, \dots, p = \sum (X_{ki} - \hat{X}_{ki})^2$</td><td>$n - p - 1$</td><td>$s^2_{k \cdot 1, 2, \dots, p}$</td></tr><tr><td>Total</td><td>$S_T = \sum (X_{ki} - \bar{X}_k)^2$</td><td>$n - 1$</td><td>$S_T / (n - 1)$</td></tr></table>	DESIGNATION	SOMME QUADRATIQUE	D.L.	VARIANCE	Variance due à la régression	$S_k^2 = \sum (\hat{X}_{ki} - \bar{X}_k)^2$	p	S_k^2 / p	Variance résiduelle	$S_k^2 \cdot 1, 2, \dots, p = \sum (X_{ki} - \hat{X}_{ki})^2$	$n - p - 1$	$s^2_{k \cdot 1, 2, \dots, p}$	Total	$S_T = \sum (X_{ki} - \bar{X}_k)^2$	$n - 1$	$S_T / (n - 1)$
DESIGNATION	SOMME QUADRATIQUE	D.L.	VARIANCE																															
Variance due à la régression	$S_y^2 = \sum (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$	1	S_y^2																															
Variance résiduelle	$S_{y \cdot x} = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2$	$n - 2$	$s^2_{y \cdot x}$																															
Total	$S_T = \sum (Y_i - \bar{Y})^2$	$n - 1$	$S_T / (n - 1)$																															
DESIGNATION	SOMME QUADRATIQUE	D.L.	VARIANCE																															
Variance due à la régression	$S_k^2 = \sum (\hat{X}_{ki} - \bar{X}_k)^2$	p	S_k^2 / p																															
Variance résiduelle	$S_k^2 \cdot 1, 2, \dots, p = \sum (X_{ki} - \hat{X}_{ki})^2$	$n - p - 1$	$s^2_{k \cdot 1, 2, \dots, p}$																															
Total	$S_T = \sum (X_{ki} - \bar{X}_k)^2$	$n - 1$	$S_T / (n - 1)$																															
COMPARAISON DES VARIANCES TEST F	Hypothèse $S_y^2 = s^2_{y \cdot x}$ $\text{Si } F = \frac{S_y^2}{s^2_{y \cdot x}} \gg \text{limite de signification } F_{lim}$ alors l'hypothèse est rejetée $S_y^2 \neq s^2_{y \cdot x}$	Hypothèse $S_k^2 / p = s^2_{k \cdot 1, 2, \dots, p}$ $\text{Si } F = \frac{S_k^2 / p}{s^2_{k \cdot 1, 2, \dots, p}} \gg \text{limite de signification}$ alors l'hypothèse est rejetée																																

CHAPITRE II

APERÇU GÉOLOGIQUE

La Suisse est un pays qui touche les
dividendes de ses vertus.

Anonyme.

1. LEVERS GÉOLOGIQUES

La région étudiée est entièrement couverte par les feuilles Neuchâtel, Bâle et Berne de la carte géologique de la Suisse au 1/200'000. Les feuilles : 1144 Val de Ruz, 1164 Neuchâtel, 1145 Lac de Bièvre et 114 - 117 Bâle - Les Bois - La Ferrière - St Imier de l'Atlas géologique de la Suisse au 1/25'000 recouvrent l'ensemble de la région et constituent les documents géologiques de base utilisés pour ce travail. Au NW la feuille XXXV-23 Morteau de l'Atlas géologique de la France au 1/50'000 recoupe une partie de l'anticlinal Tête de Ren - Mont-Racine.

Un lever géologique inédit de A. BAER (1959) au 1/5000 recouvre l'anticlinal de Tête de Ren - Mont d'Amin ainsi qu'une partie de l'anticlinal de Chaumont. Plus récemment KIRALY (1973) a établi une carte hydrogéologique du canton de Neuchâtel au 1/50'000 sur laquelle figure une carte structurale du toit des marno-calcaires argoviens (KIRALY 1969). Une partie de ce document est reproduite à la figure II-1.

2. ETUDES GÉOLOGIQUES

Une récapitulation des principaux travaux géologiques à l'intérieur ou à proximité des bassins de la Serrière et du Seyon est donnée au tableau II-1. Parmi les travaux importants, citons FREI (1925) pour la première chaîne anticlinale et SUTER (1920, 1937) pour la région Tête de Ren - Vue des Alpes. La monographie de FREI (op. cit) constitue une étude lithologique, stratigraphique et tectonique très complète.

3. LITHOLOGIE ET STRATIGRAPHIE DES TERRAINS SECONDAIRES ET TERTIAIRES

3.1. Résumé lithostratigraphique.

Le bassin de la Serrière est situé dans la zone bordière interne du Jura central et ses terrains en présentent les faciès caractéristiques. Un résumé lithostratigraphique (tableau II-II) avec référence aux principaux travaux géologiques et une coupe lithostratigraphique (fig. II-2) complètent la description qui suit.

Relayons que les modifications de l'épaisseur ou de la lithologie des formations à l'intérieur du bassin ne modifient pas fondamentalement leurs caractéristiques hydrodynamiques.

3.2. Le Lias.

Toarcien et Aalénien constituent les plus anciens terrains observables. Du point de vue de la circulation karstique, ces formations sont peu perméables. A ce titre, elles participent à la délimitation de la partie Nord du bassin de la Serrière.

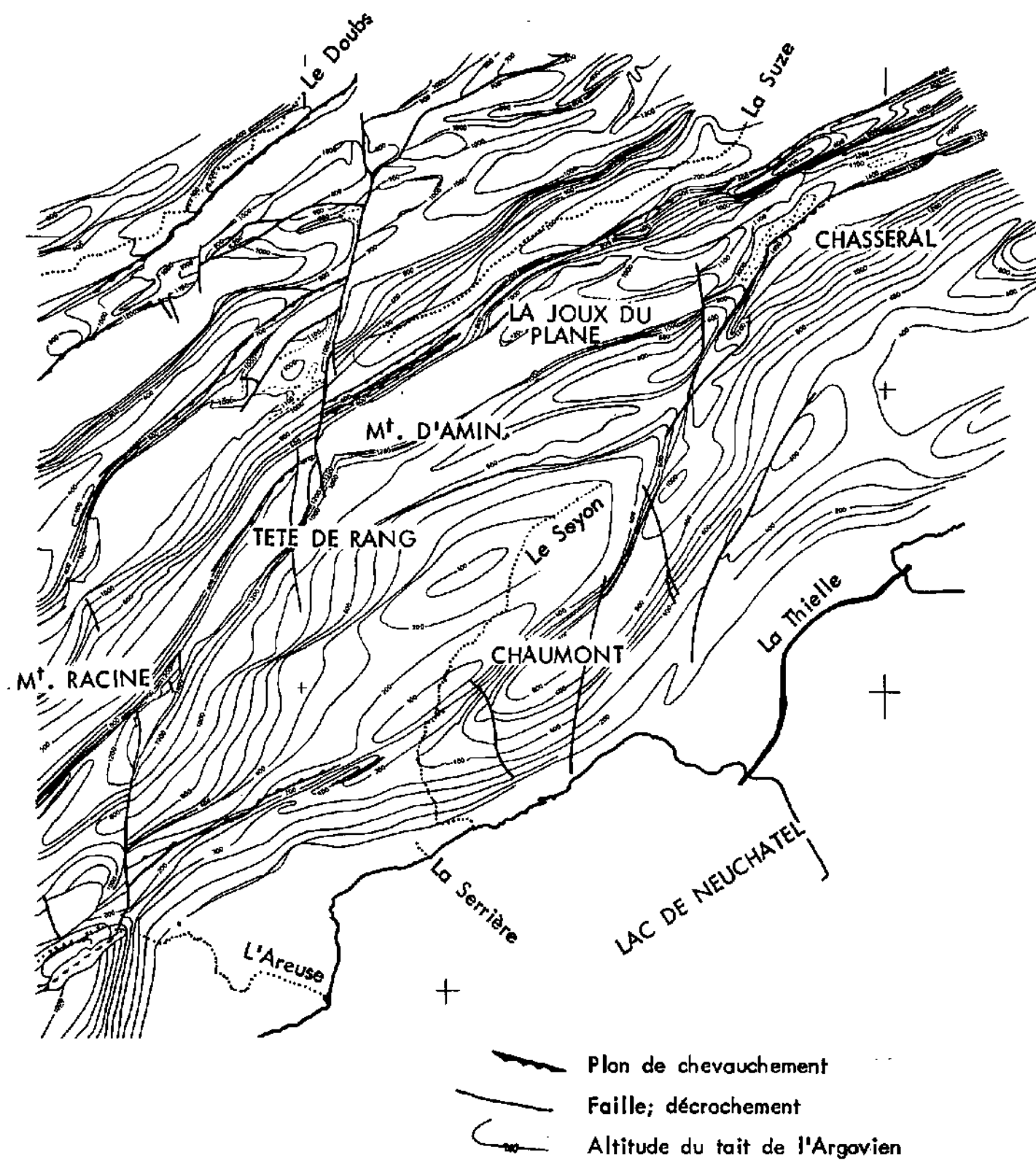


Figure II -1 Carte structurale du toit de l'Argovien (d'après L. KIRALY 1969)

3.3. Jurassique moyen : Le Dogger.

Considéré sous l'angle de la circulation karstique le Dogger apparaît comme une alternance de couches calcaires et marneuses, perméables en grand et imperméables. (BURGER, 1959). Les formations du Dogger affleurent dans la partie centrale de la chaîne anticlinale qui va du Mont-Racine aux Bugnenaux.

L'alternance des niveaux tendres et résistants détermine dans le relief une succession de crêtes et de combes.

Les principaux horizons calcaires sont :

- Les calcaires du Callovien (Dalle sacrée) : 40 - 50 m.
- Les calcaires du Bathonien (Oberer Hauptrogenstein) : 20 - 25 m.
- Les calcaires du Bajocien : 100 - 125 m. avec intercalations marneuses peu importantes.

3.4. Jurassique supérieur : Le Malm.

A la base on trouve une série marno-calcaire de 150 mètres d'épaisseur, l'Argovien, dans laquelle on peut inclure un Oxfordien presque inexistant. Au-dessus, Séquanien, Kimméridgien et Portlandien forment une épaisse masse calcaire de 350 mètres qui couvre près des 4/5 de la surface alimentaire de la source de la Serrière. Par leur épaisseur et leur extension, ces formations calcaires déterminent le neture karstique de nombreux bassins du Jura méridional, (Orbe, Aarouse, Noiraigue) et en particulier celui de la Serrière. L'épisode saumâtre du Pürbeckien (10 - 15 m. de marno-calcaires) est généralement trop mince pour empêcher une liaison hydraulique entre le Malm et le karst Valanginien sus-jacent.

3.5. Le Crétacé.

Cette série occupe le fond et les bords du synclinal du Val de Rur, le synclinal du Côté ainsi que le flanc Sud de la première chaîne. Sa surface d'affleurement dans les deux bassins est de 1,7 km².

On y trouve deux épisodes calcaires : le Valanginien (35 - 50 m) et l'Hauterivien supérieur (50 - 60 m) auxquels on peut adjoindre le Barrémien sur le littoral uniquement. L'Hauterivien inférieur marneux (25 m) forme une limite généralement étanche entre ces deux formations. Relevons que l'épaisseur du Crétacé diminue de près de la moitié entre le littoral neuchâtelais et le vallon de St Imier (LUTHI 1954). Aux Prés Royer, entre Chézerd et Dombresson, sur le versant NW du Val de Rur, MORNOU (1970) a relevé par forage des épaisseurs un peu plus fortes que celles admises généralement : Hauterivien supérieur (et Barrémien ?) : 70 m, Hauterivien inférieur marneux : 48 m, Valanginien : 24 m, Pürbeckien : 19 m.

Dès la fin du Barrémien le pays est exondé. Quelques reliques d'Albian (résidus sableux et nodules phosphatés) subsistent dans des poches hauteriviennes sur le littoral. Des dépôts de craie d'âge Cénomaniens ont été décrits au Baliset près de Rochefort (SCHAROT et DUBOIS 1905, FREI 1925). Leur intérêt hydrogéologique est très restreint, mais ils sont le témoin d'une karstification qui a débuté à cette époque.

3.6. Le Tertiaire.

Au cours de l'Eocène, les grès, craies et marnes du Crétacé supérieur, moyen, puis les calcaires sous-jacents sont successivement altérés ou décalcifiés sous un climat chaud et humide. (AUBERT 1975). Les résidus insolubles constituent un sol latéritique que l'on retrouve sous forme de remplissages de cavités karstiques dans les calcaires jurassiques, mais plus souvent crétacés (BURGER 1959 p. 50). Le sidérolithique du Val de Ruz découvert récemment par sondage aux Prés Royer (MORNOD 1970) est constitué de 1,1 mètre de grès brunâtres à pisolites, formation qui peut être rattachée à celle du bassin saurais dont elle constitue l'extrémité occidentale (AUBERT 1975). Elle est surmontée par 3,1 mètres de sidérolithique remanié, d'âge probablement Chattien constitué par un grès à ciment argileux ocre avec lentilles de calcaire.

L'Oligocène (Stampien ? Aquitanien), bien qu'affleurant très rarement au Val de Ruz (La Borcarderie) atteint 110 mètres d'épaisseur aux Prés Royer (-38 à -148 m, coord. 562.370/212.765) (MORNOD 1970). Cette formation est imperméable en grand, bien qu'on y rencontre des circulations d'eau sulfatée.

Dans le synclinal du Côté un sondage mécanique, au Pâquier, a rencontré la molasse représentée par un grès argileux sous 5 mètres d'argile à galets et de limons argileux quaternaires. (POLDINI 1960).

4. MILIEU DE DÉPÔT ET PALEOGEOGRAPHIE

Dans une étude des milieux de dépôt du Dogger supérieur et au Malm dans le Jura neuchâtelois méridional, (PERSOZ et REMANE, 1973), les auteurs distinguent deux grands systèmes régressifs allant du Bathonien au Callovien inférieur et de l'Oxfordien à la base du Crétacé. Les étapes de cette évolution peuvent être résumées ainsi : bassin épicontinental → talus → barre plateforme → zone infratidale → zone supratidale.

La première régression se termine par la barre de la Dalle nécrée (Callovien) puis après un passage au type bassin épicontinental (Argovien), l'évolution se poursuit par un système de barres (Séquanien) auxquelles succèdent des dépôts en milieu de plateforme (Kimméridgien et Portlandien). Les modifications du milieu seront plus rapides au Crétacé. Le système paléogéographique de l'Hauterivien présente de nombreuses similitudes à celui du Dogger (PERSOZ 1973).

Dès la fin de l'Hauterivien (centre et Est du Val de Ruz) et du Barrémien (littoral) débute une longue phase d'émersion. Une dépression structurale orientée WSW - ENE (gouttière neuchâteloise) s'étendant du Val de Travers au lac de Bière subsistera jusqu'au Cénomanien. (Aubert 1975).

Le caractère lacustre de la molasse oligocène est généralement authentifié par des gastéropodes. Les terrains qui constituent actuellement les deux premières chaînes anticlinales du Jura neuchâtelois ne seront pas recouvertes par la mer miocène et par conséquent soumis à une érosion à peu près uniforme. Après le plissement jurassien ou Tardipontien, celle-ci se différencie : maximum sur les anticlinaux, elle reste négligeable dans les synclinaux (AUBERT, 1975 op. cit.)

5. COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DES ROCHES

Le tableau II-III donne un aperçu de la composition minéralogique moyenne des roches du Jura neuchâtelois méridional. Bien que ces valeurs n'englobent que très partiellement le domaine étudié, leur faible variabilité permet toutefois de les considérer comme valables ici :

- Roches dolomitiques. PERSOZ (1973) classe les dolomites de la série jurassienne en 3 catégories :

1. Dolomites des séries marneuses (Argovien, Hauterivien inférieur).

En raison de leur environnement lithologique peu perméable, leur mise en solution est très lente.

2. Dolomites et ferrodolomites (Callovien, Valanginien supérieur).

Facilement lessivables, elles pourront enrichir les eaux karstiques en fer et en magnésium.

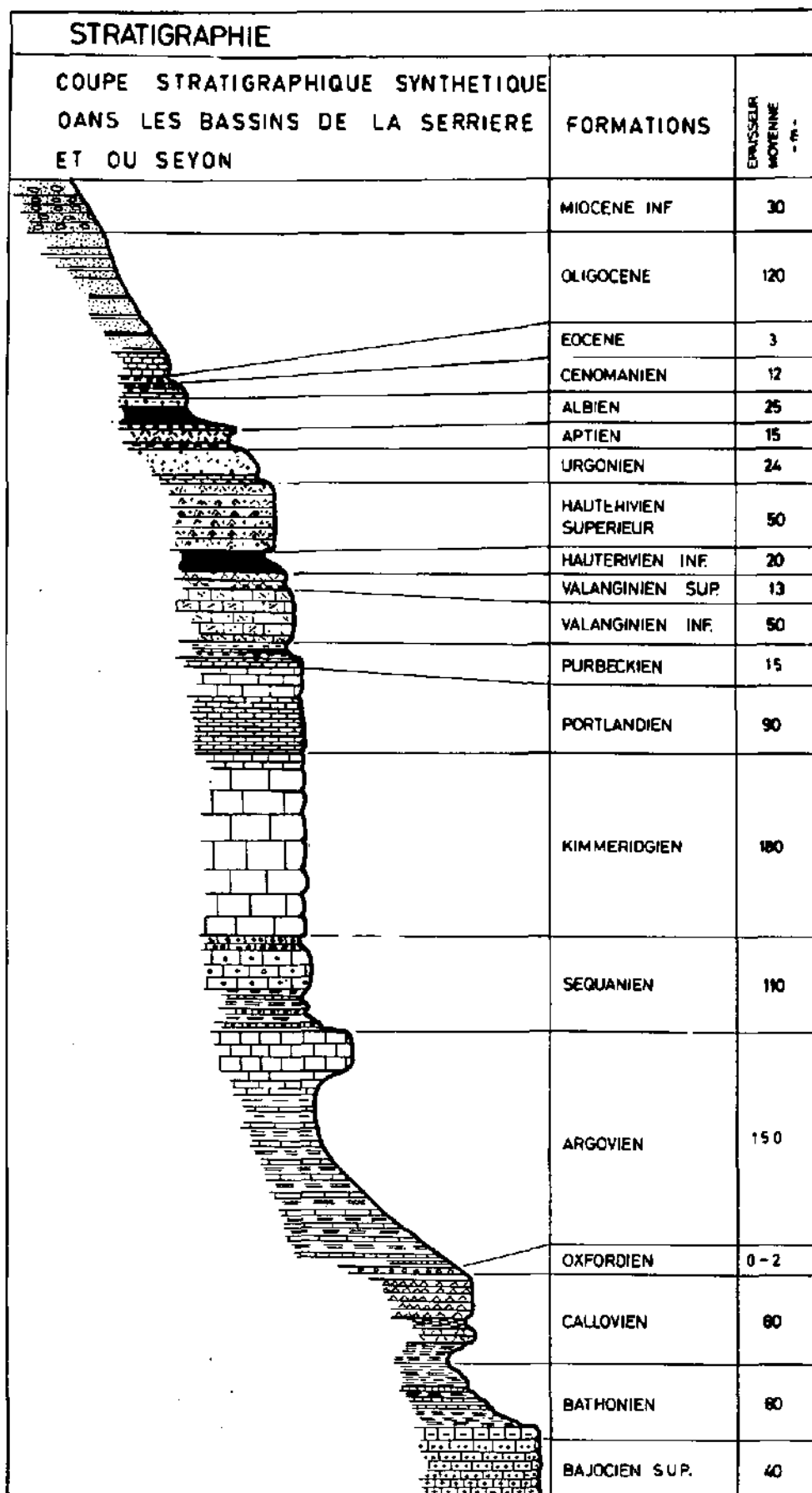


Figure II - 2 Coupe stratigraphique des terrains des bassins de la Serrière et du Seyon

3. Dolomites des formations d'origine supratidales et lagunaires (Portlandien, Pürbeckien), où elles forment jusqu'à 30 % de la roche. Leur lessivage enrichira les eaux karstiques en Mg.

- Le quartz.

Dans toutes les formations jurassiennes, à l'exception du Kimméridgien supérieur, du Portlandien et du Pürbeckien, où il est surtout néoformé, le quartz est de nature détritique (PERSOZ et KUBLER dans KIRALY, 1973). On observe les teneurs les plus élevées dans les formations de bassin (Argovien, Hauterivien inférieur) où sa mise en solution est plus lente.

- Minéraux des argiles.

Les phyllites sont en général d'origine détritique. Si les teneurs relatives de chacun des minéraux des argiles ne sont pas encore parfaitement corrélées et expliquées dans le cadre de leur milieu de dépôt, on retiendra que les formations jurassiques sont très riches en illite. Celle-ci diminue dès le Portlandien au profit de la montmorillonite qui aura une concentration maximum au Crétacé (PERSOZ et KUBLER, 1968).

- Le fer.

Callovien, Argovien et Valanginien supérieur sont les formations les plus riches en fer. Les phénomènes d'équilibre de cet élément dans les eaux karstiques sont encore mal connus.

- Sodium - potassium.

Les eaux karstiques du Jura sont relativement pauvres en éléments alcalins. Comme le fer, ces éléments sont essentiellement liés à la phase silicatée, donc plus abondants dans les niveaux marneux et argileux.

Tableau II-III

Composition minéralogique et chimique moyenne des roches du Jura neuchâtelois méridional. (D'après PERSOZ et KUBLER dans KIRALY 1973)

Formation	Rés. insoluble	Quartz %	Dolomite %	Calcite %	FeO (g/t)	Na ₂ O (g/t)	K ₂ O (g/t)
Urgonien	4,5	1,9	-		1270	76	299
Hauterivien sup.	11,4	7,8	-		4166	84	579
Hauterivien inf.	30,6	13,0	4,0		5321	355	1626
Valanginien sup.	27,3	9,0	11,7		<u>10093</u>	294	1166
Valanginien inf.	6,7	3,4	1,2		2233	140	496
Pürbeckien	11,5	3,5	23,9		2535	229	503
Portlandien	3,1	1,1	<u>32,9</u>		819	306	417
Kimméridgien	1,2	tr.	4,7		253	154	182
Séquanien	3,5	1,6	tr.		2114	314	342
Argovien	<u>37,8</u>	<u>14,6</u>	2,8		6349	395	<u>1060</u>
Callovien	6,5	2,8	3,4		8646	337	577
Bathonien	14,0	5,3	4,0		5567	<u>482</u>	1493

6. GEOLOGIE STRUCTURALE

6.1. Esquisse tectonique.

Les principaux éléments structuraux intéressant le bassin du Sayon et de la Serrière sont représentés à la figure II-3. On consultera également la notice explicative de la carte géologique du Val de Ruz (SUTER et LUTHI 1969).

6.2. L'anticlinal de Chaumont.

Entre la montagne de Boudry et les gorges du Sayon, la première chaîne subit un abaissement axial de près de 600 mètres. Depuis la cluse du Sayon jusqu'à Chaumont l'axe du pli s'élève à nouveau de 500 mètres en même temps qu'il s'infléchit vers le Nord. Pour SCHAER (1956) les décrochements sénestres de Fontaine André et du Grand Chaumont traversent tout l'anticlinal, mais sont plus marqués sur le versant Sud. Entre Sous le Mont et Clémessin, l'anticlinal chevauche le synclinal tertiaire du Val de Ruz.

6.3. Le synclinal du Val de Ruz.

Prolongement des synclinaux du Val de Trévers et de Rochefort, il a une forme de losange. Il s'ouvre à Montmollin, il a 4,5 km de large entre Fontainemelon et Vilars et se pince à la hauteur de Clémessin, où le plan de chevauchement fait disparaître son flanc SE. Il disparaît là où l'anticlinal des Planches rejoint celui de Chasseral.

6.4. Anticlinal des Planches - Synclinal du Côté

Palais entre les deux premières chaînes anticlinales jurassiennes, l'anticlinal des Planches prend naissance à la montagne de Cernier, il se termine dans la région de Chasseral et disparaît en même temps que le synclinal du Val de Ruz. Le synclinal du Côté sépare l'anticlinal des Planches de l'anticlinal Mont d'Amin - Joux-du-Plâne. Décalé de 400 mètres vers le Nord à l'Est du décrochement des Bugnons, il se pince et disparaît le long du plan de chevauchement qui suit le versant NW de Chasseral.

6.5. Anticlinal de Mont Racine - Tête de Ren - Mont d'Amin.

Bien connu depuis les travaux de SUTER (1920, 1937) il est traversé par deux accidents tectoniques importants : les décrochements de la Tourne et l'extrémité S du décrochement de la Ferrière. Plusieurs plis-feuilles qui se relaient dans le cœur de l'anticlinal provoquent la disparition partielle du jurassique moyen sur son versant NW (SCHARDT 1901, 1903). Entre la Tourne et Tête de Ren l'anticlinal est orienté N35. De Tête de Ren à la Vue des Alpes, soit dans la zone terminale du décrochement de la Ferrière, il prend une direction axiale N65 - N70. Si ce changement d'orientation s'effectue sans accident tectonique majeur dans la couverture de Melm, "plus souple", la direction axiale du noyau anticlinal du Dogger est réalisée par une succession d'accidents transversaux, chaque compartiment contribuant à la modification de l'axe de la chaîne.

Relevons 4 culminations axiales (Grande Segneule, Combe des Aulx, Gurnigel, Joux-du-Plâne) dont deux mettent à jour l'Aalénien. A partir du Bec à l'Oiseau l'anticlinal se dédouble pour donner naissance au synclinal de l'Echelette - montagne de l'Envers.

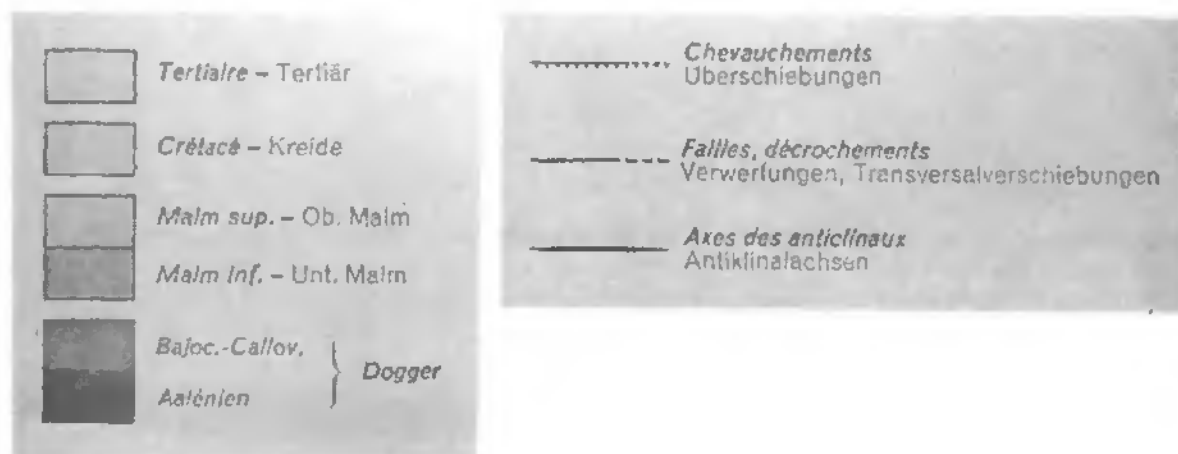
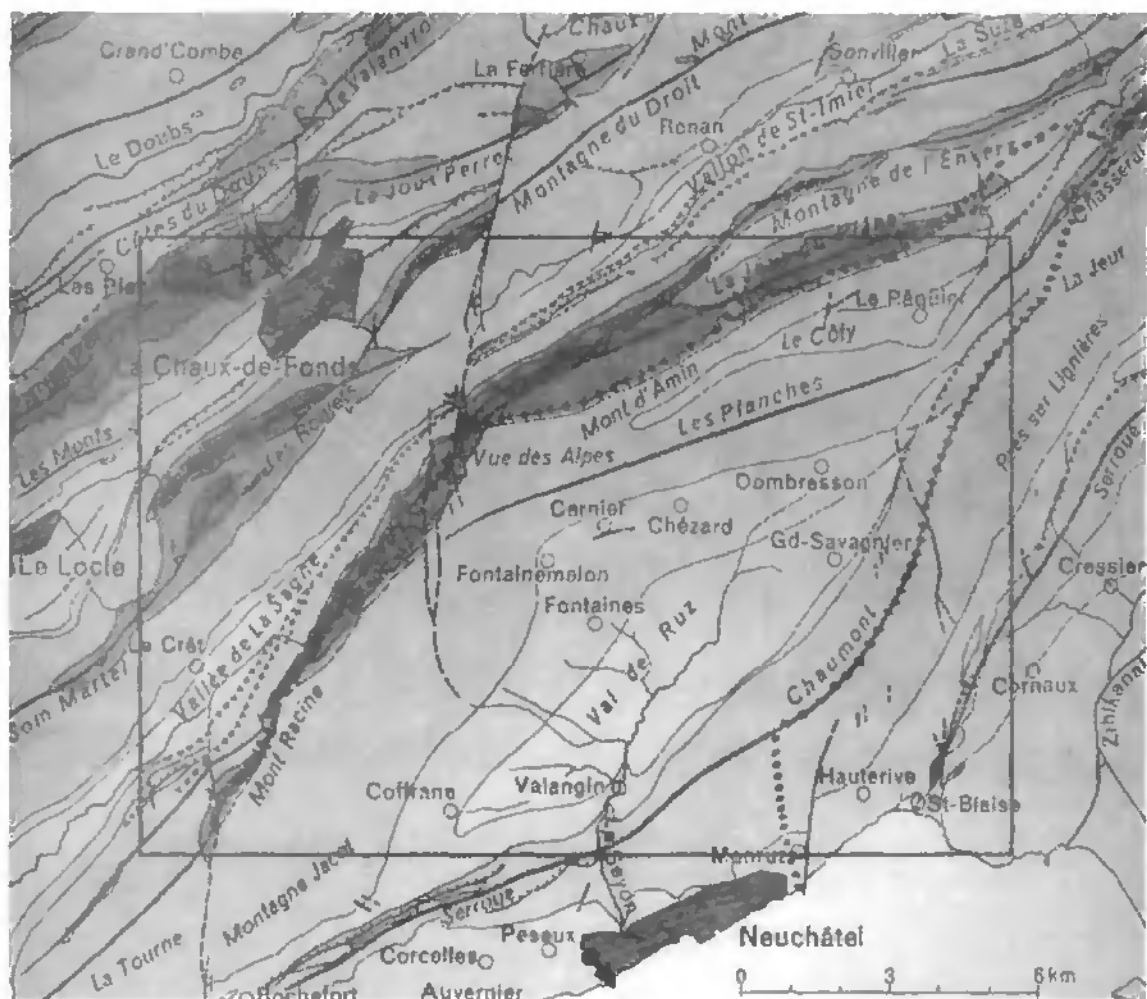
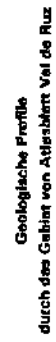


Figure II-4/1 : Coupes géologiques à travers la zone des bassins de la Serrière et du Seyon (tiré de légende de la carte géologique du Val de Ruz de H. SUTER et E. LUTHI, 1969.).



17

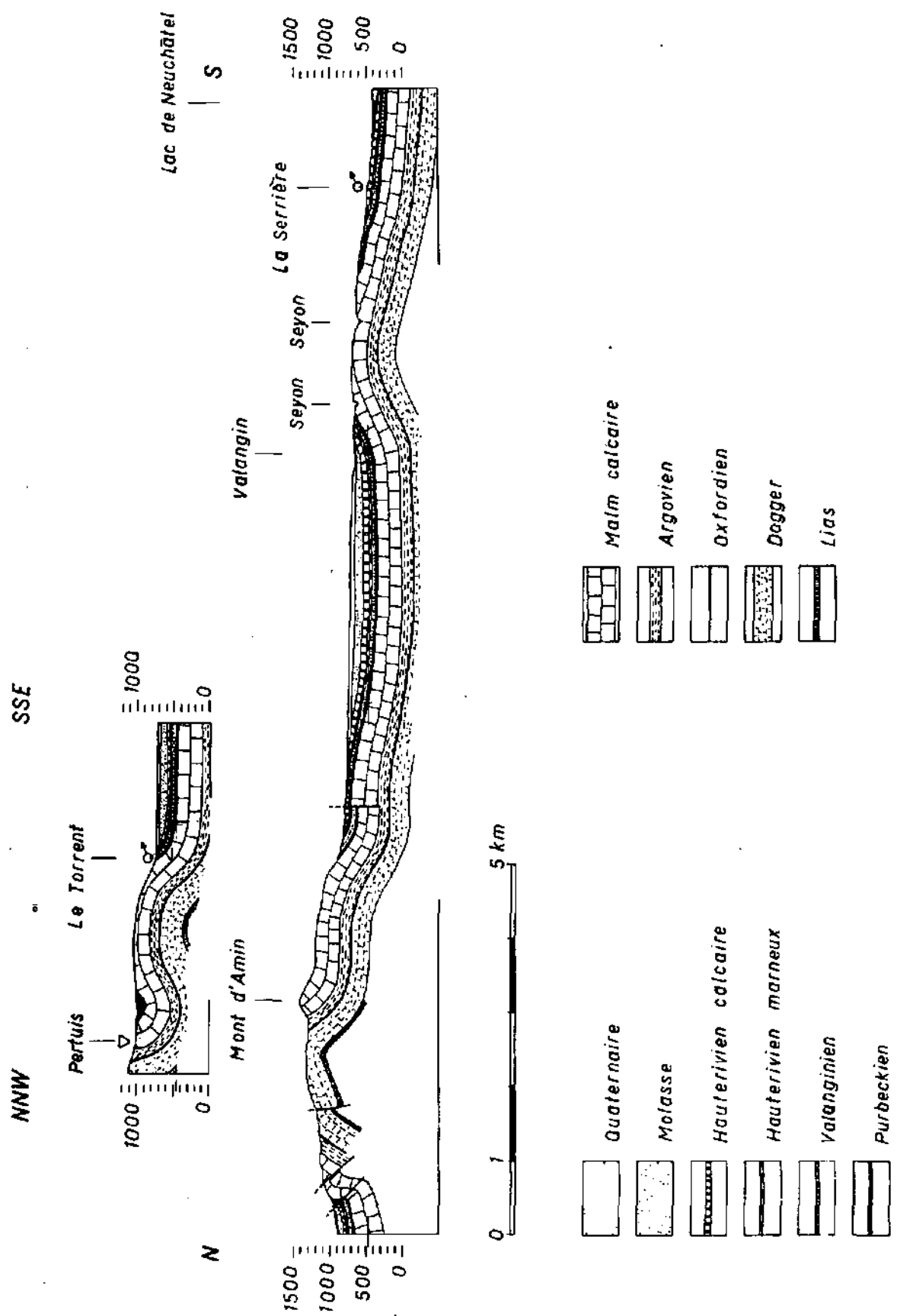
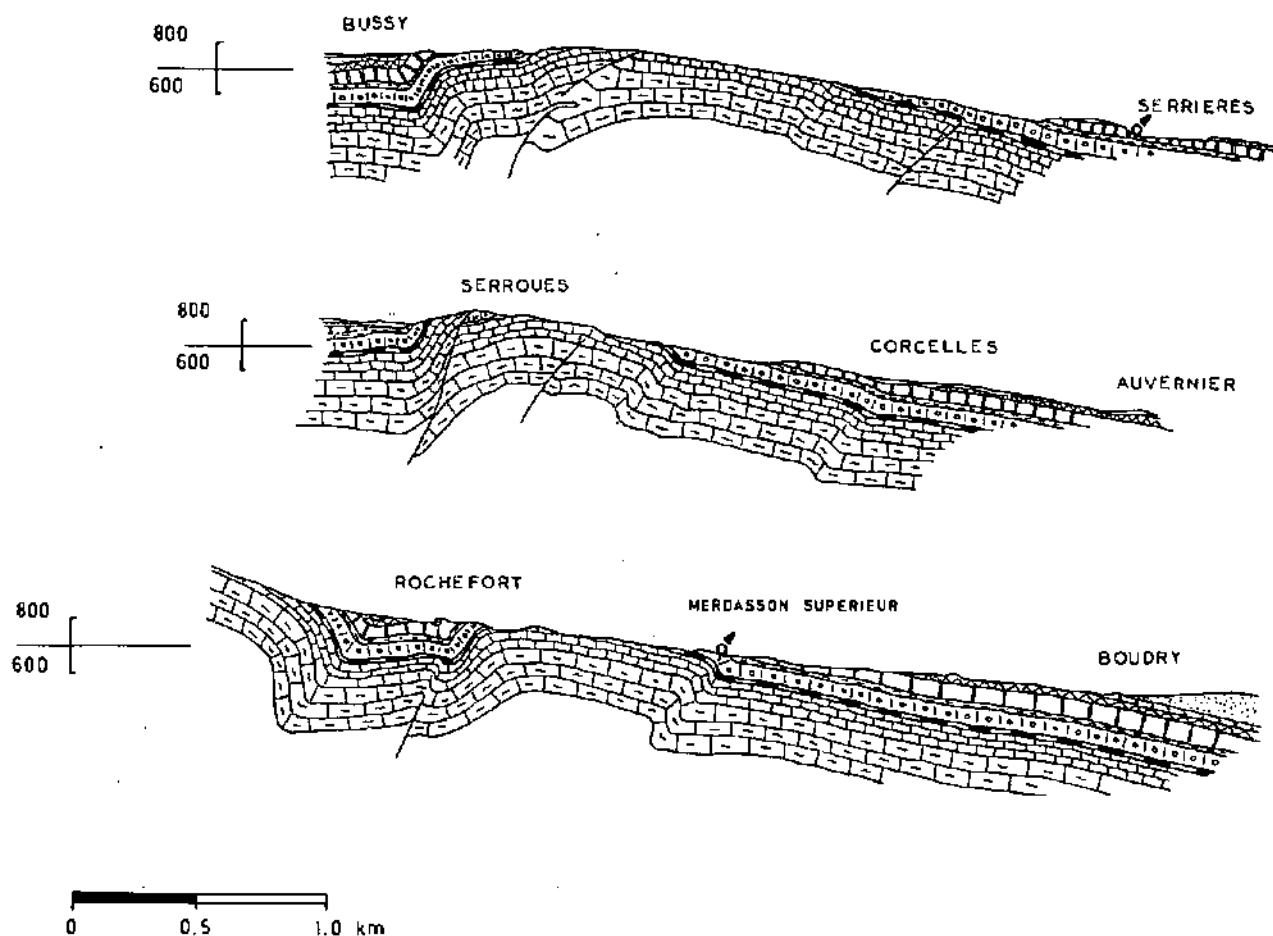


Figure II - 4/2 Coupes géologiques a travers des bassins de la Serrière et du Seyon. D'après MATHÉY et SIMBONI (1972)

NNW

SSE



- | | |
|--|-----------------------|
| | QUATERNAIRE |
| | TERTIAIRE |
| | CRETACE SUPERIEUR |
| | URGONIEN |
| | HAUTERIVIEN SUPERIEUR |
| | HAUTERIVIEN INFERIEUR |
| | VALANGINIEN |
| | PURBECKIEN |
| | PORTLANDIEN |
| | KIMMERIDGIEN |

Figure II - 5 3 Coupes géologiques dans l'anticlinal de la première chaîne anticlinale entre Valangin et Rochefort après FREI (1925)

Tableau II-1

Récapitulation des principales études géologiques dans les bassins
de la Serrière et du Seyon.

Auteurs	Année	Région étudiée	Sommaire
VON BUCH, L.	1803	Anticlinal de Chaumont	Coupees géologiques
GRESSLY, A.	1874	Gorges du Seyon	Stratigraphie du Malm
ROLLIER	1893	La Bocarderie	Présence de molasse aquitanienne
BAUMBERGER, E. MOULIN, H.	1898	Valangin	Stratigraphie du Néocomien
SCHARDT, H.	1901	La Vue des Alpes	Description d'un pli faillé
SCHARDT, H.	1903	Combe des Cugnets	Découverte d'un pli faillé et description du Lias
SCHARDT, H.	1903	Serroue - Montérillon	Découverte d'un pli faillé
BAUMBERGER, E.	1905	Valangin - Hauterive	Paléontologie de l'Hauterivien
SCHARDT, H.	1910	Valangin	Stratigraphie du Valanginien
SCHARDT, H.	1906	Neuchâtel - Vauseyon	Stratigraphie du Néocomien
MOULIN, H.	1919	Val de Ruz	Présence d'Aquitaniens supérieurs
SUTER, H.	1920	Les Convers - La Vue des Alpes	Monographie géologique
FREI, E.	1925	Neuchâtel - Boudry	Monographie géologique
SUTER, H.	1937	La Tourne - Tête de Ren	Tectonique de la chaîne
ROESSINGER	1940	Mont d'Amin	Stratigraphie du Lias
LUTHI, E.	1954	Chessex - St Imier	Lever géologique et coupes
BAER, A.	1956	Anticlinal de Chaumont	Stratigraphie du Malm
ZIEGLER, P.A.	1956	Mont d'Amin - Chessex	Stratigraphie et lithologie du Séquanien
SCHAEER, J.P.	1956	Anticlinal de Chaumont	Etude tectonique
BAER, A.	1959	Tête de Ren	Etude du décrochement de la Ferrière
STAUBLE, A.J.	1959	Tête de Ren - Mt d'Amin	Stratigraphie du Collavien
SCHWAAB, D.	1961	Roche fort - la Tourne	Etude du décrochement de la Tourne
KIRALY, L.	1964	Flanc Sud de la 1ère chaîne	Hauterivien supérieur : stratification entrecroisée
HAEFELI, Ch. et cons.	1965	Valangin - Hauterive	Stratigraphie du Néocomien
KIRALY, L. MEIA, J.	1967	Fenin	Tectonique de l'anticlinal de Chaumont
MORNOU, L.	1970	Dombresson - Chérad	Recherches d'eau par forages, inédit
MEIA, J. et cons.	1971	Colombier - Serrière	Lithologie des formations quaternaires, inédit
JAMIER, D. MATHEY, B.	1977	La Tourne - Tête de Ren	Tectonique et morphologie

Tableau II-II

RESUME LITHOSTRATIGRAPHIQUE

Étage	Facies	Lithologie	Épaisseur [m]	Localité - Auteur - Date
AQUITANIEN STAMPIEN ?	Molasse d'eau douce inférieure	Marnes et argiles bigarrées avec bancs gréseux	0-120 m	La Barcarderie (ROLLIER 1893) Syncl. de Rochefort (SCHARDT et DUBOIS 1905) Lit du Sayon (MOULIN 1919) Valangin, le Ballest (FREI 1925) Le Péquier (POLDINI 1960) Les Prés Royer (MORNOU 1970, AUBERT 1975)
CHATTIEN	Sidérolithique ramené	Grès à ciment argileux noir avec lentilles de calcaire	3,1 m	Les Prés Royer (AUBERT 1975)
EOCENE	Sidérolithique	Nodules phosphatés et fossiles raménés	1-2 m	Mauterive (SCHARDT 1907)
		Grès brunâtre à pisolites, feuilletés et lentilles de bolus	1,1 m	Les Loges (SUTER 1920) Les Prés Royer (MORNOU 1970, AUBERT 1975)
CENOMANIEN		Craie		Le Ballest (FREI 1925)
ALBIEN	Sables verts	Marnes et sables gréseux verts en contact tectonique sur l'Urgonien dans les replis synclinaux Avec concrétions phosphato-silicatées		La Combe aux Epines (ROLLIER 1898) Le Coudre (SCHARDT 1901) Syncl. de Rochefort (SCHARDT et DUBOIS 1905) Le Ballest (FREI 1925)
APTIEN		Non décrit		
BARREMIEN	Urgonien blanc	1. Supérieur Calcaires blancs cochlithiques parfaits imprégnés d'asphalte 2. Inférieur	8-10 m 10-15 m	Auvergnier-Serrière (FREI 1925) Syncl. de Rochefort (FREI 1925)
	Urgonien jeune	Calcaires spathiques glauconieux jaunes bruns		Serrière (FREI 1925) Les Prés Royer ? (AUBERT 1975)
	Marnes de la Rousille	Intercalations de marnes et marno-calcaires dans 2.		Serrière (FREI 1925)
HAUTERIVIEN	Pierre jaune	1. Supérieur Calcaire spathique cochlithique brun - jeune glauconieux biodétritique. A la base marno-calcaires en bancs de 5 à 20 cm	50-60 m	Vausseyon (SCHARDT 1906) l'Ecluse (FREI 1925) Littoral (KIRALY 1964) Mauterive - le Coudre (HAEFELI et cons. 1965)

Tableau II-II (suite)

Etage	Facies	Lithologie	Epaisseur [m]	Localité - Auteur - Date
HAUTERIVIEN		2. Inférieur Marnes gris-bleu ou jaunes fossilifères avec intercalations marno-calcaires dans le haut	25 m	Valengin (BAUMBERGER 1905) Vauveyon (SCHARDT 1906) Cormondrèche (FREI 1925) Valengin (HAEFELI et cons. 1965)
VALANGINIEN	Calcaires roux	1. Supérieur Calcaire brun roux limonitique avec quelques intercalations marnueuses. Marnes à Astérie au sommet	10-15 m	Valengin (BAUMBERGER et MOULIN 1898) Vauveyon (SCHARDT 1906) Valengin (SCHARDT 1910) Valengin (HAEFELI et cons. 1965)
	Marnes d'Azé	Marnes et calcaires marneux oolithiques d'épaisseur très variable souvent éboulés	0-0,3 m	Chambrelion (BAUMBERGER 1905) Montezillon (FREI 1925)
	Membre bétard	2. Inférieur Calcaire dur blanc ou légèrement jaune finement oolithique. A la base une zone marno-calcaire	35-45 m	
PURBECKIEN		Couches saumâtres supérieures : marnes Couches lacustres : marno-calcaires noirs. A la base marnes à gypse et bancs calcaires.	10-15 m	Gorges du Sayon - Le Chenat (DE LORIOU et JACCARD 1865) Valengin (MAILLARD 1884) Les Convers (SUTER 1920)
PORTLANDIEN	Calcaires dolomitiques	3 formations lithologiques dont la position stratigraphique n'est pas parfaitement définie : (BAER 1956) Calcaires dolomitiques finement saccharoïdes	80-90 m	Gorges du Sayon (GRESSLY 1874) Gorges du Sayon (FREI 1925) Chaumont (BAER 1956) Le Tourne (SCHWAAR 1961)
	Calcaires plaquetés	Calcaires clairs, jaunes ouivoires, finement plaquetés		
	Calcaires fimbriés	Calcaires à grain très fin avec taches, jaunes bruns		
KIMMERIDGIEN		Calcaires massifs, clairs, en bancs épais avec de très rares intercalations marnueuses. Limite inférieure définie par le toit de l'oolithe de St Vérand	150-180 m	Gorges du Sayon (VON BUCH 1803) Tunnel de la Luche (FREI 1925) Tête de Ren (SUTER 1920, 1937) Le Tourne (SCHWAAR 1961)
SEQUANIEN		1. Supérieur Calcaires durs, massifs 2. Inférieur a) Alternance de calcaires et marno-calcaires. Au sommet oolithe nuciforme. b) Calcaires jaunes apathiques coralligènes. A la base intercalation de marnes	110-120 m	Les Pontins (LUTHI 1954) Mt d'Amin - Chasseral (ZIEGLER 1956) Le Tourne - Grande Courbe (SCHWAAR 1961)

Tableau II-II (suite)

Etage	Facies	Lithologie	Epaisseur [m]	Localité - Auteur - Date
ARGOVIEN	Effingerschichten	Marnes et calcaires marneux gris bleu sou- vent feuilletés, plus marqués à la base	130 m	Combe des Auges (SUTER 1920) Combe Grède (LUTHI 1954)
SPONGITIEN	Birmensdorf- schichten	Calcaires gris en bancs altérant avec des marnes	10-20 m	
OXFORDIEN		Calcaires marneux et marnes limonitiques fossillifères. Lacune au SW	~ 0,30 m	Chasseraud - Combe Grède (LUTHI 1954) Mt d'Amin - Chasseraud (STAUBLE 1959)
CALLOVIEN	Dalle nacrée	Calcaires plaqués oolithiques et zo- gènes bruns	40-50 m	Combe des Eugnats (SCHARDT 1903) Vue des Alpes (SUTER 1920)
	Calcaires rouges sablés	Alternance de calcaires jeunes et de marnes feuilletées grises ou jaunes	14-18 m	Chasseraud (LUTHI 1954) Mt d'Amin - Chasseraud (STAUBLE 1959)
	Marnes du Fucil	Marnes	3-8 m	
BATHONIEN	Obere Haupt- rogenstein	Calcaires en gros bancs jaunâtres ou gris finement oolithiques	20-25 m	Combe des Eugnats (SCHARDT 1903) La Chaux d'Amin - Est Meuron (SUTER 1920)
	Marnes blanches	Marnes jeunes très sa- blées et calcaires marneux	10-15 m	
	Couches à Ostrea Acuminata	Calcaires marneux oolithiques brun rouge	15-18 m	
BAJOCEIEN	Untere Haupt- rogenstein	Calcaire blanc ou gris finement spathique avec intercalation de marno-calcaire	25-40 m	Combe des Eugnats (SCHARDT 1903) Montperreux (SUTER 1920) La Gauthierine (SUTER et LUTHI 1954)
	Calcaires à entrouses	Messif calcaire à en- treuses alternant avec des calcaires oolithi- ques et des marno-cal- caires gris	70-100 m	
AALENIEN	Opalinuston	Calcaires gris à grain fin avec marnes sablées	40 m	Combe des Eugnats (SCHARDT 1903) Montperreux (SUTER 1920)
		Calcaires marneux gris sablés	20 m	La Gauthierine (ROESSINGER 1940)
TOARCIEN		Marnes grises et noires Calcaires marneux		Tunnel des Loges (DESOR et GRESSLY 1859) Combe des Eugnats (SCHARDT 1903) La Gauthierine (ROESSINGER 1940)

CHAPITRE III

GÉOLOGIE DES TERRAINS QUATERNAIRES

La science n'est qu'approximation successive. Les certitudes définitives ne sont que l'expression de l'ignorance.

Henri Leborit : L'homme imaginant.

1. LE RISS

C'est le plus ancien des terrains glaciaires décrit dans la région. SUTER (1920) qui admet que le glacier risien aurait atteint une altitude de 1400 mètres décrit à proximité de la gare des Convers une moraine essentiellement formée de matériel jurassien qu'il attribue au Riss à partir de données lithologiques seulement. Cette attribution, non étayée par des recherches chronostratigraphiques (pôlynologie, malécologie) reste hypothétique.

Les dépôts les plus proches des bassins de la Serrière et du Seyon dont l'âge risien est certain ont été décrits aux tuileries d'Yverdon par JAYET et PORTMANN (1966) et on ne connaît pour l'instant au Val de Ruz, aucune formation attribuée avec certitude au Riss ou à l'interglaciaire Riss-Würm.

2. LE WÜRM

2.1. Facies et lithologie du Val de Ruz.

Les dépôts glaciaires würmiens recouvrent entièrement le fond du Val de Ruz et partiellement l'auréole crétacée du synclinal, oblitèrent presque totalement la molasse. Deux grands facies sont ici dominants : Une moraine argileuse, dite moraine de fond et, la recouvrent par endroit des moraines caillouteuses de retrait. Au NE d'une ligne Fanin - Les Geneveys-sur-Coffrane la moraine argileuse constitue l'essentiel des dépôts glaciaires effleurants.

Les moraines caillouteuses de retrait, attribuées souvent à tort (FREI 1943) à du fluvioglaciaire occupent la SW du synclinal. Elles reposent sur la moraine de fond (Crêt de Paulière), sur la molasse (Gravière de Champ Fleury) voire directement sur le Crétacé (Serroux).

Il s'agit de moraines caillouteuses de type chaotique ou pseudo-fluviatile comme en a décrit JAYET (1966) dans le bassin genevois. Leur matériel, essentiellement jurassien, est très hétérogène. Des blocs calcaires encore anguleux donnent l'impression de ne pas avoir été enfouis très profondément dans la masse glaciaire. Dans la gravière de Rives la moraine caillouteuse contient des "paquets" de moraine de fond pouvant dépasser le mètre cube arraché au socle et pris dans la masse sablo-graveleuse.

Sur le versant sud du Mont Racine les moraines latérales s'élèvent jusqu'à 1150 mètres, où le glacier a abandonné de nombreux blocs erratiques (La Chenille, Les Prés Devant, Le Louversin). Leur matrice est suffisamment grossière pour absorber la totalité des eaux météoriques qui se déchargent ensuite dans les calcaires du Malm.

Un inventaire pétrographique effectué sur les moraines caillouteuses du Val de Ruz par PORTMANN (1955) montre que près de 70 % des galets (20-100 mm) sont d'origine jurassienne, 20 % sont alpins et 10 % molassiques. Les proportions sont respectivement de 55 %, 25 % et 20 % pour les granules (3-6 mm).

Le fluvioglaciaire est représenté par des chenaux de cailloutis et de sables bien stratifiés (gravières de Rives, de Champ Fleury) de 0,5 à 3 mètres d'épaisseur situés au pied de vallum morainiques. Ils sont à mettre en relation avec les torrents glaciaires qui, du Louvrain et des Crotêts s'éouachaient entre Coffrane et Montmollin au retrait würmien. L'émissaire principal rejoignait ensuite la dépression du Bas de Ruz, maintenant vallée sèche. Sont également fluvioglaciaires les dépôts vervés retrouvés par forage sur le tracé de la route Valangin - Boudevilliers (MEIA comm. orale).

La nature géologique des lentilles graveleuses forme l'aquifère artésien des Prés Royer n'est pour l'instant pas définie (fluvioglaciaire, moraine intraglaciaire, interglaciaire ?)

2.2. Littoral neuchâtelois.

Jusqu'à 1100 mètres d'altitude les flancs du Jura sont jonchés de roches erratiques et souvent recouverts de moraines renfermant des galets alpins et jurassiens, d'âge würmien. PORTMANN (1955) distingue 3 faciès : moraine de fond (argileuse), moraine superficielle et moraine lavée. Les moraines grossières occupent les régions élevées, celles situées en-dessous de 700 mètres ont une matrice plus fine.

Leur intérêt hydrogéologique réside dans les nappes peu étendues dont elles constituent le réservoir. Celles-ci donnent naissance à de petites sources (le Coudre, le Villaret), mais le plus souvent se déchargent souterrainement dans les calcaires sous-jacents. C'est le cas dans la région de Pierre à Bot où des forages géotechniques (coord. 559.750/205.700) ont mis en évidence une zone saturée entre 3 et 4 mètres de profondeur disparaissant au 5 à l'approche des calcaires portlandiens.

Entre Serrière et Auvonnier, la moraine se poursuit sous le lac où elle se présente comme un gravier à matrice sablo-argileuse très mal classé (MEIA et cons. 1971). Au large de Neuchâtel la moraine est recouverte par le delta du Sayon qui se prolonge jusqu'au pied du talus. A l'Est de Neuchâtel les formations deltaïques postglaciaires constituées par des ruis locaux formés sur le moraine, reposent soit sur l'Urgonien soit sur la moraine dans laquelle la fraction fine reste abondante.

Dans la baie de St Blaise des recherches géoélectriques (POLDINI 1965) ont fait apparaître plusieurs zones conductrices (100 à 150 ohms/m) que l'auteur interprète comme des graviers saisis par de la matière argileuse. Si l'un de ces noyaux graveleux constitue certainement le cône de déjection du Ruhaut, les autres, à la hauteur de Préfergier en particulier, doivent être rattachés à des formations morainiques. L'épaisseur des niveaux graveleux ne dépasse cependant pas 7 à 10 mètres, la teneur en éléments fins s'accroissant rapidement avec la profondeur.

3. Extension et distribution des formations glaciaires du Val de Ruz.

3.1. Dépôts glaciaires au Sud-Ouest de la Sorge.

La répartition et l'extension des terrains quaternaires est bien représentée par les cartes des résistivités électriques des terrains (AB = 40, 200 et 400 m) établie à la demande du département des Travaux publics de l'Etat de Neuchâtel par le laboratoire de géophysique de l'Université de Lausanne (POLDINI 1964).

Les graviers secs des moraines caillouteuses ont une résistivité de 1000 ohms/m qui passe à 200 ohms/m lorsqu'ils sont saturés, alors que les sédiments fins (moraine argileuse, argiles vervées fluvioglaciaires) ont une résistivité de 50 à 100 ohms/m. Celle de la molasse oligocène est de 30 ohms/m et celle du calcaire va de 100 ohms/m pour des formations comme l'Hauteriviien inférieur ou le Pürbeckien à plus de 1000 ohms/m pour les formations plus compactes (Valanginien, Portlandien). On peut résumer ainsi les conclusions de POLDINI (1964) :

- La carte des résistivités (fig. III-1) AB = 40 m fait ressortir de grosses masses de gravières secs (moraines caillouteuses du Crêt de Paulière, de Rive, de l'Engollieux) ainsi que le crétacé lorsqu'il est peu couvert (Serroue). Sur le plateau de Bussy, calcaires hauteriviens et gravières sont par endroits difficiles à séparer en raison de leur résistivité voisine.

- La carte des résistivités AB = 200 m (fig. III-2) permet déjà d'entrevoir une dépression dans la molasse dont le point le plus bas est situé à 400 m au SE de Coffrane mais dont l'épaisse couverture quaternaire masque encore la forme. Entre Montmollin et les Geneveys sur Coffrane, au SE de la voie CFF, le substratum crétacé (calcaires résistants, marnes conductrices) se distingue nettement.

- La carte des résistivités AB = 400 m (profondeur d'investigation : 150 m, non représentée) permet de dessiner une carte du substratum molassique. D'une façon générale le toit de la molasse s'abaisse vers le SE pour se relever brusquement au contact des calcaires crétacés. Cette auge molassique remplie de sédiments que POLDINI qualifie de gravières aquifères serait l'ancien thalweg d'un ruisseau qui prenait naissance dans la région de l'Engollieux.

Un forage de reconnaissance effectué là où la Vaubelay rejoint la combe de Bussy a rencontré les calcaires hauteriviens à -11,50 m. Dans cette région la limite SE de la molasse doit donc être déplacée vers le Nord de 150 à 200 mètres.

Trois coupes géologiques représentant 3 interprétations structurelles possibles sont données à la figure III-3. Dans le cas où le sillon puis le remontée de la molasse dans la région de Serroue sont confirmés, on peut s'attendre à trouver un aquifère important mais profond au Sud de Coffrane.

En direction du NE le tensor en éléments fins des moraines augmente et la barre imperméable constituée par la moraine de fond provoque l'apparition des sources de Bussy-Sargereux. L'absence de manifestations hydrologiques sur le plateau de Bussy confirme la présence de matériaux graveleux et sableux probablement peu épais reposant sur l'Hauterivien.

3.2. Dépôts glaciaires à l'Est de la Sarge.

A l'Est de la Sarge la moraine argileuse devient prépondérante. La région du Breuil et le plateau de Biolet décrits comme fluvioglaciaires sur la carte géologique de l'Atlas au 1/25'000 sont déjà constitués de moraines où les éléments fins dominent. La composition minéralogique de ces moraines en fonction de la profondeur a été étudiée par MONBARON (1973).

Tableau III-1

Composition minéralogique moyenne de la moraine argileuse à Valengin (d'après M. MONBARON 1973)

Profondeur	Quartz %	Calcite %	Dolomite %	Feldpaths %	Argiles %
0-4 m	31,1	28,4	-	2,8	37,7
5-9 m	26,3	38,2	2,3	5,2	28,0
10-14 m	27,2	33,7	4,8	5,8	28,5
15-19 m	27,6	33,4	5,3	5,2	28,5

L'augmentation du stock argileux, l'appauvrissement en calcite, la disparition de la dolomite et l'enrichissement relatif en quartz dans les premiers mètres révèlent l'altération de la moraine, sans qu'il y ait lessivage puisque la fraction argileuse n'est pas augmentée. Dans la partie non altérée le sédiment peut être considéré comme granulométriquement mal classé avec des fractions limoneuses et argileuses supérieures à 50 %, dont la composition minéralogique se rapproche fortement de celles des formations de l'Aquitainien du bassin molassique.

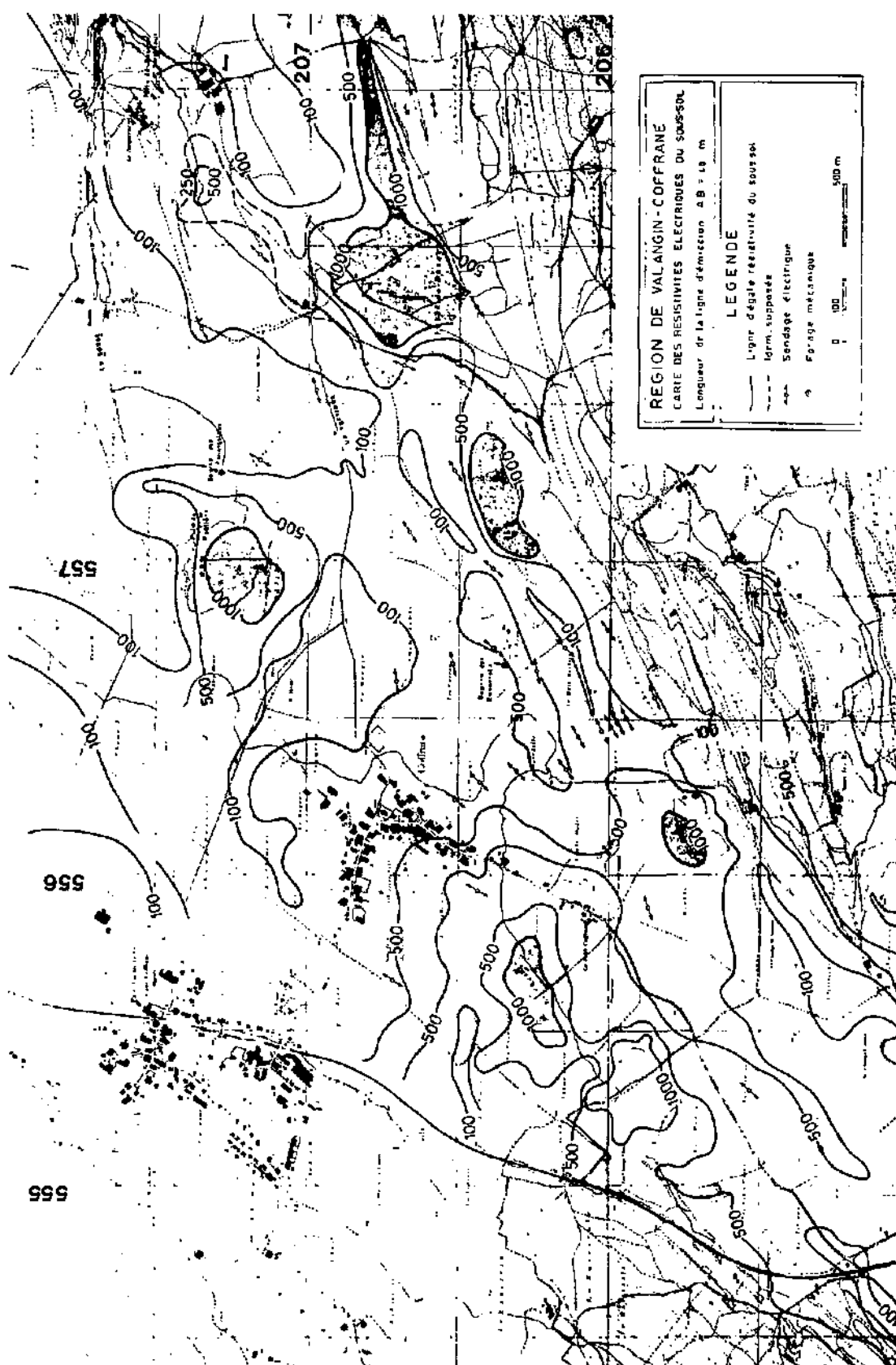


Figure III - 1 Valangin - Coffrane - Montmollin. Carte des résistivités électriques apparentes. AB = 40 m
 D'après POLDINI (1964). Maquette G. SIMEONI

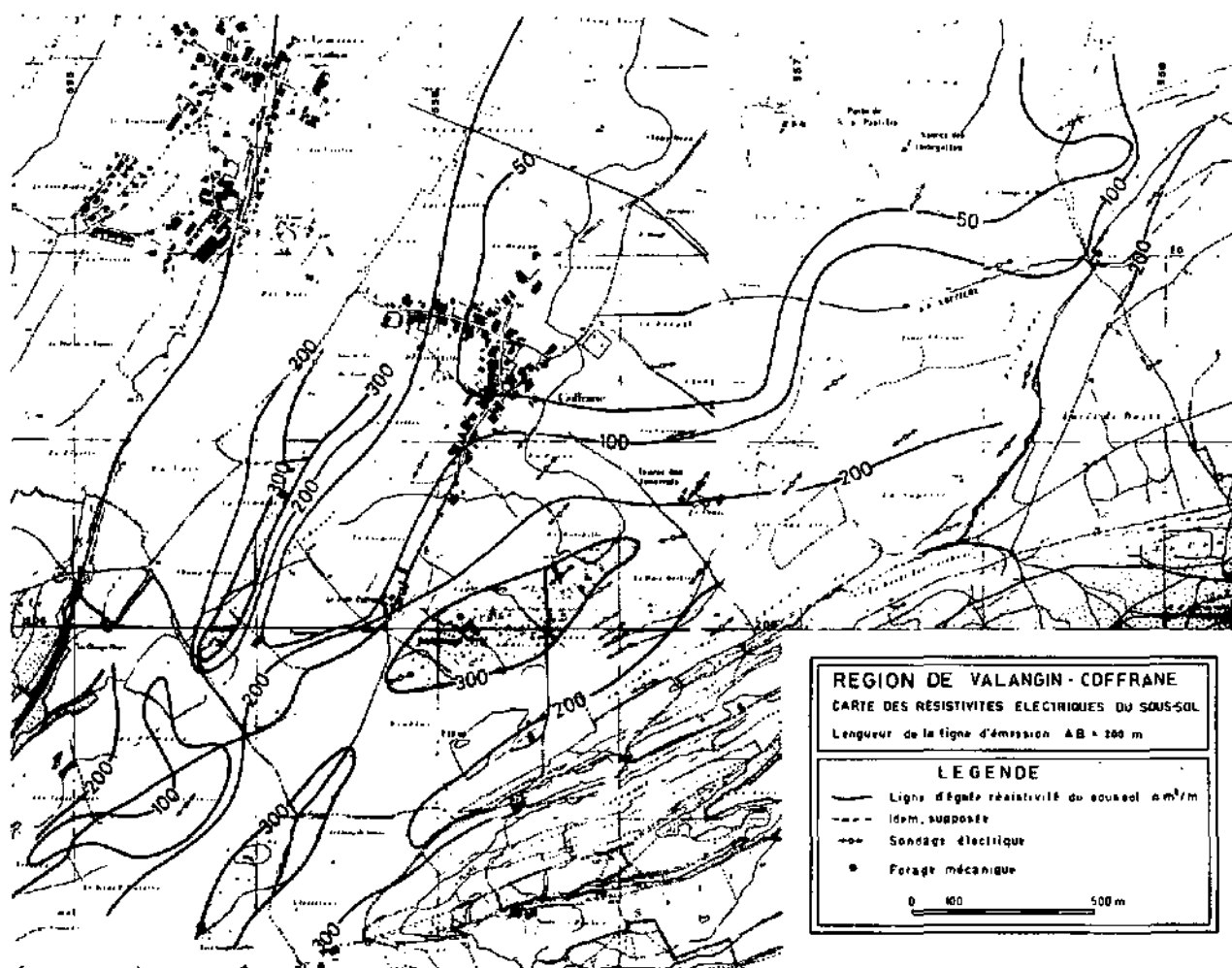


Figure III - 2 Valangin - Coffrane - Montmollin. Carte des résistivités électriques du terrain. AB = 200 m.
 D'après POLDINI (1964). Maquette G. SIMEONI

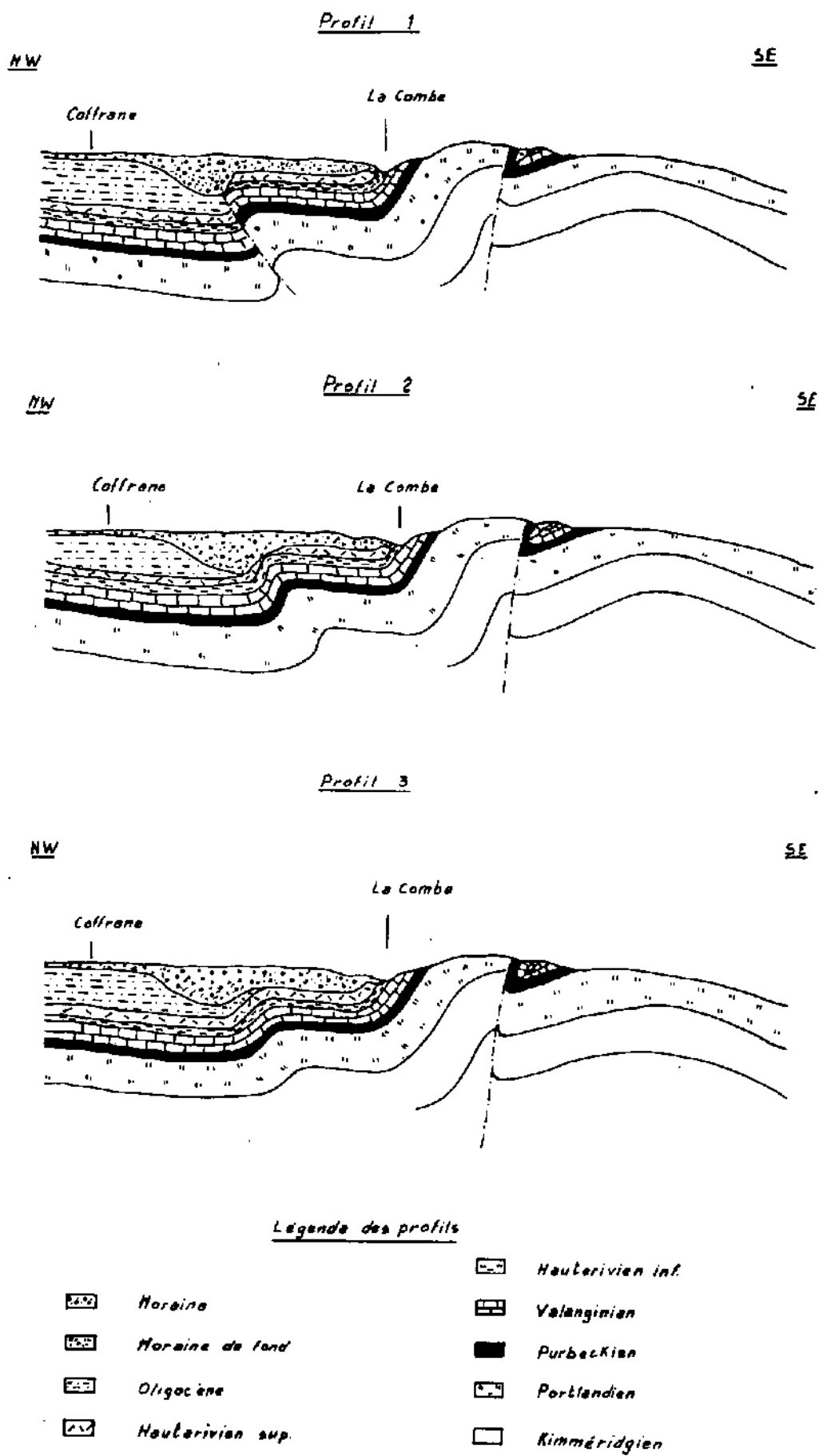


Figure III - 3 Coupes géologiques entre Coffrane et Serroue:
3 interprétations possibles.

Entre Fontaines et les Hauts Geneveys, la moraine repose sur les calcaires valanginiens, portlandiens et hauteriviens au NE. Quelques sources jaillissent de la moraine mais l'absence de cours d'eau permanent permet de supposer qu'une grande partie des eaux météoriques s'infiltrent dans les calcaires. Entre Saule et Savagnier, les pentes plus doux du flanc Nord de l'anticlinal de Chaumont a permis le maintien d'une couverture morainique continue jusqu'à une altitude de 1050 mètres. Vers l'Est les couches jurassiques se redressent et la moraine est recouverte par des éboulis (Sous le Mont).

3.3. Formations quaternaires dans la région des Prés Royer.

Dans un triangle compris entre St Martin, La Rincière et Dombresson la moraine est recouverte par les cônes de déjection imbriqués du Torrent et du Seyon. A Dombresson ces formations occupent encore une bande de 800 mètres de large qui se termine à Villiers. A l'Ouest de la source du Torrent, le Pürbeckien et le Crétacé sont recouverts par une moraine latérale caillouteuse. Des recherches géophysiques (TRIPIET 1967, MOPNOD 1970) ont révélé qu'au centre de la vallée l'épaisseur des formations quaternaires est assez régulière et de l'ordre de 40 et exceptionnellement 60 mètres. Plusieurs forages de reconnaissance ont confirmé ces valeurs, en mettant en évidence plusieurs lentilles graveleuses aquifères dans la moraine argileuse dont l'origine est pour l'instant mal définie.

La carte des résistivités apparentes AB = 40 m (profondeur d'investigation ~ 15 m) (TRIPIET 1967) concerne les formations graveleuses superficielles et représente bien la répartition du champ des transmissivités de l'aquifère phréatique. (Fig. III-4)

Le tableau III-II résume les principales caractéristiques lithologiques des dépôts quaternaires ainsi que leur perméabilité.

Tableau III-II

Lithologie - Géologie - Perméabilité
des formations quaternaires aux Prés Royer

Lithologie	Géologie	Epaisseur m	Perméabilité $K \text{ m s}^{-1}$	Transmissivité $T \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
Graviers sableux plus ou moins limoneux (aquifère phréatique), matériel jurassien surtout	Fluvio-glaciaire et alluvions du Seyon	3-13 m	$5 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-2} - 10^{-3}$
Sables et limons plus graveleux en se rapprochant du Torrent	Cônes de déjection du Torrent	5-15 m	-	-
Graviers sableux un peu limoneux	Moraine latérale	10-20 m	-	-
Argiles limoneuses très peu graveleuses, très peu caillouteuses, compactes	Moraine argileuse	20-40 m exceptionnellement 60 m	$10^{-8} - 3 \cdot 10^{-9}$	$10^{-7} - 5 \cdot 10^{-8}$
Graviers grossiers sableux jurassiens et rhodaniens en intercalation dans la moraine de fond argileuse (2 ou 3 niveaux)	Moraine intra-glaciaire ? Fluvio-glaciaire ?	1 à > 6 m	$5 \cdot 10^{-4}$ $- 10^{-4}$	$10^{-3} - 5 \cdot 10^{-4}$

3.4. Le synclinal du Côté.

Synclinal tertiaire, le vallon du Côté est recouvert par un plaquage morainique qui s'étale au Nord, jusqu'à une altitude de 950 à 980 mètres. Au Pâquier, plusieurs buttes morainiques, visibles de part et d'autre du ruz Chasseron marquent un stade de retrait représentant probablement le limite d'extension maximum du glacier würmien. Entre les deux, un petit plateau entaillé par le ruz Chasseron, sur lequel est construit le village. La carte des résistivités électriques (AB 40 m) établie par E. POUBINI (1960) interprétée à la lumière de quelques forages qui ont suivi (Fig. III-5) permet de distinguer :

- Au Nord Est du village des terrains résistants dessinant le détail de tout l'appareil morainique de retrait reposent sur les calcaires du Valenginien par endroit très peu profonds (noyau résistant au Nord-Ouest du village).
- Sous le village une zone conductrice délimite un complexe morainique plus argileux reposant au Nord-Ouest sur les marnes hauteriviennes et au Sud-Est sur 20 à 30 mètres de molasse (grès argileux dur, retrouvé par forage à 5 mètres de profondeur, coord. 565.610/216.360).
- Une bande résistante longeant le thalweg provoquée au Sud-Ouest par les calcaires hauteriviens surmontés de 6 à 10 mètres de graviers fluviatiles et sous le village par des graviers grossiers compacts reposent sur la moraine argileuse.
- Rive gauche, une bande conductrice délimite une moraine argileuse contenant quelques niveaux sableux. Les marnes d'Hauterive sous jacentes sont probablement à l'origine de la diminution de la résistivité vers le Sud-Ouest.

4. FORMATIONS TARDI ET POSTGLACIAIRES

4.1. Formations de piedmont.

Le long de la chaîne Mt Racine - Tête de Ran - Mt d'Amin une bande d'éboulis d'une centaine de mètres de large au pied de la falaise séquanienne masque généralement le contact Argovien - Séquanien. Les eaux météoriques qui s'infiltrant dans ces formations sont arrêtées par les marno-calcaires de l'Argovien où elles alimentent la circulation hypodermique très fréquente dans la zone d'altération de cette formation. Captées par drainage elles alimentent un bassin ou une ferme (Grande Racine, Les Neigeux, Combe Berthière, Combe Meuley).

Les bancs très redressés du Malm entre Clemesin et Savagnier (Sous le Mont) ont favorisé l'accumulation d'éboulis au pied du flanc NW de la côte de Chaumont. Ces derniers masquent très souvent le contact entre la moraine et les calcaires. Leur intérêt hydrogéologique sera envisagé plus loin.

4.2. Le delta du Seyon.

4.2.1. Situation.

Dans une étude sur la description du cours du Seyon à travers le territoire de la ville de Neuchâtel (JAUN 1946) l'auteur émet l'hypothèse qu'avant l'avance des glaciers quaternaires, le Seyon traversait le crêt hauterivien par une cluse située dans la région de Maillefer - Grise-Pierre pour se jeter dans le lac. Son cône de déjection aurait été emporté par le glacier würmien. Au moment du retrait il aurait déblayé la combe hauterivienne de ses atterrissements morainiques pour passer au travers de la semi-cluse de l'Ecluse préexistante. Cette hypothèse est en accord avec des observations récentes où durant la construction d'un immeuble à Maillefer on pouvait observer le contact entre les calcaires entaillés verticalement sur plusieurs mètres et la moraine. Elle mériterait cependant une vérification par

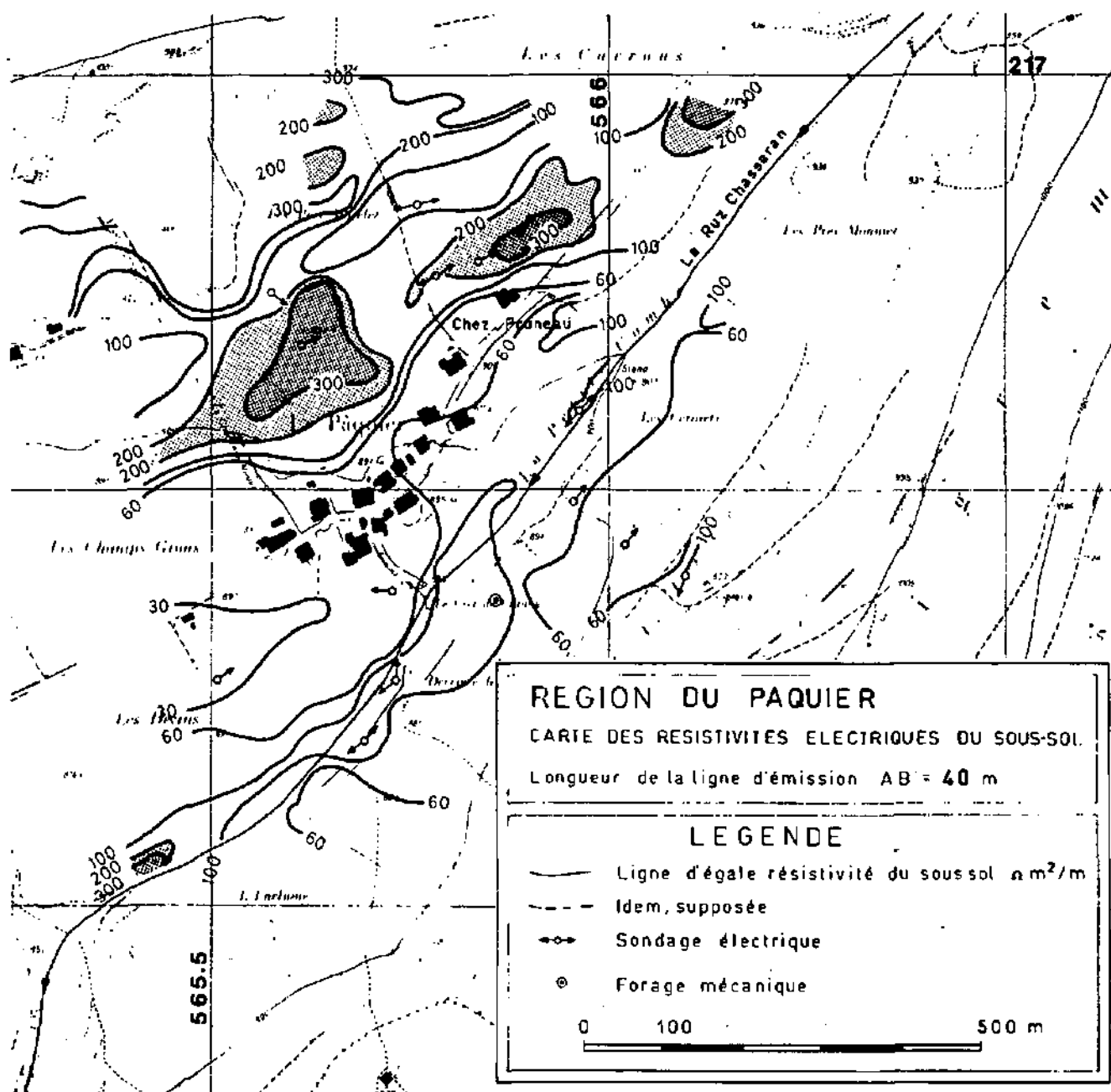


Figure III - 5 Le Pâquier. Carte des résistivités électriques apparente.
 AB = 40 m. D'après POLDINI (1960). Maquette G. SIMBONI

reconnaissance géophysique du substratum rocheux (sismique ou électricité).

Le delta postglaciaire du Seyon sur lequel est édifié la basse ville de Neuchâtel repose essentiellement sur le moraine. Il est déjeté vers l'Est en raison des vents dominante de direction Ouest-Est qui, par les vagues interposées ont repoussé les sédiments vers l'Est. Cette asymétrie a d'ailleurs déterminé le tracé des rues de la basse ville de Neuchâtel (Rue et Faubourg de l'Hôpital, Faubourg du Lac). Le rivage actuel est constitué par des remblais dont la limite avec les formations deltaïques est souvent difficile à distinguer.

A l'Est, dans la région de Pierre à Mazel les calcaires de l'Urgonien bordaient autrefois le lac. Avec les anciennes moraines sous lacustres, ils sont maintenant recouverts par des dépôts récents.

4.2.2. Lithologie.

Les alluvions du Seyon ainsi que la nappe du delta sont souvent mises à jour lors de fouille profonde sous la ville de Neuchâtel. Il s'agit d'une alternance de graviers grossiers et sableux dont la granulométrie décroît avec la profondeur. Des forages effectués à la rue St Maurice donnent la coupe générale suivante :

-5,60 à -11,00	Sable grossier avec gravier et galets
-11,00 à -15,00	Sable fin, limoneux et fluent
-15,00 à -16,80	Sable moyen à grossier avec graviers et pierres
-16,80 à -20,30	Sable fin avec gravier et quelques pierres

L'analyse granulométrique (Fig. III-6) confirme une élévation de la teneur en fins avec la profondeur, D_{10} passant de 0,4 à 0,1 mm, bien que les fractions grossières restent présentes.

Le tableau III-III donne les valeurs des coefficients de perméabilité pour ces terrains obtenus en appliquant les formules de Hazen et Slichter.

Tableau III-III

Delta du Seyon : estimation des coefficients de perméabilité K à partir des analyses granulométriques.

Profondeur	D_{10}	D_{60}/D_{10}	K_{HAZEN} m s ⁻¹	$K_{SLICHTER}$ m/s
-6,0 à -6,5	0,38	14,5	$2,7 \cdot 10^{-1}$	$5,6 \cdot 10^{-2}$
-9,5	0,14	3,4	$3,7 \cdot 10^{-2}$	$7,6 \cdot 10^{-3}$
-15,0 à -20,0	0,1	3,4	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$

* $K = 100 d_{10}^2 / a$ où $a = \text{const (52)}$

** $K = 0,2012 d_{10}^2 / m \cdot a$ m = viscosité (0,01)

5. COMPOSITION ET ALTERATION DES SOLS

Dans les régions non touchées par l'avance glaciaire le karst est généralement recouvert d'un sol épais de 5 à 30 cm parfois davantage, que l'on retrouve également dans les diaclases. Enrichi en fraction argileuse par décarbonatation, cette couverture favorise un retard à

DELTA DU SEYON COURBES GRANULOMETRIQUES

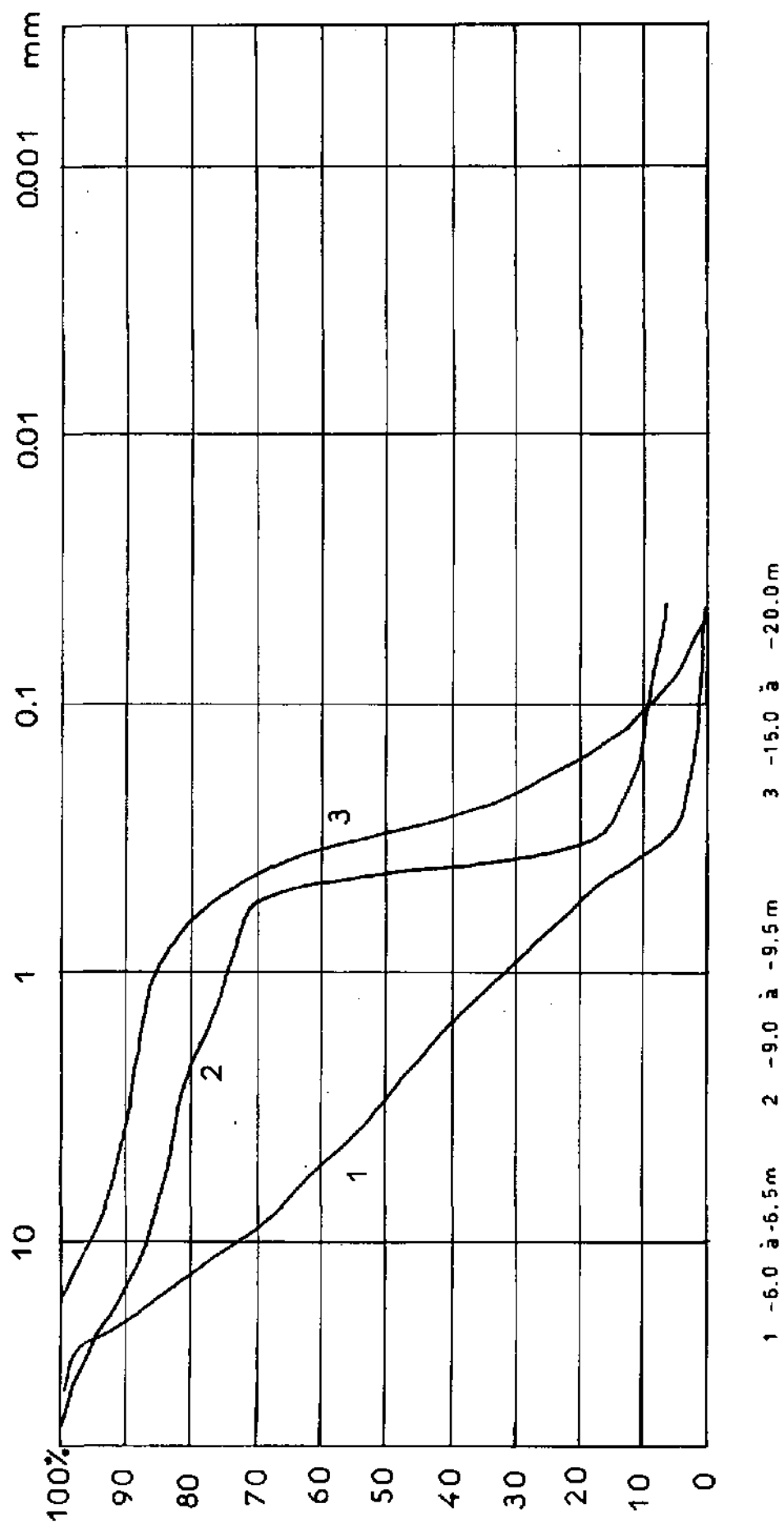


Figure III - 6 Delta du Seyon à Neuchâtel. Analyse granulométrique.
 1) -6.00m à -6.50 m. 2) -9.0 m à -9.50 m.
 3) -15,0 m à -17.0 m.

l'infiltration des eaux météoriques non négligeable. Dans une étude de la composition minéralogique du matériel de remplissage d'une diacalse près de la Vue des Alpes (bassin de la Serrière), POCHON (1973) montre que cette dernière diffère peu de celle des sols qui recouvrent la moraine argileuse à Valengin (MONBARDON, 1973, op. cit). L'analyse des fractions décarbonatées révèle une abondance de chlorite, de quartz et de feldspathes (plagioclases surtout) alors que ces minéraux sont presque inexistantes dans le substratum calcaire.

De très nombreuses autres analyses (POCHON 1974) conduisent cet auteur à envisager la formation de la plupart des sols jurassiens à partir d'un apport éolien issu de la fraction fine des moraines würmiennes de la bordure du Jura.

L'altération des calcaires va donc dépendre de la composition du sol de couverture. La phase aluminosilicatée est très facilement altérée, alors que le fer est piégé dans les structures gonflantes des argiles. Calcium, magnésium et potassium sont naturellement emportés par les eaux d'infiltration. Au niveau du sol, leur teneur en potassium est déjà très voisine de celle des résurgences. La corrosion du calcaire dépend alors étroitement de l'acidité du sol qui le recouvre. Notons encore que les calcaires dolomitiques sont plus facilement érodés ce qui provoque la formation de zones déprimées qui suivent les structures.

CHAPITRE IV

DELIMITATION DES BASSINS VERSANTS

La Science ne saurait admettre la moindre hypocrisie,
la moindre présomption. Ce qu'elle exige c'est assurément le contraire : l'honnêteté et la modestie.

Meo Taé-toung
Oeuvres choisies 1937

1. INTRODUCTION

Dans le dictionnaire géographique de la Suisse, SCHARDT (1906 b) présente une carte où, pour la première fois sont délimités les bassins du Seyon et de la Serrière, ce dernier comprenant le cœur de Dogger de la chaîne Tête de Ran - Mont d'Amin - Joux du Plâne. Il relève également l'existence d'échanges hydrauliques entre les deux bassins, comme l'avait déjà fait DU PASQUIER (in MOULIN 1896). A partir de 1967, une série d'essais de traçage effectués pour le compte des Chocolats Suchard S.A. et des Papeteries de Serrières S.A., que nous remercions de leur collaboration, devaient permettre de confirmer et préciser certaines de ces limites. Les données techniques des essais sont rassemblées au tableau IV-1 et la figure IV-1 donne l'emplacement des sites d'injection et des résurgences surveillées.

Tous les essais ont été réalisés avec de la fluorescéine, la méthode au charbon actif (MATHEY 1971) permettant d'abaisser le seuil de détection jusqu'à 10^{-10} g/ml (10^{-4} ppm). Plus récemment (essais No. 5 et No. 12), l'utilisation d'un spectrofluorimètre P.E. 204 a permis d'obtenir la même limite de détection mais pour des solutions aqueuses. Dans ce cas l'emploi du charbon actif constituait une sécurité supplémentaire.

2. DESCRIPTION ET RESULTATS DES ESSAIS DE COLORATION

2.1. Les pertes du Seyon en aval du Pont-Noir.

En basses eaux le Seyon se perd complètement entre Valengin et Veussyon. Citons SCHARDT (1908) "En traversant sa gorge le Seyon subit des pertes qui se rendent dans la Serrière ainsi que l'a démontré un essai de coloration à la fluorescéine". Cette seule référence était insuffisante et nécessitait la répétition de l'essai.

La fluorescéine a été injectée dans la partie aval des gorges à un endroit où le Seyon se perdait complètement. Après 50 heures le colorant pouvait être détecté dans le Seyon à Veussyon. Bien que la petite résurgence qui sortait à l'époque dans le lit de la rivière 250 mètres en aval du point d'injection n'ait pu être surveillée directement en raison de son accès difficile, elle constitue certainement un des points de réapparition. La surveillance des autres résurgences, dont la Serrière, a été interrompue après 25 jours. Relevons que la possibilité d'une liaison hydraulique entre la source valenginienne de l'Ecluse, non contrôlée, n'est pas exclue.

L'hypothèse d'une liaison entre les pertes du Seyon et la source de la Serrière n'est donc pour l'instant pas confirmée. La vitesse de cheminement très lente s'explique par une circulation dans les alluvions du Seyon, l'infiltration dans les calcaires étant empêchée par un colmatage récent. Un nouvel essai devrait être réalisé plus en amont à proximité du Pont-Noir.

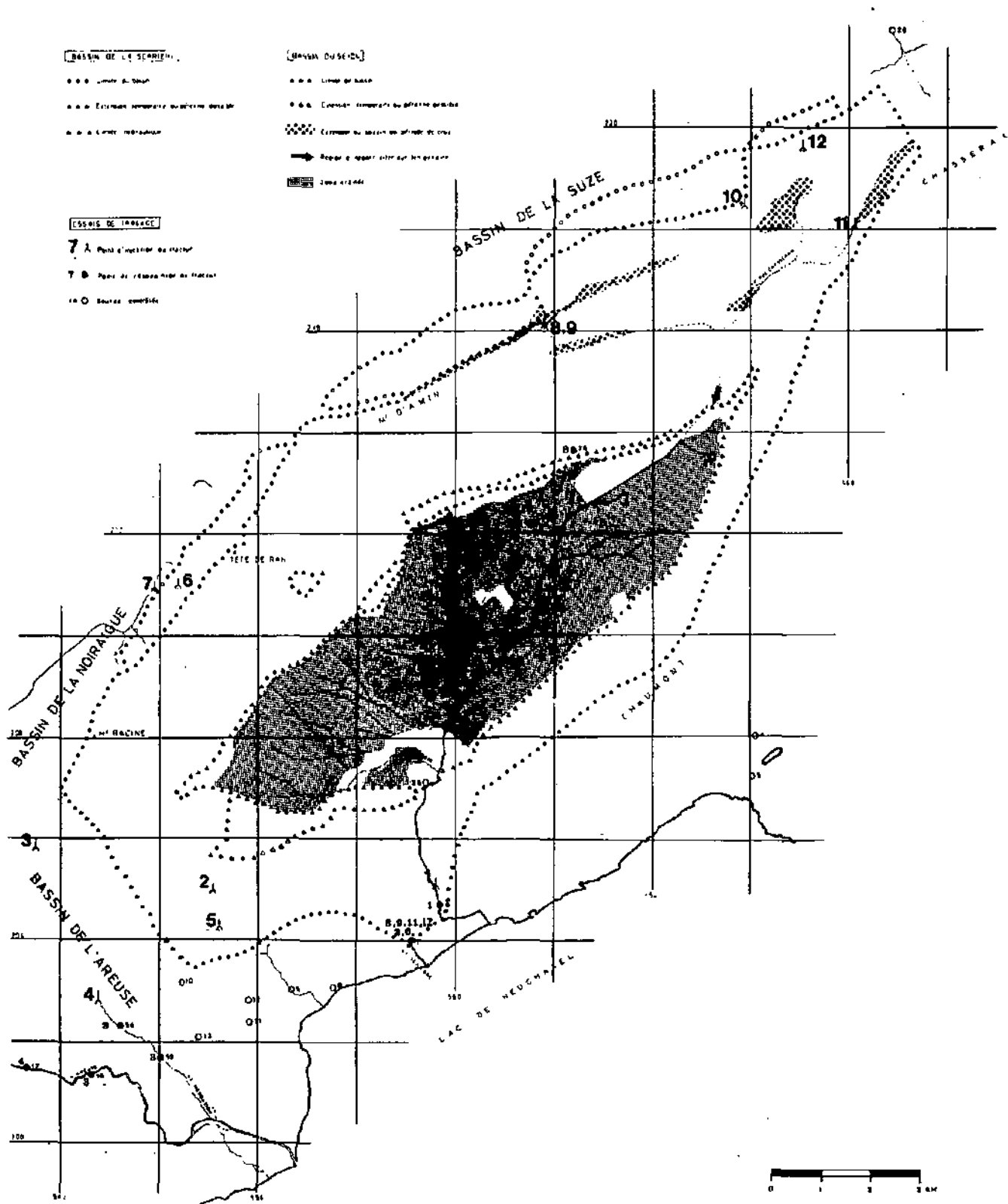


Figure IV - 1 Résultats des essais de traçage limites des bassins versants et extension des zones drainées.

2.2. La perte de l'ancien étang de Montmollin.

La perte qui absorbe les égouts du village est placée à proximité du chevauchement de Sarroue - Montézillon (SCHARDT 1904) dans les calcaires du Portlandien.

Le colorant a été décelé 6 jours après l'injection à la source de la Sarrière, uniquement sur charbon actif. Comme il s'agit chronologiquement du premier essai de la campagne, la liaison hydraulique entre la perte et la résurgence peut être considérée comme sûre et par conséquent l'extension du bassin de la Sarrière à l'Ouest.

2.3. La perte du ruisseau de la Petite Sagneule.

Les nombreuses sources qui jaillissent dans la zone d'altération des marno-calcaires ergoviens, au cœur de l'anticlinal, se réunissent en un ruisseau qui se perd dès qu'il atteint les calcaires séquanien au haut de la Mauveise Combe où il a été coloré. Les prélèvements ont été effectués 6 fois par jour durant 23 jours.

Trois résurgences ont été colorées :

- Les sources supérieures du Mardasson.

Il s'agit d'un groupe de résurgences temporaires qui jaillissent du Valanginien à une altitude de 590 mètres à proximité du Mardasson, par débordement sur les marnes hauteriviennes. (BURGER 1959 p. 201). Intensité de la coloration élevée et vague peu étalée indiquent un milieu d'écoulement peu dispersif, soit des chenaux karstiques généralement dénoyés.

- Les sources inférieures du Mardasson.

Elles jaillissent dans les berges du ruisseau sur une trentaine de mètres de longueur. Pérennes, elles sortent des alluvions mais représentent la décharge de l'Urgonien encaissant à l'endroit où il passe sous le molasse oligocène. Leur bassin alimentaire est constitué par les terrains sus-jacents à l'Hauterivien inférieur, mais elles ramènent au jour au moins en partie les eaux qui se perdent en amont dans le lit du ruisseau (BURGER 1959 p.203). Les résultats de la coloration ne permettant pas de dire si une pert seulement ou la totalité du colorant provient des sources supérieures.

- Source de la grotte à l'amont du Gore de Braye.

Source temporaire, elle sort des calcaires Valanginiens en contrebas du chemin à 500 mètres d'altitude. C'est grâce à une équipe de spéléologues occupés à la destruction de l'entrée de cette grotte que l'apparition du colorant a pu être signalée. Le déversement de la fluorescéine dans l'Arusa colorait nettement la rivière.

La source des Puries n'a pas donné de résultat positif. Les contrôles y étant effectués au fluoroscope uniquement, la présence de colorant dans cette source n'est donc pas exclue mais à des concentrations inférieures à $5 \cdot 10^{-9}$ g/ml.

La perte du ruisseau de la petite Sagneule se situe exactement sur la trace du décrochement de la Tourne. On peut supposer que l'eau souterraine bénéficie ainsi d'une zone préférentielle d'infiltration et de circulation, dont la karstification est soulignée par plusieurs cavités (grotte et gouffre de la Tourne). A la hauteur de Rochefort le trojet souterrain s'écarte de la trace du décrochement et rejoint les deux résurgences valanginiennes grâce à un jeu de fissures de tension bien développées et karstifiées. Cet essai de traçage précise également l'origine de la source inférieure du Mardasson. La non imperméabilité des marno-calcaires Pürbeckiens est démontrée.

2.4. Pertes du Merdasson, entre Rochefort et Chambrelan.

Cet essai, réalisé par R. STETTLER chimiste au Service des Eaux de la Ville de Neuchâtel, ne concerne plus directement le bassin de la Serrière mais ses résultats en contradiction apparente avec ceux de l'essai de la petite Sagneule méritent d'être signalés.

La fluorescéine a été injectée dans les calcaires du Portlandien au Sud Est de Rochefort entre les 2 voies CFF Neuchâtel - Le Chaux-de-Fonds. (Fig. IV-2). Cet essai a été réalisé en basses eaux alors que le Merdasson se perdait complètement et que les sources du Merdasson supérieur et du Gore de Braye étaient à sec. En plus des sources mentionnées au tableau IV-1 des fluocapteurs étaient déposés dans la source de la Verrerie à Combe Gerot, dans le ruisseau de la Meirasse à Bôle ainsi que dans le forage artésien de Treytel.

Bien qu'attendue, la sortie du traceur à la source des Puries révèle le rôle de l'état hydrologique du karst sur la direction des écoulements souterrains.

Dans cette région, en période d'étiage le niveau saturé est compris entre 480 et 530 mètres d'altitude et le gradient hydraulique dans les calcaires est alors orienté NE - SW soit parallèlement à l'axe du plissement. Lorsque le niveau de la zone noyée s'élève au-dessus du niveau des sources supérieures du Merdasson, l'apparition d'un nouvel exutoire détermine une ligne de partage des eaux entre ces sources et celles des Puries. Une confirmation de cette hypothèse pourrait être obtenue par une coloration du ruisseau de la petite Sagneule en basses eaux. Au cas où le colorant ne ressortirait pas aux Puries mais dans les sources inférieures du Merdasson, il existerait alors 2 systèmes d'écoulements distincts l'un profond, transversal à l'axe de l'anticlinal, l'autre supérieur, dans le Portlandien, et parallèle à l'axe de l'anticlinal. (Fig. IV-2).

Les résultats des essais No. 3 et No. 4 soulignent le rôle des fissures de tension dans le développement de la karstification puisque l'on sait que celles-ci sont également normales et parallèles à l'axe du plissement.

2.5. Forêt de Dame Othenette.

Dix kilos de fluorescéine dilués dans 9 mètres cubes d'eau ont été déversés dans une petite carrière abandonnée au Sud-Ouest de Montmollin à moins d'un kilomètre du site d'injection de l'essai No. 1, dans les calcaires Valanginiens.

Bien que toutes les sources importantes que l'on rencontre entre les Gorges de l'Arrose et Serrière aient fait l'objet de contrôles réguliers (dosage des échantillons d'eau au spectrofluorimètre et pose de fluocapteurs), les résultats ont toujours été négatifs, à l'exception de traces de colorant non significatives à la source de la Serrière. La surveillance a été abandonnée après 5 mois durant lesquels se sont déroulées 2 fortes crues.

L'expérience montre que les essais de traçage effectués en absence de perte naturelle ont des chances de réussites plus faibles. Dans le cas présent on doit supposer que le colorant s'est dispersé dans une zone peu karstifiée pour se diluer ensuite très lentement dans la zone noyée. La dilution augmentant avec le temps, sa détection devenait problématique, surtout si le colorant après dilution dans la zone noyée ressortait à très petite dose dans un chenal karstique à fort débit.

2.6. Perte du ruisseau de la Combe des Aulx.

La Combe des Aulx est une petite cluse qui entame la coque du Dogger de l'anticlinal de Tête de Ran - Mont Racine. Le ruisseau qui la parcourt est alimenté par les eaux qui ruissellent ou circulent à faible profondeur dans les marno-calcaires de la Combe des Neigeux. En période de crue il traverse la cluse de part en part, mais plus généralement il se perd dans le Bathonien. Au moment de l'essai, le ruisseau se perdait complètement à la base de

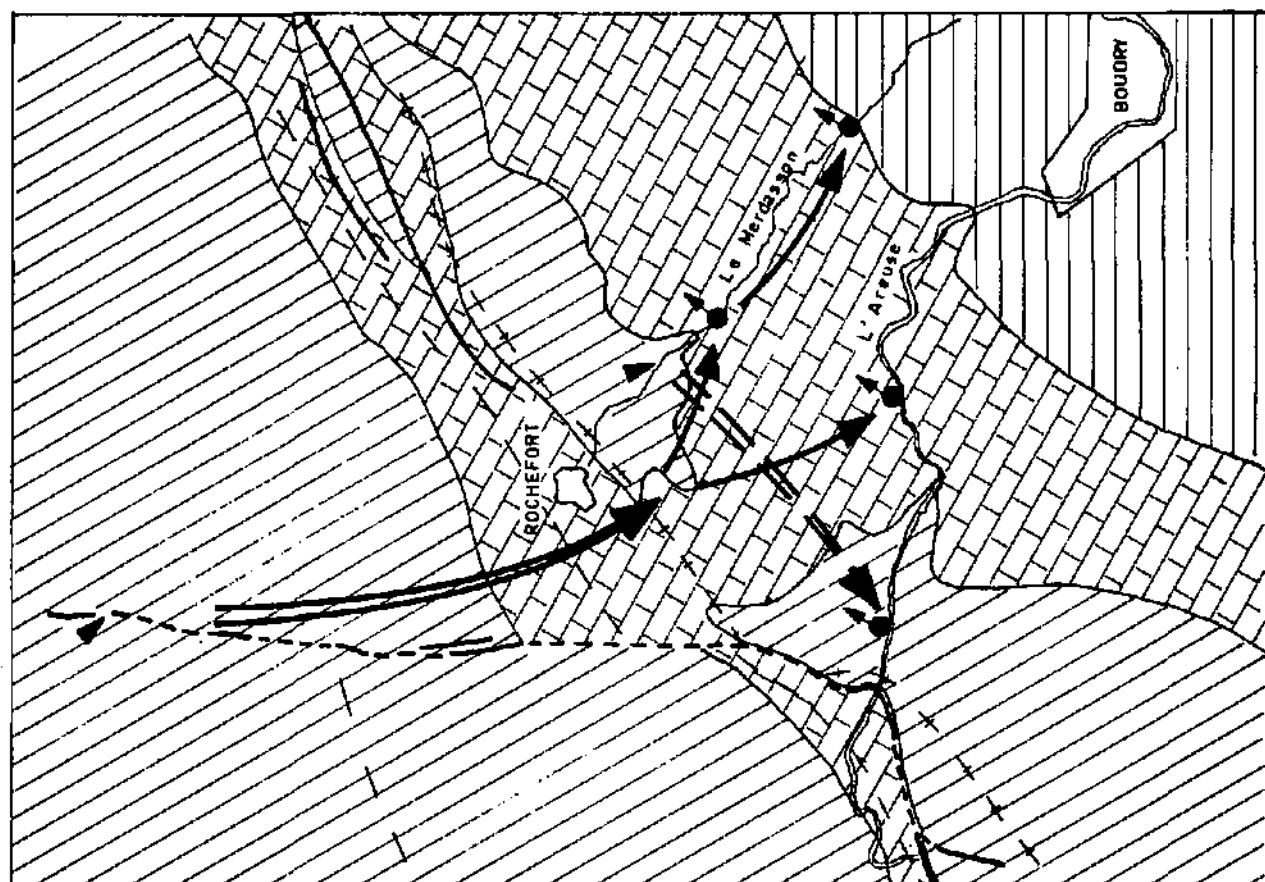


Figure IV - 2 Géologie et circulations souterraines dans la région du Merdasson

la Dalle sacrée (Cellovien), soit encore sur le versant Sud de l'anticlinal (Fig. IV-3).

Les prélèvements ont été effectués toutes les 4 heures durant 18 jours, puis tous les jours, et durant les 4 dernières semaines tous les 3 jours.

Seule la source de la Serrière a donné un résultat positif et ceci 54 jours après la date de l'injection. Bien que les concentrations de colorant dans l'eau aient été inférieures à $5 \cdot 10^{-9}$ g/ml, on distinguait nettement dans les solutions alcooliques du charbon actif un accroissement puis une décroissance régulière des teneurs en fluorescéine. S'agit-il du colorant de l'essai No. 1 réalisé précédemment ?

Cet essai confirme l'hypothèse qu'une partie du cœur jurassique moyen de la chaîne Tête de Ren - Mont Racine appartient au bassin de la Serrière. On notera en particulier la valeur très basse de la vitesse de circulation de l'eau (6,4 m/h) comparée à celle mesurée sur le trajet Pertuis - Serrières (305 m/h).

La source de la Serrière jaillit de l'Hauterivien supérieur: cet essai démontre qu'il existe des liaisons hydrauliques entre les trois grandes unités lithostratigraphiques du bassin (Dogger, Malm, Crétacé) et que l'imperméabilité des niveaux marneux (Argovien, Pürbeckien, Hauterivien inférieur) n'est pas générale.

2.7. Forage de la Combe des Aulx.

Dans le cadre d'une étude hydrogéologique du bassin de la Noiraigue par le Comité de l'Areuse, un forage de reconnaissance (-55 m) a été implanté à proximité de la résurgence temporaire qui jaillit à l'issue de la Combe des Aulx. Elle coule rarement plus de quelques jours mais son débit peut dépasser 100 l/s. Pour BURGER (1959, p. 140), elle trahit l'existence d'une circulation générale dans les calcaires du Dogger.

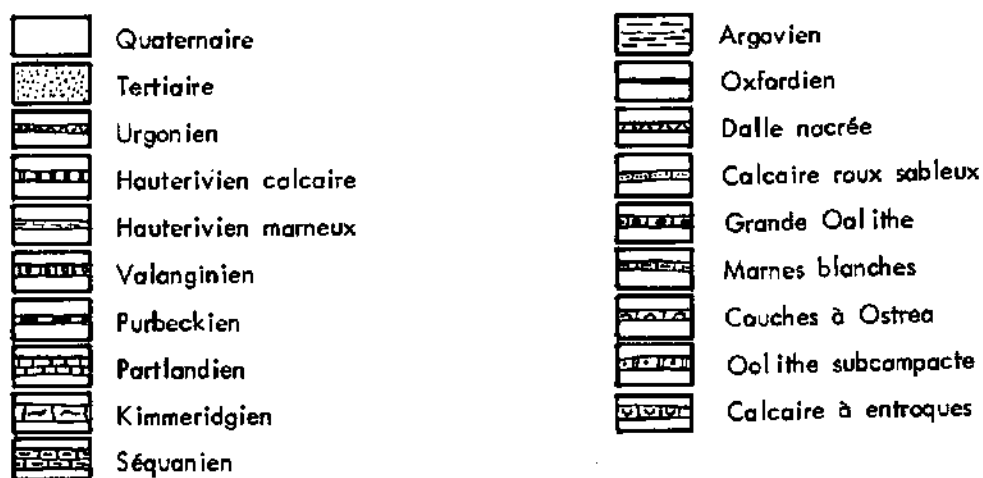
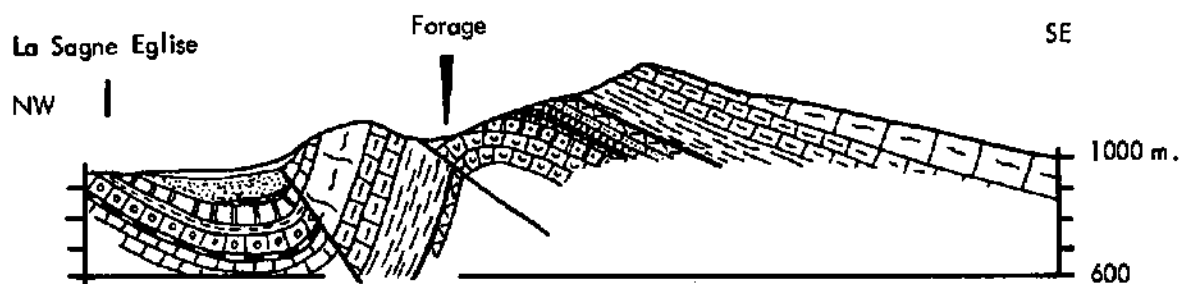
Le colorant (35 kg de fluorescéine) a été déversé directement dans le forage, à sec à ce moment-là. Après 2 ans de surveillance ininterrompue les contrôles ont été suspendus, aucune trace de colorant n'ayant été retrouvée. En mars 1973 dans la résurgence de la Combe des Aulx en activité, on ne décelait pas de colorant. Paradoxe : en juillet 1974, soit 3 ans après l'injection du colorant, un échantillon d'eau prélevé dans le forage à des fins d'analyse avait une teneur en fluorescéine de l'ordre de 10^{-6} g/ml.

Bien que les sites d'injection des essais No. 6 et No. 7 soient distants d'à peine 400 mètres ils sont situés de part et d'autre de l'axe anticlinal qui constitue au moins temporairement la ligne de partage des eaux entre les bassins de l'Areuse et de la Serrière. Quant au trajet suivi par le colorant il ne peut être défini avec précision. (Fig. IV-3)

2.8. Galerie de dérivation dans le gouffre de Pertuis.

En temps normal la Cluse de Pertuis est parcourue par un ruisseau qui draine les combes argoviennes de la Berthière et Mauley. Ces eaux se perdent habituellement dans le lit du ruisseau au passage de la cluse. A la fonte des neiges ou après de violents orages le ruisseau de Pertuis enflé considérablement (2 à 3 m³/s), et les pertes n'absorbant qu'une fraction de la crue, il inonde le synclinal du Câté avant de rejoindre le Ruz Cheaseren. Après une reconnaissance géologique et topographique du gouffre de Pertuis (-163 m), le Service des Eaux de l'Etat de Neuchâtel fit construire une galerie de dérivation de 55 mètres rejoignant le gouffre à la cote -22 m de l'entrée. Depuis 1963 les crues sont déversées dans le gouffre. (GIGON, 1974).

Quelques jours après la première dérivation, la source de la Serrière était fortement troublée par des suspensions argileuses. L'argile accumulée sur les parois du gouffre avait fonctionné comme traceur.



0 ————— 1000 m.

Figure IV - 3 Coupe géologique passant par le forage de la Combe des Aulx. (D'après G. SIMBONI, inédit.)

Soixante six heures après l'injection de 20 kg de fluoreacéine à l'entrée de la galerie on pouvait déceler le colorant dans la Serrière ce qui représente une vitesse de 188 m/h (période normale). Les contrôles ont été effectués toutes les 4 heures et poursuivis 7 jours après la disparition du traceur à Serrières.

Cet essai démontre qu'il existe sous la Val de Ruz une circulation de caractère karstique, le long de chenaux dont l'ouverture respectable permet de conduire un débit de plusieurs mètres cubes par seconde vers la source de la Serrière. On est pour l'instant réduit à des hypothèses en ce qui concerne la projection en surface du trajet colorant entre le gouffre et la résurgence. (Pertuis - Source du Torrent - Valengin - Serrières ?)

2.9. Galerie de dérivation dans la gouffre de Pertuis en période de crue.

Le renouvellement de l'Essai No. 8 en période de forte crue était destiné à :

- confirmer que la source temporaire du Torrent représentait bien un trop plein du réseau karstique de la Serrière, ce que supposait déjà JACCARD en 1883.
- étudier les vitesses de circulation pour divers états hydrologiques du Malm et comparer ces résultats avec ceux de l'essai No. 8.
- étudier l'influence de la fissuration sur les directions et les vitesses d'écoulement.

Le colorant est ressorti

à la source du torrent 16 heures après l'injection

à la source de la Serrière 36 heures après l'injection

Comparons les vitesses de circulation de l'eau entre elles avec celles obtenues lors du premier essai.

Tableau IV-II

Vitesse de circulation de l'eau sur le trajet
Pertuis - Torrent - Serrières

	Pertuis - Torrent	Pertuis - Serrières
Distance	2,5 km	12,4 km
Dénivellation	9,6 %	4,4 %
* Vitesse (30.5.1967)	-	188 m/h
* Vitesse (4.2.1970)	156 m/h	305 m/h
** Vitesse (4.2.1970)	131 m/h	276 m/h

* première apparition

** concentration maximum

On constate que

- la vitesse du colorant sur le trajet Pertuis - Serrières est 1,6 fois plus élevée en période de crue (1,7 fois pour la concentration maximum)
- malgré une dénivellation deux fois plus forte la vitesse est deux fois plus faible sur le trajet Pertuis - Torrent.

En accord avec les conclusions d'un précédent article (MATHEY 1971) on devrait observer une vitesse de circulation plus élevée le long de l'axe Pertuis - Torrent qui coïncide sensiblement avec la direction des fissures de tension N 170 transversales à l'axe de l'anticlinal. En admettant que fréquence et ouverture des deux systèmes de fissures de tension

conjugées (N 70 et N 170) sont également développées la composante du vecteur vitesse dépendre de la composante du gradient hydraulique dans la direction des fiseures. Le système N 70 est certainement bien développé parallèlement aux deux plis en genou du flanc Sud de l'anticlinal entre Pertuis et le Torrent. La développement de la perméabilité parallèlement à l'axe de l'anticlinal, combinée à une composante plus grande du gradient suivant cette direction permet d'expliquer ces différences de vitesse de circulation (MATHEY - SIMEONI, 1972).

2.10. Perte du ruissseau des Bugnats.

Les eaux de ruissellement des marno-calcaires argoviens de la combe anticlinale des Bugnats donnent naissance à un affluent du Ruz Chasseran qui, en étiage, s'infiltrer totalement dès l'entrée de la cluse, sur la trace d'un décrochement sénestre mettant en contact Séquanien et Cellovien.

Trente kilos de fluorescéine ont été déversés en amont de la cluse et la surveillance des résurgences a été abandonnée après 14 mois d'observations infructueuses (30 mois à la Serrière). Compte tenu des vitesses très lentes rencontrées dans le Dogger lors d'autres essais, on pouvait penser que le colorant s'était laissé piéger sous l'Argovien sans trouver de zone suffisamment perméable pour passer massivement dans les chenaux à circulation rapide du Malm. L'essai No. 12 devait compléter notre information.

2.11. Perte du ruissseau de la Combe Biosse.

Le point d'injection est situé au SE des métairies de Dombresson au haut de la Combe Biosse à proximité du contact Argovien - Séquanien. Le ruissseau qui dreine la Combe argovienne s'infiltrer rapidement dès qu'il atteint les calcaires. En période de crue il donne naissance au Ruz Chasseran.

A l'exception des sources de la Combe Grède le contrôle des résurgences avait lieu toutes les 4 heures.

Seule la source de la Serrière, 11 jours après l'injection contenait du colorant, visible à l'oeil nu dans la petite retenue aux abords de la source. La courbe des concentrations en fonction du temps (non représentée) était nettement asymétrique et étalée sur 9 jours. L'essai a été réalisé à un moment où la vidange du bassin était avancée, soit avec des faibles gradients hydrauliques, ce qui explique les différences de vitesse avec l'essai No. 12 alors que le parcours est sans doute partiellement commun.

2.12. Les Savagnières-Dessous.

Dix kilos de fluorescéine ont été injectés à la fonte des neiges dans une fouille créée à l'emplacement prévu pour la station d'épuration du village de vacances des Savagnières. Le site retenu (séquanien) est situé dans l'axe et au point structuralement le plus bas du synclinal de l'échelle dans le prolongement du décrochement des Bugnats. Alors que la carte structurale du toit de l'Argovien conduit à envisager la vidange des eaux du synclinal en direction de la Combe Grède, la résurgence des eaux à la source de la Serrière avec des vitesses élevées surprend puisqu'elle implique la non-imperméabilité des marno-calcaires argoviens. La courbe de réapparition (Fig. IV-4) traduit un milieu peu dispersif caractéristique d'un écoulement en chenaux tel qu'on le trouve sur le trajet Pertuis - Serrière. Dans la partie amont le colorant rejoint le Dogger et suit probablement un trajet identique à celui de l'essai No. 11. Une situation de crue explique les différences de vitesse. Le Dogger constitue un bassin profond dont le débit d'exutoire est limité. Si en période d'étiage cette formation absorbe les eaux de la périphérie du bassin de la Serrière qui s'enfoncent profondément, en période de crue les pressions s'élèvent et les eaux des circu-

ESSAI DE COLORATION AUX SAVAGNIERES

Concentration de fluorescéine
à la SERRIERE

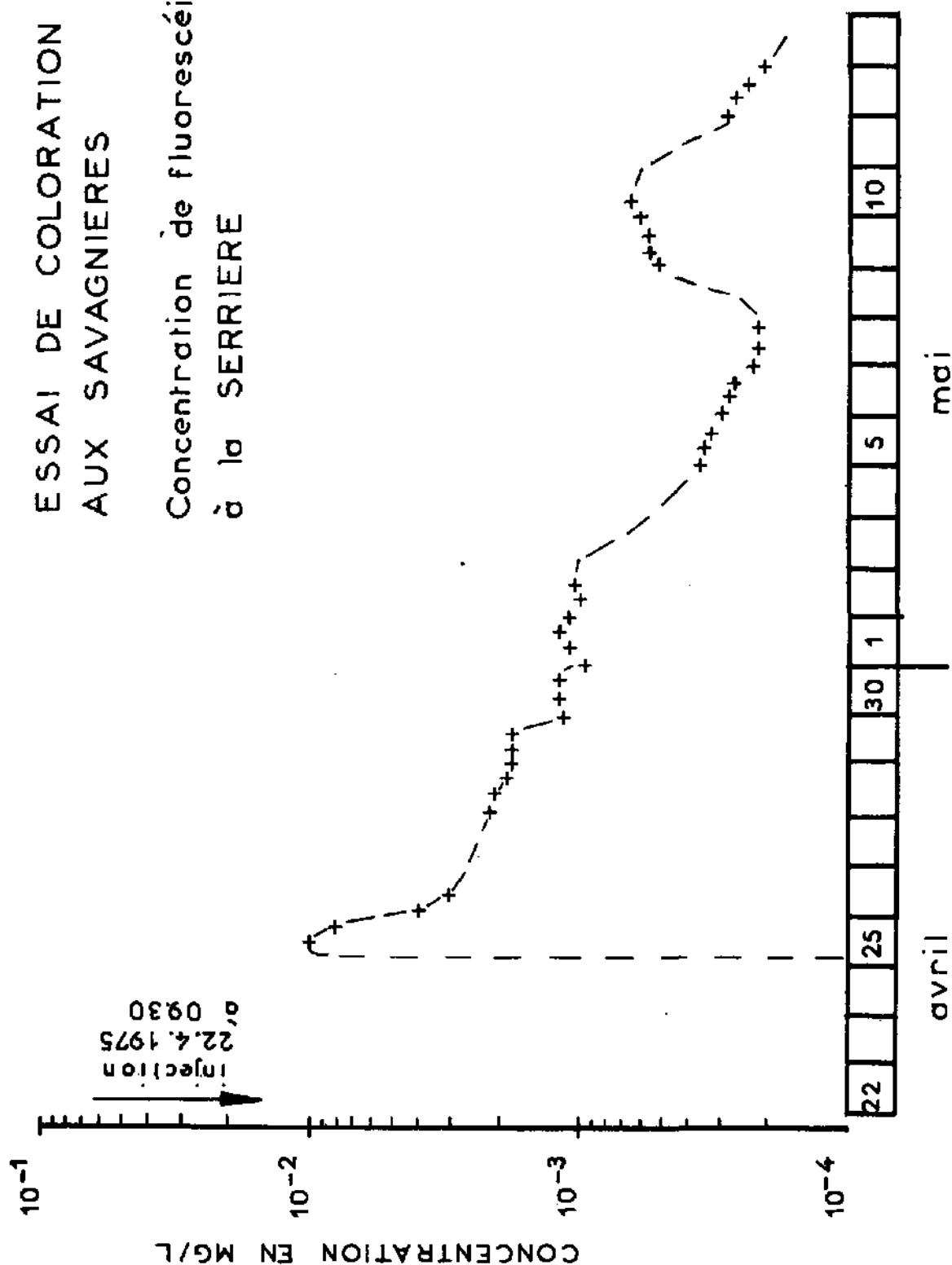


Figure IV - 4 Essai de coloration aux Savagnière - Dessous.
Courbe de réapparition du colorant.

letions est inversé: le Melm devient alors l'exutoire principal. Ce schéma peut être comparé au régime des échanges hydrauliques entre les bassins de la Serrière et du Seyon.

2.13. Autres essais.

D'autres essais projetés ont été abandonnés à la suite de la non réapparition du colorant injecté aux Bugnenets. Ce sont :

- La perte du marais de la Joux du Plâne à la Vernière (Callovien)
- La perte de Verreta (Bethonien et Callovien)
- La perte de la Grande Racine (Callovien)

Des essais complémentaires devraient être effectués afin de préciser tant les limites du bassin (région des Bugnenets, synclinal de l'échelette) que les caractéristiques hydrauliques du réseau karstique en étiage comme en crue, particulièrement dans l'Hauterivien supérieur. Citons :

- Les pertes du marais des Pontins (Séquanien)
- Dolines au Creux-Joly (Séquanien)
- La perte du Châtelard aux Hauts-Geneveys (Portlandien)
- La perte du Ruz Chassera dans la cluse de Chenu (Portlandien)
- La perte du ruisseau de Pertuis au Côté (Hauterivien supérieur)
- La perte du ruisseau du Bas de Ruz à l'Est de Coffrane (Hauterivien supérieur)
- Les forages profonds des Prés Royer (Melm)
- Région terminale du décrochement de la Ferrière entre Tête de Ran et la Vue des Alpes (Dogger)
- Pertes des sources dans le tunnel des Loges

2.14. Les vitesses de circulation dans le karst.

Reportées sur un histogramme on constate qu'elles sont le plus souvent comprises entre 20 et 80 m/h. La distribution des fréquences est de type log-normal avec des fréquences un peu trop élevées pour les hautes vitesses, ce qui s'explique par la sélection des sites d'injection situés le plus souvent à l'aplomb de zones très perméables. (Fig. IV-7)

Les vitesses les plus élevées (270, 306 m/h) sont comparables à celles que l'on rencontre dans des karsts alpins avec forte dénivellation et écoulement en zone noyée très réduit.

3. DETERMINATION DES LIMITES DU BASSIN DE LA SERRIERE

3.1. Nature des limites.

Les résultats des essais de traçage ne constituent que des données ponctuelles sur l'extension d'un bassin et on sait, en milieu karstique, la difficulté d'en fixer avec précision les limites, les seuls critères topographiques étant largement incomplets.

A la suite de BURGER (1972) on pourra distinguer 4 types de limites de bassin versant en terrain karstique :

- lithologiques
- structurales
- morphologiques
- hydrauliques

Dans le cas présent, compte tenu des échanges hydrauliques entre les bassins dont l'intensité varie au cours de l'année hydrologique il était nécessaire de distinguer des limites minimum et leur extension maximum possible. Dans la mesure du possible on a tenu compte des résultats des analyses isotopiques (BURGER et cons. 1971) en vue de limiter l'extension du bassin

de la Serrière dans les parties basses.

3.2. Limites NW : Mont Racine, Tête de Ran.

Tout au long de l'anticlinal l'érosion a créé une morphologie où alternent combes et crêtes. Les limites minimum du bassin suivent naturellement le contact Argovien - Séquanien mais englobent l'Argovien lorsque les eaux de ruissellement se perdent sur le versant SE de l'anticlinal. En admettant le rôle d'écran étanche des niveaux marneux du Dogger, on peut placer la limite extrême du bassin sur l'axe de l'anticlinal.

Les résurgences du Dogger de la Combe des Cugnets fonctionnent comme trop plein partiel et temporaire du bassin de la Serrière.

3.3. Limite N : Vue des Alpes, Mont d'Amin, Pertuis, Joux du Plâne. (Fig. IV-5)

Les limites minimum sont toujours représentées par le contact Argovien - Séquanien, ou Cellovien - Argovien lorsque le ruissellement est absorbé sur le versant Sud (Pertuis). Entre Tête de Ran et la Vue des Alpes la terminaison du décrochement de la Ferrière par un jeu de fractures longitudinales et transversales assure probablement un drainage des eaux en direction du Nord. Concerne-t-il aussi le Malm ? Plus à l'Est (Mont Parreux, le Gurnigel) la limite maximum suit l'axe anticlinal. Le dôme callovien de la Joux du Plâne appartient très probablement au bassin de la Serrière. Les résultats de l'essai de coloration des Savagnières-Dessous permettrait d'englober théoriquement la totalité du synclinal de l'Échelette dans le bassin mais l'évacuation des eaux par le seuil du Creux Joly en direction de la Sure doit être envisagée. La zone marécageuse des Pontins est comprise dans les limites maximum possibles.

3.4. Limite NE : Les Bugnenets, Combe Biosse.

Une analyse structurelle du contact Argovien - Séquanien permet théoriquement d'étendre les limites du bassin de la Serrière jusqu'aux Métairies de Meuringue (572.000/222.175). Le caractère drainant de la Combe Grède, souligné par plusieurs résurgences assure une limite hydraulique au bassin de la Serrière qui a été arrêté au haut de la Combe Biosse, parallèlement à la Combe Grède.

3.5. Limite SE : La Combe Biosse, Chaumont.

L'argovien fonctionne très probablement comme limite lithologique et structurale et la limite du bassin suit l'axe anticlinal, fixent ainsi l'impluvium des sources du littoral entre la Neuvaville et Nauchâtel.

3.6. Le littoral.

3.6.1. Limites hydrauliques.

Entre les Trois Bornes et Combe Garot le toit de l'Argovien s'abaisse au-dessous du niveau de la source de la Serrière (475 m) d'où la difficulté de fixer avec précision le rayon d'action des chenaux de la Serrière sur le littoral sans connaître le champ des pressions hydrauliques dans le Malm et le Valenginien dans cette région.

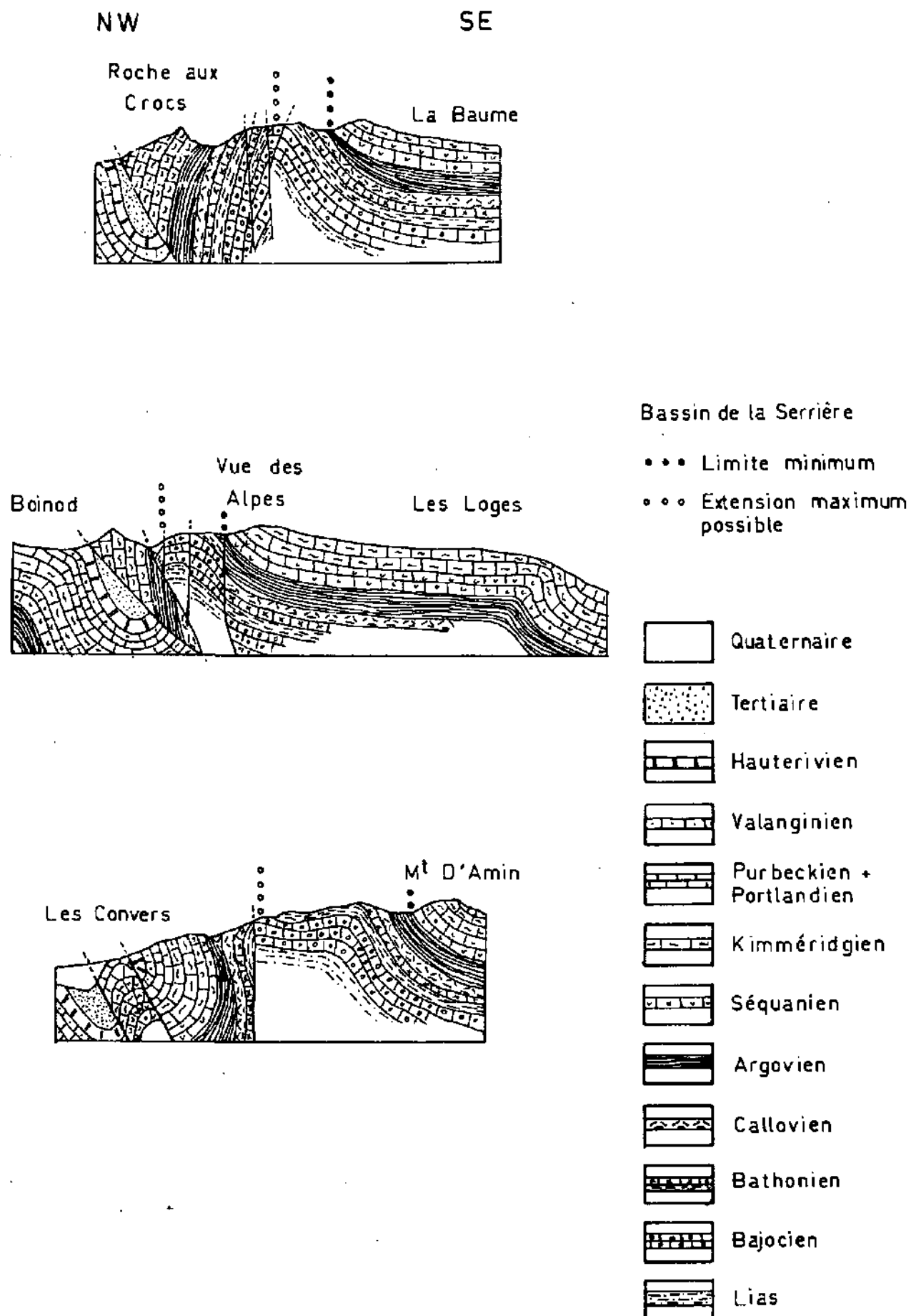


Figure IV - 5 Limites du bassin de la Serrière entre Tête de Ran et Mt. d'Amin. (Coupes géologiques d'après SUTER 1930)

Les exutoirs connus les plus proches dont on sait qu'ils sont issus de ces formations sont au NE la source valanginienne de l'Ecluse (445 m) et la source du Ruau à St Blaise (485 m) et au SW, les sources des gorges de l'Areuse, voire du Merdasson. Le niveau de la zone saturée du Malm mesuré par le Service des Ponts et Chaussées dans le forage de Fontaine André (561.970/205.528) est généralement plus bas que celui de la Serrière (fig. IV-6). Le décrochement proche joue certainement le rôle de drain, ce qui est confirmé par l'existence au large de Monruz (BURGER comm. orale) d'une source sous-lacustre.

L'extension de la zone de drainage de la Serrière au NE semble donc très restreinte, alors qu'au SW elle ne peut être fixée avec précision pour l'instant.

3.6.2. Bassin alimentaire sur le littoral.

Bien que la source jaillisse de l'Hauterivien supérieur, la part des eaux de cette formation alimentant la Serrière est limitée à la zone sourcière car les écoulements souterrains y sont peu unifiés. La limite du bassin suit donc généralement le contact Valanginien - Hauterivien supérieur.

3.7. Limite Ouest : Bèze, Rochefort, la Tourne.

Conséquences de l'abaissement axial de la première chaîne anticlinale entre la Montagne de Boudry et Chaumont, au Sud d'une ligne les Grattes - Rochefort, l'Argovien est situé en-dessous du niveau des sources de la Serrière et des Gorges de l'Areuse. L'extension du bassin de la Serrière à l'Ouest dépend donc principalement de conditions hydrauliques dont on sait qu'elles varient au cours de l'année et qui sont ici mal connues.

4. LIMITES DU BASSIN DU SEYON

4.1. Nature des limites - Zones drainées.

La couverture tertiaire du synclinal du Val de Ruz isole pratiquement le bassin de la Serrière du bassin du Seyon, bien qu'on y rencontre des circulations d'eau très lente comme aux Prés Royer (MORNOD 1970) dont les effets sur le bilan sont négligeables.

Plus encore que la tertiaire, la séparation des deux bassins est réalisée par la moraine argileuse qui constitue la totalité du soubassement quaternaire du Val de Ruz au NE de Coffrane. Les limites minimum sûres du bassin du Seyon seront donc bien définies par l'extension des zones assainies par drainage de la moraine (fig. IV-1). Lorsque l'infiltration est importante, (SW de Coffrane, Paulière, les Prés Royer), lithologie, structure et direction des écoulements souterrains permettent de fixer les limites du bassin.

4.2. Limite NW : Les Geneveys sur Coffrane, Melvilliers, Cernier.

Au SW des Crotêts, l'absence de ruissellement témoigne de l'infiltration des eaux vers la moraine et les calcaires portlandiens sous-jacents. La zone sourcière des Crotêts peut être rattachée au bassin du Seyon mais compte tenu du faible débit d'étiage des sources une infiltration partielle des eaux vers la Serrière n'est pas exclue.

De Melvilliers à la Jonchère le contact moraine-Portlandien donne une limite précise. De la Jonchère à Cernier l'Hauterivien peut être rattaché au bassin du Seyon et les limites minimum suivent le toit du Valanginien. Toutefois, une extension du bassin en période de crue à la couverture quaternaire de cette formation est probable. L'îlot des Hauts Geneveys est justifié par les drainages et captages reliés au Seyon.

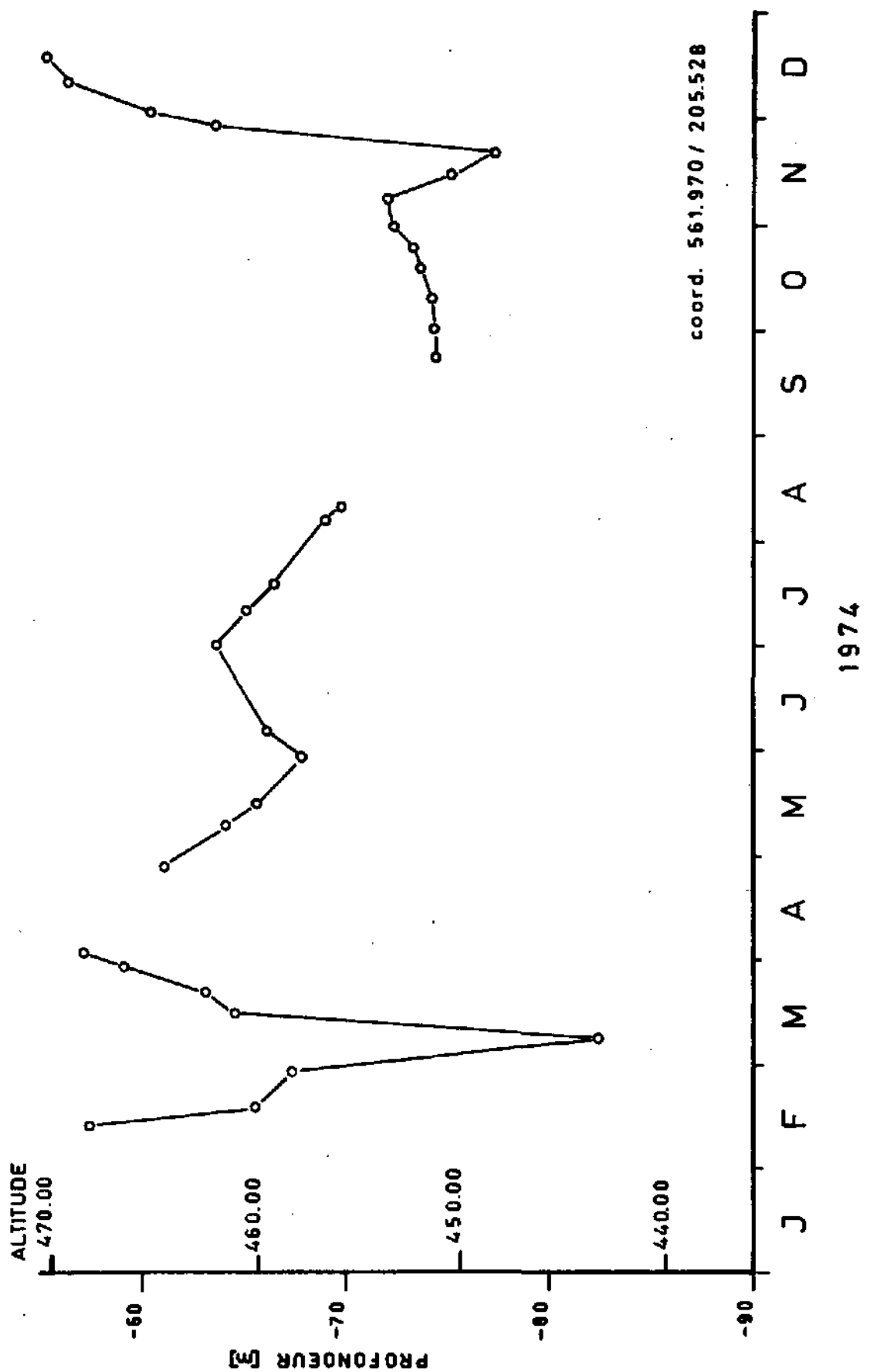


Figure IV - 6 Niveau de l'eau dans le forage de Fontaine André en 1974 (Malm). D'après un document du Service cantonal des Ponts et Chaussées.

4.3. Limite N-NW : Cernier, Villiers.

Dans l'état actuel des connaissances on peut admettre que les eaux de l'Hauterivien se déchargent dans le quaternaire dans la zone des Prés Royer (Chap. XI). En période de crue le débordement de la nappe du Malm à la source du Torrent et exceptionnellement du Taque-Mouche à Villiers, constitue un apport temporaire au bassin du Seyon, au dépend de celui de la Serrière. A moins de crues exceptionnelles comme au printemps 1970 leur poids dans le bilan reste négligeable, comme le sont également les venues qui peuvent jaillir du Portlandien à Chenau.

A Villiers le Seyon rejoint le Rur Chasseeren. Si ce dernier se perd généralement à l'entrée de la cluse de Chenau, à la fonte des neiges ou après de violents orages, les eaux qui ruissellent sur les affleurements des marnes argoviennes (Combe Barthière, Combe Mauley, les Eugénets, Combe Biessé) provoquent une onde de crue qui rejoint le Seyon. Si les volumes d'eau ainsi soustraits à la Serrière sont négligeables, cette extension du bassin du Seyon doit être prise en compte pour l'estimation des débits de crue dont la fréquence de retour est supérieure à un an.

4.4. Limite SE : Clemeain, Savagnier, Valengin.

Les éboulis du pied de Chaumont recouvrent alternativement le Malm, le Crétacé, le moraine, voire la molasse et masquent l'exakte limite entre les bassins, mais l'erreur d'appréciation reste modeste. Un apport temporaire depuis les calcaires du Malm représentant l'équivalent ruisselé annuel d'une surface d'environ 1 km² alimente la nappe de Sous le Mont (chap. X-4) Entre Savagnier et Vilars la moraine latérale qui s'élève jusqu'à 1060 mètres d'altitude appartient au bassin de la Serrière.

4.5. Limite Sud : Valengin, Coffrens.

Des incertitudes sur la structure du bord du synclinal (Fig. III-3), sur l'extension de la molasse et sur les gradients d'écoulement de ce secteur nécessitent la création d'une double limite, la limite maximum variant probablement au cours de l'année.

Les résultats de l'étude du régime des sources d'Hauterive à Valengin et des sources de Bussy - Sergereux n'ont pas permis de définir avec précision la limite séparant les deux bassins du niveau de l'Hauterivien supérieur entre Valengin et Montmollin.

Tableau IV-1

Données et résultats techniques des essais de traçage dans le
bassin de la Serrière

INJECTION								Eplacement	Coordonnées
Numéro	Eplacement	Coordonnées	Altitude m	Débit estimé de la piste l/min	Type de traceur	Quantité kg	Date		
1	Perte du Sayon en aval du Pont-Noir	559.600 / 205.000	520	40	Fluores- céine	8	22.7.1967	La Sayon en amont de Voussyon	559.675 / 204.775
2	Perte de l'ancien étang de Montcollin	555.050 / 204.925	765	30	Fluores- céine	5,2	6.4.1967	Source de la Serrière	559.125 / 203.975
3	Perte du ruis- seau Petite Sagneule	551.450 / 205.800	1220	100	Fluores- céine	15	2.5.1967	S. Merdasson sup S. Merdasson inf S. Gers de Braye	553.200 / 202.325 554.085 / 201.665 552.630 / 201.395
4 ¹⁾	Pertes du Merdasson en- tre Rochefort -Chambrelan	552.300 / 202.290	680-690	100	Fluores- céine	10	11.3.1971	Source des Purins	551.140 / 201.200
5	Carrrière, fo- rêt de Dame Othenette	555.220 / 204.185	680	-	Fluores- céine	10	12.10.1971	-	-
6	Perte du ruisseau de la Combe des Aulx	554.350 / 210.938	1250	-	Fluores- céine	25	16.8.1967	Source de la Serrière	559.125 / 203.975
7 ²⁾	Forage de la Combe des Aulx	553.910 / 210.890	1150	-	Fluores- céine	35	5.10.1971	-	-
8	Galerie de dérivation dans le gouf- fre de Pestuis	561.850 / 215.975	1010	6000	Fluores- céine	20	30.5.1967	Source de la Serrière	559.125 / 203.975
9	Galerie de dérivation dans le gouffre de Pestuis	561.850 / 215.975	1010	12000	Fluores- céine	3	4.2.1970	Source du Torrent Source de la Serrière	562.375 / 213.640 559.125 / 203.975
10	Perte du ruisseau des Bugnons	566.850 / 218.310	1040	40	Fluores- céine	30	27.12.1967	-	-
11	Perte du ruisseau de la Combe Biosse	568.125 / 218.000	1270	20	Fluores- céine	10	20.6.1967	Source de la Serrière	559.125 / 203.975
12 ³⁾	Les Savagnières- Dessaux. Fouille STEP	567.130 / 219.550	1120	-	Fluores- céine	10	22.4.1975	Source de la Serrière	559.125 / 203.975

1) Essai effectué en collaboration avec le Service des Eaux de la ville de Nauchâtel (R. STETTLER)

2) Essai effectué par le Centre d'Hydrogéologie dans le cadre de l'étude du bassin de la Noiraigue
(Comité de l'Areuse) (G. SIMEONI)

3) Essai effectué en collaboration avec l'Office cantonal bernois d'économie énergétique (G. DELLA VALLE)

4) Tableau IV-1 (suite)

REAPPARITION				RESULTATS TECHNIQUES						
Date	Concentr. maximum g/ml	Durée de la coloration heures	Sources contrôlées ⁴⁾	Distance injection -réapp. m	Dénivel- letien m	Pente %	Temps de dosage		Vitesse moyenne	
							Début heures	Conc.max heures	Début m/h	Conc.max m/h
24.7.1967	$1 \cdot 10^{-8}$	96	4, 6, 7, 15	250	30	12	50 j.	75 h.	5,0	3,3
12.4.1967	$\sim 10^{-9}$	96	7, 9, 10, 14, 15, 17, 18, 19 25	4200	295	7	144 h.	-	29	-
6.5.1967	$6 \cdot 10^{-6}$	360		3820	640	16,7	82 h.	90 h.	47	42,5
7.5.1967	$5 \cdot 10^{-7}$	390	7, 14, 15, 17	4870	730	15	90 h.	110 h.	54	44,3
6.5.1967	$\sim 10^{-6}$	-		4520	720	16	93 h.	-	49	-
13.3.1971	$< 5 \cdot 10^{-7}$	-	7, 8, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19	1920	170	8,8	52	58	37	33
-	-	-	7, 8, 9, 10 11, 12, 13, 14 15, 16, 17	-	-	-	>180 j.	-	-	-
9.10. 1967	$< 5 \cdot 10^{-9}$	280	7, 14, 15, 17 18, 19, 20, 21 23, 24	8300	780	9,4	54 j.	58 j.	6,4	6,0
-	-	-	7, 14, 20, 21 22, 23, 24, 31	-	-	-	> 2 ans	-	-	-
2.6.1967	10^{-7}	90	4, 7, 25, 27	12400	540	4,4	66 h.	77 h.	188	161
5.2.1970	$\sim 5 \cdot 10^{-9}$	25	7, 26	2500	260	9,6	~ 16 h.	33	156	131
6.2.1970	$\sim 10^{-9}$	150		12400	540	4,4	38 h.	45	305	276
-	-	-	7, 27, 28 29, 30	-	-	-	>14 mois	-	-	-
1.7.1967	10^{-7}	216	1, 2, 3, 4, 5, 7, 27, 28	16700	800	4,8	268 h.	368 h.	62	45
25.4.1971	$1 \cdot 10^{-8}$	460	7, 28, 29, 30 et 13 sources entre Sonvil- lier et Cormoret	17500	650	3,7	65	70	70	250

Tableau IV-1 (suite)

Liste des sources contrôlées durant les
essais de coloration

Essais de coloration dans le bassin de la Serrière

1	Source de la Baume	(Le Landeron)	17	Source des Puries	(Combe Garot)
2	Source du Ruhaut	(Crassier)	18	Source Rochefort	(Combe Garot)
3	Source de la Prévôtée	(Corneux)	19	Source de l'Eperon	(Combe Garot)
4	Source du Vigner	(St Blaise)	20	Galerie des Mayats	
5	Source du Ruéu	(St Blaise)	21	Source de la Baleine	(Le Plan de l'Eau)
6	Le Seyon à Veuseyon		22	Galerie Boisy	(Le Plan de l'Eau)
7	Source de la Serrière		23	Source du Plan de l'Eau	(Le Plan de l'Eau)
8	Source de la station viticole	(Auvernier)	24	Source de la Noirmigue	(Noirmigue)
9	Le Ruz Chetaru	(Cormondrèche)	25	Sources d'Hauterive	(Valengin)
10	Source de Crosten	(Rochefort)	26	Source du Torrent	(Doebresson)
11	Source de Breget	(Colombier)	27	Sources du Seyon	(Villiers)
12	Source du Reuy	(Colombier)	28	Ruisseau de la Combe Grède	
13	Puits de la commune	(Bâle)	29	Le Suze	(Senvilier)
14	Source supérieure du Mordesson	(Chambellien)	30	Ruisseau du vallon d'Erguel	(Senvilier)
15	Source inférieure du Mordesson	(Bâle)	31	Source de Bieufond	(Bieufond)
16	Source du Gare de Broye	(Gorges de l'Areuse)			

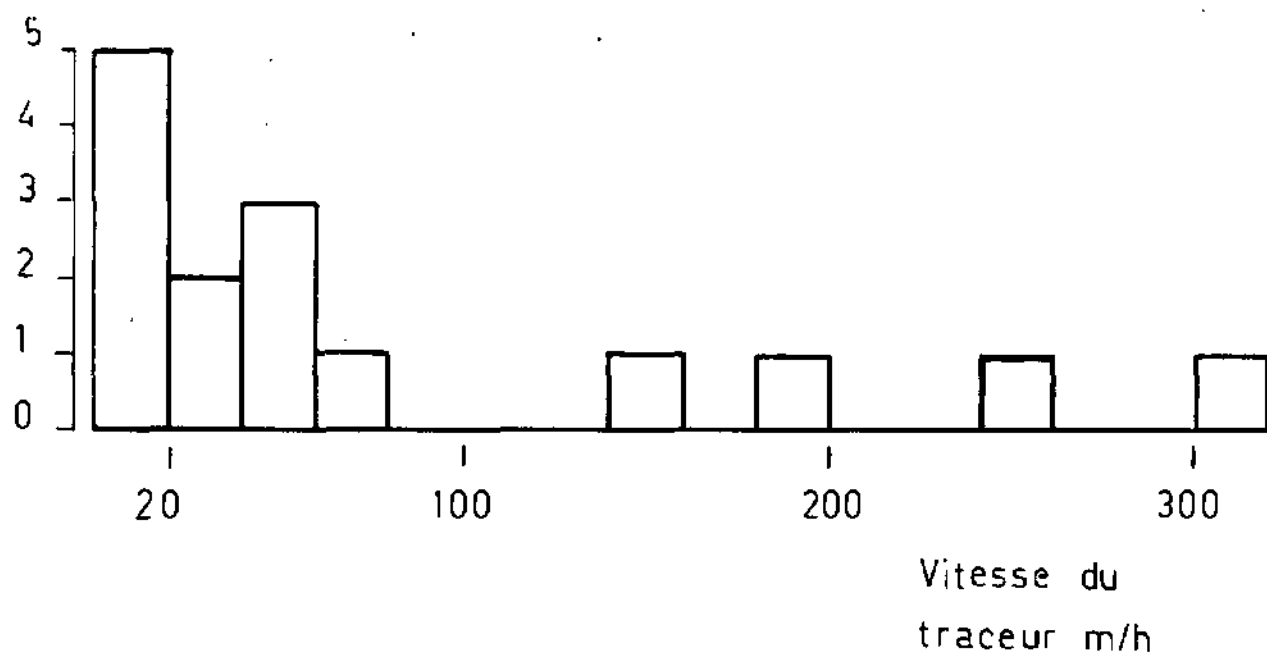


Fig. IV - 7 Histogramme des vitesses de circulation mesurées par essai de traçage.

CHAPITRE V

CARACTERES PHYSIQUES DES BASSINS VERSANTS

La confusion est le plus court chemin
entre deux idées.

Anonyme.

1. QUELQUES DONNEES GEOGRAPHIQUES

Les coordonnées géographiques limitant les bassins de la Serrière et du Seyon sont données au tableau V-I.

Tableau V-I

Coordonnées géographiques limitant les bassins de
la Serrière et du Seyon

	Longitude E		Latitude N	
Bassin de la Serrière	6° 48'	7° 01'	46° 59'	47° 07'
Bassin du Seyon	6° 51'	6° 59'	46° 59'	47° 05'

Toutes les limites du champ collecteur du Seyon coïncident avec les limites du bassin de la Serrière. Tous deux appartiennent au bassin du Rhin de même que les bassins qui les bordent : Bassins de l'Areuse à l'Ouest, de la Noiraigue au NW, de la Suze au Nord et des nombreux affluents des lacs de Neuchâtel et Bienne au SW. Il est possible que la zone terminale du décrochement de la Ferrière soit drainée en direction du Doubs qui appartient au bassin du Rhône.

2. SUPERFICIE

La nature des limites et leur justification ont été discutées au chapitre IV. Compte tenu des incertitudes qui subsistent, des échanges hydrauliques entre les deux bassins et de la variation des limites hydrauliques au cours de l'année hydrologique on était contraint de définir plusieurs valeurs de surface, les valeurs extrêmes représentant des maxima et minima théoriques (tableau V-1). La figure V-1 qui préfigure les échanges hydrauliques entre les bassins permet de visualiser les surfaces relatives de chacun des bassins et des terrains qu'ils se partagent. Les surfaces définies par des traitillés varient au cours de l'année hydrologique ou sont incertaines. Les chiffres 1, 2, 3 représentent respectivement les apports au bassin de la Serrière depuis les terrains argoviens, les échanges à la périphérie du bassin du Seyon et les infiltrations de ce dernier dans les gorges.

On tentera de préciser ces valeurs en cours de travail et le choix de la surface probable de chacun des bassins sera effectué à partir du bilan (Chap. XII).

La surface des deux bassins réunis est comprise entre 123,3 et 133,9 km².

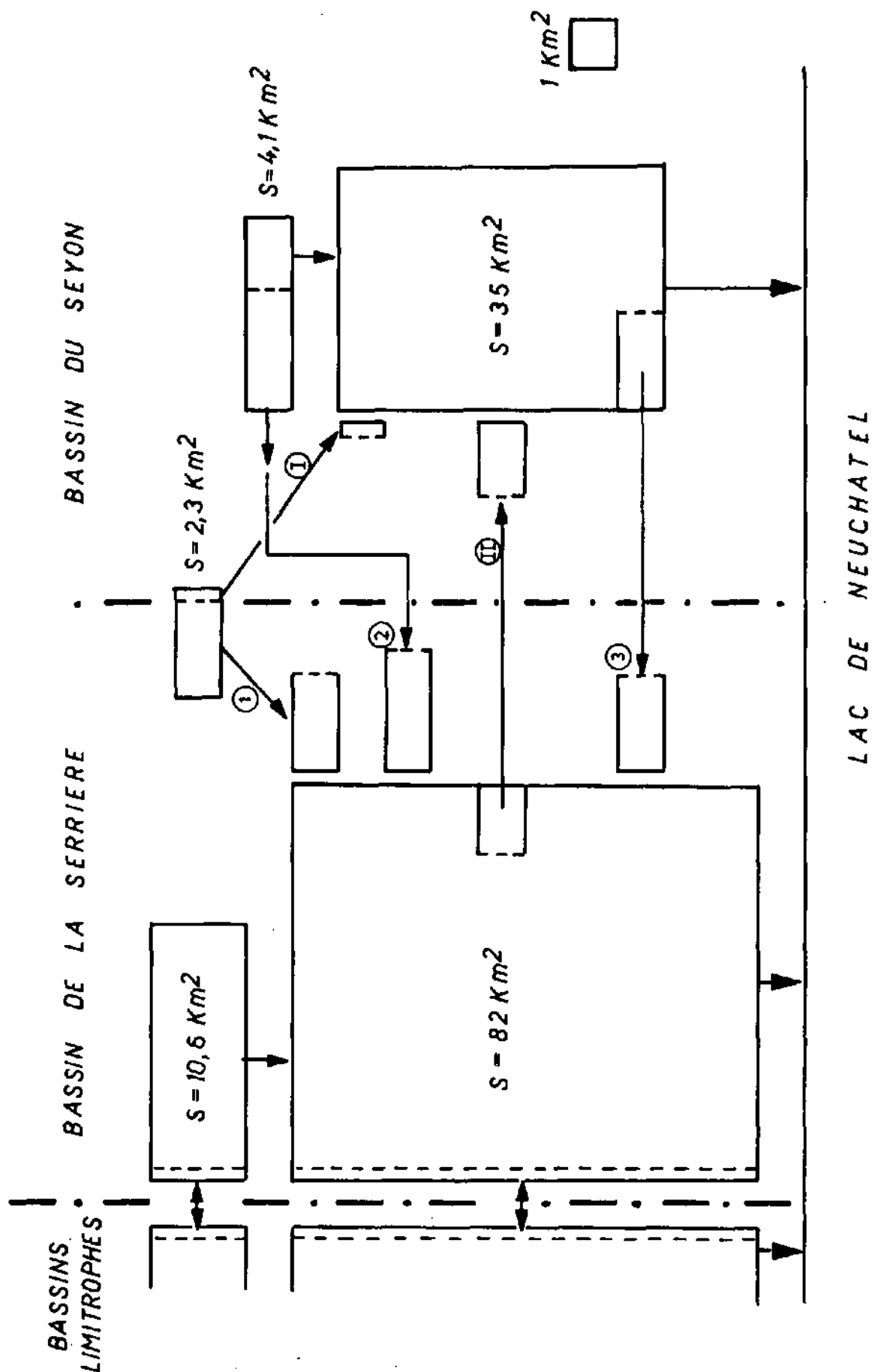


Figure V - 1 Surface des bassins versants de la Serrière et du Seyon; représentation schématique. 1) et 1): Apport des combes argoviennes. 2): Apport depuis la périphérie du bassin du Seyon. 3): Pertes du Seyon dans les gorges. II) Sources du Torret et de Sous le Mont. Les surfaces limitées par des traitillés sont incertaines ou varient au cours de l'année hydrologique.

3. RESEAU HYDROGRAPHIQUE

3.1. La Serrière.

Son tracé long de 650 mètres et son profil hypsométrique ont été profondément modifiés par les usiniers qui depuis longtemps s'en partagent les eaux et la force hydraulique. Actuellement une première retenue aux sbords de la source dérive la Serrière vers les Papeteries (hydroélectricité et eaux industrielles). Le second palier est constitué par la prise d'eau de la chocolaterie Suchard. Après turbinage la Serrière rejoint le lac de Neuchâtel. Son tracé naturel n'évêque plus que les crues, le débit de base étant totalement soustrait aux regards.

Tableau V-II

Superficie des bassins versants de la Serrière
et du Seyon

Bassin de la Serrière		
	Limites minimum ¹⁾	Limites maximum ²⁾
Non compris extension possible du bassin du Seyon	82,0 km ²	92,5 km ²
Avec surface du bassin du Seyon minimum	88,3 km ²	98,9 km ²

1) Non compris : Dogger Tête de Ren (2,8 km²), Dogger Prés à l'Ours (3,5 km²), synclinal de l'Echelette (3,5 km²), Marais des Pontins (0,7 km²)

2) Y compris 1)

Bassin du Seyon à Valangin

	Limites minimum	Limites maximum
Normal	35,0 km ²	39,1 km ²
En crue ³⁾	37,3 km ²	41,4 km ²

3) Maximum théorique, mais non compris la source du Torrent et les sources de Sous-le-Mont.

Extension possible : détail		Extension en crue : détail	
Sud de Coffrane	2,31 km ²	La Pâquier	0,15 km ²
Les Haute Geneveys	0,18	La Combe Bissée	0,45
Fontaines	0,34	Les Bugneta	0,63
Cernier-Chévard	1,09	Le Côté	0,19
Clémassin	0,12	Combe Mauley + Berthière	0,85
Total	4,06		2,28

3.2. Le Seyon.

De sa source Sous-le-Mont au lac de Neuchâtel le cours du Seyon est de 12,6 km. Cette distance doit naturellement être augmentée en période de crue lorsque le ruz Chassaran traverse la cluse de Chénav. Du haut de la Combe Berthière au lac son cours est alors de 21,5 km.

COURBES HYPSONOMETRIQUES

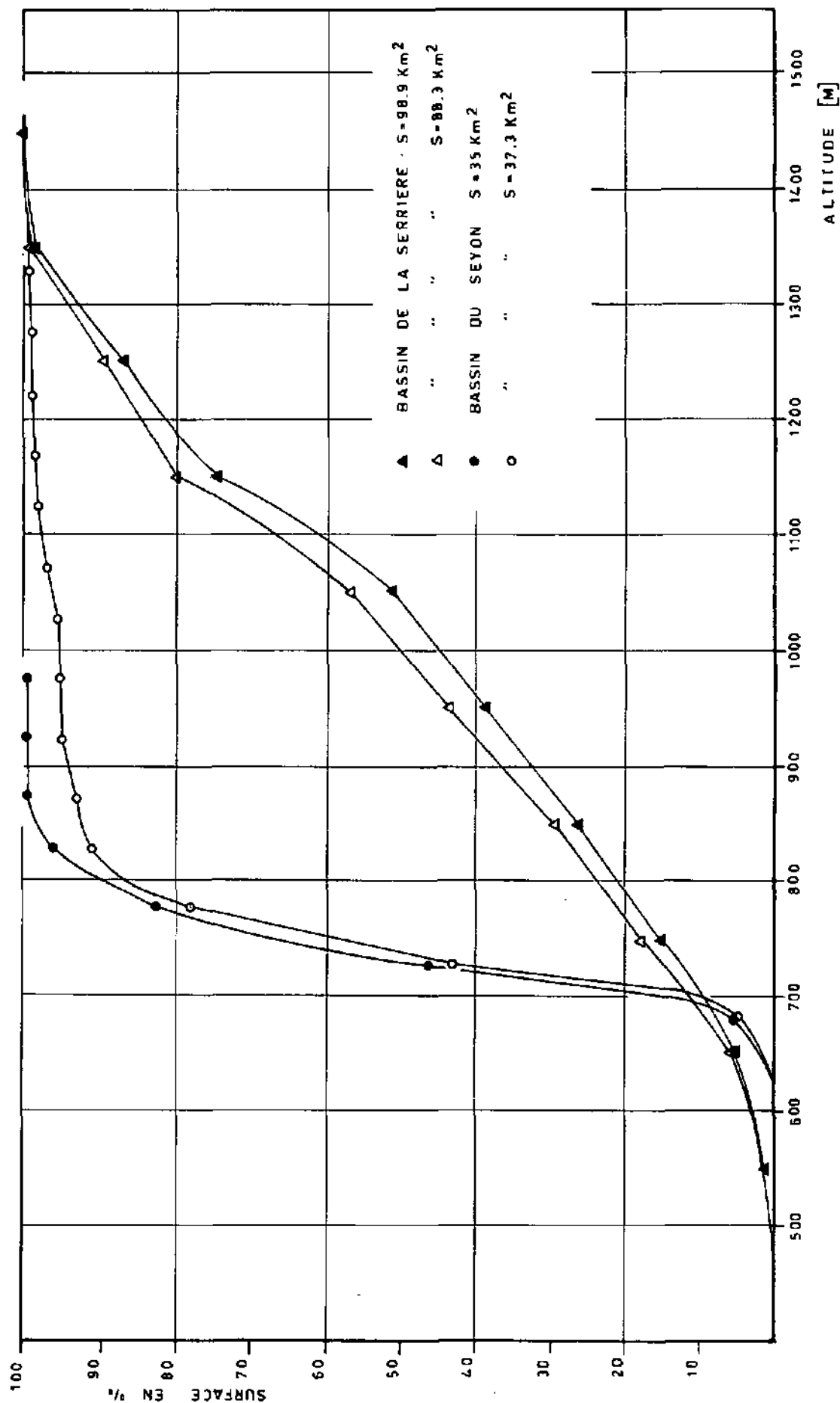


Figure V - 2 Bassin du Seyon et de la Serrière. Courbes hypsométriques

Parmi les distances caractéristiques citons :

Le Seyon	Le Ruz Chasseeran
Valangin - Neuchâtel 4,0 km	Combe Bissée - Villiers 6,7 km
Sous-la-Mont - Neuchâtel 12,6 km	Les Bugnats - Villiers 6,3 km
	Combe Berthière - Villiers 9,5 km
	Combe Mauley - Villiers 8,5 km

Alore qu'au début du siècle le Seyon et la Sorge actionnaient encore une demi douzaine de petites usines (SCHAPDT 1906), les deux dernières installations ont été récemment désaffectées (La Bortcarderie, Usine Touchon), ainsi que le canal de dérivation qui rejoignait à flanc de coteau l'usine des Valangins. C'est cette canalisation qui alimentait autrefois Neuchâtel en eau potable.

En 1839, pour éviter l'inondation périodique de la basse ville de Neuchâtel, le Seyon fut dérivé dans un tunnel de 250 mètres au travers de la colline du Château. Depuis cette date s'est formé progressivement dans le lac un delta graveleux qui comble lentement la baie de l'Évêlé.

Les principaux caractères physiques et morphologiques du Seyon et de ses affluents sont donnés au tableau V-III.

L'indice de compacité qui est égal à 1 pour un bassin de forme circulaire et croît avec son élongation est un peu plus faible pour les sous-bassins. Le Ruz Chasseeran fait exception en raison de la morphologie des combes agroviennes qui constituent son champ collecteur. La densité de drainage des sous-bassins définie par le rapport des longueurs cumulées des cours d'eau par la surface du bassin est toujours supérieure à celle du Seyon.

Une des particularités du bassin du Seyon est constituée par l'extension des zones asséchées par drainage : 29,3 km² ou 84 % de la surface du bassin (fig. IV-1). Espacées de 20 mètres voire de 15 mètres dans les terrains très peu perméables, ils constituent un véritable réseau hydrographique de sub-surface dont l'établissement a certainement modifié le régime de la rivière (diminution du temps de concentration des crues et accélération du tarissement) contrairement à ce qu'en dit SCHAPDT (1906).

L'abondance des tracés rectilignes témoigne des profondes modifications apportées au réseau hydrographique. A la classification des thalwegs définie par HORTON on pourra ajouter deux ordres liés au réseau de drainage, soit :

Ordre	Cours d'eau
-	Drain
-	Collecteur de drainage souterrain
1	Collecteur de drainage à ciel ouvert
2	Affluent principal du Seyon
3	Le Seyon à l'aval de la Rincière

4. HYPSONETRIE

4.1. Le bassin de la Serrière.

Il est essentiellement constitué par le versant sud de la chaîne anticlinale Mont Racine - Mont d'Amin et ne comprend pas de fonds synclinaux comme le bassin de la source de la Doux, ce qui est clairement mis en évidence par les courbes hypsométriques (Fig. V-2) et le résultat des planimétrages. (tableau V-IV). Quelles que soient les limites considérées, l'allure générale des courbes ne change guère: toutes les tranches d'altitude entre 700 et 1400 mètres sont relativement égales d'où leur tendance à la linéarité.

L'altitude moyenne du bassin est comprise entre 1028 et 1064 mètres suivant l'extension retenue.

Tableau V-III

Le Seyon et ses affluents principaux : caractères physiques et morphologiques.

Ruisseau	Surface du bassin versant (A) [km ²]	Longueur tot. des cours d'eau (ΣL _x) [km]	Périmètre du bassin versant (P) [km]	Indice de ¹⁾ compacité (C)	Longueur du rectangle équivalent (L) ²⁾	Densité ³⁾ de drainage (Dd)	Pente moyenne du bassin [%]
Le Seyon à Valengin	15,0	42,9	30,2	1,43	12,2	1,22	11,6
Le Seyon à Valengin	39,1	42,9	35,5	1,59	15,2	1,10	12,0
Le Sarge à Valengin	6,2	9,5	13,5	1,52	5,65	1,53	10,3
Le Ruz d'Amont à la Borcarderie	3,9	7,6	9,2	1,31	3,49	1,96	-
Le Marguenet à La Bonneville	4,8	6,7	10,0	1,27	3,67	1,60	-
Le Rossy à la Rincière	3,4	6,3	9,5	1,45	3,88	1,54	-
Le Vernelet à la Rincière	0,9	1,3	4,0	1,19	1,33	1,47	-
Le Ruz Chassan à Cheneau	2,3	15,3	26,4	4,87	13,01	6,62	-

1) $C = 0,28 P \cdot A^{-\frac{1}{2}}$

3) $Dd = \frac{\sum L_x}{A}$

2) $L = A^{\frac{1}{2}} \frac{C}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{C} \right)^2} \right]$

4.2. Le bassin du Seyon.

Près de 80% de la surface du bassin est comprise entre 700 et 800 mètres d'altitude et son altitude moyenne entre 760 et 784 mètres (tableau V-V). Le contraste avec la bassin de la Serrière est frappant.

Tableau V-IV

Hypsométrie du bassin de la source de la Serrière

Altitude [m]	Surface [km ²]			
	S = 88,3 km ²	S = 98,9 km ²	S = 82,0 km ²	S = 92,5 km ²
400 - 500	0,04 km ²	0,04 km ²	0,04 km ²	0,04 km ²
500 - 600	1,0	1,0	1,0	1,0
600 - 700	3,7	3,6	3,6	3,6
700 - 800	10,4	10,4	7,6	7,6
800 - 900	10,6	10,6	9,6	9,6
900 - 1000	12,4	12,4	11,8	11,8
1000 - 1100	12,1	12,5	11,4	11,6
1100 - 1200	20,1	22,9	19,4	22,2
1200 - 1300	8,4	12,6	8,3	12,5
1300 - 1400	8,6	11,9	8,3	11,6
1400 - 1500	1,0	1,0	1,0	1,0
Altitude moyenne	1028 m	1053 m	1040 m	1064 m
Point le plus haut	1485 m	1485 m	1485 m	1485 m
Point le plus bas	475 m	475 m	475 m	475 m

Tableau V-V

Hypsométrie du bassin du Seyon à Valengin

Altitude [m]	Surface [km ²]				
	S = 35,0 km ² I	S = 39,1 km ² II	S = 2,3 km ² III	S = 37,3 km ² I + III	S = 41,4 km ² II + III
600 - 650	0,1	0,1		0,1	0,1
650 - 700	1,7	1,7		1,7	1,7
700 - 750	14,2	14,5		14,2	14,5
750 - 800	12,8	15,3		12,8	15,3
800 - 850	5,1	6,0		5,1	6,0
850 - 900	1,0	1,0	0,1	1,1	1,2
900 - 950	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
950 - 1000	0,04	0,2	0,1	0,1	0,3
1000 - 1050		0,1	0,1	0,1	0,2
1050 - 1100			0,6	0,6	0,6
1100 - 1150			0,4	0,4	0,4
1150 - 1200			0,2	0,2	0,2
1200 - 1250			0,1	0,1	0,1
1250 - 1300			0,1	0,1	0,1
1300 - 1350			0,2	0,2	0,1
1350 - 1400			0,2	0,2	0,1
1400 - 1450			0,02	0,02	0,02
Altitude moyenne	760 m	765 m	1112 m	781 m	784 m
Point le plus haut	980 m	1030 m	1389 m	1389 m	1389 m
Point le plus bas	630 m*	630 m*	880 m	630 m*	630 m*

* Bassin du Seyon à Neuchâtel : 431 m

4.3. Pente moyenne des bassins de la Sorge et du Seyon.

Plusieurs méthodes existent pour calculer la pente moyenne d'un bassin. Celle décrite par CUCCHINI (1969) a l'avantage d'être rapide et précise. La pente moyenne est donnée par la formule

$$I_m = K \cdot \frac{\sum_{i=1}^{M+m/2} N_i}{M+m/2} [\%]$$

où N_i = nombre d'isohypse de la i ème maille

M = nombre de mailles recouvrant entièrement le bassin

m = nombre de mailles recouvrant partiellement le bassin

K est un coefficient dépendant de l'échelle de la carte et des dimensions des mailles carrées de la grille appliquée comme masque.

$$K = \frac{100 \cdot e}{b \cdot s}$$

où e = équidistance entre 2 courbes de niveau [m]

b = longueur du côté de la maille du masque [m]

s = dénominateur de l'échelle de la carte topographique

Dans le cas du bassin de la Sorge on trouve (carte au 1/25'000 et maille de 0,02 m):

$$K = 2 \quad I_m = 2 \cdot \frac{65 + 128/2}{17 + 16/2} = 10,3 \%$$

On constate que si le nombre de mailles à l'intérieur et en bordure du bassin est à peu près égal (16 et 17), les mailles situées à la périphérie recouvrent des surfaces dont la pente moyenne est environ 2 fois plus élevées.

Un calcul analogue pour le bassin du Seyon donne respectivement 11,6 % et 12 % suivant que l'on considère le bassin en période d'étiage ($S = 35 \text{ km}^2$) ou de crue ($S = 37,3 \text{ km}^2$).

4.4. Pente moyenne des thalweg.

Les profils en long du Seyon et de la Sorge sont représentés à la figure V-3.

La détermination de la pente moyenne des thalweg a été effectuée à partir d'une méthode décrite par NASH (1960, p. 257). Le profil de la rivière étant reporté graphiquement on trace une oblique rejoignant la courbe à l'exutoire de telle façon que la surface du triangle rectangle qu'elle détermine (de l'exutoire à l'extrémité du bassin) soit équivalente à la surface délimitée par la courbe décrivant le thalweg. La recherche de la droite dont la pente moyenne donne l'inclinaison du thalweg peut être effectuée numériquement à partir du résultat du planimétrage de la surface déterminée par la courbe.

On trouve :

Le Seyon à Neuchâtel	$P = 3,3 \%$
Le Seyon à Valangin	$P = 1,4 \%$
Le Seyon entre Valangin et Neuchâtel	$P = 5,2 \%$
La Sorge à Valangin	$P = 4,1 \%$

On relève le fort accroissement de la pente du Seyon à l'aval de Valangin au travers de la cluse qui traverse la première chaîne anticlinale jurassienne.

Alors que pour de nombreux cours d'eau le profil d'équilibre du thalweg décrit généralement une parabole, celui du Seyon est du type courbe en S avec un point d'inflexion dans la région de Bayerel. L'équation de la courbe estimée par la méthode des moindres carrés est une fonction du 4ème degré.

$$H_D = 432,0 + 46,27 D + 4,70 D^2 - 1,22 D^3 + 0,058 D^4$$

où H_D et D sont respectivement l'altitude en mètres et la distance à l'exutoire en kilomètres. A l'exutoire $H_D = 430$ et $D = 0$

sa dérivée qui est la pente de la courbe vaut

$$P_D = \frac{dH_D}{dD} = 46,27 + 9,40 D - 3,66 D^2 + 0,23 D^3$$

et le gradient de la pente exprimant la variation de la pente en un point donné

$$\text{grad } P = \frac{d^2 H_D}{dD^2} = 9,40 - 7,32 D + 0,69 D^2$$

Dans le cas de la Sorge le profil correspond à une courbe du 3ème degré

$$H_D = 639,0 + 60,39 D - 9,41 D^2 + 1,22 D^3$$

$$P_D = 60,39 - 18,82 D + 3,66 D^2$$

$$\text{et grad } P = - 18,82 + 7,32 D$$

Le Seyon est donc loin d'avoir atteint un profil d'équilibre. Sur la courbe décrivant la pente du thalweg on distingue deux fronts où l'érosion régressive est prépondérante. Le premier est constitué par la barre calcaire de la première chaîne anticlinale jurassienne, le second s'étend depuis Valangin en direction Bayerel.

Dans le haut bassin, le cône de déjection du Seyon aux Prés Royer est une zone de dépôt que l'érosion régressive en cours depuis la cuvette de Valangin viendra entamer dans plusieurs millénaires.

Dans le cas de la Sorge un front d'érosion régressive pour l'instant peu marqué se développe dans la région de Valangin.

LE SEYON ET LA SORGE : PROFILS EN LONG DES THALWEGS

pente moyenne: le Seyon à Neuchâtel: 3.3 ‰

" à Valangin: 1.4 ‰

la Sorge à Valangin: 4.1 ‰

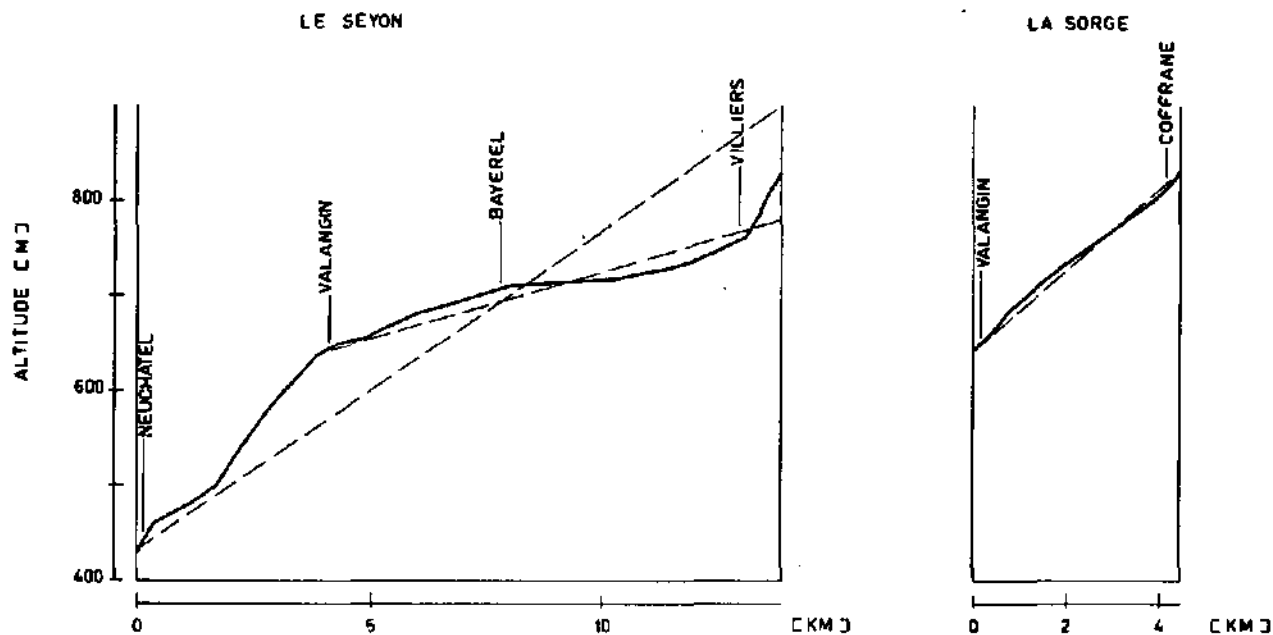


Figure V - 3 Profils en long des thalwegs du Seyon et de la Sorge.

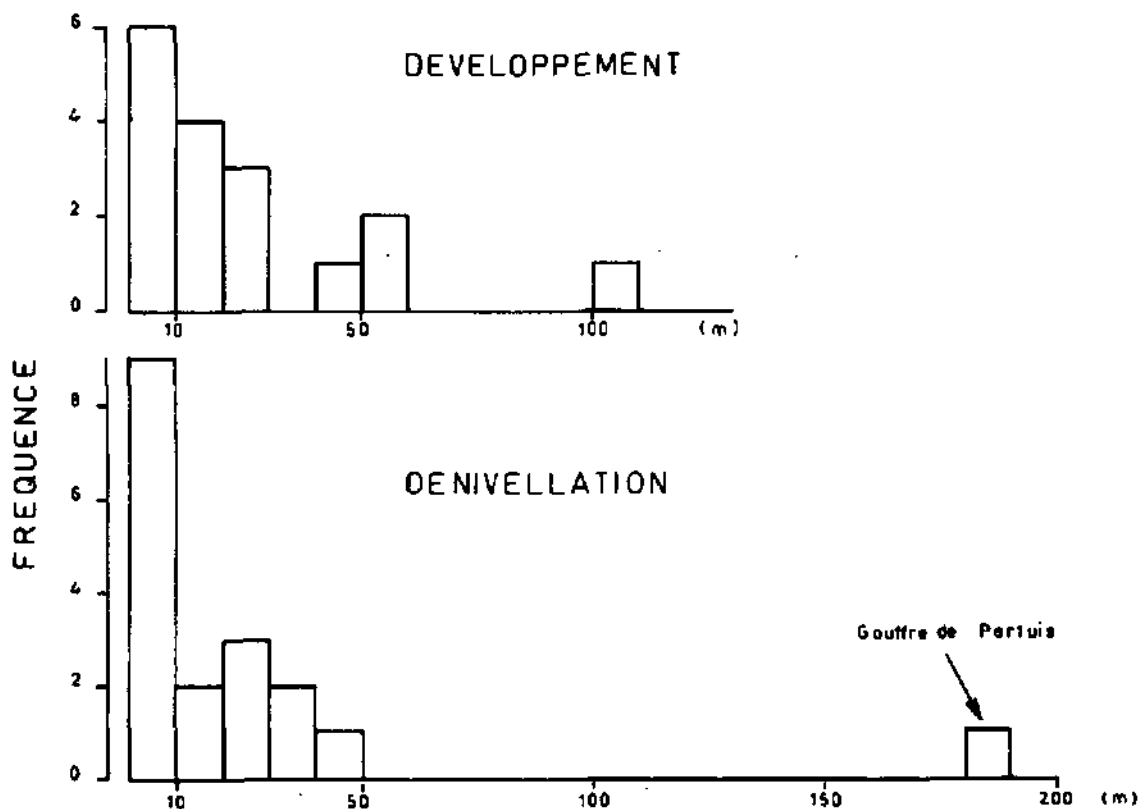


Figure V - 4 Histogrammes des développements et des dénivellations des cavités du district du Val de Ruz. (Le gouffre de Pertuis ne figure pas dans l'histogramme des développements).

5. MORPHOLOGIE ET RELIEF

5.1. Le bassin du Seyon.

L'extension et le relief des terrains oligocènes n'est connu que par des relevés géophysiques. Entre St Martin et Sevagnier le toit de la molasse repéré par sismique (MORNOU 1970) ne présente pas de dépression marquée qui constituerait un ancien lit du Seyon. Entre Sous Vy et Champ Rod, au Sud de Chérard un sondage géoélectrique a révélé une épaisseur supérieure à 200 mètres de couverture tertiaire et quaternaire (MEIER de STADELMAN, comm orale). Citons également le sillon molassique mis en évidence par géoélectricité au Sud de Coffrane (POLDINI 1964).

Le relief actuel est typiquement glaciaire, particulièrement au SW de Boudrevilliers où alternent cordons morainiques de retrait et formations fluvioglaciaires. Au NW, où le moraine argilasse domine le relief est plus doux et marqué par une succession de petites collines séparées par des ruz orientés NW - SE qui rejoignent la Seyon.

5.2. Le bassin de la Serrière.

5.2.1. Ablation karstique .

L'étude des mécanismes de l'ablation karstique n'entrant pas dans le cadre de ce travail, on se référera aux travaux d'AUBERT (1969), MISEREZ (1973) et POCHON (1974).

JAMIER et MATHEY (1977) ont montré le rôle de la tectonique dans l'orientation des dépressions karstiques. Si la fissuration et les phénomènes d'érosion se conjuguent pour développer le modelé, certains systèmes de fissures sont très mal représentés dans la morphologie. Des facteurs complémentaires, comme la pente du terrain jouent un rôle certainement important dans le creusement des dépressions karstiques.

L'importance de la couverture sédimentaire post-glaciaire, essentiellement éolienne (POCHON 1974, op cit.) a été soulignée par AUBERT (1969 op cit):

"Dans la région située à l'Est de la ligne Vallorbe - Pontarlier (décrochement de Pontarlier) qui n'a guère été soumise à l'influence glaciaire, la roche est recouverte dans sa plus grande étendue d'un sol épais et continu qui dissimule ou atténue les formes caractéristiques de la dissolution. C'est le Jura pelouse".

Effectivement, dans le bassin de la Serrière, rares sont les lapiés qui ne soient pas envahis par la végétation. BURGER (1959) utilise le terme d'essart pour caractériser ce stade avancé de la dégradation des lapiés avant leur disparition. Un beau champ lapiaire en voie de comblement qui peut être observé sur le boutonnière de Grande Colithe de la Joux du Plâne témoigne d'une "lapiézation" récente.

5.2.2. Combes et dolines.

De la présence d'horizons marneux dans une lithologie essentiellement calcaire résulte une morphologie typiquement jurassienne où alternent combes et crêtes. La plus épaisse, formée par les marno-calcaires argoviens trace deux profonds sillons qui encadrent le cœur résistants de Dogger de la chaîne anticlinale, du Mont Racine à la Joux du Plâne. De nombreuses dolines jalonnent les combes argoviennes, révélant une circulation d'eau dans la zone d'altération. Elles sont particulièrement abondantes entre Derrière Pertuis et la Joux du Plâne où elles sont parfois anastomosées. Au niveau du Dogger, Calcaires roux sableux et Marnes blanches révèlent leur zone d'affleurement par un "rasplet" caractéristique accompagné d'une végétation de type marécageux ou même un véritable marais comme à la Joux du Plâne. Dolines en forme de cuvette et étangs y sont fréquents.

Les marnes et marno-calcaires du Pürbeckien provoquent généralement une rupture de pente. Des dolines, qui ne doivent pas être confondues avec d'anciennes marnières, jalonnent les affleurements de l'Hauterivien inférieur.

6. COUVERTURE VEGETALE

Dans le bassin de la Serrière, champs, prairies et pâturages d'une part, et forêts, sont d'importance à peu près égale. (Tableau V-VI). Relevons que les surfaces forestières englobent les pâturages boisés également lorsqu'ils figurent sur l'Atlas topographique au 1 : 25'000. Comme dans le bassin de l'Areuse (BURGER 1959) les sols favorables aux prairies et à la culture sont généralement situés sur les formations morainiques ou les affleurements marneux du Jurassique et du Crétacé. Les pentes y sont plus douces et l'abondance des éléments fins y favorise la rétention d'eau capillaire plus que sur les bancs calcaires aux sols peu épais qui sont maintenant boisés ou en pâturages. En altitude (1100-1400 m) les prairies ont été progressivement transformées en pâturages.

Une carte phytosociologique des forêts du canton de Neuchâtel a été levée par RICHARD (1964). La répartition potentielle des essences forestières est la suivante : au-dessous de 600 mètres la hêtraie domine; au-dessus on trouve une hêtraie à sapins qui passe à une hêtraie à érablée dans les zones d'altitude élevée.

La surface forestière est aujourd'hui plus importante qu'à la fin du 18ème siècle (AUBERT comm. orale). Pour des raisons économiques la sylviculture tend actuellement à favoriser la croissance des résineux (épicéa surtout) dans toutes les tranches d'altitude avec comme conséquence le développement d'une végétation arboricole secondaire parfaitement contrôlée par l'homme s'éloignant progressivement de la végétation potentielle. Les conséquences hydrologiques de ces modifications n'ont pas été étudiées faute de données suffisantes.

Le bassin du Seyon est recouvert de prairies et de champs cultivés. Quelques forêts pseudo-naturelles subsistent, en particulier le long du Seyon entre la Rincieure et la Borcarderie (GALANDAT comm. orale).

Tableau V-VI

Répartition de la couverture végétale dans les bassins
de la Serrière et du Seyon

Bassin	Champs, prairies et pâturages		Forêts	
	km ²	%	km ²	%
Bassin de la Serrière S = 86,3 km ²	44,1	50,2	44,0	49,8
S = 98,9 km ²	53,4	54,0	45,5	46,0
Dagger seul S = 10,1 km ²	8,8	87,3	1,3	12,7
Bassin du Seyon S = 35,0	33,3	95,3	1,7	4,7
S = 39,1	37,3	95,3	1,8	4,7

7. SPELEOLOGIE

7.1. Fréquence des cavités.

Dans un inventaire descriptif des cavités naturelles du canton de Neuchâtel, GIGON (à paraître) décrit 20 cavités sur le territoire du district du Val de Ruz, celui-ci recouvrant sensi-

blement les bassins de la Serrière et du Seyon. On se référera à cet ouvrage très complet pour l'obtention de données techniques.

Il s'agit de gouffres peu profonds ou de grottes au développement restreint qui s'ouvrent pour la plupart dans les calcaires du jurassique supérieur (2 cavités dans le Dogger, 1 dans le Crétacé). Un histogramme des développements et des dénivellations de ces cavités est donné à la figure V-4. Les deux distributions sont nettement de type log-normal.

Les 4 plus grandes cavités sont :

	Développement	Dénivellation
Gouffre de Pertuis	725 m	189 m ¹⁾
Gouffre de la Combe Mauley	60	45
Gouffre de Sous-la-Mont	40	31
Gouffre Mauler	55	33

1) -163 → +26

7.2. Le gouffre de Pertuis.

Il s'agit de la cavité la plus importante du canton de Neuchâtel dont GIGON (1964, 1967) a fait l'historique des aménagements et des explorations. Depuis 1963, les eaux de crue du ruisseau issu des Combes Mauley et Berthière sont déversées dans le gouffre qui absorbe des débits supérieurs à 1 mètre cube par seconde (chap. IV-2.8). Depuis cette date tous les puits situés sur le passage de l'eau se sont approfondis en raison de la disparition des pierriers. Alors que l'entraînement de ces matériaux aurait dû logiquement combler la salle du fond, celle-ci s'est approfondie de 8 mètres, phénomène qui se poursuit (BALLMER et STOCCO 1974). L'installation d'électrodes au fond du gouffre, s'échelonnant entre 2 et 10 mètres a permis de constater une mise en charge atteignant 8 mètres lors de fortes crues.

Cette dérivation représente un apport souterrain au bassin de la Serrière au dépend du bassin du Seyon. Il est en effet extrêmement rare que le ruisseau qui inonde le synclinal du Côté rejoigne le ruz Chasseran à la Croix.

CHAPITRE VI

LES FACTEURS METEOROLOGIQUES

Au cours de l'année, la quantité d'eau qui s'élève égale celle qui descend dans les fleuves et l'air.

Leonard de Vinci : Carnets.

1. LES PRECIPITATIONS

1.1. Réseau d'observation.

Deux périodes ont été sélectionnées pour l'étude des précipitations. La première a été choisie en raison des mesures de débit qui étaient effectuées simultanément sur le Seyon et la Serrière (1901 à 1925). La liste des stations pluviométriques, toutes sous contrôle de l'Institut Suisse de Météorologie (ISM) est donnée au tableau VI-I.

La seconde période couvre les années 1969 - 1972. Aux stations de l'ISM s'ajoutent celles mises en place dans le cadre de la présente étude ainsi que celles rattachées à l'étude du bassin de la Noiraigue (tableau VI-II). Ces relevés journaliers inédits sont déposés au Centre d'Hydrogéologie. Durant cette période l'équipement pluviométrique était complété par un pluviographe de type Hellmann installé au Sorgereux (I 1969-VIII 1970) puis à Dombresson (IX 1970-IX 1972). De janvier 1971 à octobre 1972, les frais de surveillance des stations ont été supportés par le Service cantonal des Ponts et Chaussées dans le cadre d'un système de prévision des crues du Seyon.

Les pluviomètres sont tous de type Hellmann, normalisés (surface de réception : 200 cm²). Les précipitations journalières sont mesurées le matin, en principe à 7 h 30 et rapportées au jour précédent. Les directives données aux observateurs sont toujours celles de l'ISM.

1.2. Répartition régionale des précipitations.

Dans son étude hydrogéologique du bassin de la Doux, TRIPET (1972), relève les tendances générales de la pluviométrie du Jura helvétique.

"Entre le Grand Crodo et Vallorbe, la hauteur de pluie dépasse 2000 mm sur les crêtes du Jura. Au NE de Vellerbe les valeurs ne dépassent pas 2000 mm, puis 1600 mm à partir du Creux du Van." L'axe pluvieux du Jura est également dissymétrique: la pluviosité diminue rapidement en direction du Plateau suisse, alors qu'elle ne décroît que très lentement vers l'extérieur de la chaîne jurassienne.

Les bassins de la Serrière et du Seyon sont situés dans une zone de transition où les maxima sont compris entre 1400 et 1600 mm.

Notons également que la chaîne jurassienne est soumise aux vents doux et humides venant de l'Atlantique et dont les dépressions qui les accompagnent apportent la majeure partie des précipitations.

Tableau VI-I Bassins du Seyon et de la Serrière : Modules pluviométriques mensuels et annuels
exprimés en mm pour la période 1901 - 1925

Moyenne x

Station	Coordonnées	Altitude	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
NEUCHÂTEL	563.110/205.600	478 m	64	67	71	77	79	94	85	100	81	72	86	100	976
VALANGIN		660 m	77	77	79	84	87	102	91	101	82	78	92	116	1066
CHAMBRELIEN	552.320/201.950	685 m	80	86	96	102	97	102	95	110	91	92	110	129	1193
CHAUMONT	563.840/208.830	1127 m	71	74	84	91	95	116	105	118	96	87	95	113	1144
SERRIERE	559.290/203.640	462 m	51	55	57	64	71	82	73	88	69	62	75	82	829
FONTAINEMELON	557.520/211.750	980 m	120	110	121	129	120	124	121	137	124	122	134	175	1537
BOUDRY		500 m	71	73	84	90	89	101	89	111	88	84	108	111	1094
DOMBRESSON	563.470/213.280	735 m	79	73	78	85	86	102	94	106	89	82	93	118	1085
CERNIER	559.650/212.100	790 m	94	87	95	100	97	103	107	111	95	97	107	128	1221
MALVILLIERS	556.680/209.140	835 m													1327
TETE DE RAN	555.800/211.770	1325													1369

Ecart type s

Station	Coordonnées	Altitude	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
NEUCHÂTEL	563.110/205.600	478 m	44	45	45	43	38	50	44	44	42	50	62	56	183
VALANGIN		660 m	49	50	48	43	40	52	50	44	43	53	60	66	162
CHAMBRELIEN	552.320/201.950	685 m	48	60	55	52	46	47	53	48	44	62	72	71	203
CHAUMONT	563.840/208.830	1127 m	40	48	44	42	43	58	54	51	48	59	56	68	168
SERRIERE	559.290/203.640	462 m	35	38	36	36	34	46	39	39	39	51	54	49	141
FONTAINEMELON	557.520/211.750	980 m	66	72	73	64	50	58	65	60	53	78	80	98	269
BOUDRY		500 m	53	48	51	48	42	56	57	53	45	63	97	65	249
DOMBRESSON	563.470/213.280	735 m	51	45	46	41	38	54	52	44	39	53	54	63	187

Sources : Annuaire pluviométrique de la Suisse et Institut Suisse de météorologie (ISM) à Zürich

Tableau VI-II

Modules pluviométriques 1969 - 1972 des stations considérées
pour les bassins de la Serrière et du Seyon.

Station	Coordonnées	Altitude	Précipitations mm				Moyenne 1969-1972
			1969	1970	1971	1972	
NEUCHÂTEL	563.110/205.600	478 m	965	1106	779	765	903
AREUSE	555.890/200.900	438 m	840	1211	730	768	887
CHAUMONT	565.200/211.220	1141 m	1123	1328	854	903	1067
COMBE GAROT	551.210/201.460	532 m	1256	1700	962	1101	1254
BOUDEVILLIERS	558.210/208.580	755 m	1039	1398	828	865	1032
LE SORGEREUX 1)	558.480/207.530	720 m	962	-	-	-	-
VILARS 1)	561.120/209.160	742 m	869	1164	682	(716)	858
DOMBRESSON 1)	563.310/213.520	740 m	-	-	888	-	-
CERNIER 1)	559.710/212.000	780 m	1030	1410	960	(950)	1087
LA TOURNE 2)	550.840/204.380	1131 m	(1165)	1579	876	1010	1257
LES VIEUX PRES 1)	561.850/214.870	1030 m	1284	1645	955	(1029)	1228
LES BUGNENETS 1)	566.610/218.560	1093 m	1344	1763	885	(995)	1246
TETE DE RAN 2)	555.770/211.820	1325 m	(1394)	1863	1109	1178	1386
BOINOD 2)	555.920/214.510	1167 m	(1167)	1587	912	973	1199

1) Stations implantées dans le cadre de l'étude des bassins du Seyon et de la Serrière.

2) " " " " " " " du bassin de la Noireique.

() Valeurs obtenues par régression avec la station de Boudevilliers.

1.3. Distribution et fréquence des précipitations.

1.3.1. Précipitations journalières.

L'ajustement d'une loi théorique de répartition des fréquences des précipitations journalières à partir de l'histogramme des observations a été réalisé pour les stations de Neuchâtel et La Chaux-de-Fonds. La méthode de calcul utilisée est celle développée à l'Institut de Génie Rural de l'EPFL par A. MUSY (1973) qui nous a communiqué les résultats de l'analyse statistique des précipitations journalières de ces deux stations (tableaux VI-III et VI-IV).

Tableau VI-III

Analyse statistique des précipitations journalières : 1901 - 1971
Station de NEUCHÂTEL

Coordonnées 205/600
563/110

	NJP	NJP %	$\bar{x}$ mm	$\bar{x}$ mm	m_3 mm	m_4 mm	x_{max} mm	$v=s/\bar{x}$	$a_3=m_3/s^3$	$a_4=m_4/s^4-3$
ANNEE	10519	40.0	6.7	7.70	1140	42469	80.4	1.16	2.51	8.99
MOIS										
I	1455	41.0	6.2	6.88	781	25279	52.0	1.10	2.40	8.27
II	1358	39.1	5.9	6.51	598	16236	44.8	1.10	2.17	6.05
III	1411	39.2	5.7	6.32	551	14588	46.0	1.11	2.18	6.12
IV	1508	41.9	5.4	6.02	535	14764	49.0	1.12	2.45	8.25
V	1597	43.5	6.1	7.10	922	30551	61.1	1.16	2.58	9.02
VI	1569	43.6	7.1	8.11	1220	41477	61.1	1.14	2.28	6.57
VII	1468	40.0	7.6	8.40	1300	44259	55.6	1.11	2.19	5.89
VIII	1439	39.2	7.7	8.68	1438	52045	60.1	1.12	2.20	6.18
IX	1339	37.2	7.5	8.63	1468	56477	66.3	1.15	2.29	7.20
X	1325	36.1	7.2	8.58	1602	63964	66.3	1.19	2.53	8.80
XI	1450	40.3	7.1	8.61	1829	83824	80.4	1.20	2.87	12.26
XII	1473	40.7	6.3	7.27	906	29973	59.4	1.12	2.36	7.72

NJP : nombre de jours de pluie. $\bar{x}$: précipitations journalière moyenne rapportée à NJP. s : écart type.
 m_3 , m_4 : moments d'ordre 3 et 4. x_{max} : précipitation maximum. v : coefficient de variation.
 a_3 : coefficient d'asymétrie. a_4 : coefficient d'éplatissement.

Cette analyse couvre les années 1901 à 1971 (72 ans) soit 26'298 jours.

Le nombre de jours de pluie ≥ 0.3 mm (NJP) représente le 40 % du nombre de jours totaux à Neuchâtel et le 46 % à La Chaux-de-Fonds. Avril, Mai et Juin sont les mois où le nombre de jours de pluie (NJP) est le plus élevé mais les différences d'un mois à l'autre au cours de l'année restent faibles.

La moyenne des hauteurs journalières ($\bar{x}$) rapportée au nombre de jours de pluie est de 6,7 mm à Neuchâtel et de 8,6 mm à La Chaux-de-Fonds. Les différences d'un mois à l'autre sont mineures. Le maximum qui a lieu au mois d'août aux deux stations est à mettre sur le compte des orages fréquents à cette époque de l'année.

L'écart type (s) des hauteurs journalières est légèrement supérieur à la moyenne de ces dernières. Août, septembre et novembre pour Neuchâtel et août, novembre et décembre donnent les écarts types les plus hauts, mais là également les différences d'un mois à l'autre sont faibles. L'examen de ces 3 paramètres (NJP, $\bar{x}$, s) confirme que les précipitations sont bien réparties au cours de l'année hydrologique.

Les maxima journaliers 1901 - 1971 x_{max} valent :

Neuchâtel 80,4 mm (XI)
La Chaux-de-Fonds 98,5 mm (I)

Les moments d'ordre 3 et 4 (m_3 , m_4), le coefficient de dispersion ou de variation ($v=s/\bar{x}$), le coefficient d'asymétrie ($a_3=m_3/s^3$) et le coefficient d'aplatissement ($a_4=m_4/s^4-3$) renseignent sur la forme générale de l'histogramme des fréquences. Ils montrent un étalement de la distribution statistique vers les fortes valeurs (asymétrie positive) ainsi qu'un pic de la courbe des fréquences par rapport à la courbe de Gauss ($a_4 > 0$, courbe leptocurtique). Ces résultats concordent avec ceux obtenus par MUSY (1973 et comm. orale) pour d'autres stations de Suisse romande.

Comme pour ces dernières, la loi de K. Pearson III, équivalente à une loi Γ à 2 paramètres décrit bien l'ellure générale de la distribution des fréquences des pluies journalières à Neuchâtel et à La Chaux-de-Fonds. Le contrôle de l'ajustement a été réalisé par le test du χ^2 de Pearson.

Connaissant l'écart type, la moyenne et les moments d'ordre 2 et 3 de la série statistique ainsi que la loi de distribution (Pearson III) on pourra calculer la fréquence de dépassement des hauteurs journalières pour la période de retour choisie à l'aide d'une méthode du type de celle utilisée par MUSY (1974).

Tableau VI-IV

Analyse statistique des précipitations journalières : 1901 - 1971
Station de LA CHAUX-DE-FONDS

Coordonnées 217/870
553/950

	NJP	NJP %	$\bar{x}$ mm	s mm	m_3 mm	m_4 mm	x_{max} mm	$V=s/\bar{x}$	$a_3=m_3/s^3$	$a_4=m_4/s^4-3$
ANNEE	12281	46.7	8.6	9.37	1907	86505	98.5	1.09	2.32	8.22
MOIS										
I	1725	48.6	8.6	9.69	2316	117520	98.5	1.13	2.55	10.34
II	1632	47.0	7.9	8.76	1413	48331	56.5	1.11	2.10	5.21
III	1706	47.4	7.4	8.00	1145	39135	63.1	1.08	2.23	6.54
IV	1871	52.0	7.4	7.97	1232	48448	70.7	1.07	2.43	9.00
V	1902	51.8	8.0	8.87	1799	81096	78.6	1.10	2.56	10.08
VI	1792	49.8	9.0	9.25	1560	60735	78.6	1.02	1.97	5.29
VII	1663	45.3	9.3	9.46	1606	60915	68.5	1.02	1.90	4.60
VIII	1608	43.8	9.4	10.08	2281	111640	93.6	1.07	2.23	7.83
IX	1511	42.0	9.3	9.76	2112	106900	93.6	1.05	2.27	8.78
X	1505	41.0	9.3	9.72	19640	92193	83.5	1.05	2.14	7.31
XI	1677	46.6	9.2	10.37	2669	132290	86.6	1.12	2.39	8.43
XII	1738	48.0	8.8	9.78	2316	112530	86.6	1.11	2.47	9.23

Légende : cf tableau VI-III

1.3.2. Précipitations mensuelles.

L'histogramme des précipitations mensuelles entre 1901 et 1925 pour les stations de Neuchâte, Valengin, Chambrélan, Chaumont et Serrière est donné à la figure VI-1 (intervalle des classes = 20 mm). On constate là également un étalement de la courbe vers les fortes valeurs (asymétrie positive). On relèvera que les valeurs mensuelles de ces 5 stations n'atteignent jamais 300 mm.

1.3.3. Précipitations annuelles.

L'histogramme des précipitations annuelles 1901 - 1925 (intervalle des classes = 100 mm) pour les 5 stations précitées révèle également le caractère asymétrique de la loi de répartition. (Fig. VI-2).

HISTOGRAMMES
Précipitations mensuelles
 1901-1925

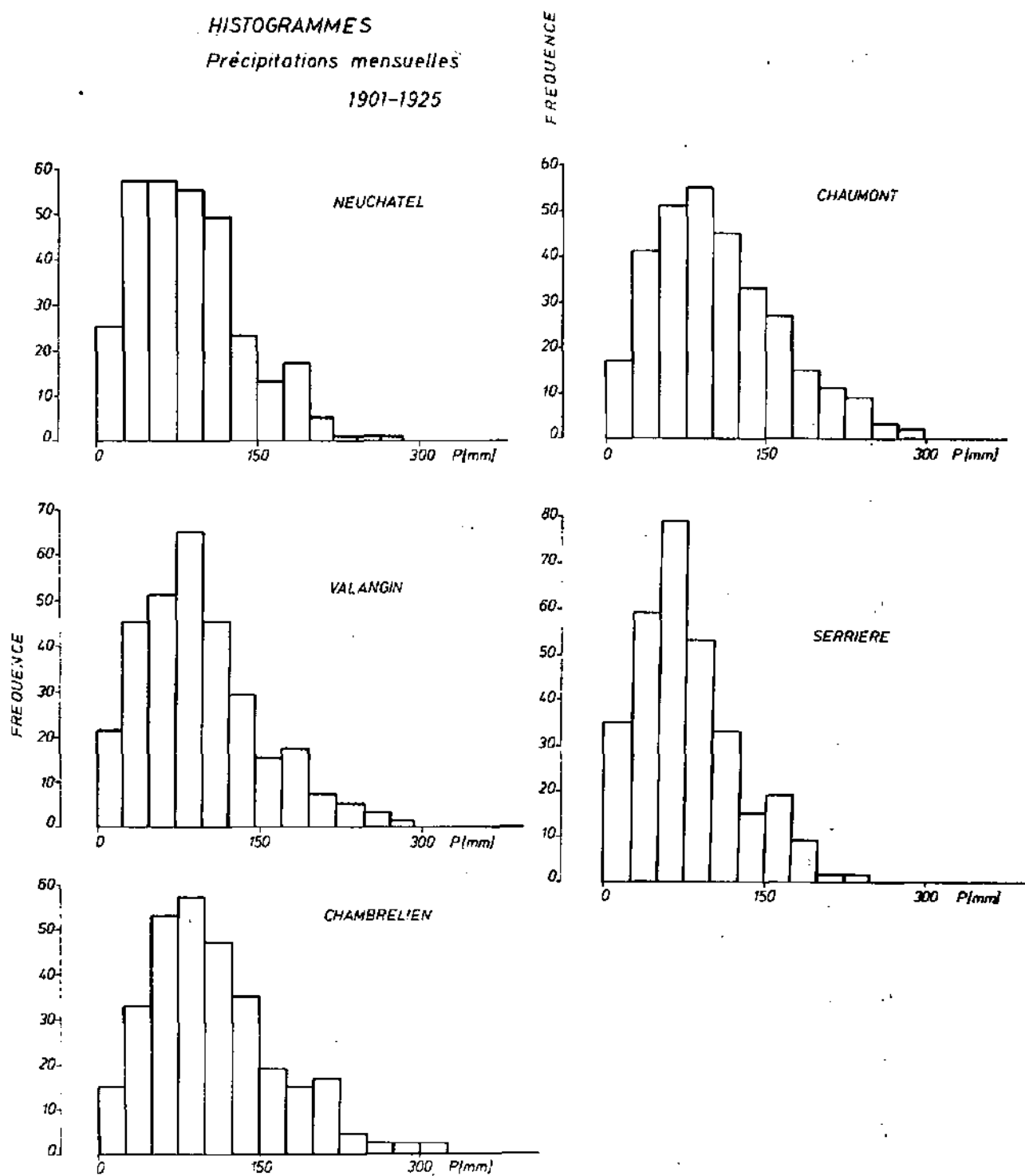


Figure VI - 1 Histogramme des précipitations mensuelles (1901 - 1925)
 pour 5 stations rattachées au bassin de la Serrière.

HISTOGRAMMES

Précipitations annuelles 1901-1925

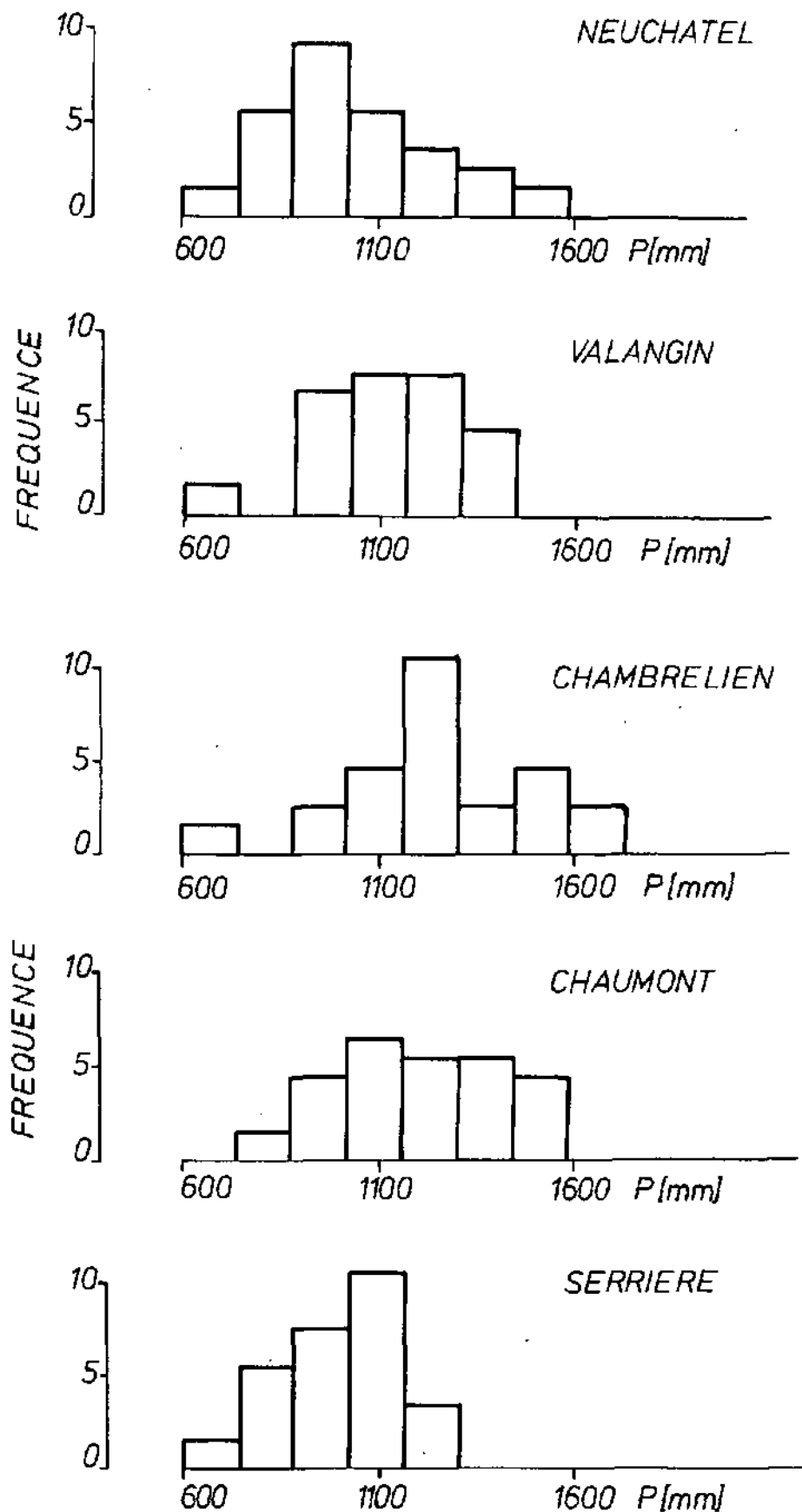


Figure VI - 2 Histogramme des précipitations annuelles (1901 - 1925) pour 5 stations rattachées au bassin de la Serrière.

1.4. Modules pluviométriques mensuels et annuels.

1.4.1. Période 1901 - 1925.

Les modules pluviométriques mensuels et annuels du tableau VI-I ont été calculés à partir des valeurs mensuelles fournies par l'Annuaire pluviométrique de la Suisse.

De 1909 à 1912, les valeurs manquantes de Fontainemelon ont été remplacées par celles des Hauts-Geneveys.

De 1917 à 1925, la station de Cernier n'a pas été observée. Les précipitations mensuelles et annuelles de cette période ont été estimées à l'aide de régressions linéaires des précipitations 1901 - 1916 avec la station de Valangin. Les coefficients de corrélation (r) entre les deux stations sont compris entre 0,84 et 0,97 (moyenne = 0,92 $r_{0,001}=0,72$). Le tableau VI-V permet de comparer les hauteurs de pluie annuelles obtenues par sommation des valeurs mensuelles estimées, avec celles calculées à partir de la régression des valeurs annuelles. L'écart maximum entre les lames d'eau obtenues par les deux méthodes ne dépasse pas 7,2 % et est inférieur à 1 % pour les deux moyennes 1917 - 1925. La reconstitution des hauteurs d'eau mensuelles manquantes par régression à la seule fin d'obtenir la somme annuelle apparaît donc ici comme superflue.

Les valeurs mensuelles manquantes, ici peu nombreuses, des stations de Boudry (corrélation avec Neuchâtel) et Dombresson (corrélation avec Valangin) ont également été estimées par régression. Ce sont toujours les hauteurs annuelles obtenues par sommation des valeurs mensuelles estimées qui ont été retenues pour le calcul des modules annuels.

Vu la brièveté des observations à Melvilliers (1904 - 1916) et à Tête de Ran (1901 - 1909), la matrice des précipitations mensuelles 1901 - 1925 n'a pas été reconstituée. Seules les valeurs annuelles manquantes ont été estimées par régression. On considère les modules annuels de ces deux stations avec réserve, en particulier celui de Tête de Ran, manifestement trop faible, ce qui est confirmé par des mesures récentes.

Août et décembre possèdent les modules pluviométriques les plus hauts, janvier et février sont les mois les plus secs. Les écarts types des valeurs mensuelles sont toujours nettement inférieurs aux moyennes. Les modules pluviométriques annuels et mensuels sont maximum à Fontainemelon et minimum à Serrières.

Tableau VI-V

Station pluviométrique de Cernier : comparaison des hauteurs de précipitations obtenues par régression linéaire avec la station de Valangin.

Année	Méthode		Différence en %
	Somme des précipitations mensuelles estimées	Précip. annuelles estimées	
1917	1307 mm	1300 mm	0,5
1918	1126	1197	- 6,1
1919	1297	1335	- 2,9
1920	971	958	1,3
1921	801	743	7,2
1922	1450	1507	- 3,9
1923	1389	1420	- 2,2
1924	1139	1111	2,4
1925	1064	1098	- 1,3
Moyenne	1174	1185	- 0,9

1.4.2. Période 1969 - 1972.

Les précipitations mensuelles mesurées aux pluviomètres des stations établies dans le cadre de la présente étude (le Sorgereux, Vilars, Dombresson, Cernier, les Vieux Prés, les Eugnens) sont données au tableau VI-VI. Les données pluviométriques des autres stations sont tirées de l'Annuaire pluviométrique de la Suisse (tableau VI-II).

L'établissement de la carte de isohyètes pour cette période a nécessité l'estimation des valeurs annuelles manquantes et de plusieurs stations. Les valeurs indiquées entre parenthèse au tableau VI-II ont été obtenues par régression linéaire avec la station de Boudevilliers. A Dombresson les lames d'eau mensuelles données par le pluviographe sont généralement plus faibles que celles obtenues au pluviomètre. Pour la lame d'eau annuelle (1971) la différence atteint 6,5 %.

1.5. Précipitations et altitude.

L'altitude et l'exposition sont les 2 facteurs orographiques qui déterminent la répartition régionale des précipitations. L'hypothèse d'une relation entre les précipitations et l'altitude est généralement vérifiée (UTTINGER 1949, BURGER 1959, TRIPET 1972), mais les coefficients de corrélation entre les deux variables sont le plus souvent médiocres en raison du facteur exposition qu'il est difficile d'estimer numériquement.

Les relations entre les précipitations et l'altitude définies pour les bassins de la Serrière et du Sayon (tableau VI-VII, figures VI-3 à VI-6) étaient destinées à l'établissement des cartes pluviométriques. Elles permettent également de tester la représentativité des stations.

Quatre périodes ont été retenues : 1901 - 1925, 1969, 1970 et 1971. Les lames d'eau annuelles considérées sont celles des tableaux VI-I et VI-II mais les valeurs estimées ont été écartées. P_0 , A_1 , A_2 (tableau VI-VII) sont les coefficients des équations de régression tels que :

$$\begin{aligned} P &= P_0 + A_1 H && \text{(1er degré)} \\ P &= P_0 + A_1 H + A_2 H^2 && \text{(2ème degré)} \end{aligned}$$

où P est la lame d'eau annuelle exprimée en mm
et H l'altitude exprimée en m

r est le coefficient de corrélation et F le résultat du test de Fisher-Snedecor (analyse de variance de la régression tableau I-1).

Après élimination de la station dont l'écart par rapport à la régression est le plus élevé (1901 - 1925 : Cheumont, 1969 - 1971 : Combe Garot), l'hypothèse d'une augmentation des précipitations avec l'altitude est généralement vérifiée ($r > r_{0,001}$) à l'exception de l'année 1971.

Tableau VI-VII

Précipitations en fonction de l'altitude.
Résultats des régressions linéaires et quadratiques.

Période	Nombre de stations N	P_0 mm	Coefficients de régression		r	F	$r_{0,001}$ ($v=N-2$)
			A_1	A_2			
1901-1925	9	713	0,58	-	0,68	6,11	0,89
	8	434	1,04	-	0,90	26,6	0,92
	8	1013	- 0,72	0,0013	0,92	14,3	0,92
1969	12	720	0,46	-	0,72	11,3	0,82
	11	588	0,58	-	0,89	34,2	0,84
	11	770	0,11	0,00027	0,90	16,3	0,84
1970	12	1016	0,52	-	0,64	6,9	0,82
	11	815	0,70	-	0,83	20,5	0,84
	11	1020	0,17	0,00031	0,84	9,4	0,84
1971	13	692	0,21	-	0,56	5,1	0,80
	12	620	0,28	-	0,70	9,9	0,82
	12	770	- 0,11	0,00022	0,72	4,8	0,82

$$P_H = P_0 + A_1 H \qquad P_H = P_0 + A_1 H + A_2 H^2$$

Les précipitations P sont exprimées en mm, les altitudes en m

Tableau VI-VI

Précipitation mensuelle 1969 - 1972 aux stations
non rattachées au réseau de l'ISM

LE SORGEREUX (pluviographe)													
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
1969	42	74	70	132	92	120	112	104	55	4	107	50	962
1970	67	281	94	124	75	119	71	97					
VILARS													
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
1969	43	60	58	97	75	113	104	92	52	4	104	67	869
1970	73	246	91	110	72	98	60	161	44	50	139	20	1154
1971	62	36	38	12	48	108	71	125	19	23	104	36	682
1972	25	28	41	42	75	125							
DOMBRESSON													
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
1970										109	121	37	
1971	62	52	51	26	44	140	70	176	43	26	141	55	885
1972	34	33	50	78	69	127	54	20	47				
DOMBRESSON (pluviographe)													
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
1970										105	121	40	
1971	64	49	51	26	43	126	68	174	39	24	126	40	830
1972	30	31	47	81	68	110	52	18	46				
CERNIER													
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
1969	50	79	78	130	117	166	103	80	50	2	88	87	1030
1970	82	353	102	134	77	118	102	119	56	83	136	48	1410
1971	54	46	57	36	66	146	90	216	28	26	151	42	960
1972	21	30	46										
LES VIEUX PRES													
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
1969	53	99	107	151	108	181	117	132	78	6	155	97	1284
1970	84	367	136	192	114	115	107	160	61	122	137	50	1645
1971	68	54	66	39	55	127	78	182	51	26	164	45	955
1972	37	40	67	100	88	132	65	53	22				
LES BUGNESETS													
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
1969	65	115	100	145	117	184	136	125	80	7	163	107	1344
1970	85	429	136	192	114	125	104	190	61	130	149	48	1763
1971	26	59	46	54	56	148	74	162	28	27	163	42	885
1972	45	52	67	116									

* Station des Vieux Prés

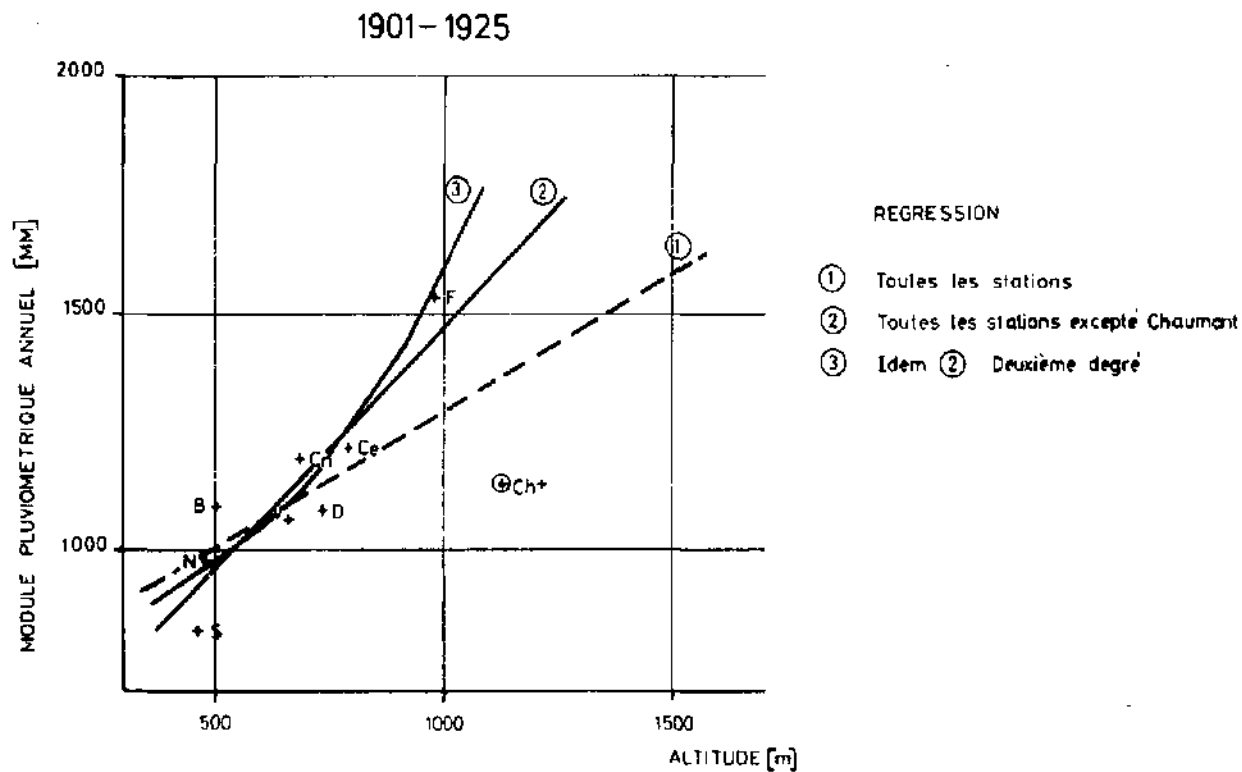


Figure VI - 3 Précipitation en fonction de l'altitude : 1901 - 1925

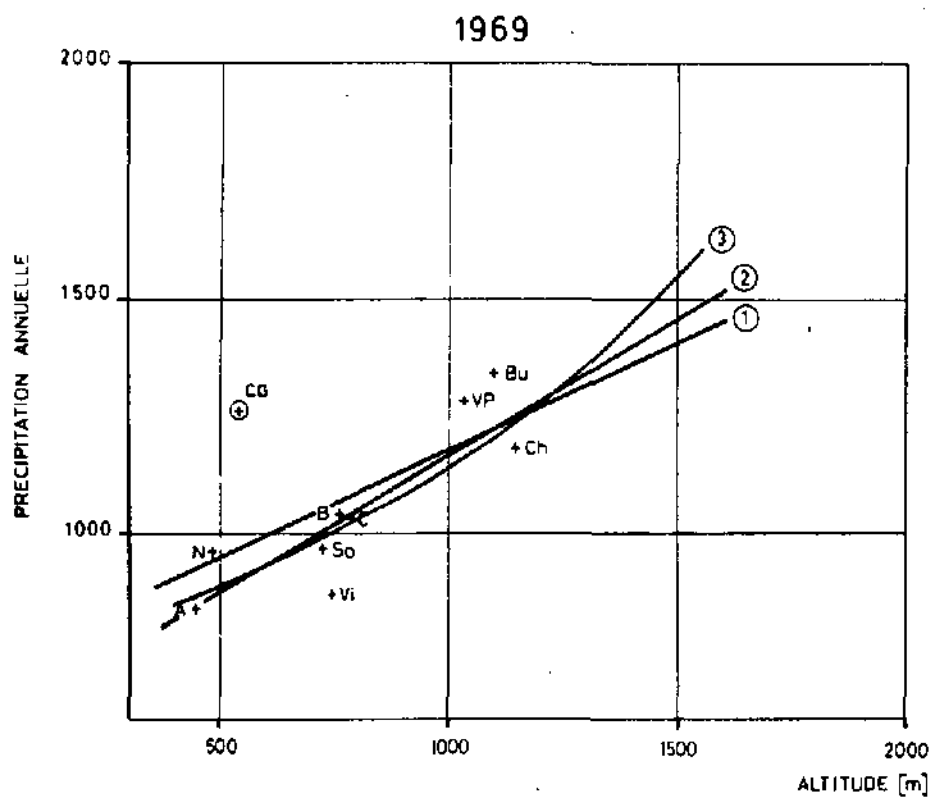


Figure VI - 4 Précipitation en fonction de l'altitude : 1969

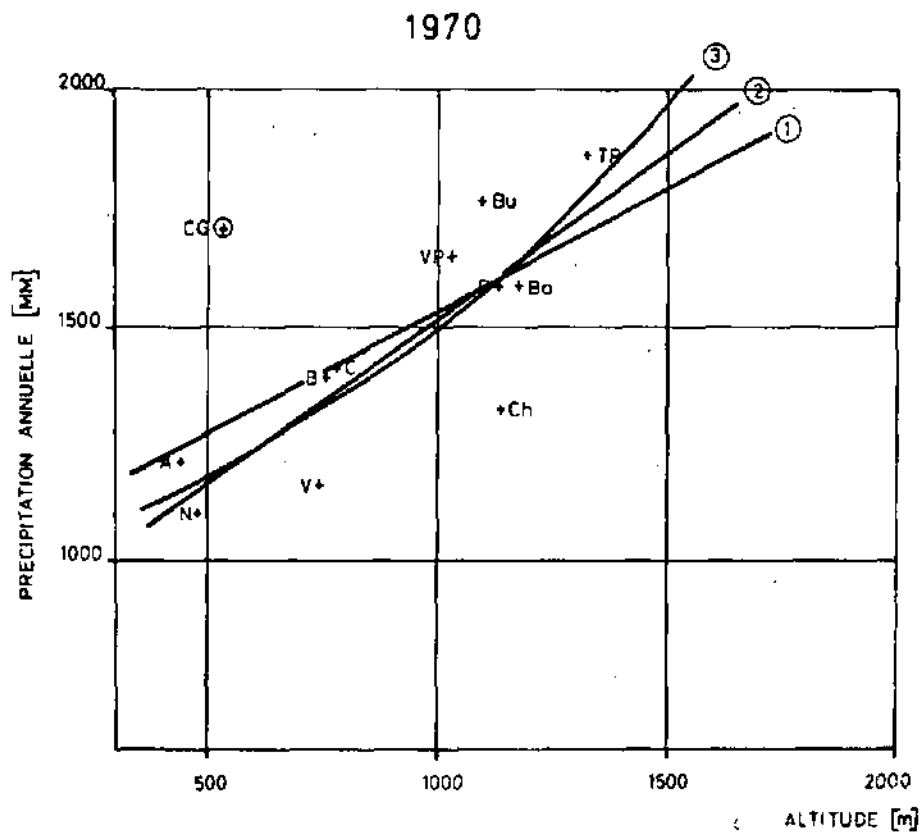


Figure VI - 5 Précipitation en fonction de l'altitude : 1970

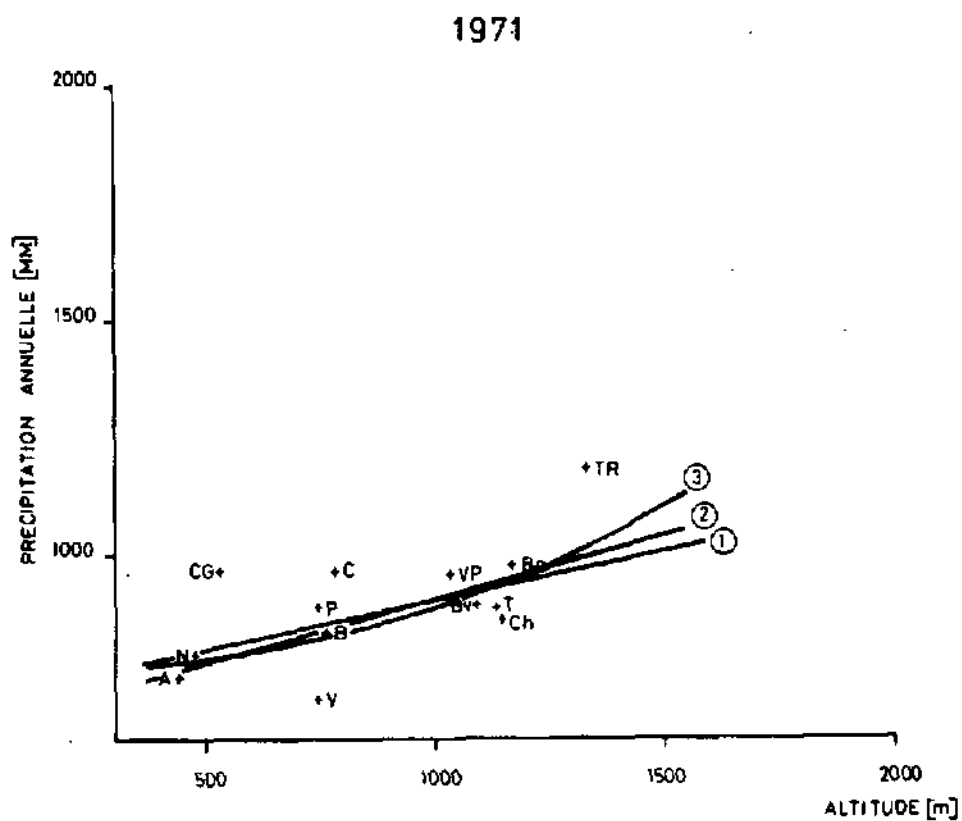


Figure VI - 6 Précipitation en fonction de l'altitude : 1971

●1085 STATION PNEUMOMETRIQUE AVEC
MODULE ANNUEL

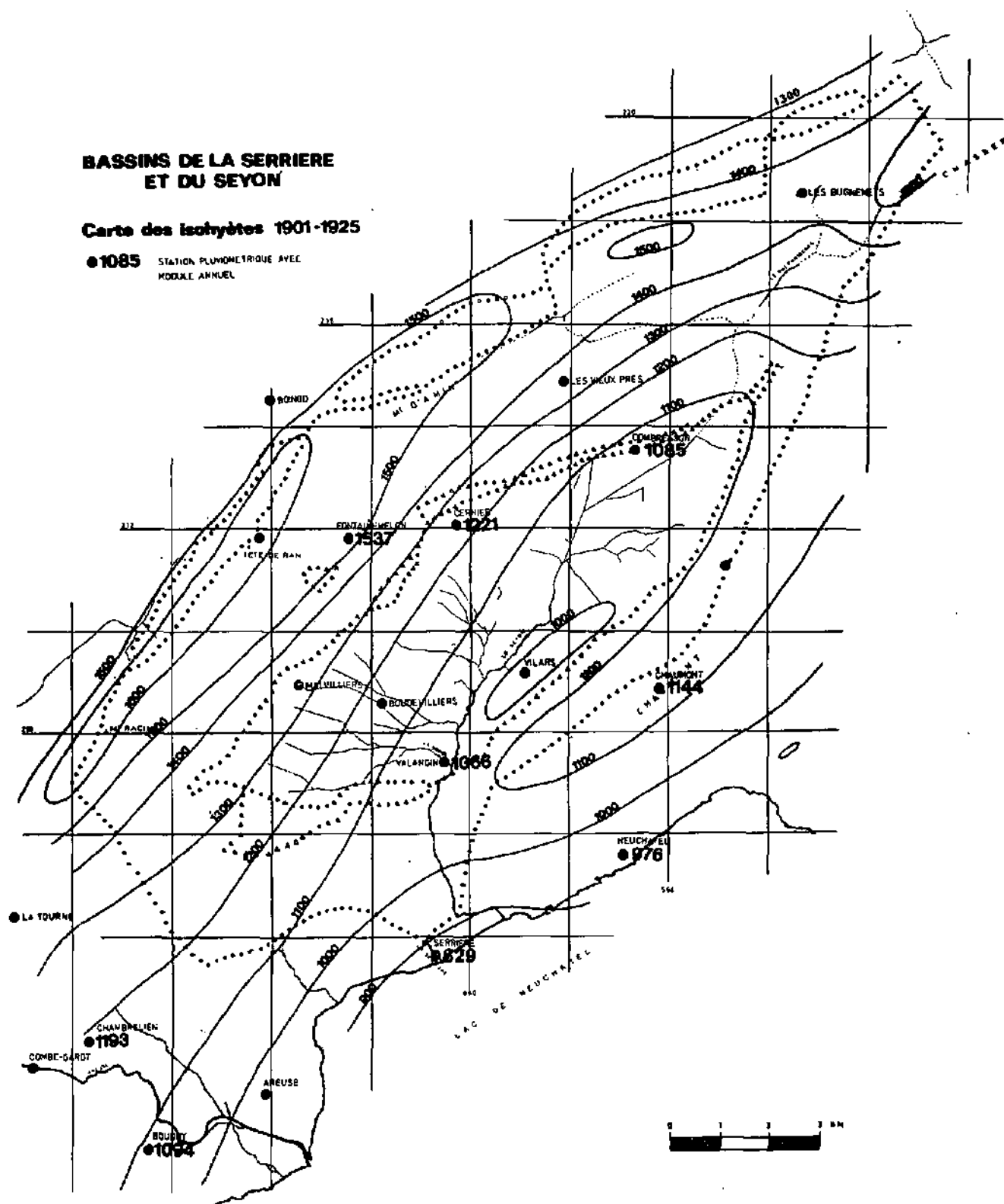


Figure VI - 7 Bassins du Seyon et de la Serrière. Carte des isohyètes
1901 - 1925

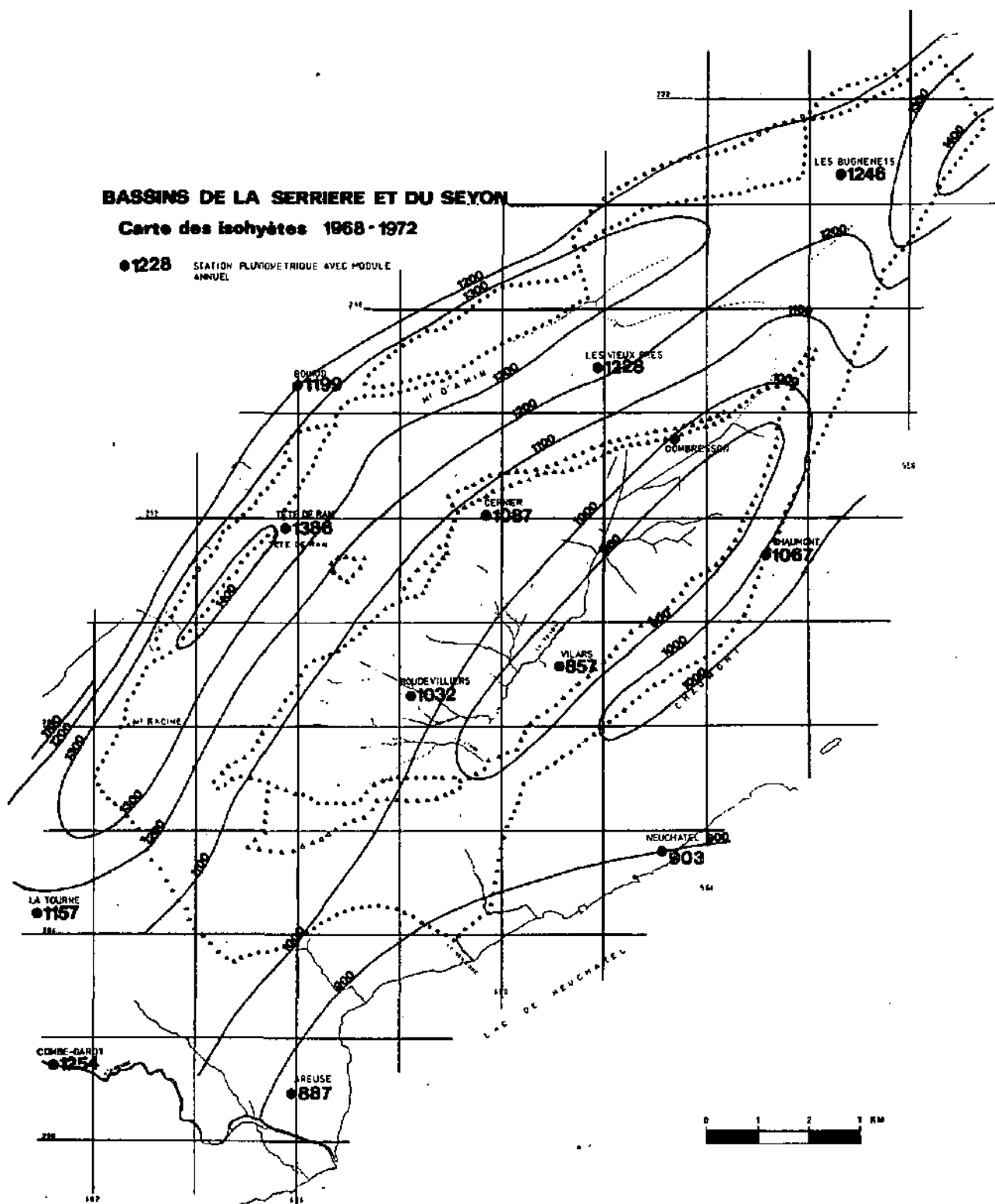


Figure VI - 8 Bassins du Seyon et de la Serrière. Carte des isohyètes 1969 - 1972

Bien qu'atténué le déficit pluviométrique de la station de Chaumont subsiste après son déplacement en 1934. L'existence d'un gradient des précipitations plus faibles sur le flanc sud de Chaumont que sur celui de la chaîne de Tête de Ren - Mont d'Amin est ainsi confirmée. En revanche la pluviosité anormalement élevée de Combe Garot doit être un phénomène localisé.

1901 - 1925

Après élimination de la station de Chaumont le coefficient de régression linéaire passe de 0,58 à 1,04. Ces deux valeurs extrêmes sont la conséquence de la concentration des stations pluviométriques dans les régions basses. De plus, Chaumont et Fontainemelon, seules stations au-dessus de 800 mètres, ne sont, en raison de leur exposition ni l'une ni l'autre représentatives des précipitations en altitude, des mesures récentes l'ont confirmé.

L'accroissement moyen de la pluviosité avec l'altitude est probablement compris entre 0,60 et 0,70 mm/m. L'utilisation d'un polynôme de 2^{me} degré n'apporte pas d'amélioration notable.

1969, 1970, 1971

Ces trois années sont successivement de caractère moyen (1969), humide (1970) et sec (1971). Après élimination de la station de Combe Garot l'accroissement de la pluviosité est avec l'altitude successivement de 0,58, 0,70 et 0,28 mm/m. (moyenne 0,52 mm/m).

On remarquera l'écart important entre les années sèches et humides. Les régressions de degré 2 améliorent toujours les coefficients de corrélation et par conséquent la qualité de la prévision. La dérivée des polynômes de degré 2 est une droite dont la pente est ici toujours positive, ce qui signifie un accroissement constant du gradient de pluviosité avec l'altitude. PRIMAULT (in MUSY 1973) constate le phénomène inverse, à savoir une diminution de la tendance à l'augmentation de la pluviosité avec l'altitude. Vu le nombre restreint et la répartition peu favorable des stations la non linéarité du phénomène n'est pas étudiée ici.

1.6.1. Isohyètes 1901 - 1925.

1.6. Les cartes pluviométriques.

Vu le nombre restreint de stations au-dessus de 800 mètres (2), (tableau VI-1), il était absolument nécessaire de tenir compte des observations récentes, d'où l'obligation d'estimer les modules pluviométriques 1901 - 1925 de 6 stations par régression linéaire avec les stations de Neuchâtel, Cernier et Chaumont (tableau VI-VIII). Les facteurs orographiques, en particulier les relations entre la pluie et l'altitude ont également été pris en considération.

Le long du lac de Neuchâtel la lame d'eau annuelle moyenne est inférieure à 1000 mm. Un premier axe pluvieux apparaît le long de la crête de Chaumont, mais les précipitations y sont moins importantes à altitude égale que sur la 2^{ème} chaîne anticlinale. Abrité par la chaîne de Chaumont le SE du Val de Ruz, entre Vilars et Savagnier est une zone à faible pluviosité (900-1000 mm). L'accroissement de la pluviosité avec l'altitude est plus marqué au SW qu'au NE du bassin du Seyon. Conséquence : le bassin de la Sorge est plus humide que le haut bassin du Seyon. Cette tendance se poursuit dans le bassin de la Serrière entre le Mont Racine et les Bugnètes. Exposée aux vents dominants, la station de Fontainemelon est caractérisée par une pluviométrie anormalement élevée. La décroissance des précipitations sur le versant de la 2^{ème} chaîne anticlinale est mal connue.

1.6.2. Isohyètes 1969 - 1972.

Bien que les stations pluviométriques soient plus nombreuses et mieux réparties, un certain nombre de valeurs annuelles ont été estimées par régression, soit pour 1969, soit pour 1972.

L'ellure générale des isohyètes diffère peu de celle de la période 1901 - 1925, mais avec des hauteurs d'eau plus basses. L'axe de faible pluviosité qui longe le versant NW de la chaîne de Chaumont est encore plus accentué. La diminution de la pluviométrie du Sud-Ouest au Nord-Est des bassins se manifeste également.

Une carte pluviométrique pour l'année hydrologique XI 1970 - X 1971, non représentée ici confirme ces tendances.

Tableau VI-VIII

Estimation des modules pluviométriques annuels 1901 - 1925 pour les stations n'ayant pas fait l'objet d'observations durant cette période.

Station de référence I	Station au module inconnu II	Période considérée pour la corrélation	Coef. de corrélation	Module pluviométrique 1901 - 1925 Station II
Neuchâtel	Boudrevilliers	1969 - 1972	0,97	1159 mm
Cernier			0,97	1189
Chaumont	Vilars	1969 - 1971	0,94	926
Cernier			0,96	990
Neuchâtel	Les Vieux-Prés	1969 - 1971	0,99	1369
Cernier			0,93	1411
Neuchâtel	Le Tourne	1970 - 1972	0,97	1348
Chaumont			0,99	1319
Neuchâtel	Les Bugnats	1969 - 1971	0,99	1426
Cernier			0,91	1476
Neuchâtel	Belnod	1970 - 1972	0,99	1335
Chaumont			0,99	1323

$$N=4 \quad r_{0,05} = 0,95 \quad N=3 \quad r_{0,05} = 0,99$$

1.7. Lame d'eau annuelle moyenne.

Les lames d'eau annuelles moyennes pour les périodes considérées ont été estimées à partir des cartes des isohyètes. En raison d'une orographie très marquée et de la mauvaise répartition spatiale des pluviomètres cette méthode est la seule capable de fournir des résultats satisfaisants. La méthode de Thiessen a dû être écartée pour les mêmes raisons, comme celle, utilisée avec succès par BURGER (1959) et TRIPET (1972) qui consiste à faire la moyenne arithmétique des hauteurs d'eau à chaque station.

Une moyenne pondérée des modules des stations de Chaumont et des Vieux-Prés fournit une bonne approximation des précipitations sur le bassin de la Serrière :

Période	Méthode des isohyètes 1)	Stations de Chaumont et des Vieux-Prés 2)	Différence
1901-1925	1349 mm	1328 mm	+ 1,6 %
1969-1972	1176	1187	+ 0,9
XI 1970-X 1971	916	922	+ 0,7

$$1) S = 92,5 \text{ km}^2$$

$$2) P = \frac{P_{\text{CHAUMONT}} + 3 (P_{\text{VIEUX-PRES}})}{4}$$

En multipliant par un facteur 0,9 la moyenne des lames d'eau tombées à Chaumont et à Cernier on obtient une valeur proche des précipitations sur le bassin du Seyon.

Période	Méthode des isohyètes	Stations de Chaumont et Cernier	Différence
1901-1925	1119 1) 1128 2)	1063 3)	- 5,0 % 1) - 5,8 % 2)
1969-1972	969 975	969	0,0 0,6
XI 1970-X 1971	824 827	827	0,4 0,0

$$1) S = 35,0 \text{ km}^2$$

$$2) S = 39,1 \text{ km}^2$$

$$3) (P_{\text{CHAUMONT}} + P_{\text{CERNIER}}) \cdot 0,45$$

2. ETUDE DE LA COUVERTURE NIVALE

2.1. Le réseau d'observation.

De 1969 à 1972 l'épaisseur de la neige était mesurée quotidiennement aux abords des stations pluviométriques de Cernier, Vilars et des Vieux-Prés. Les hauteurs totales étaient relevées sur une perche à graduation décimétrique, les hauteurs journalières mesurées sur une plaque d'amiante blanchie posée à la surface du sol.

Les figures VI-9 et VI-10 représentent les hauteurs journalières de la neige aux trois stations précitées.

Un réseau d'observations mensuel de la hauteur et de la densité de la neige a été établi dans le périmètre des bassins durant les hivers 1968 - 1969 et 1969 - 1970. Il comprenait 21 stations avec mesure de la hauteur et de la densité de la neige et 14 stations avec mesure de la hauteur seule; 13 stations étaient situées en forêt, 22 en terrain découvert. Leur emplacement, altitude et exposition est donné au tableau VI-X ainsi qu'à la figure VI-11.

La méthode de mesure correspond à celle utilisée par TRIPET (1972). On réalise 8 à 10 sondages dans un rayon d'une vingtaine de mètres autour de la station et on prend la moyenne des hauteurs obtenues. Sur un emplacement où la hauteur de neige correspond à la hauteur moyenne, on creuse une tranchée dans la paroi de laquelle on prélève une ou plusieurs carottes pesées au dynamomètre. Converties en équivalent en eau les mesures permettent de calculer la densité de la neige.

Le tableau VI-XI donne les équivalents en eau relevés durant 2 hivers consécutifs. La figure VI-11 est une carte des hauteurs d'eau retenues sous forme de neige le 19.2.1970 en terrain découvert. Relevons que l'hiver 1969 - 1970, exceptionnel par sa durée et l'épaisseur de la couche de neige (2,15 m le 13.3.1970 à Tête de Ran) est un événement dont le période de retour dépasse probablement 30 ans.

2.2. Equivalent en eau de la neige et altitude.

La couverture de neige et le lame d'eau ainsi soustraits temporairement à l'écoulement s'accroissent avec l'altitude et au cours de l'hiver par la conjonction de deux facteurs, à savoir : l'augmentation des précipitations avec l'altitude et les fontes de neige passagères au cours de l'hiver qui sont plus fréquentes dans les régions basses.

L'analyse de variance des régressions et les tests de signification du coefficient de corrélation et de la pente de la droite de régression (tableau VI-XII) confirment l'hypothèse d'une relation positive entre l'accroissement de l'équivalent en eau avec l'altitude pour l'ensemble des stations et celles situées en terrain découvert ($f > f_{0,001}$, $r > r_{0,001}$, $t > t_{0,001}$).

En forêt, en raison de la dispersion des valeurs, la limite de signification doit être généralement relevée à 0,05 pour que les coefficients de régression soient toujours significatifs.

Les coefficients de régression s'accroissent constamment au cours de l'hiver (tableau VI-XII, figures VI-12, VI-13). Le 23.1.1970 l'augmentation était en terrain découvert et en forêt de 31 mm et 15 mm par 100 mètres, elle valait 92 mm et 58 mm par 100 mètres le 13.3.1970.

A altitude égale le lame d'eau retenue sous forme de neige est toujours plus faible sous couverture forestière, mais la nature des essences joue un rôle majeur d'où la grande dispersion des points de part et d'autre des droites de régression. En particulier l'interception de la neige est beaucoup plus élevée dans les pessières que dans les hêtraies. Comme le signale TRIPET (1972), le problème de l'interception de la neige par la couverture forestière est un phénomène complexe, qui n'a pas fait ici l'objet d'étude particulière, mais les observations faites ici concordent avec les résultats de cet auteur.

MILLER (1959, in TRIPET 1972) a montré qu'en raison de leur grand pouvoir d'absorption vis-à-vis du rayonnement solaire, les forêts se comportent comme source de chaleur vis-à-vis des régions avoisinantes, boisées ou non, augmentant ainsi la rapidité de la fonte de la neige.

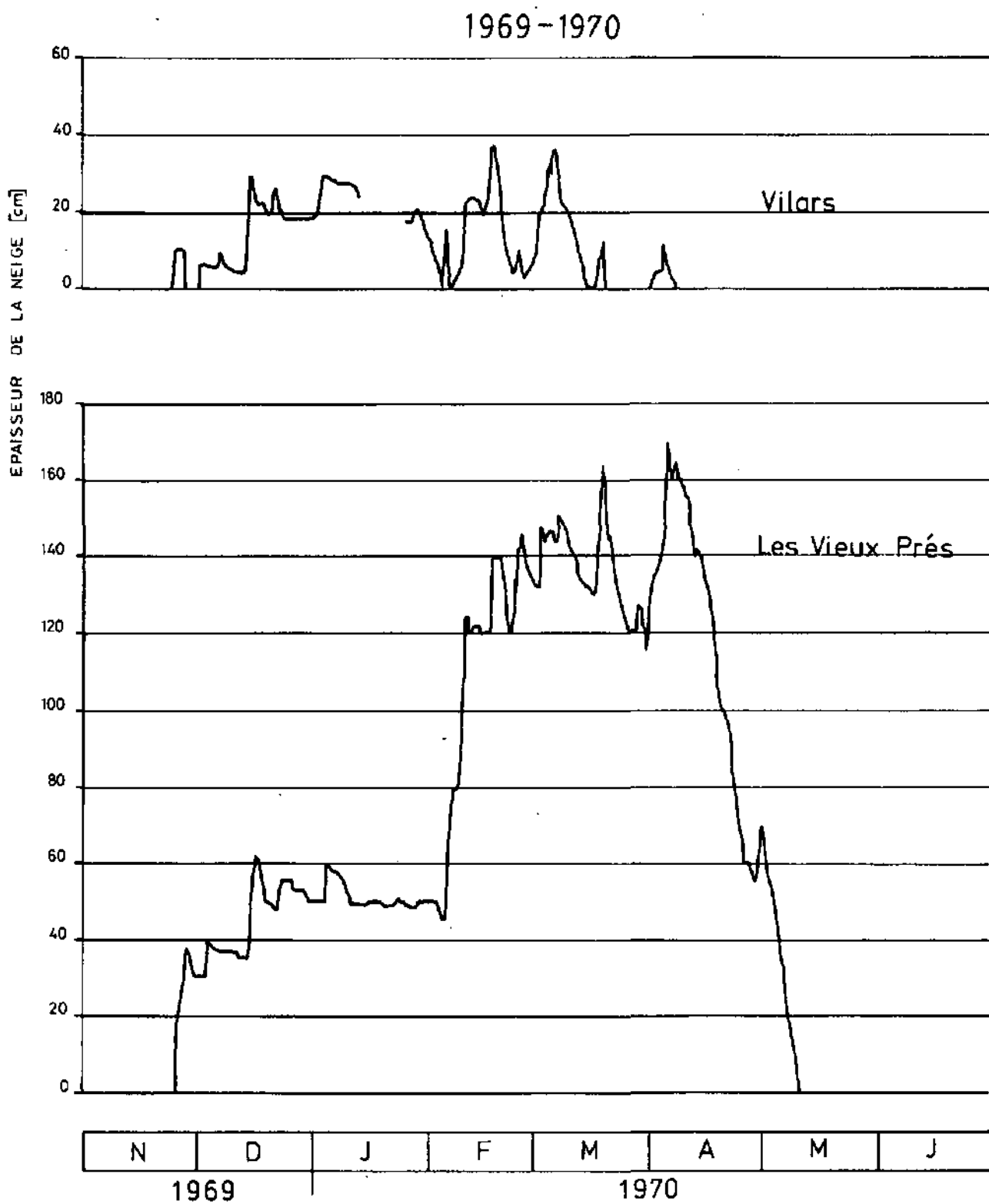


Figure VI - 9 Epaisseur de neige durant l'hiver 1969 - 1970 à Vilars et aux Vieux-Prés

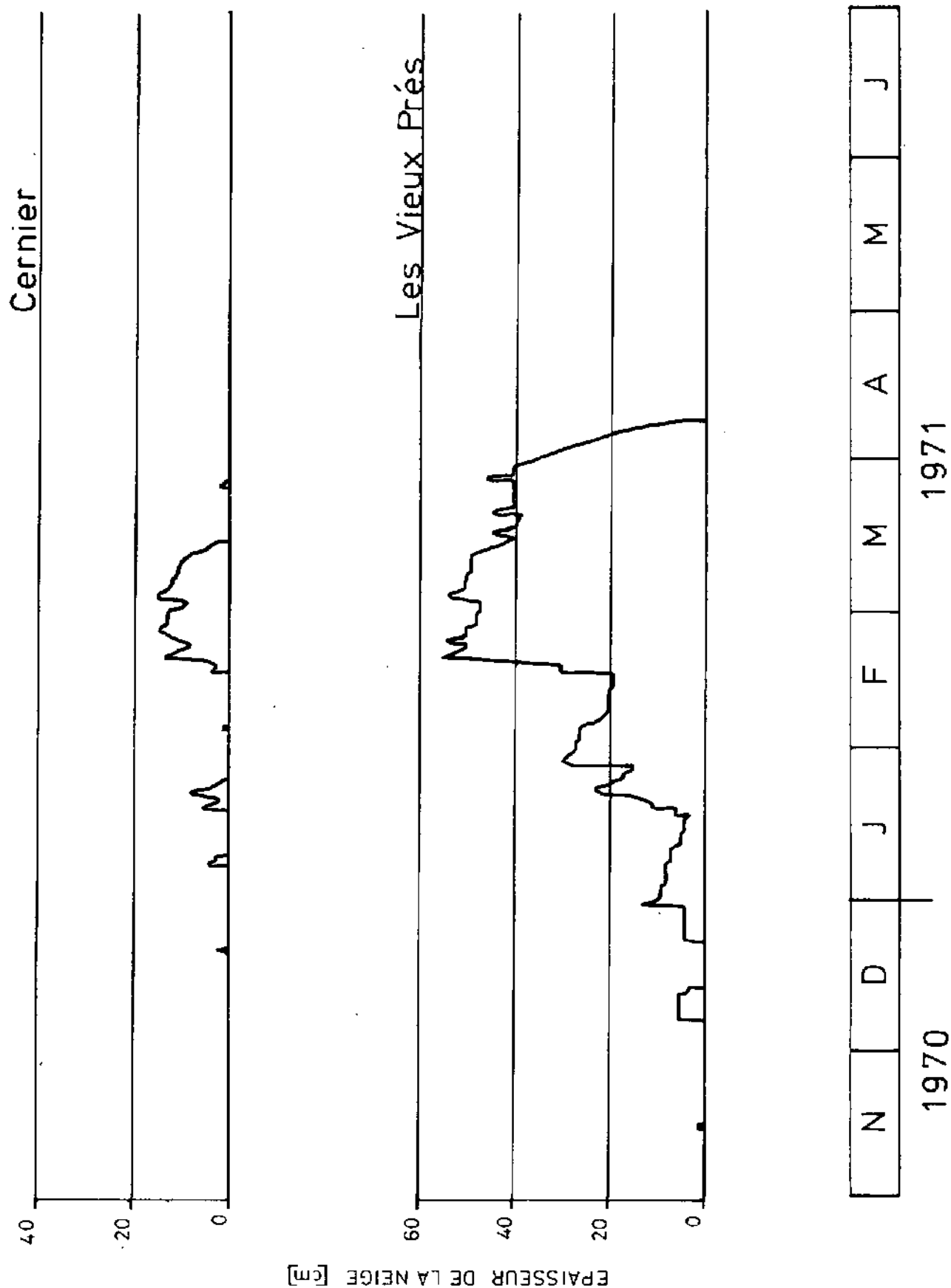


Figure VI - 10 Epaisseur de la neige durant l'hiver 1970 - 1971 à Cernier et au Vieux- Prés

BASSINS DE LA SERRIERE ET DU SEYON **Etude de la couverture nivale**

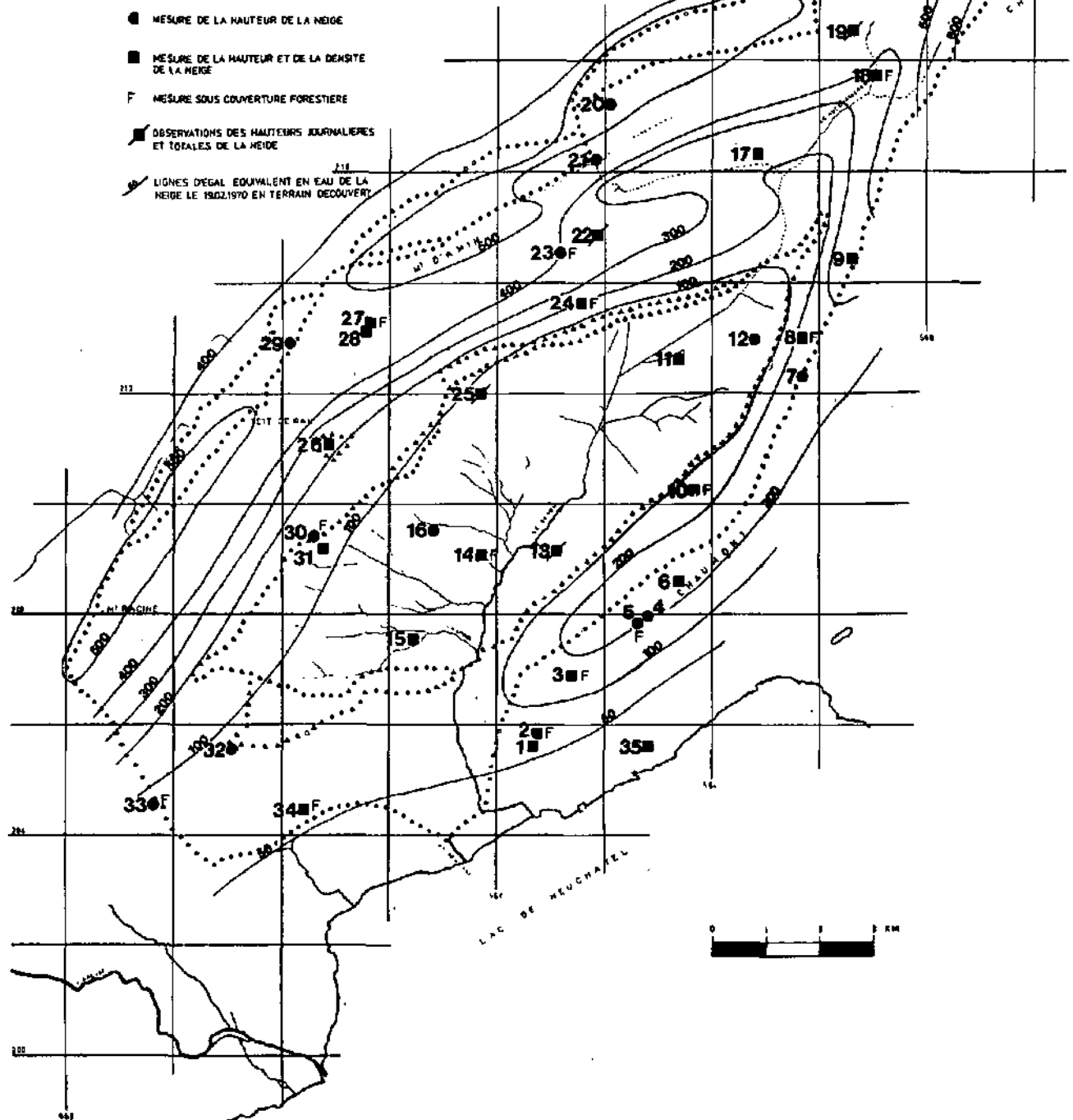


Figure VI - 11 Emplacement des stations de mesure de hauteur et de densité de la neige. Courbes d'égale équivalent en eau de la neige le 19.2.1970 en terrain découvert.

Tableau VI-IX

Lame d'eau annuelle moyenne sur les bassins de la Sorrière et du Seyon.

Période	Lame d'eau annuelle moyenne en mm							
	Bassin de la Sorrière			Bassin du Seyon			Seyon + Sorrière	
	S = 82,0	S = 10,1	S = 92,9	S = 35,0	S = 4,1	S = 39,1	S = 123,4	S = 133,6
1901 - 1925	1328	1525	1349	1119	1210	1128	1263	1283
1969 - 1972	1158	1334	1176	969	1064	975	1099	1116
XI 1970-X 1971	907	983	916	824	861	827	887	890

S : surface du bassin versant en km²

Tableau VI-X

Liste des stations de mesures de l'épaisseur et de la densité de la neige.

Station	No	Coordonnées	Altitude m	Exposition	Végétation, type de mesure
Pierrabot	1	560.550/205.600	625	S	Pré H. *
Pierrabot Golf	2	560.580/205.670	650	S	Forêt H. (* 34)
Maison du Cantonnier	3	561.380/206.870	680	S	Forêt H. *
Cheumont de Pury I	4	562.750/207.940	1020	SE	Pré H. (* 6)
Cheumont de Pury II	5	562.620/207.840	1015	SE	Forêt H. (* 3)
Mûtel de Cheumont	6	563.380/208.590	1095	SE	Pré H. *
Grand Cheumont I	7	565.650/212.200	1155	E-SE	Pré H. (* 6)
Grand Cheumont II	8	565.680/212.010	1175	W-NW	Forêt H. (* 10)
Le Doma	9	566.710/214.410	1215	NW	Pré H. *
Le Charrière Neuve	10	563.670/210.250	890	NW	Forêt H. *
Les Sagots (Dombresson)	11	563.360/212.620	735	NW	Pré H. *
Haut de la Fin (Dombresson)	12	564.780/212.980	830	NW	Pré H. (* 11)
Vilasse	13	561.090/209.170	740	NW	Pré H. *
Landayaux	14	559.560/209.035	715	E	Forêt H. *
Le Sargereux	15	558.425/207.520	728	SE	Pré H. *
Fontaines	16	558.640/209.420	760	SE	Pré H. (* 15)
Le Côté	17	564.850/216.290	880	S	Pré H. *
La Combe Blassac	18	567.070/217.740	915	W	Forêt H. *
Les Bugneta	19	566.630/218.565	1090	S	Pré H. *
La Joux du Pléne	20	562.050/217.230	1150	S	Pré H. (* 19)
Pertuis	21	561.810/216.180	1030	NE	Pré H. (* 19)
Les Vieux Prés I	22	561.855/214.860	975	E	Pré H. *
Les Vieux Prés II	23	561.150/214.545	1085	E	Forêt H. (* 27)
Les Vieux Prés- Chévard	24	561.540/213.660	910	SE	Forêt H. *
Carnier	25	559.690/211.995	782	SE	Pré H. *
Haute Genavaye	26	556.870/211.125	1000	S-SE	Pré H. *
Montagne de Carnier I	27	557.630/213.240	1180	SE	Forêt H. *
Montagne de Carnier II	28	557.550/213.120	1180	SE	Pré H. *
Tête de Ren	29	556.140/212.892	1290	N-NW	Pré H. (* 28)
Melvilliers I	30	556.530/209.460	965	SE	Forêt H. (* 14)
Melvilliers II	31	556.680/209.290	840	SE	Pré H. *
Coffrens	32	555.025/205.520	788	SE	Pré H. (* 15)
Forêt des Grottes	33	553.605/204.505	815	SE	Forêt H. (* 14)
Les Vagneta s. Corcelles	34	556.480/204.410	765	S-SE	Forêt H. *
Centre d'Hydrogé- ologie	35	562.840/205.550	485	SE	Pré H. *

H * Stations avec mesure de la densité et de l'épaisseur de la neige

H (* 28) Stations avec mesure de l'épaisseur de la neige.

Entre parenthèses station de référence pour l'estimation de la densité.

Tableau VI-XI

Equivalent en eau de la neige dans les bassins de la Serrière
et du Seyon. (1969 - 1970)

STATION	No	10.1.69 mm	14.2.69 mm	12.12.69 mm	23.1.70 mm	19.2.70 mm	13.3.70 mm	25.4.70 mm
Pierrebot	1	13	24	5	39	57	9	0
Pierrebot golf	2 F	10	30	5	31	46	42	0
Maison du Contonnier	3 F	17	33	17	37	44	41	0
Chaumont de Pury I	4	53	134	27	80	228	272	0
Chaumont de Pury II	5 F	23	32	19	26	67	148	0
Chaumont Hôtel	6	84	108	61	103	221	304	56
Grand Chaumont I	7	84	176	72	133	231	427	264
Grand Chaumont II	8 F	45	64	62	87	155	242	192
Le Deme	9	130	186	-	-	-	-	264
Le Charrière Neuve	10 F	19	24	37	36	93	78	0
Les Saïnes	11	32	48	31	95	69	91	0
Haut de la fin	12	38	38	44	89	73	57	0
Vilars	13	21	44	24	82	62	54	0
Lendeyaux	14 F	13	18	16	58	37	75	0
Sorgersaux	15	20	37	22	91	91	115	0
Fontaines	16	20	26	26	91	64	33	0
Le Côté	17	80	159	52	149	244	365	116
Le Combe Bieuss	18 F	70	124	39	147	349	595	428
Les Bugnats	19	134	265	82	205	415	608	522
Le Joux du Piône	20	105	209	73	205	515	578	414
Pertuis	21	137	244	93	200	485	527	460
Les Vieux Prés I	22	90	216	59	162	345	466	460
Les Vieux Prés II	23 F	57	117	68	111	293	322	299
Vieux Prés-Chézerd	24 F	46	46	22	65	113	168	0
Carnier	25	30	35	31	95	83	118	0
Les Haute Gaveys	26	53	127	43	106	214	285	0
Mont de Carnier I	27 F	57	142	88	144	277	367	365
Mont de Carnier II	28	119	247	84	216	433	476	520
Tête de Ren	29	119	192	103	370	459	602	680
Malvilliers I	30 F	19	27	21	75	81	142	0
Malvilliers II	31	32	54	33	82	112	122	0
Coffrans	32	29	34	78	94	82	69	0
Forêt des Grottes	33 F	14	21	13	45	31	49	0
Les Vernats	34 F	11	30	9	43	50	39	0
Centre d'Hydrogél.	35	0	14	0	12	19	10	0
Moyenne $\bar{x}$		50	92	44	106	180	232	-
Écart type s		39	79	29	72	151	200	-

F Stations en forêt

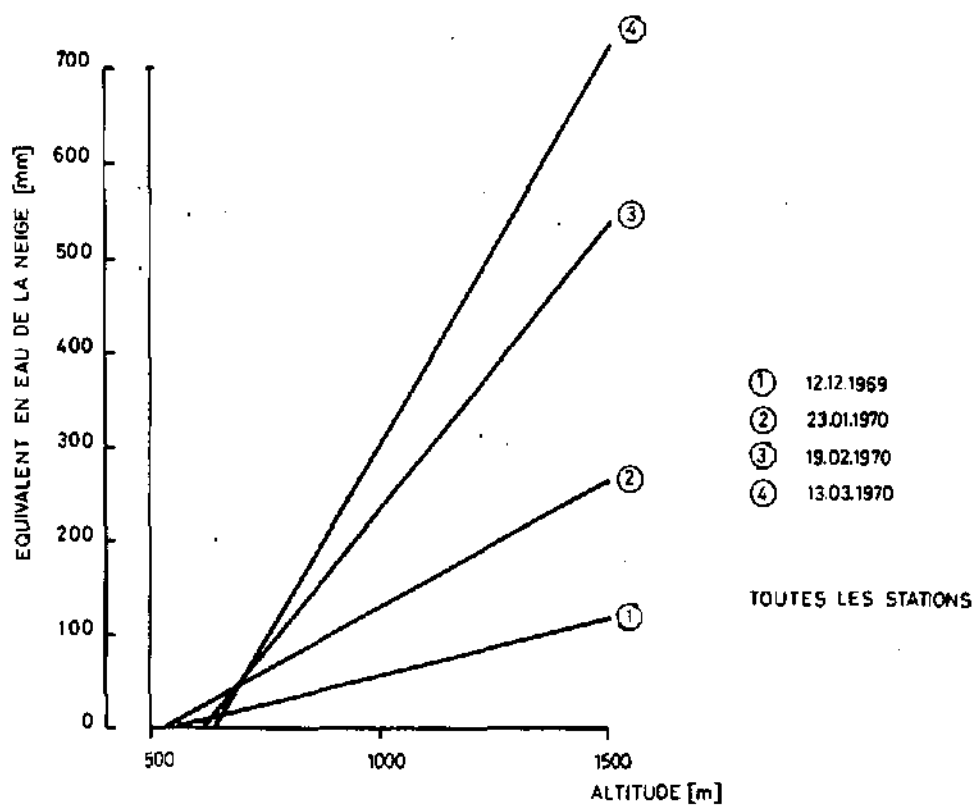


Figure VI - 12 Relation entre l'équivalent en eau de la neige et l'altitude: ensemble des stations

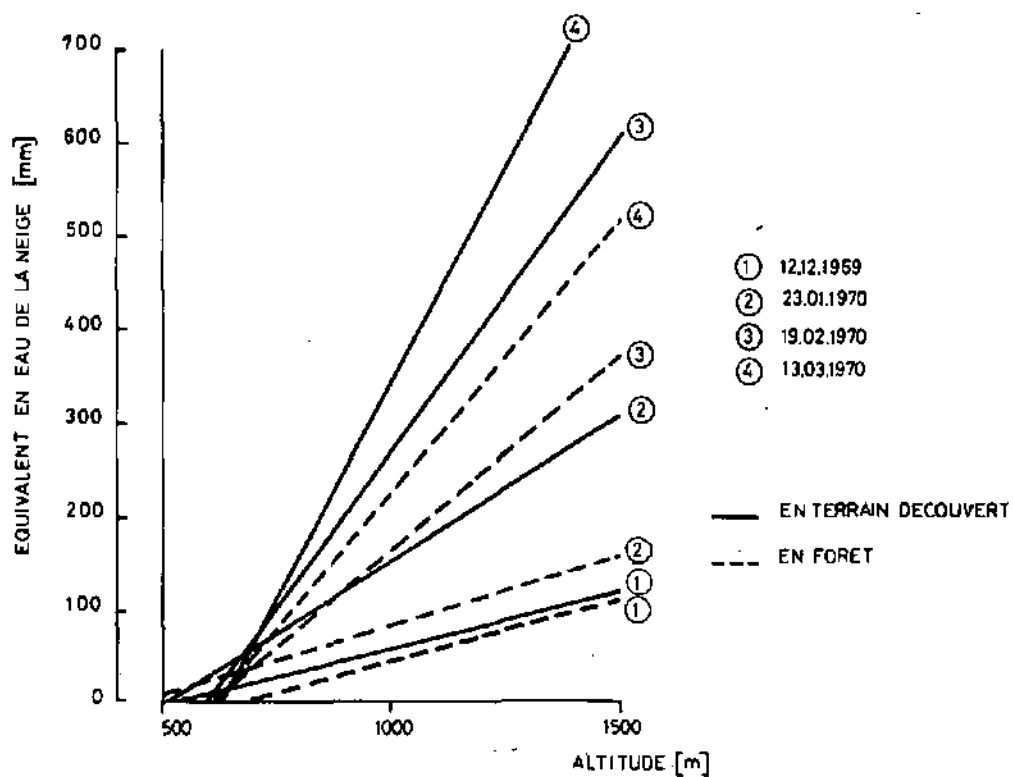


Figure VI - 13 Relation entre l'équivalent en eau de la neige et l'altitude: station en forêt, stations en terrain découvert.

Tableau VI-XII

Lame d'eau retenue sous forme de neige en fonction de l'altitude.

Résultats des régressions linéaires.

Date	Lame d'eau moyenne $\bar{X}$ mm	Ecart type s mm	Coefficient de corrélation r	L_0 mm	Coefficient de régression A_1 mm/m	N
10.1.1969	49,7	39,0	0,76	-94,1	0,16	34
10.1.1969	61,5	43,2	0,87	-105,1	0,18	21
10.1.1969	30,8	21,1	0,71	-52,1	0,09	13
14.2.1969	92,2	78,8	0,73	-185,8	0,30	34
14.2.1969	115,7	87,2	0,84	-205,2	0,35	21
14.2.1969	54,5	43,7	0,67	-108,4	0,18	13
12.12.1969	43,9	28,8	0,81	-69,5	0,12	34
12.12.1969	49,7	29,1	0,84	-58,3	0,12	21
12.12.1969	32,1	25,6	0,87	-92,1	0,14	13
23.1.1970	105,6	72,0	0,70	-135,9	0,26	34
23.1.1970	128,0	78,4	0,81	-153,4	0,31	21
23.1.1970	69,5	41,5	0,58	-65,3	0,15	13
19.2.1970	180,5	150,5	0,76	-374,1	0,61	34
19.2.1970	214,4	164,4	0,85	-404,4	0,66	21
19.2.1970	125,7	109,4	0,63	-256,8	0,42	13
13.3.1970	231,7	200,4	0,79	-527,4	0,83	34
13.3.1970	265,7	215,7	0,89	-578,8	0,92	21
13.3.1970	177,0	166,4	0,57	-354,0	0,58	13

$$LH = L_0 + A_1 \cdot H$$

N = 34 : toutes les stations ($r_{0,001} = 0,54$)

N = 21 : stations en terrain découvert ($r_{0,001} = 0,66$)

N = 13 : stations en forêt ($r_{0,001} = 0,80$, $r_{0,05} = 0,55$)

2.3. Etude de la densité de la neige en fonction de l'altitude.

Les densités relevées en 1969 et 1970 sont comprises entre 0,15 et 0,20 au début de l'hiver, elles peuvent atteindre 0,45 au moment de la fonte de la neige (Fig. VI-14).

Il existe une relation entre la densité et l'épaisseur de la neige, celle-ci se tassant par son propre poids. Comme l'épaisseur de la neige croît avec l'altitude la densité tendra à s'accroître avec elle. Comme phénomène agissant en sens contraire, il faut retenir de fréquents redoux accompagnés de pluies ou de neige mouillée au cours de l'hiver dans les régions basses, et l'épaisseur croissante de la neige fraîche avec l'altitude après de fortes précipitations.

Une analyse de la relation densité - altitude a été tentée. Celle-ci est positive et significative, mais avec une forte dispersion des valeurs ($r > r_{0,05}$): elle s'améliore à la fin de l'hiver.

Une exception : la tournée du 23.1.1970 où l'on ne détecte pas de tendance à l'accroissement de la densité de la neige avec l'altitude.

Sur la figure VI-14 on constate que la densité est plus basse en forêt qu'en terrain découvert, ce qui est confirmé par le résultat des régressions.

2.4. Estimation de la lame d'eau retenue sous forme de neige.

Une estimation par délimitation de zones d'enneigement telles que les a définies TRIPET (1972) s'applique mal aux bassins du Seyon et de la Serrière en raison des grandes différences d'altitude. On a utilisé ici la méthode suivante : à partir des équations linéaires exprimant l'équivalent en eau de la neige en fonction de l'altitude, on calcule les valeurs d'enneigement correspondant à l'altitude moyenne du bassin, pour les terrains boisés et découverts. On additionne alors ces valeurs multipliées au préalable par le rapport de la surface considérée (forêt, terrains découverts) à la surface totale du bassin. Les résultats (tableau VI-XIII) sont exprimés en lame d'eau équivalente moyenne et en millions de mètres cubes. Celle-ci atteint au maximum 353 mm pour le bassin de la Serrière et 123 mm pour le bassin du Seyon, soit respectivement le 26 % et le 10 % des modules pluviométriques 1901 - 1925. Si les effondrements de Dogger représentent le 1/8 de la surface alimentaire du bassin de la Serrière, la réserve stockée sous forme de neige sur ces terrains peut atteindre la quart de la réserve nivale du bassin, d'où son effet retardataire possible lors de la crue printanière.

La méthode de calcul de la lame d'eau retenue sous forme de neige donne probablement des résultats un peu trop élevés pour le bassin du Seyon. En effet, en ne séparant pas les deux bassins dans le calcul des relations lame d'eau - altitude, on accorde trop d'importance aux fortes valeurs qui ne sont pas situées dans le bassin. Une meilleure estimation serait obtenue en traitant chaque bassin séparément, ou en augmentant le degré des polynômes de régression mais en pondérant alors la lame d'eau selon la courbe hypsométrique.

Tableau VI-XIII

Lame d'eau retenue sous forme de neige dans les bassins de la Serrière et du Seyon. (1969 - 1970)

DATE		10.1.1969	14.2.1969	12.12.1969	23.1.1970	19.2.1970	13.3.1970
	Surface Unités						
SERRIERE	82,0 km ² mm	63	120	62	132	246	320
	10 ⁶ m ³	5,1	9,9	5,1	10,8	20,1	26,2
	1) 10,1 km ² mm	125	243	100	242	472	612
	10 ⁶ m ³	1,3	2,4	1,0	2,4	4,8	6,2
	92,5 km ² mm	70	134	67	145	272	353
	10 ⁶ m ³	6,4	12,4	6,2	13,4	25,1	32,7
SEYON	35,0 km ² mm	31	59	32	81	110	118
	10 ⁶ m ³	1,1	2,1	1,2	2,8	3,8	4,1
	39,1 km ² mm	32	61	33	82	113	123
	10 ⁶ m ³	1,2	2,4	1,3	3,2	4,4	4,8
SERRIERE + SEYON	123,4 mm	53	101	53	116	203	258
	10 ⁶ m ³	6,5	12,5	6,5	14,3	25,1	31,8
	133,8 mm	59	113	57	127	225	286
	10 ⁶ m ³	7,9	15,0	7,6	16,9	30,1	38,2

1) Dogger : Tête de Ran, Pré à l'Oure, Joux du Plâne

2.5. Stations représentatives de l'enneigement des bassins.

Bien que sujette à erreur, l'estimation de la réserve nivale à partir d'une seule, voire de deux stations permet l'économie de nombreuses mesures. Cette méthode fournit rapidement des données d'enneigement dans le cas d'une prévision des crues par exemple.

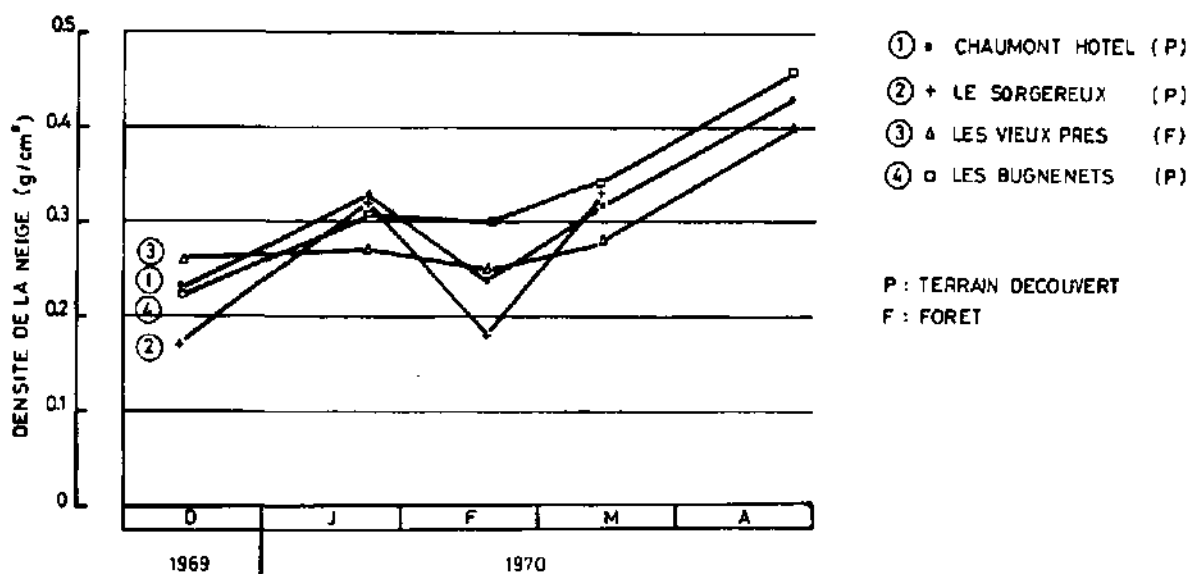


Figure VI - 14 Densité de la neige au cours de l'hiver 1969 - 1970

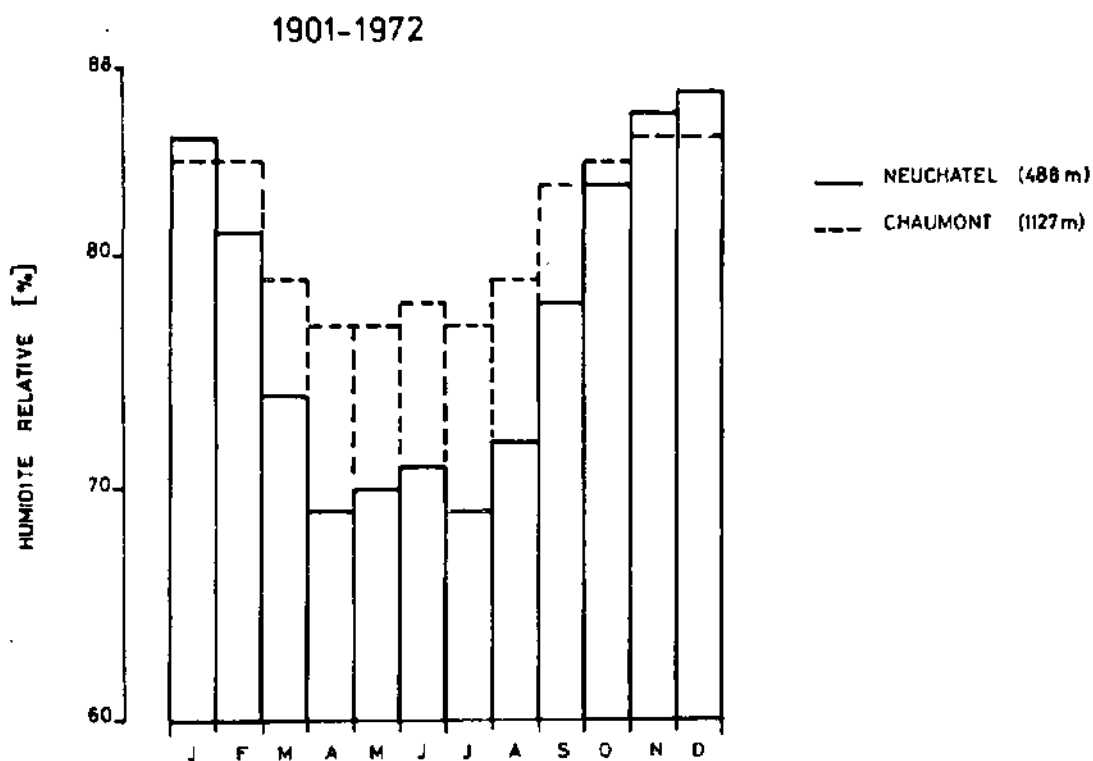


Figure VI - 15 Humidité relative. Moyennes mensuelles 1901 - 1972.
 Stations de Neuchâtel et Chaumont

- Bassin du Seyon

La lame d'eau mesurée à Malvilliers, en terrain découvert est légèrement supérieure à celle calculée pour le bassin du Seyon (35 km²). La relation obtenue par la méthode des moindres carrés est :

$$L_{SEY} = 6,24 + 0,93 L_{MAL} \quad (r = 0,98 \pm 0,001 = 0,95)$$

où L_{SEY} et L_{MAL} sont les lames d'eau retenues sous forme de neige exprimées en mm.

- Bassin de la Serrière

Les différences d'altitude importantes d'un point à l'autre du bassin rendent cette estimation plus délicate. La moyenne des lames d'eau des stations du Grand Chaumont (forêt) et les Vieux Prés I s'approche de celle du bassin.

La relation obtenue par la méthode des moindres carrés vaut :

$$L_{SER} = 6,5 + 0,94 (L_{CHA} + L_{VP}) / 2 \quad (r = 0,99 \pm 0,001 = 0,95)$$

où L_{SER} , L_{CHA} et L_{VP} sont les lames d'eau retenues sous forme de neige exprimées en mm.

3. INSOLATION, HUMIDITE RELATIVE, VENT, TEMPERATURE.

3.1. Réseau d'observation.

Il est constitué par le réseau des stations météorologiques de l'ISM situées dans ou à la périphérie des bassins du Seyon et de la Serrière. Les résultats des observations journalières sont consignés dans les annuaires publiés par cet Institut. Les stations considérées ici sont les suivantes :

Neuchâtel	alt. 488 m
Chaumont	alt. 1127 m / 1141 m
Cernier	alt. 800 m
Mont Soleil	alt. 1183 m
La Chaux-de-Fonds	alt. 986 m

Jusqu'en 1972 les observations étaient effectuées 3 fois par jour, à 7 h 30, 13 h 30 et 21 h 30. Depuis 1973 l'horaire des observations a été modifié, soit : 6 h 45, 12 h 45 et 18 h 45. Des coefficients de corrections mensuels adaptés à chaque station permettant de calculer les moyennes mensuelles.

3.2. Humidité relative.

Les modules mensuels et annuels 1901 - 1972 (tableau VI-XIV et fig. VI-15) révèlent que les variations de l'humidité relative au cours de l'année sont plus importantes à Neuchâtel qu'à Chaumont. Alors qu'en été elle s'accroît avec l'altitude, elle diminue légèrement avec celle-ci en hiver.

Minimum de mai à juillet, elle est maximum de novembre à janvier. Juin présente un léger maximum que l'on peut mettre en rapport avec un régime de mousson qui apparaît fréquemment en Suisse à cette époque (SANDQZ 1949 in BURGER 1959, p. 123).

3.3. L'insolation.

L'insolation moyenne pour les périodes 1901 - 1930 et 1930 - 1960 a été étudiée par B. PRIMAULT (1972) pour les stations de Neuchâtel et La Chaux-de-Fonds. A. MUSY (1974) donne les modules mensuels des stations de Neuchâtel, Mont Soleil et La Chaux-de-Fonds pour la période 1901 - 1972 (Fig. VI-16, tableau VI-XIV).

La durée annuelle moyenne de l'insolation pour les stations de La Chaux-de-Fonds et Neuchâtel représente respectivement le 38 % et le 41 % de sa durée maximum possible.

1901-1972

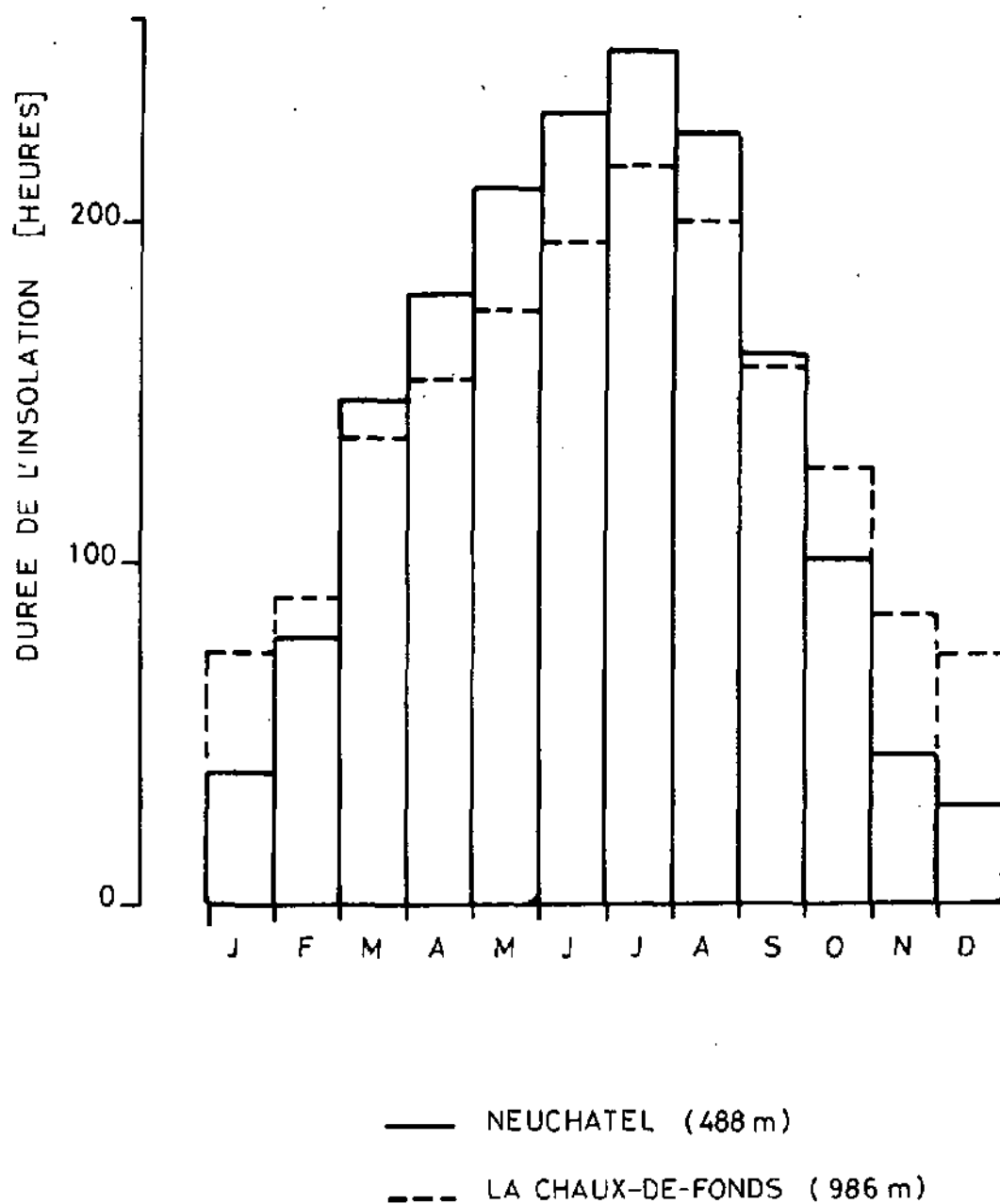


Figure VI - 16 Durée de l'ensoleillement. Moyennes mensuelles 1901 - 1972.
Stations de Neuchâtel et La Chaux de Fonds

Si la durée annuelle moyenne de l'insolation décroît quelque peu avec l'altitude, ce facteur joue un rôle important sur les moyennes mensuelles. Durant les mois d'été, le réchauffement du sol des versants exposés au Sud détermine des courants ascendants qui s'élèvent au-dessus des sommets, où, le point de condensation atteint, ils augmentent la nébulosité. L'insolation sera donc plus faible en montagne durant les mois ensoleillés. En revanche, d'octobre à février, l'apparition par temps calme d'un plafond de brouillard élevé sur le plateau suisse, alors qu'en montagne le ciel demeure serein, diminue la durée de l'insolation en plaine. De par sa situation orographique, le bassin de la Serrière se rapproche davantage de la station de La Chaux-de-Fonds.

Tableau VI-XIV

Humidité relative et durée de l'insolation. Moyennes mensuelles 1901 - 1972

HUMIDITÉ RELATIVE [%]

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Neuchâtel	65	81	74	69	70	71	69	72	78	83	86	87	77
Chauxmont	84	84	79	77	77	78	77	79	83	84	85	85	81
La Cha-de-Fds	84	81	77	75	75	75	74	76	80	82	84	85	79
Mont Soleil	80	78	73	72	73	75	74	77	79	80	82	79	73

INSOLATION [HEURES]

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Neuchâtel	39	78	148	179	210	232	251	226	162	101	44	29	1693
La Cha-de-Fds	74	90	137	154	174	194	216	200	156	128	85	73	1685
Mont Soleil	74	88	135	149	167	177	199	194	156	130	81	63	1618

(d'après A. MUSY, 1974)

3.4. Les vents.

Entre les périodes 1901 - 1930 et 1931 - 1960 considérées par PRIMAULT (1972) apparaissent de fortes différences, particulièrement dans la fréquence des calmes.

Celle-ci est respectivement pour les stations de La Chaux-de-Fonds et Neuchâtel 3,8 et 1,9 fois plus élevée dans le premier tiers du siècle (tableau VI-XV). Bien que la qualité et la précision des mesures puissent être partiellement mises en cause, ces écarts mériteraient une étude appropriée. Pour la période 1901 - 1960 (Fig. VI-17 et VI-18) les calmes (non représentés) constituent le 52 % et le 22 % des mesures en ces deux stations.

A La Chaux-de-Fonds l'orientation des vents dominants correspond à l'axe de la vallée. Les courants du SW y sont prépondérants parfois remplacés par des courants du NE en février et d'avril à septembre. A Neuchâtel, si la rose des vents est moins contrastée, les courants du NE (bise) et du SW (vent) restent les vents dominants. En revanche, la bise est plus fréquente surtout de novembre à février. Le joran statique, vent local du NW qui descend des hauteurs vers la fin des chaudes journées d'été se marque par une protubérance.

Tableau VI-XV

Roses des vents.

NEUCHÂTEL

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Calmes
1901 - 1930	9,7	22,7	9,5	4,7	2,3	16,6	10,7	11,7	12,1
1931 - 1960	4,0	14,8	10,3	5,3	3,7	14,9	10,5	4,9	31,6
1901 - 1960	6,9	18,8	9,9	5,0	3,0	15,7	10,6	8,3	21,8

LA CHAUX-DE-FONDS

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Calmes
1901 - 1930	3,6	19,4	2,5	3,0	9,4	35,8	2,9	1,9	21,5
1931 - 1960	1,0	1,9	0,6	0,2	0,8	8,3	2,4	1,2	83,6
1901 - 1960	2,3	10,6	1,6	1,6	5,1	22,1	2,6	1,6	52,5

Les valeurs sont exprimées en %

Sources : ISM et B. PRIMAULT (1972)

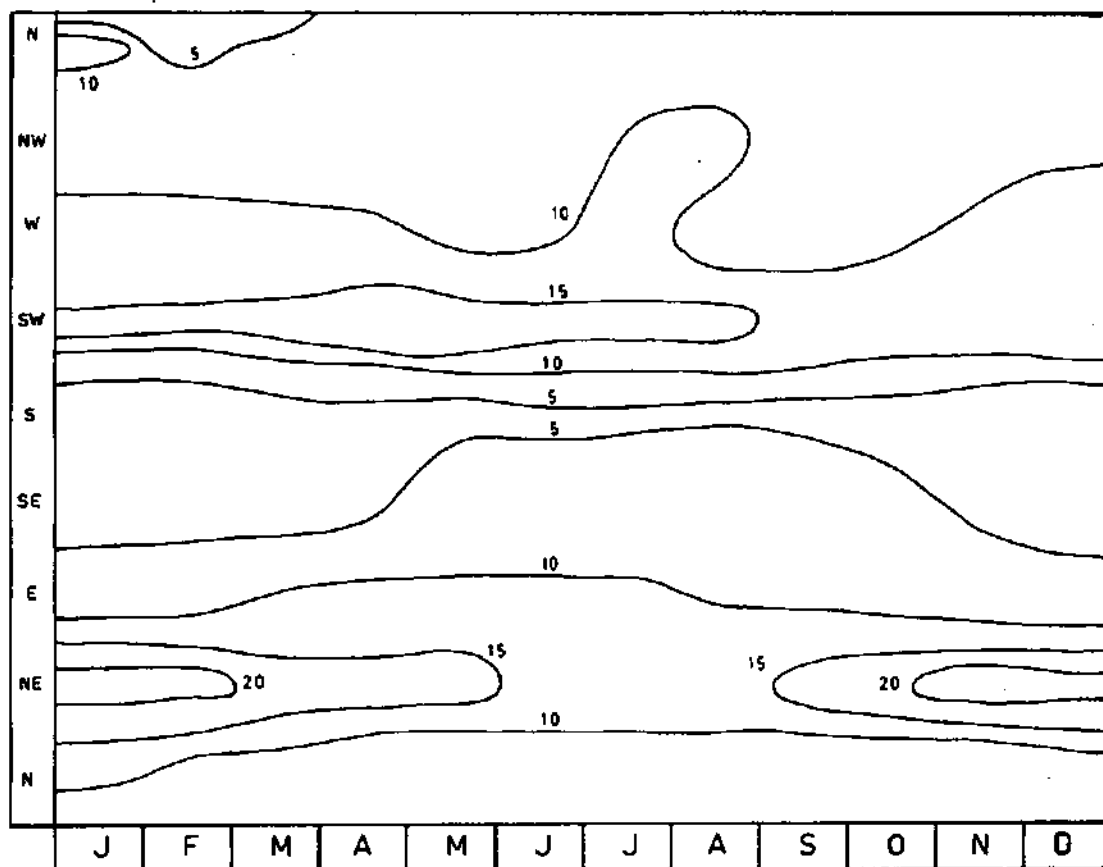


Figure VI - 17 Neuchâtel : rose des vents 1901 - 1960 en %

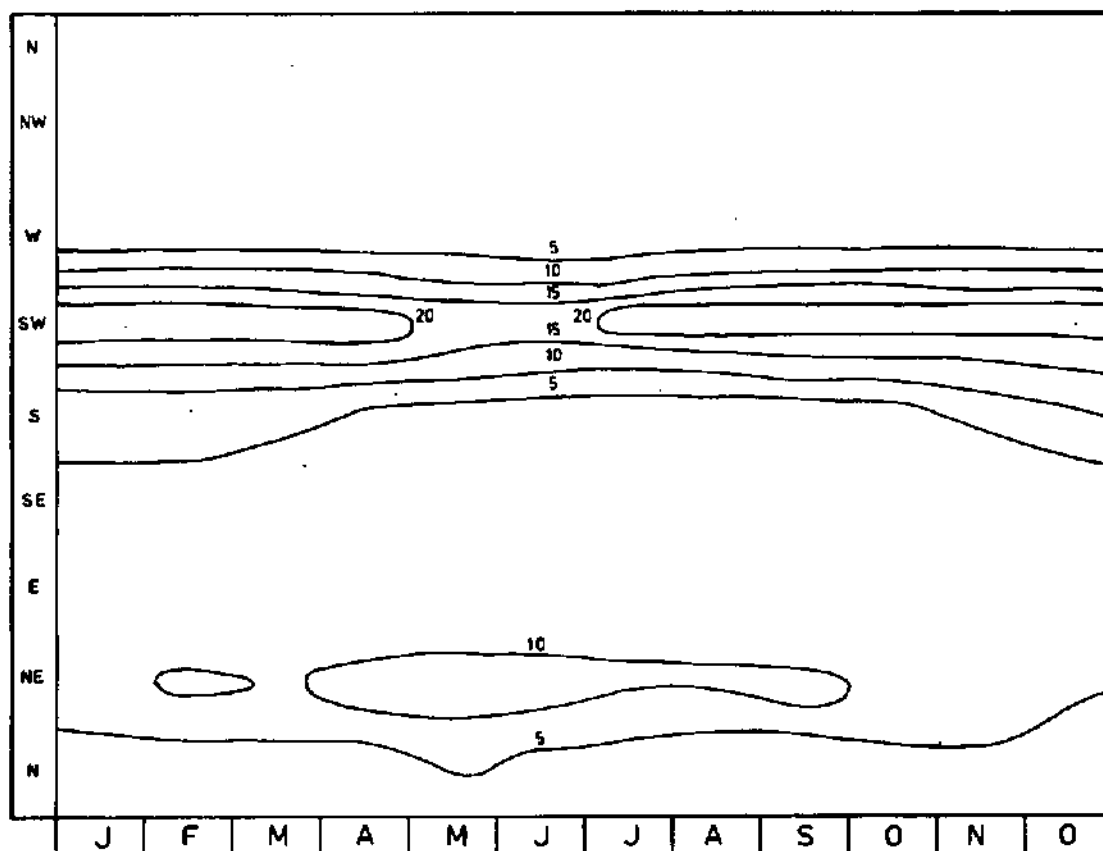


Figure VI - 18 La Chaux de Fonds : rose des vents 1901 - 1960 en %

3.5. La température.

3.5.1. Mesures.

Si des variables comme la vitesse du vent, la pression atmosphérique, voire l'humidité relative, agissent peu sur le bilan hydrologique, la température de l'air joue un rôle prépondérant dans les phénomènes d'évapotranspiration (MATHEY et MOREL, 1974).

PRIMAULT (1972) a calculé les températures mensuelles moyennes, ainsi que les maxima et minima pour les stations de Neuchâtel, Le Chaux-de-Fonds durant les périodes 1901 - 1930 et 1931 - 1960. UTTINGUER et SCHUEPP ont considéré en plus les stations de Cernier, Chaumont et Mt Soleil entre 1901 et 1940. Le tableau VI-XVI donne les températures mensuelles moyennes aux stations intéressant les bassins de la Serrière et du Seyon pour la période 1901 - 1925 retenue pour l'établissement du bilan.

Les écarts types des températures mensuelles sont compris entre 1,4 et 2,6° C. Maximum en février, pour les 4 stations considérées, la dispersion des points est minimum à Neuchâtel et maximum à Chaumont.

Janvier est toujours le mois le plus froid, juillet le plus chaud, mais les extrêmes journaliers se rencontrent en février et en août.

Les valeurs manquantes de la station de Cernier (1917 - 1925) ont été estimées par régression avec la station de Neuchâtel selon une méthode identique à celle utilisée pour les précipitations. Relevons que la différence entre les moyennes annuelles obtenues par sommation des températures mensuelles estimées ou annuelles estimées (11 ans) est inférieure à 0,1° C.

Tableau VI-XVI

Températures mensuelles moyennes ° C

1. Stations météorologiques (1901 - 1925)																
Station	Altitude	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année		
														1901-1925	1901-1940	1901-1960
Neuchâtel	488 m	0,1	1,0	4,5	8,2	13,6	16,4	18,3	17,6	14,0	9,0	3,7	1,5	9,0	9,1	9,2
Chaumont	1127 m	-2,0	-1,7	0,7	3,8	9,3	11,7	13,9	13,4	10,3	6,1	1,1	-0,7	5,5	5,3	-
Cernier	800 m	-1,5	-0,8	2,5	6,1	11,5	14,1	15,8	15,2	12,0	7,5	1,9	-0,4	7,0	6,8	-
Le Chx-de-Fds	986 m	-2,2	-1,6	1,2	4,6	10,2	12,8	14,8	14,1	10,9	6,6	1,4	-0,7	6,0	6,6	6,6

2. Bassins du Seyon et de la Serrière (1901 - 1925)															
	Surface km ²	Altitude moyenne	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
SEYON	35,0	760 m	-1,1	-0,4	2,8	6,3	11,7	14,4	16,3	15,7	12,3	7,7	2,4	0,2	7,4
	39,1	765 m	-1,1	-0,4	2,7	6,3	11,7	14,4	16,3	15,6	12,3	7,7	2,4	0,1	7,3
	82,0	1040 m	-2,8	-1,6	1,2	4,4	9,9	12,4	14,4	13,8	10,7	6,5	1,3	-0,7	5,9
SERRIERE	10,1 ¹⁾	1326 m	-2,8	-2,9	-0,6	2,3	7,9	10,3	12,4	11,9	9,0	5,2	0,1	-1,8	4,2
	92,5	1064 m	-2,1	-1,7	0,9	4,2	9,7	12,2	14,2	13,6	10,5	6,4	1,1	-0,8	5,7

1) Dogger Tête de Ren, Pré à l'Oure, Joux du Plâne.

2

3.5.2. Température et altitude.

La température mensuelle moyenne décroît toujours avec l'altitude, à l'exception des mois de décembre et février où la moyenne des températures à Chaumont est plus basse qu'à Le Chaux-de-Fonds, ce qui se traduit par de moins bonnes corrélations de celle-là avec les autres stations pour les mois d'hiver. Anomalie de même type que pour les précipitations, la décroissance de la température avec l'altitude est moins importante sur le versant sud de la première chaîne jurassienne (Fig. VI-19).

Si l'on considère les 4 stations, les gradients, obtenus par la méthode des moindres carrés, oscillent entre 0,33 et 0,73°C par 100 mètres.

Ils sont minimum durant les mois d'hiver et maximum d'avril à juillet. La valeur du gradient annuel est un peu supérieure à celle donnée par UTTINGER (in BURGER, 1959), ce qui indique que la région offre un climat relativement froid.

UTTINGER : $T = 11,3 - 0,52 H$ (90 stations)

Serrières + Seyon : $T = 11,6 - 0,56 H$ (4 stations)

où T représente la température annuelle moyenne et H l'altitude en hectomètres.

On trouve au tableau VI-XVII les valeurs des gradients pour chaque mois.

Tableau VI-XVII

Température et altitude : gradients mensuels obtenus par régression des températures mensuelles moyennes entre les stations de Neuchâtel, Chaumont, Cornier et Le Chaux-de-Fonds. Période 1901 - 1925

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Gradient A_1 °C/100 m	-0,33	-0,44	-0,61	-0,72	-0,68	-0,73	-0,68	-0,66	-0,59	-0,45	-0,41	-0,36	-0,56
T_0 °C	1,4	1,0	7,4	11,6	16,9	20,0	21,5	20,7	16,8	11,1	5,5	2,9	11,6
C. de corrélation	0,93	0,97	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,97	0,92	0,99

$$T_H = T_0 + A_1 \cdot H$$

3.5.3. Inversion de la température.

Comme dans les vallées de la Brévine et des Ponts (BURGER 1959), on observe dans la partie centrale du Val de Ruz, particulièrement entre Combrezon et la Rincière, un phénomène d'inversion nocturne de la température. Par les nuits calmes et claires, les couches inférieures de l'atmosphère se refroidissent considérablement par rayonnement. Il n'est pas rare que la température atteigne -30° à la fin d'une nuit de février, voire parfois -40° au lieu dit "La Scierie Debrot".

3.5.4. Température moyenne du bassin.

Si l'on admet que la relation qui lie la température à l'altitude du bassin est linéaire, on prendra comme température moyenne des bassins celle de l'altitude moyenne (tableau VI-XVI), définies à partir des relations du tableau VI-XVII.

4. L'EVAPOTRANSPIRATION

4.1. Méthodes de calcul.

La littérature hydrologique contient un choix varié de formules dont la complexité (mais pas nécessairement la fiabilité) s'accroît avec le nombre de variables considérées. Pour le calcul de l'évapotranspiration réelle annuelle (ETR) on a retenu ici : les formules de TURC et COUTAGNE et pour l'évapotranspiration potentielle la formule largement utilisée de THORNTWHAITE. Cette dernière a l'avantage d'être uniquement fonction de la température sans faire intervenir l'ensoleillement, trop rarement mesuré en Suisse. Elle s'adapte bien à l'établissement de bilans mensuels dont on déduit l'ETP puis l'ETR mensuelles.

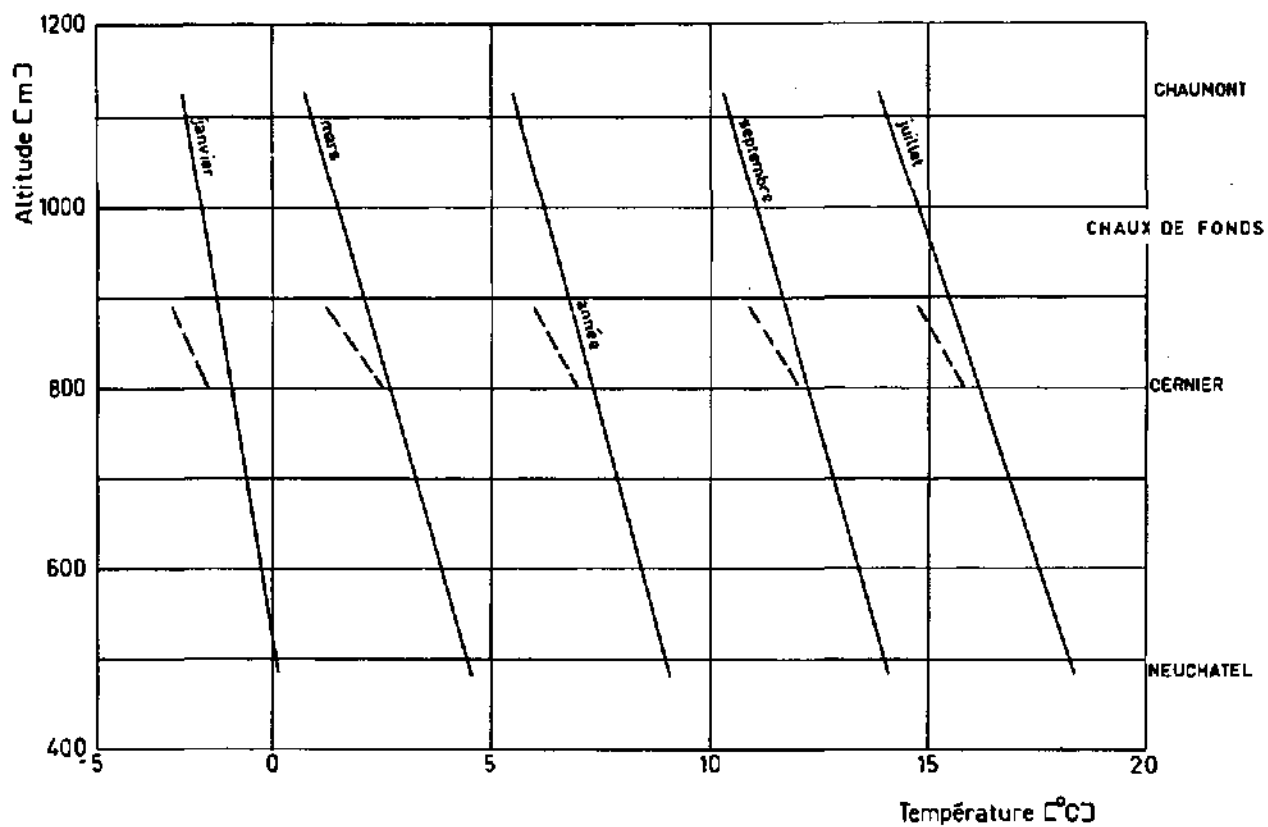


Figure VI - 19 Température et altitude

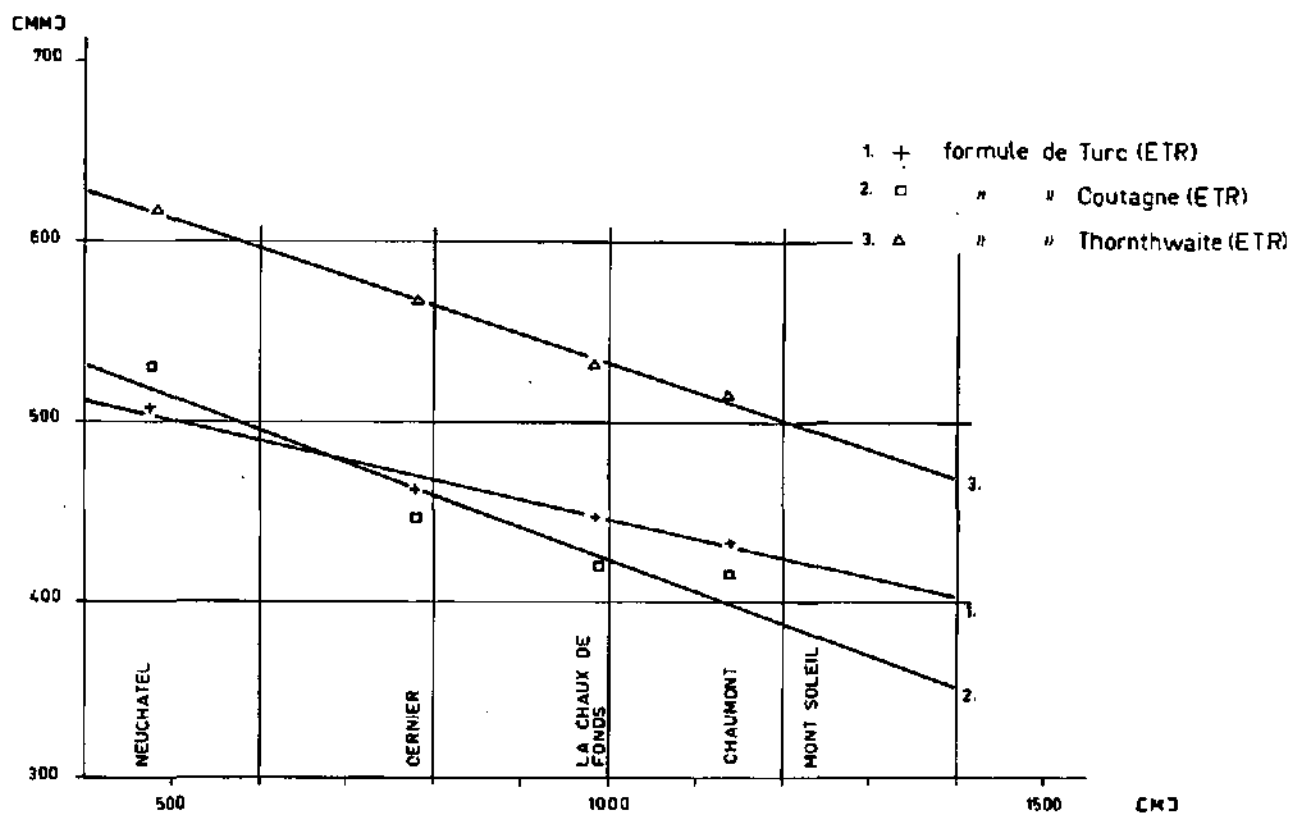


Figure VI - 20 Evapotranspiration et altitude 1901 - 1925

Formule de TURC

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + P^2/L^2}} \quad \text{mm}$$

où P est le module pluviométrique annuel en mm

T la température annuelle moyenne en °C

$$L = 300 + 25 T + 0,05 T^2$$

Formule de COUTAGNE¹⁾

$$ETR = P - \lambda P^2 \quad \text{avec } \lambda = \frac{1}{0,8 + 0,14 T}$$

$$\text{si } P > 1/2\lambda \quad ETR = 1/4\lambda$$

1) P et ETR sont exprimés en mètres

Formule de THORNTHWAITE

$$ETP_{\text{mens}} = 1,6 \left[10 \frac{T_{\text{mens}}}{I} \right]^a \quad \text{mm}$$

$$\text{où } a = 0,49239 + 1792 \cdot 10^{-5} I - 771 \cdot 10^{-7} I^2 + 675 \cdot 10^{-9} I^3 \approx 0,016 I + 0,5$$

$$I = \sum (i) \rightarrow \sum \left[\frac{T_{\text{mens}}}{5} \right]^{1,514} \approx \sum \left[0,009 T_{\text{mens}}^{1,5} \right]$$

T_{mens} est la température mensuelle (moyenne) en mm.

ETP_{mens} l'évapotranspiration potentielle mensuelle (moyenne) en mm.

Les valeurs de l'ETP_{mens} sont corrigées par un coefficient K qui tient compte de la latitude du lieu.

L'établissement d'un bilan hydrique à partir des modules pluviométriques mensuels et de l'évapotranspiration mensuelle moyenne tel qu'il est décrit par CASTANY (1968) et REMENIERAS (1972) a été réalisé à l'aide du programme de calcul EVAP1 développé à cet effet. Ce programme calcule également l'ETR selon TURC et COUTAGNE.

Aucune étude de détail, recherche ou développement de formule appropriée n'a été tentée ici. Les résultats qui suivent sont d'abord destinés à l'estimation du bilan hydrologique. La validité des diverses formules sera discutée lors de l'établissement du bilan.

4.2. Evapotranspiration et altitude.

Le tableau VI-XVIII fournit les valeurs de l'évapotranspiration réelle et potentielle aux stations de Neuchâtel, Chaumont, Cernier, La Cheux-de-Fonds et Mont Soleil pour une sélection de 5 périodes. Les figures VI-20 à VI-24 représentent l'évapotranspiration en fonction de l'altitude.

- Année moyenne (1901 - 1925) (1901 - 1940)

L'évapotranspiration réelle et potentielle décroît toujours avec l'altitude. L'ETR selon TURC passe de 516 mm à 437 mm de Neuchâtel à Mont Soleil (539 à 402 mm selon COUTAGNE). Au-dessus de 600 mètres la formule de TURC donne des valeurs supérieures de 4 à 7 % à celle de COUTAGNE. L'ETR calculée par la méthode des bilans mensuels est supérieure de 15 à 20 % à l'ETR selon TURC. Elle est d'autre part et pour toutes les stations, égale à l'évapotranspiration potentielle.

L'hypothèse d'une décroissance linéaire de l'évapotranspiration avec l'altitude peut être acceptée. Les coefficients des fonctions ETR (ETP) = f (H) sont données au tableau VI-XIX.

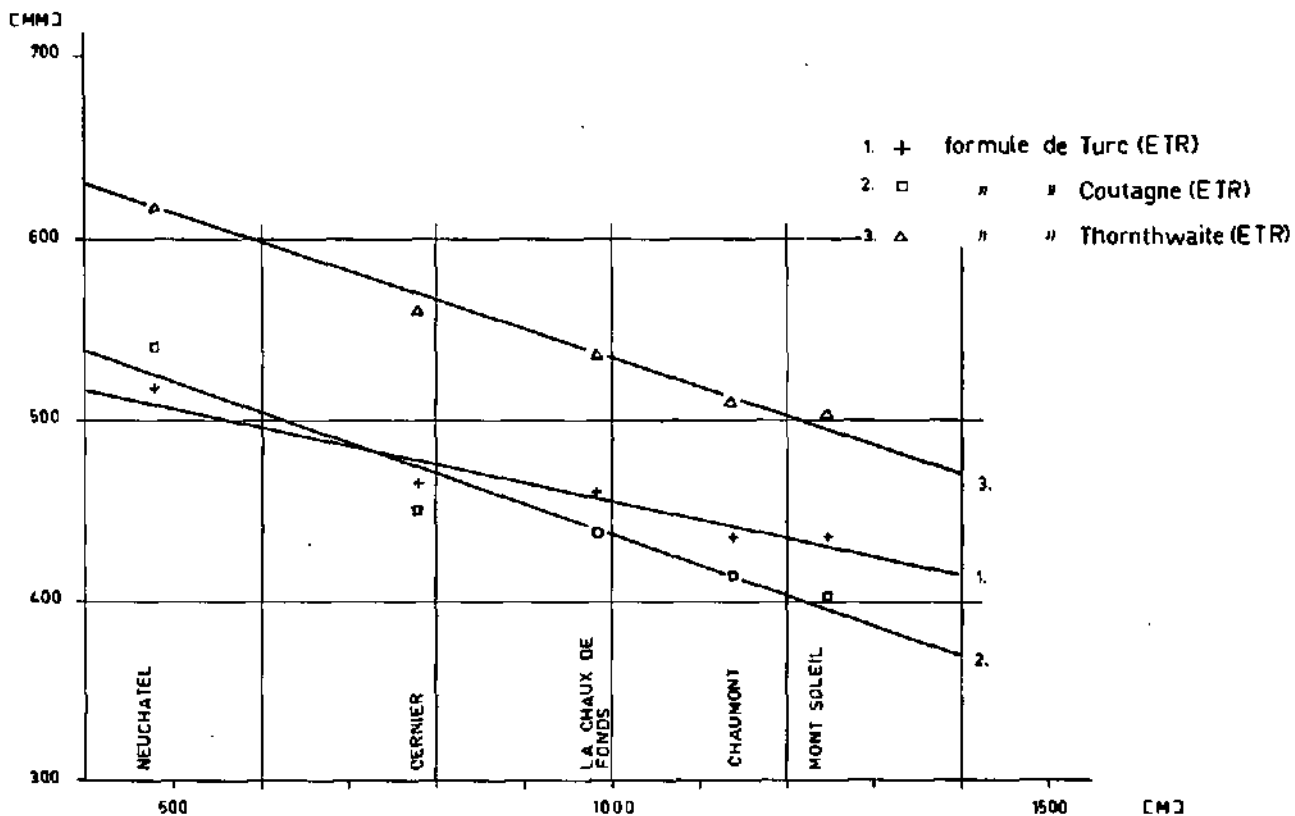


Figure VI - 21 Evapotranspiration et altitude 1901 - 1940

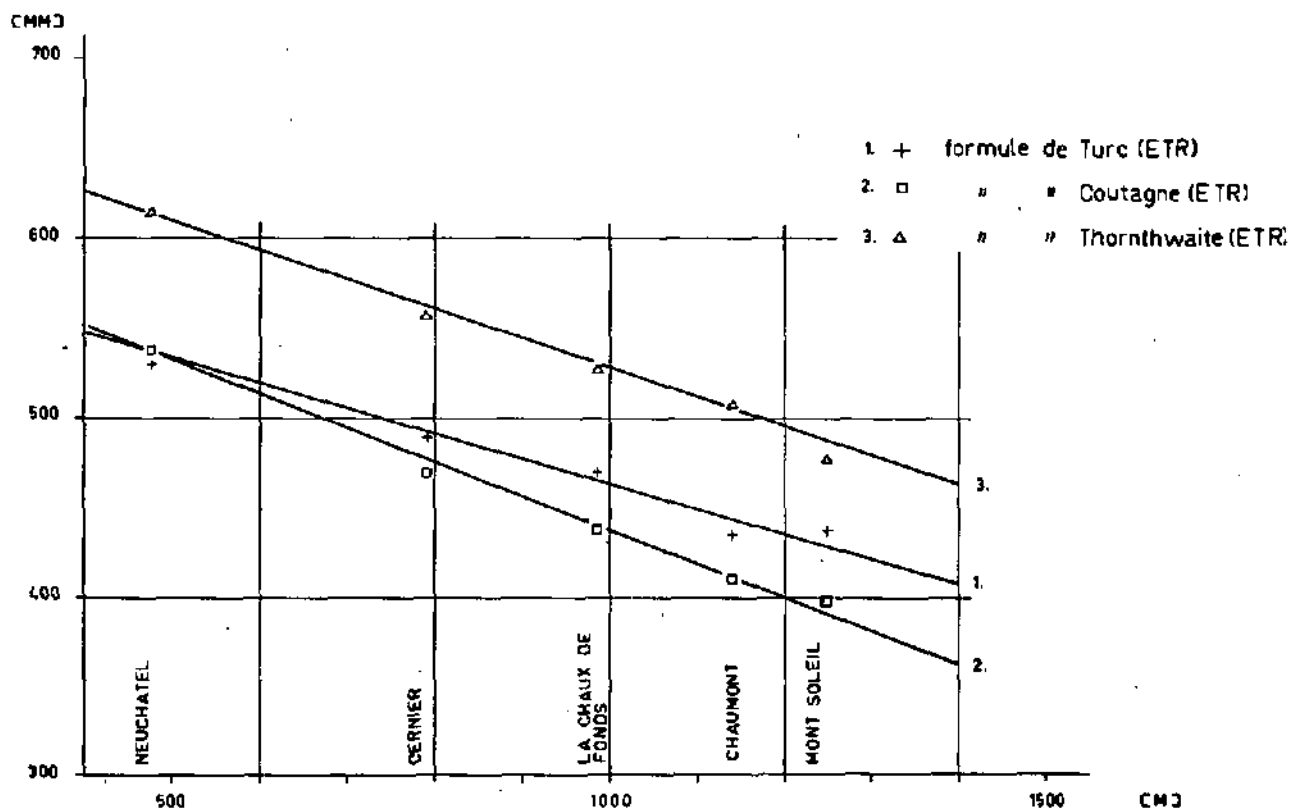


Figure VI - 22 Evapotranspiration et altitude 1914

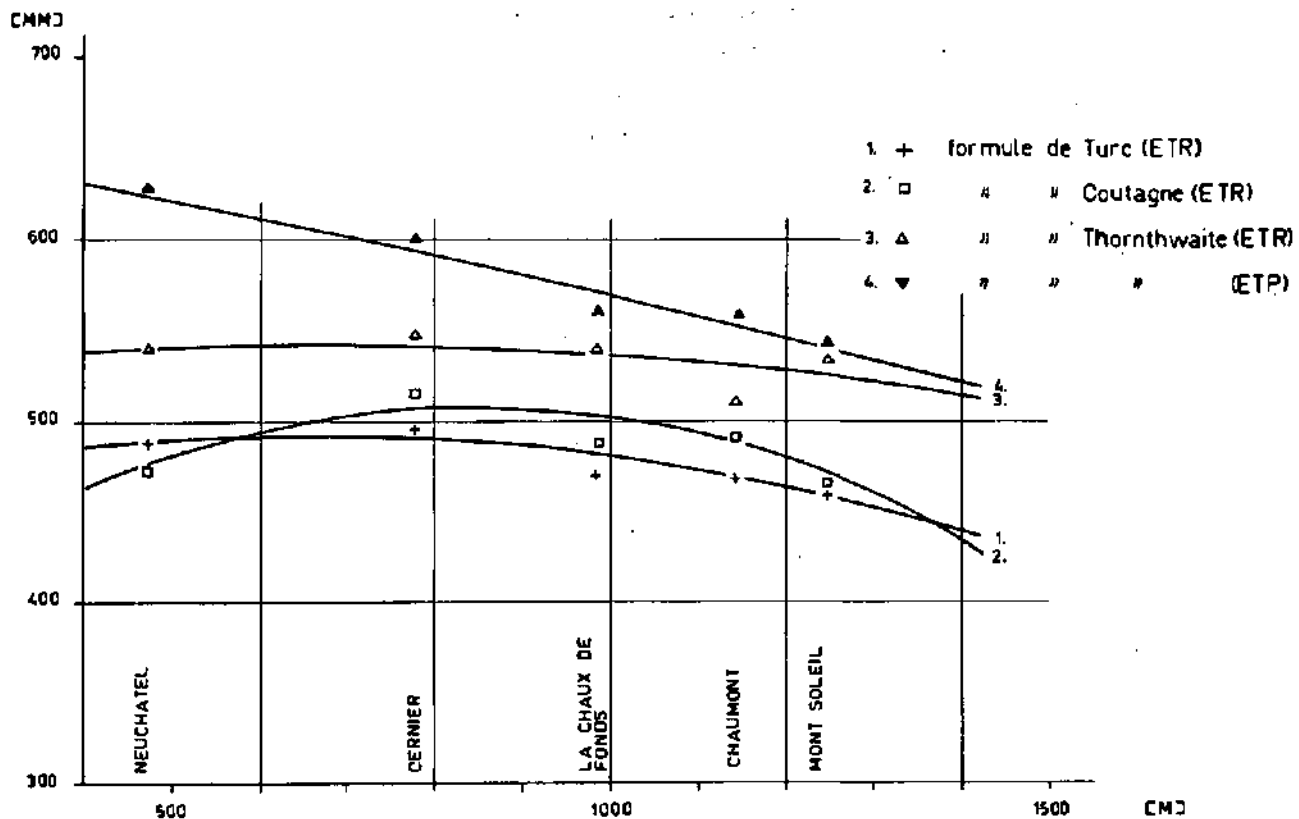


Figure VI - 23 Evapotranspiration et altitude 1921

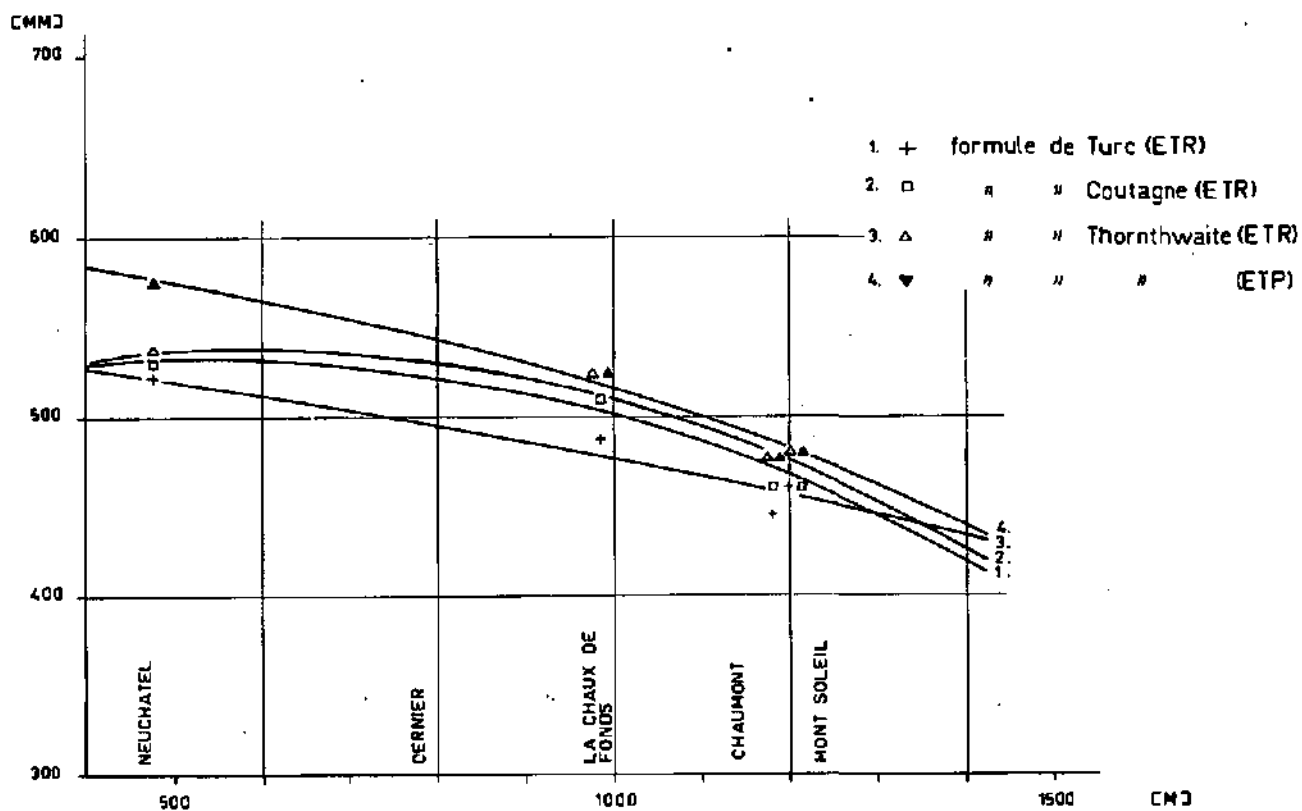


Figure VI - 24 Evapotranspiration et altitude XI 1970 - X 1971

- Année humide (1914)

Bien que les formules utilisées soient habituellement appliquées à des années moyennes, on a tenté d'estimer l'évapotranspiration pour des années extrêmes.

Les résultats pour 1914 sont très proches de ceux de l'année moyenne, surtout pour les stations d'altitude élevées. L'ETR calculée par les bilans mensuels est toujours égale à l'ETP mais un peu inférieure à celle de l'année moyenne.

L'hypothèse d'une décroissance linéaire de la température avec l'altitude est acceptable.

- Année sèche (1921 (XI 1970 - X 1971))

L'année 1921 est exceptionnellement sèche et chaude d'où une ETP nettement supérieure à l'ETR. Si l'hypothèse de la linéarité de la décroissance de l'évapotranspiration avec l'altitude peut être admise pour l'ETP, ce n'est pas le cas pour l'ETR qui s'accroît d'abord de 450 et 750 mètres d'altitude pour diminuer ensuite (Fig. VI-23). Les coefficients des paraboles $ETR = f(H)$ sont donnés au tableau VI-XIX. On retrouve cette situation, moins marquée en 1970 - 1971. Par sa situation exposée sur le flanc sud du Jura et son déficit pluviométrique, la station de Chaumont a naturellement une ETP très élevée pour cette altitude.

4.3. Bilans mensuels.

4.3.1. Méthode.

A partir des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle calculées pour chaque mois, ici selon THORNTHWAITÉ, il est possible d'établir une succession de bilans hydrologiques mensuels en un point du bassin au cours de l'année, selon une méthode fréquemment utilisée par les agronomes pour fixer les périodes d'irrigation.

Cette méthode nécessite l'évaluation de la lame d'eau maximum emmagasinée dans le sol à saturation. THORNTHWAITÉ admet 100 mm, mais elle varie selon les terrains (et les auteurs) de 50 à 300 mm. (REMENIERAS 1972). Dans le karst la lame d'eau équivalente maximum varie avec l'épaisseur des sols de couverture. Elle est probablement comprise entre 50 et 100 mm, mais une étude en vue d'une estimation plus précise est souhaitable. Dans la région étudiée, l'ETR étant généralement égale à l'ETP au cours de l'année moyenne, l'erreur introduite par la méconnaissance de ce facteur reste faible. Lorsque la température mensuelle moyenne est proche ou inférieure à 0°C l'évapotranspiration potentielle est théoriquement nulle. Compte tenu des variations de température au cours du mois et de la possibilité d'une sublimation de la neige, on a admis ici que l'évapotranspiration potentielle n'était jamais inférieure à 5 mm.

Enfin on peut reprocher à cette arithmétique des lames d'eau son caractère purement linéaire. Il est certain que l'ETR est elle-même une fonction décroissante de la teneur en eau. Lorsque le sol n'est plus saturé, en particulier lorsqu'on approche du point de flétrissement, l'évapotranspiration réelle devient progressivement inférieure à l'ETP, ce qui n'est pas considéré par la méthode des bilans mensuels qui devrait être revue à partir d'une fonction de type

$$ETR = f(ETP, \theta) \quad \text{ou } \theta \text{ est la teneur en eau du sol.}$$

4.3.2. Année moyenne (1901 - 1940)

Les tableaux VI-XIX à XXIII et la figure VI-25 donnent les résultats des bilans mensuels tels qu'ils ont été calculés par le programme EVAP1 pour 5 stations proches ou situées à l'intérieur du bassin de la Serrière et du Seyon. Un calcul de même type effectué pour la période 1901 - 1925 donne des résultats très voisins.

On constate que tout au long de l'année l'ETR est égale à l'ETP. Au-dessus de 800 mètres, il y a même toujours un excédent d'alimentation représentant l'écoulement soit superficiel, soit vers le milieu souterrain. Pour toutes les stations le déficit d'écoulement est minimum de décembre à février, il est maximum en juillet.

C'est à Neuchâtel seulement que la réserve en eau du sol est entamée (juin, juillet, août), mais la lame d'eau extrême ne dépasse pas 44 mm. Ce déficit en eau du sol est rapidement comblé en septembre et en octobre.

4.3.3. Année humide (1914).

L'ETR et l'ETP sont égales tout au long de l'année. Les stations de Chaumont, Cernier et Neuchâtel présentent un léger déficit pluviométrique en juillet et en octobre qui entame à peine les réserves en eau du sol.

4.3.4. Année sèche (1921).

L'intérêt des bilans hydrologiques mensuels utilisés surtout dans les pays à forte évapotranspiration potentielle apparaît ici clairement.

Examinons le bilan de la station de Neuchâtel pour l'année 1921, dans le cas peu favorable pour la végétation où la lame d'eau équivalente maximum du sol est de 50 mm (Fig. VI-26).

En janvier l'alimentation est excédentaire. En février l'ETR et les précipitations s'équilibrent. En mars l'excédent d'alimentation est nul et l'ETR consomme une partie des réserves en eau du sol qui seront partiellement reconstituées au cours du mois d'avril. La forte pluviosité de mai sature le sol puis provoque un excédent d'alimentation. Dès juin l'ETR consomme à nouveau la lame d'eau du sol qui sera complètement épuisée en juillet, mois à fort déficit d'alimentation. Partiellement reconstituées en août les réserves en eau du sol seront à nouveau exploitées en septembre puis en octobre où on voit apparaître un déficit d'écoulement. Novembre et décembre permettent la reconstitution des réserves.

Les mois de juillet et octobre sont les seuls où l'ETR est inférieure à l'ETP.

La station de Mont Solail est située à 1250 mètres d'altitude. Au cours de l'année 1921 l'ETR y est toujours égale à l'ETP, à l'exception du mois de juillet qui présente un léger déficit d'alimentation.

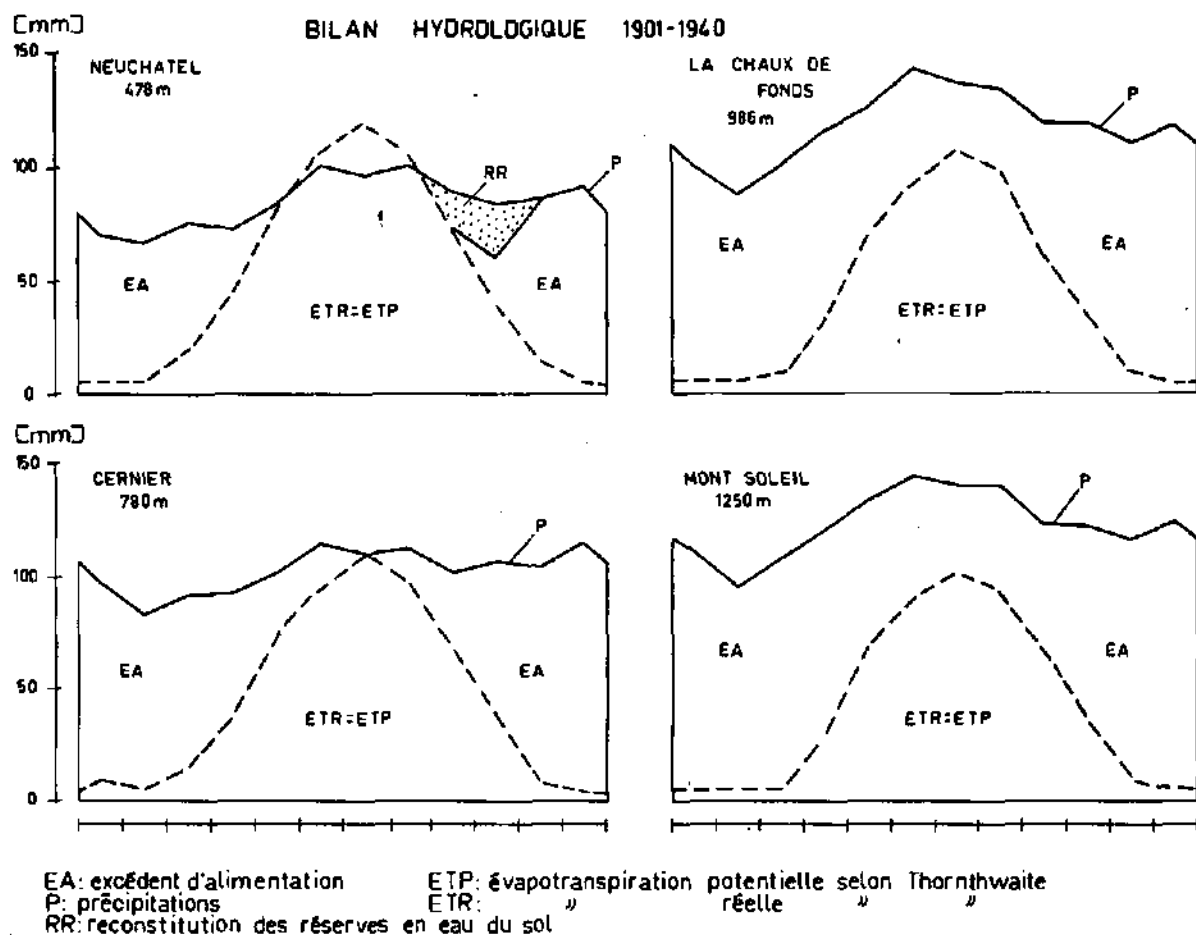


Figure VI - 25 Bilan hydrologique 1901 - 1940. Stations de Neuchâtel, Cernier, La Chaux de Fonds et Mt. Soleil

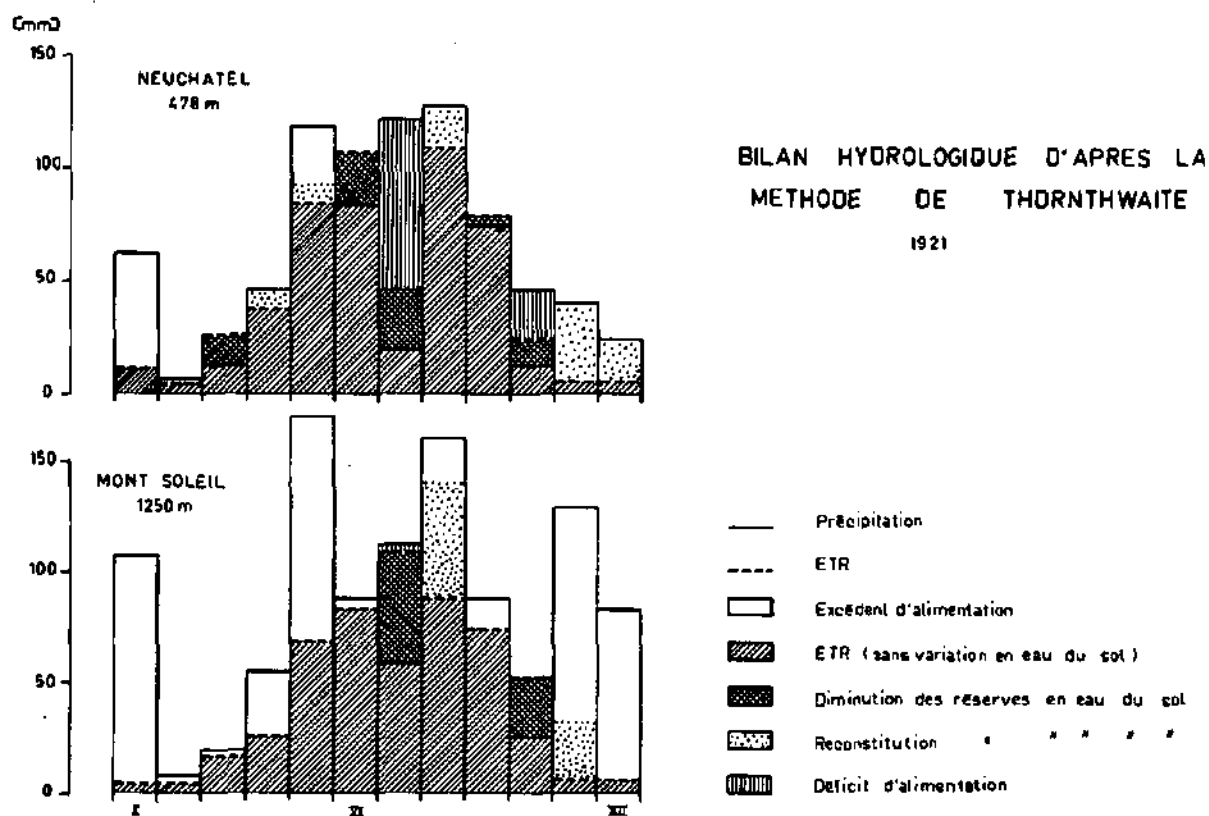


Figure VI - 26 Bilan hydrologique 1921. Stations de Neuchâtel et Mt. Soleil

Tableau VI-XVIII

Evapotranspiration réelle et potentielle pour 5 stations des bassins
de la Serrière et du Seyon.

PERIODE	Evapotranspiration réelle ETR			Evapotr. pot. ETP	PERIODE	Evapotranspiration réelle ETR			Evapotr. pot. ETP
	TURC	ECOUTAGNE	THORNTHWAITE			TURC	ECOUTAGNE	THORNTHWAITE	
NEUCHÂTEL 478 m					CNAUMONT 1141 m				
1901-1925	507 mm	530 mm	618 mm	621 mm	1901-1925	433 mm	413 mm	513 mm	513 mm
1901-1940	516	539	624	624	1901-1940	434	414	509	509
1914	540	544	615	615	1914	434	409	505	505
1921	486	472	538	620	1921	469	491	508	559
XI 1970-X 1971	521	530	533	575	XI 1970-X 1971	444	457	475	475
CERNIER 780 m					LA CHAUX-DE-FONDS 986 m				
1901-1925	461	446	565	565	1901-1925	448	417	532	532
1901-1940	464	450	560	560	1901-1940	460	437	534	534
1914	489	467	557	557	1914	470	438	526	526
1921	495	514	547	601	1921	470	487	539	560
XI 1970-X 1971	-	-	-	-	XI 1970-X 1971	487	509	525	525
MONT SOLEIL 1250 m									
1901-1925	-	-	-	-					
1901-1940	436	402	505	505					
1914	437	399	496	496					
1921	458	464	535	540					
XI 1970-X 1971	459	459	479	479					

Tableau VI-XIX

Evapotranspiration et altitude dans les bassins de la Serrière et du Seyon.
Résultats des régressions linéaires et quadratiques.

PERIODE	ETR TURC			ETR ECOUTAGNE			ETR THORNTHWAITE			ETP THORNTHWAITE		
	E_0	A_1	x	E_0	A_1	x	E_0	A_1	x	E_0	A_1	x
1901-1925 ¹⁾	554 m	-0,110	0,98	605	-0,181	0,95	692	-0,160	0,99	692	-0,160	0,99
1901-1940	558	-0,104	0,96	605	-0,170	0,96	691	-0,156	0,98	691	-0,156	0,98
1914	603	-0,139	0,98	625	-0,186	0,98	661	-0,120	0,90	661	-0,120	0,90
1921 ²⁾	E_0	A_1	A_2	E_0	A_1	A_2	E_0	A_1	A_2	E_0	A_1	A_2
1921	456	0,107	-0,85 .10 ⁻⁴	334	0,408	-0,24 .10 ⁻³	523	0,059	-0,47 .10 ⁻⁴	658	-0,066	-0,23 .10 ⁻⁴
XI 1970-X 1971	553	-0,056	-0,21 .10 ⁻⁴	482	0,179	-0,16 .10 ⁻³	467	0,223	-0,18 .10 ⁻³	598	-0,012	-0,72 .10 ⁻⁴

$N = 5$ $r_{0,01} = 0,96$

1) $ETR (ETP) = E_0 + A_1 H$

2) $ETR (ETP) = E_0 + A_1 H + A_2 H^2$

ETR : Evapotranspiration réelle mm

ETP : " " potentielle mm

H : altitude m

Tableau VI-XX

EVAPOTRANSPIRATION REELLE ET POTENTIELLE

STATION DE NEUCHÂTEL

PERIODE 1901- 1940

FORMULE DE TURC E = 316.4

FORMULE DE COUTAGNE E = 339.0

BILAN HYDRIQUE D APRES LA METHODE DE THORNTHWAITE

MOIS	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	ANNEE
TEMPERATURE	13.3	16.5	18.4	17.6	14.4	9.1	4.3	1.1	0.2	1.0	4.5	8.4	9.0
INDICES THERMIQUES	4.39	8.09	7.18	6.83	4.96	2.47	0.79	0.10	0.00	0.08	0.85	2.19	35.99
COEFFICIENTS DE CORRECTION	1.24	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75	0.80	0.81	1.02	1.13	
EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE	62.8	105.0	119.9	106.9	73.2	40.5	15.2	3.3	0.5	3.2	20.7	44.7	616.5
PRECIPITATIONS	83.0	100.0	97.0	101.0	89.0	84.0	85.0	90.0	70.0	66.0	75.0	73.0	1013.0
VARIATION DE L EAU DANS LE SOL	0.	-5.	-22.	-5.	15.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	
RESERVES UTILES A LA VEGETATION	100.	94.	71.	66.	81.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	
DEFICIT D ALIMENTATION	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
EXCEDENT D ALIMENTATION	0.	0.	0.	0.	0.	35.	69.	86.	49.	62.	54.	26.	396.
EVAPOTRANSPIRATION REELLE	62.	105.	119.	106.	73.	40.	15.	3.	0.	3.	20.	44.	616.

Tableau VI-XXI

EVAPOTRANSPIRATION REELLE ET POTENTIELLE

STATION DE CERNIER

PERIODE 1901- 1940

FORMULE DE TURC E = 464.1

FORMULE DE COUTAGNE E = 450.0

BILAN HYDRIQUE D APRES LA METHODE DE THORNTHWAITE

MOIS	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	ANNEE
TEMPERATURE	10.7	13.8	15.8	15.3	12.1	7.1	2.5	-0.6	-1.6	-1.0	2.3	5.8	6.8
INDICES THERMIQUES	3.16	4.65	5.70	5.43	3.81	1.70	0.35	0.04	0.17	0.06	0.30	1.25	26.68
COEFFICIENTS DE CORRECTION	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75	0.80	0.81	1.02	1.13	
EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE	74.3	94.9	109.3	97.9	67.7	37.3	11.8	3.0	7.4	5.2	14.2	37.1	580.9
PRECIPITATIONS	102.0	114.0	110.0	112.0	102.0	105.0	104.0	115.0	98.0	84.0	92.0	94.0	1253.0
VARIATION DE L EAU DANS LE SOL	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	
RESERVES UTILES A LA VEGETATION	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	
DEFICIT D ALIMENTATION	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
EXCEDENT D ALIMENTATION	27.	19.	0.	14.	34.	68.	92.	111.	90.	78.	77.	56.	672.
EVAPOTRANSPIRATION REELLE	74.	94.	109.	97.	67.	37.	11.	3.	7.	5.	14.	37.	580.

Tableau VI-XXII

EVAPOTRANSPIRATION REELLE ET POTENTIELLE

STATION DE CHAUMONT
PERIODE 1901- 1940

FORMULE DE TURC E = 434.0

FORMULE DE COUTAGNE E = 414.2

BILAN HYDRIQUE D APRES LA METHODE DE THORNTONWAITE

MOIS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	ANNEE
TEMPERATURE	8.8	11.7	13.8	13.3	10.4	5.7	1.4	-1.4	-2.3	-2.1	0.6	3.8					5.3
INDICES THERMIQUES	2.35	3.62	4.65	4.39	3.03	1.21	0.14	0.14	0.30	0.26	0.04	0.66					20.84
COEFFICIENTS DE CORRECTION	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75	0.80	0.81	1.02	1.13					
EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE	88.5	87.6	102.2	91.5	64.0	34.9	9.0	8.5	13.9	13.0	5.7	29.9					529.3
PRECIPITATIONS	97.0	117.0	118.0	118.0	103.0	99.0	93.0	98.0	75.0	71.0	83.0	66.0					1156.0
VARIATION DE L EAU DANS LE SOL	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.					
RESERVES UTILES A LA VEGETATION	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.					
DEFICIT D ALIMENTATION	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.					0.
EXCEDENT D ALIMENTATION	28.	29.	13.	28.	38.	64.	82.	89.	61.	37.	77.	56.					626.
EVAPOTRANSPIRATION REELLE	88.	87.	102.	91.	64.	34.	9.	8.	13.	13.	5.	29.					529.

Tableau VI-XXIII

EVAPOTRANSPIRATION REELLE ET POTENTIELLE

STATION DE LA CHAUX DE FONDS
PERIODE 1901- 1940

FORMULE DE TURC E = 460.5

FORMULE DE COUTAGNE E = 436.6

BILAN HYDRIQUE D APRES LA METHODE DE THORNTONWAITE

MOIS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	ANNEE
TEMPERATURE	9.8	12.8	14.9	14.1	11.2	6.6	2.1	-1.1	-2.1	-1.7	1.3	4.7					6.0
INDICES THERMIQUES	2.76	4.15	5.22	4.80	3.39	1.52	0.26	0.10	0.26	0.19	0.13	0.91					22.73
COEFFICIENTS DE CORRECTION	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75	0.80	0.81	1.02	1.13					
EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE	71.6	91.4	106.1	93.4	65.5	37.1	11.3	6.0	11.4	9.6	9.5	33.0					546.5
PRECIPITATIONS	124.0	142.0	137.0	134.0	120.0	120.0	110.0	118.0	99.0	88.0	100.0	115.0					1407.0
VARIATION DE L EAU DANS LE SOL	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.					
RESERVES UTILES A LA VEGETATION	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.					
DEFICIT D ALIMENTATION	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.					0.
EXCEDENT D ALIMENTATION	52.	50.	30.	40.	54.	82.	98.	111.	87.	78.	90.	61.					860.
EVAPOTRANSPIRATION REELLE	71.	91.	106.	93.	65.	37.	11.	6.	11.	9.	9.	33.					546.

STATION DE MONT SOLEIL

PERIODE 1901- 1940

FORMULE DE TURC E = 435.6

FORMULE DE COUAGNE E = 402.1

BILAN HYDRIQUE D APRES LA METHODE DE THORNTHWAITTE

MOIS	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	ANNEE
TEMPERATURE	8.6	11.4	13.5	13.0	10.3	5.8	1.5	-1.3	-2.2	-2.1	0.5	3.6	5.2
INDICES THERMIQUES	2.27	3.48	4.49	4.24	2.98	1.25	0.16	0.13	0.28	0.26	0.03	0.60	20.22
COEFFICIENTS DE CORRECTION	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75	0.80	0.81	1.02	1.13	
EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE	67.9	86.5	101.0	90.5	64.1	36.0	9.8	8.3	13.7	13.3	5.1	29.1	525.7
PRECIPITATIONS	132.0	142.0	140.0	140.0	123.0	121.0	116.0	123.0	111.0	95.0	107.0	120.0	1410.0
VARIATION DE L EAU DANS LE SOL	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	
RESERVES UTILES A LA VEGETATION	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	
DEPICIT D ALIMENTATION	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
EXCEDENT D ALIMENTATION	64.	55.	38.	49.	36.	84.	100.	114.	97.	81.	101.	90.	944.
EVAPOTRANSPIRATION REELLE	67.	86.	101.	90.	64.	36.	9.	8.	13.	13.	5.	29.	525.

CHAPITRE VII

LE SEYON

It would be extremely rash to think that a general answer is near or that technique will soon be ready to produce accurate forecasts for specific catchments.

J. E. NASH

Journal of Hydrology 10/1970

1. REGIME HYDROLOGIQUE

1.1. Historique et provenance des mesures.

C'est probablement Ch. KNAB (1864) qui réalise les premières jaugages du Seyon et de la Serrière. En basses eaux il a mesuré des débits de 0,6 à 1,7 m³ s⁻¹. Dès la fin du XIX^e siècle et jusqu'en 1925, S. DE PERROT (1897, 1922) fait procéder à des relevés journaliers des niveaux du Seyon à la sortie du tunnel de la colline du château de Neuchâtel (trouée du Seyon). La section est étalonnée et les résultats, dont les originaux ont été détruits, sont publiés sous forme graphique dans le Bulletin de la Société neuchâteloise des Sciences naturelles.

Dès 1918 le Service de l'électricité de la ville de Neuchâtel relève les débits du Seyon à l'aval de Valengin à la hauteur de l'ancienne teinturerie, détruite avec le saut de mesure en 1971 lors de la construction du tunnel de dérivation. Les résultats qui ne comprennent que les débits inférieurs à 1 m³ s⁻¹ sont publiés jusqu'en 1943 dans les rapports annuels sur la gestion des comptes des Services industriels de la ville de Neuchâtel.

D'octobre 1970 à octobre 1972 dans le cadre du dispositif de prévision des crues du Seyon à Valengin, le Centre d'Hydrogéologie a réalisé des enregistrements du débit du Seyon à la hauteur du château. (Tableaux VII-I, VII-II, VII-III, figure VII-1).

1.2. Utilisation des données de débit.

Les données utilisées ici sont surtout celles de DE PERROT entre 1901 et 1925 (tableau VII-III). On sera conscient du fait qu'il s'agit de relevés journaliers instantanés et non journaliers moyens. Sur une longue période et dans le cas où les crues seraient distribuées de façon aléatoire au cours de la journée, l'erreur introduite serait négligeable. BOUET (1972) à la suite d'autres auteurs a montré que les précipitations n'étaient pas réparties uniformément au cours de la journée : moins fréquentes au milieu du jour, elles sont plus abondantes durant la nuit.

L'erreur systématique ainsi introduite n'a pas été estimée faute de documents adéquats mais pourrait l'être pour des périodes plus récentes. Dans les périodes où l'enneigement régit seul le mécanisme de la fonte de la neige, le débit du Seyon présente des fluctuations journalières périodiques (Fig. VII-2) qui provoqueront selon l'heure de la mesure du débit une erreur systématique positive ou négative qui, pour les mesures 1901 - 1925 n'a pu être éliminée. Une autre source d'erreur est liée à l'analyse des données graphiques. Si les débits journaliers sont lus directement, les débits mensuels et annuels moyens ont été obtenus par un planimétrage soigné répété 3 fois.

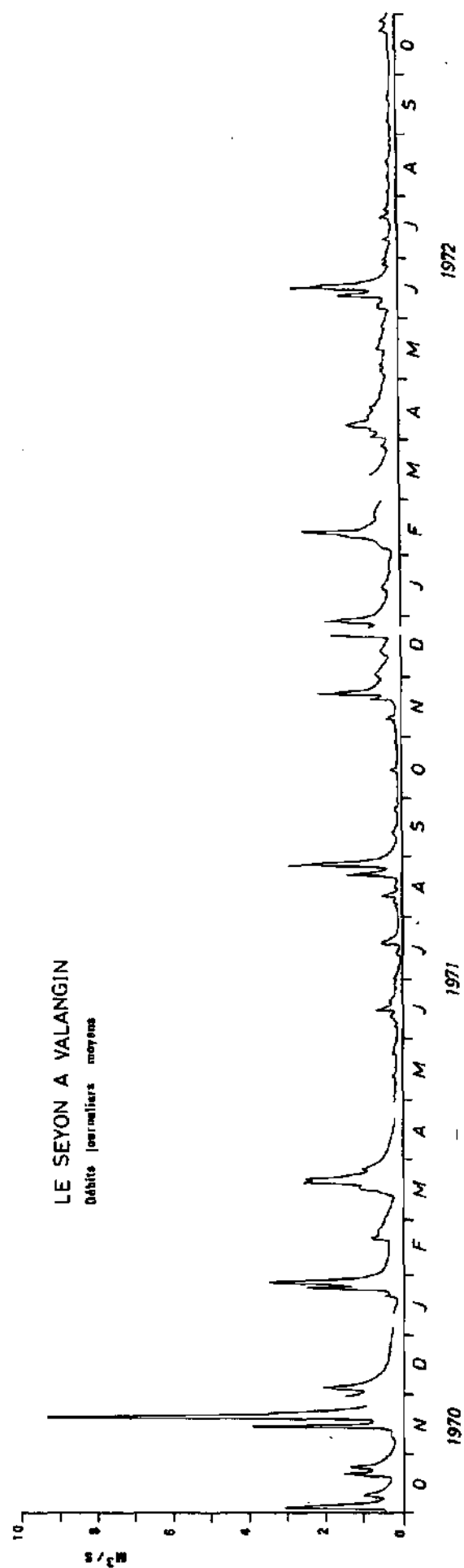


Figure VII - 1 Débit du Seyon à Valangin (X 1970 - X 1972)

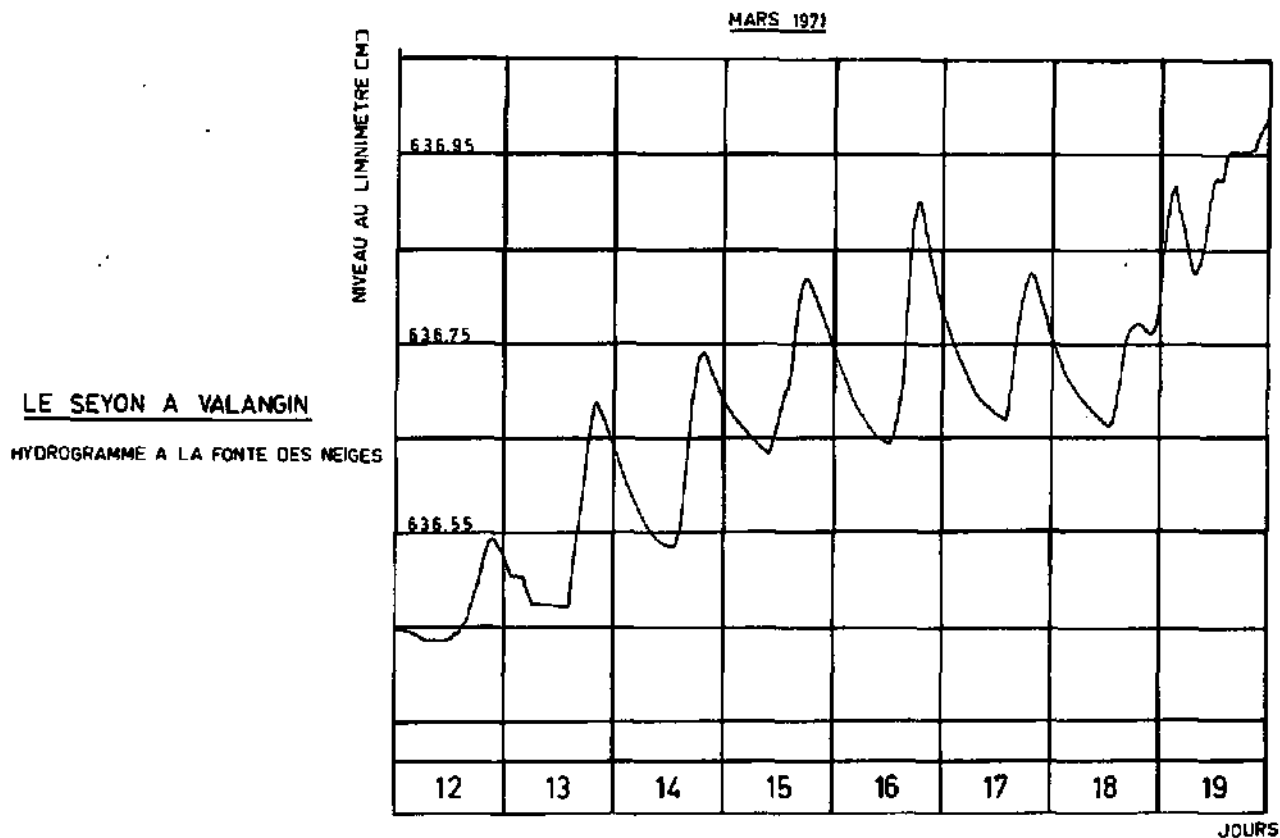


Figure VII - 2 Hydrogramme du Seyon à Valangin en période de fonte de neige (III 1971)

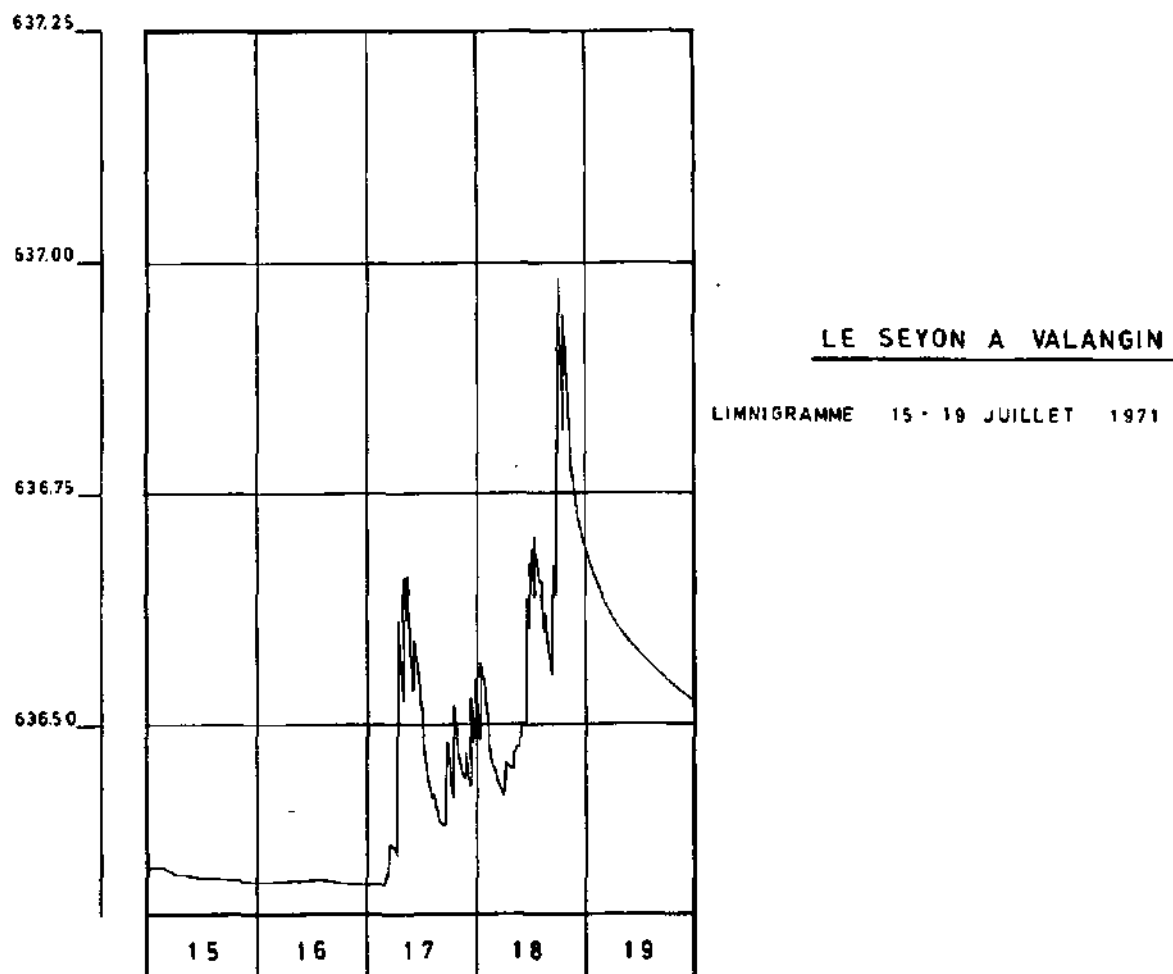


Figure VII - 3 Limnigramme du Seyon à Valangin montrant la succession des crues de la Sorge et du Haut-Seyon

Lorsque la somme des débits manuels ne correspondait pas au débit annuel, une pondération des débits manuels était effectuée. La comparaison des débits mensuels moyens à Valengin et à Neuchâtel (1918 - 1925) a mis en évidence des différences non négligeables pour les faibles débits qui ne peuvent toutes être expliquées par les pertes dans les gorges du Seyon.

Tableau VII-1

Mesures du débit du Seyon : Références bibliographiques.

Années des observations	Ouvrage	Volume	Année de parution	page	Auteur
1856	B.S.N.S.N	7	1864	464	KNAB
1901-1904	"	33	1904-1905	216	DE PERROT
1905-1907	"	35	1907-1908	75	DE PERROT
1908-1913	"	40	1912-1913	240	DE PERROT
1914-1921	"	48	1923	68	DE PERROT
1921-1923	"	51	1926	208	DE PERROT
1924-1925	"	52	1927	133	DE PERROT
1918-1943 2)	Rapport sur la gestion des comptes	-	1918-1943	-	Services industriels Ville de Neuchâtel
1970-1972	Rapport technique inédit	-	1972	-	Centre d'Hydrogéologie Université, Neuchâtel

1) Bulletin de la Société neuchâteloise des Sciences naturelles

2) Débits inférieurs à $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$

1.3. Caractéristique du régime hydrologique.

Réaction très rapide aux averse, temps de concentration restreint, crues parfois catastrophiques ($52 \text{ m}^3/\text{s}$) et débits d'étiages à Valengin inférieurs à 100 l s^{-1} 34 jours par an (1918 - 1943) sont les caractéristiques d'un bassin alimenté aux surfaces imperméables bien développées et aux réserves souterraines restreintes.

Le développement du réseau de drainage au Val de Ruz et la correction des cours d'eau ont certainement accéléré encore la vidange du bassin et diminué son temps de concentration. (Chap. X-1.1.) Plus récemment le goudronnage des routes et l'augmentation de la surface des toitures ont accentué encore ce phénomène. Le débit maximum observé est de $52 \text{ m}^3/\text{s}$ (I 1899) (VI 1901), le débit minimum 18 l/s à Valengin (VIII 1921, IX 1928) et nul à Neuchâtel en raison des pertes dans les gorges du Seyon.

Le bassin du Seyon on l'a vu comprend un bassin supérieur allant de la Borcarderie à Villiers et un bassin inférieur drainé par le Sorge.

Le plus souvent les perturbations météorologiques traversent le bassin d'Ouest en Est et on observe à Valengin la composante des débits des deux bassins (Fig. VII-3). Le limnigraphe placé à Valengin 400 mètres en aval du confluent des 2 rivières (1970 - 1972) enregistrait deux crues successives, la première en provenance de la Sorge, la seconde du haut bassin du Seyon. L'analyse des crues montre que ce phénomène apparaît avec la plupart des averse dont on suit ainsi le déplacement dans le bassin, à l'exception de celles qui sont régulièrement réparties sur le bassin ou de longue durée. Selon la vitesse de déplacement et l'intensité de l'averse, l'écart entre les deux crues est compris entre 30 minutes et 2 heures.

La figure VII-2 illustre le régime hydrologique du Seyon au moment de la fonte de la neige sous l'effet de l'ensoleillement et ses conséquences sur la recharge du flot de base (mars 1971). Le débit maximum a lieu entre 18 et 20 heures, le débit minimum entre 13 et 14 heures. L'écart entre l'ensoleillement maximum et le débit maximum est donc d'environ 6 à 10 heures.

Tableau VII-11

Le Seyan à Velangin
Débite Journaliers moyen x 1970 - x 19723
m³/e

	O	N	D	J	F	M	A	M	J	U	A	S.	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O
1	0,413	0,338	1,083	0,283	0,676	0,484	0,533	0,267	0,170	0,227	0,131	0,377	0,115	0,144	0,676	0,733	0,251	-	0,397	0,383	0,340	0,288	0,200	0,161	0,174
2	0,428	0,304	1,038	0,269	0,558	0,473	0,503	0,259	0,167	0,162	0,130	0,324	0,108	0,156	0,696	0,659	0,267	-	0,752	0,381	0,431	0,304	0,282	0,159	0,174
3	3,097	0,286	1,429	0,262	0,537	0,435	0,455	0,239	0,159	0,153	0,134	0,293	0,105	0,144	0,626	0,626	0,277	-	0,610	0,397	0,322	0,277	0,277	0,158	0,174
4	1,910	0,264	2,156	0,251	0,529	0,397	0,436	0,224	0,153	0,153	0,159	0,259	0,115	0,142	0,573	0,565	0,449	-	0,570	0,447	0,265	0,269	0,215	0,164	0,170
5	1,095	0,253	1,406	-	0,473	0,368	0,431	0,220	0,143	0,130	0,180	0,235	0,119	0,142	0,537	0,523	0,553	-	0,810	0,473	0,283	0,259	0,197	0,164	0,177
6	0,773	0,243	1,161	-	0,452	0,350	0,417	0,211	0,203	0,095	0,153	0,198	0,121	0,178	0,503	0,497	0,589	-	0,756	0,412	0,558	0,247	0,195	0,183	0,174
7	0,594	0,261	1,010	-	0,445	0,327	0,387	0,203	0,203	0,092	0,153	0,180	0,121	0,235	0,455	0,461	0,629	-	0,883	0,400	0,473	0,232	0,193	0,224	0,167
8	0,497	0,299	0,883	-	0,423	0,307	0,368	0,193	0,153	0,083	0,246	0,189	0,124	0,161	0,413	0,428	0,776	-	1,391	0,500	0,537	0,208	0,215	0,182	0,173
9	1,010	0,259	0,771	-	0,407	0,291	0,353	0,209	0,232	0,079	0,170	0,164	0,122	0,164	0,387	0,397	1,305	-	1,192	0,428	0,445	0,215	0,230	0,170	0,183
10	0,973	0,368	0,696	-	0,397	0,274	0,337	0,211	0,227	0,063	0,171	0,170	0,122	0,227	0,372	0,387	1,491	-	0,889	0,419	0,400	0,381	0,227	0,211	0,180
11	0,695	0,299	0,626	0,267	0,383	0,257	0,324	0,193	0,307	0,053	0,565	0,251	0,134	0,178	0,438	0,377	1,853	-	0,823	0,403	0,542	0,239	0,229	0,197	0,174
12	0,565	0,288	0,573	0,256	0,397	0,274	0,307	0,274	0,319	0,195	0,242	0,274	0,130	0,170	0,484	0,379	2,598	-	0,837	0,438	1,570	0,224	0,227	0,183	0,177
13	0,473	0,278	0,529	0,242	0,381	0,397	0,294	0,227	0,229	0,203	0,170	0,171	0,148	0,161	0,537	0,383	1,427	0,807	0,845	0,400	1,049	0,215	0,223	0,183	0,178
14	0,428	0,273	0,517	0,227	0,387	0,580	0,291	0,199	0,261	0,099	0,153	0,178	0,332	0,153	0,510	0,473	1,004	0,596	0,752	0,400	0,728	0,203	0,209	0,180	0,178
15	0,393	1,427	0,484	0,215	0,377	0,983	0,274	0,197	0,733	0,080	0,203	0,158	0,195	0,156	0,478	0,510	0,932	0,626	0,733	0,377	0,864	0,201	0,242	0,174	0,177
16	0,362	1,893	0,465	0,206	0,376	1,167	0,267	0,187	0,484	0,063	0,161	0,137	0,153	0,156	0,438	0,484	0,810	0,565	0,740	0,585	2,818	0,198	0,220	0,171	0,178
17	0,337	0,773	0,436	0,195	0,357	1,136	0,251	0,195	0,339	0,251	0,161	0,134	0,134	0,187	0,407	0,438	0,717	0,523	0,789	0,537	2,000	0,197	0,220	0,170	0,180
18	0,319	0,860	0,428	0,187	0,659	1,054	0,242	0,187	0,293	0,565	0,156	0,128	0,140	0,180	0,381	0,368	0,663	0,487	0,655	0,515	1,154	0,199	0,283	0,224	0,183
19	0,379	0,154	0,403	0,206	0,860	2,687	0,227	0,183	0,340	0,523	0,153	0,119	0,137	0,837	0,363	0,346	0,670	0,463	0,626	0,487	0,756	0,199	0,223	0,208	0,185
20	1,586	0,435	0,377	0,510	0,676	2,381	0,211	0,178	0,307	0,299	0,397	0,119	0,134	0,550	0,643	0,342	0,676	0,438	0,573	0,510	0,580	0,223	0,182	0,190	0,183
21	0,983	0,475	0,368	0,353	0,603	2,560	0,235	0,198	0,262	0,213	0,473	0,130	0,124	0,837	1,853	0,321	0,676	0,416	0,537	0,459	0,487	0,456	0,178	0,182	0,177
22	0,793	0,157	0,362	0,387	0,659	1,900	-	0,206	0,224	0,171	1,427	0,134	0,124	2,210	1,986	0,299	0,663	0,393	0,510	0,445	0,426	0,262	0,174	0,177	0,255
23	1,094	1,554	0,356	0,461	0,655	1,284	-	0,190	0,197	0,167	0,793	0,170	0,126	1,192	1,094	0,289	0,670	0,377	0,480	0,438	0,364	0,227	0,173	0,178	0,391
24	1,427	1,186	0,346	2,499	0,603	1,010	-	0,291	0,215	0,164	0,539	0,227	0,134	0,874	1,010	0,296	0,653	0,367	0,484	0,400	0,329	0,229	0,171	0,167	0,236
25	0,907	0,942	0,339	1,339	0,880	0,907	-	0,239	0,195	0,153	0,387	0,134	0,144	0,769	0,983	0,305	0,629	0,359	0,461	0,377	0,299	0,350	0,170	0,183	0,206
26	0,696	-	0,332	2,896	0,539	1,066	-	0,232	0,187	0,143	0,932	0,098	0,148	0,783	0,825	0,291	0,580	0,353	0,417	0,367	0,294	0,241	0,170	0,180	0,206
27	0,570	-	0,329	3,475	0,510	0,983	-	0,211	0,227	0,142	3,025	0,105	0,144	0,632	0,696	0,307	0,537	0,377	0,429	0,407	0,377	0,220	0,211	0,174	0,215
28	0,512	-	0,322	2,560	0,497	0,793	-	0,224	0,208	0,140	1,399	0,113	0,144	0,580	0,983	0,288	0,533	0,497	0,422	0,484	0,379	0,211	0,187	0,178	0,379
29	0,455	-	0,316	1,506	-	0,696	0,251	0,187	0,195	0,137	0,807	0,143	0,143	0,344	2,050	0,267	-	0,391	0,406	0,381	0,332	0,203	0,162	0,173	0,227
30	0,419	1,545	0,304	0,993	-	0,603	0,235	0,176	0,267	0,136	0,610	0,115	0,143	0,610	1,284	0,259	-	0,362	0,391	0,393	0,403	0,206	0,161	0,166	0,203
31	0,387	-	0,296	0,815	-	0,556	-	0,170	-	0,134	0,473	-	0,137	-	0,932	0,247	-	0,346	-	0,356	-	0,220	0,161	-	0,190
Moy.	0,791	1,375	0,650	0,833	0,514	0,870	0,332	0,212	0,253	0,169	0,478	0,181	0,139	0,442	0,746	0,405	0,817	0,465	0,672	0,432	0,660	0,245	0,205	0,180	0,201

Tableau VII-III

Le Seyon : débits mensuels à Neuchâtel obtenus par planimétrage
des graphiques de DE PERROT

1901 - 1925

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
1901	0,607	0,237	0,893	4,170	0,214	1,329	0,643	0,429	0,664	0,750	0,074	0,393	0,867
1902	1,541	1,214	2,530	1,185	0,807	0,227	0,323	0,288	0,030	0,143	0,370	2,760	0,779
1903	0,870	0,476	1,109	1,193	0,422	0,211	0,214	0,361	0,0	0,936	0,820	0,738	0,508
1904	1,046	1,827	0,563	0,582	0,322	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,008	0,402	0,396
1905	0,467	0,129	2,178	1,286	1,245	0,321	0,008	0,039	0,723	1,361	1,085	0,895	0,811
1906	2,087	0,925	1,496	0,144	0,626	0,144	0,0	0,0	0,0	0,0	0,288	0,348	0,505
1907	0,402	1,012	2,668	0,529	0,183	0,038	0,007	0,004	0,0	0,0	0,0	1,792	0,553
1908	0,866	1,683	3,306	0,895	0,787	1,464	0,393	0,315	1,259	2,276	0,106	1,023	1,031
1909	1,175	0,669	2,350	1,110	0,504	0,347	1,746	0,087	0,083	1,209	0,520	2,518	1,027
1910	1,143	1,265	0,143	0,089	0,086	0,590	1,571	0,214	0,086	0,093	2,029	1,178	0,707
1911	0,095	0,725	2,074	2,203	0,036	1,692	0,291	0,022	0,023	0,873	2,820	0,400	0,771
1912	1,827	0,534	0,931	0,142	0,248	0,164	0,310	1,482	0,605	0,379	0,093	0,896	0,634
1913	0,424	0,117	0,247	0,511	0,247	0,095	0,120	0,085	0,161	0,247	1,973	0,530	0,396
1914	0,690	0,885	6,394	0,826	1,235	0,203	0,545	1,126	1,126	0,145	1,126	3,488	1,482
1915	2,615	0,662	2,465	1,853	0,224	0,347	0,097	0,299	0,077	0,097	1,853	2,727	1,110
1916	0,628	1,432	0,887	0,916	0,111	0,687	1,293	0,406	1,069	1,071	0,534	1,699	0,894
1917	0,304	0,112	0,351	0,628	2,094	0,803	0,371	1,202	0,489	1,013	0,698	0,203	0,689
1918	1,047	0,193	0,454	0,902	0,419	1,406	0,349	0,419	2,019	0,558	0,721	2,303	0,899
1919	0,122	2,274	0,395	0,659	0,545	0,157	0,790	0,152	0,094	0,122	2,041	4,559	0,993
1920	2,462	0,553	0,285	0,627	0,107	0,074	0,178	0,054	0,184	0,285	0,055	0,107	0,414
1921	0,496	0,380	0,067	0,049	0,229	0,236	0,086	0,029	0,118	0,086	0,197	0,114	0,174
1922	2,171	3,062	1,240	3,168	0,758	0,116	0,017	0,017	0,063	0,207	1,104	1,309	1,103
1923	1,064	2,396	1,651	0,379	0,990	0,872	0,055	0,018	0,019	1,064	1,668	2,001	1,015
1924	0,986	0,202	1,497	0,830	1,862	0,604	0,146	0,365	0,339	1,241	0,792	0,018	0,740
1925	0,103	2,091	0,343	0,390	0,584	0,142	0,060	0,103	1,420	0,721	1,029	3,709	0,891
$\bar{x}$	1,01	1,00	1,46	0,93	0,60	0,49	0,38	0,30	0,44	0,51	0,88	1,44	0,77
σ	0,73	0,81	1,39	0,94	0,54	0,50	0,48	0,40	0,54	0,56	0,78	1,27	0,29
$\bar{x}$ Seyon	0,37	0,54	0,41	0,20	0,17	0,25	0,25	0,19	0,27	0,28	0,43	0,56	0,31
$\bar{x}$ Serrières													

Ecart type de l'ensemble des valeurs manuelles $s=0,88$

* Valeurs reconstituées par régression avec les précipitations manuelles à Dombresson .

1.4. Débits annuels et mensuels moyens.

Les débits mensuels et annuels de la période 1901 - 1925 sont donnés au tableau VII-III.

Les valeurs manquantes (1902, 1903) ont été reconstituées par régression linéaire avec les précipitations mensuelles à la station de Dombresson.

Le débit mensuel moyen oscille entre 1,46 (mars) et 0,30 m³/s (août). De juin à octobre, l'écart type s des débits mensuels est supérieur au débit, ce qui n'est pas le cas pour les précipitations. L'écart type des 300 moyennes mensuelles de débits considérées vaut 0,88 m³/s. Les débits mensuels maximum et minimum mesurés à Neuchâtel sont respectivement 6,39 et 0,00 m³/s, alors qu'à Velangin le débit mensuel minimum observé (1918 - 1943) est de 0,045 m³/s (VIII 1922).

L'histogramme des débits mensuels moyens (Fig. VII-4) que l'on comparera à celui des précipitations révèle l'effet retardateur de la réserve nivale sur l'écoulement: excédentaire en mars, il est déficitaire en janvier et février.

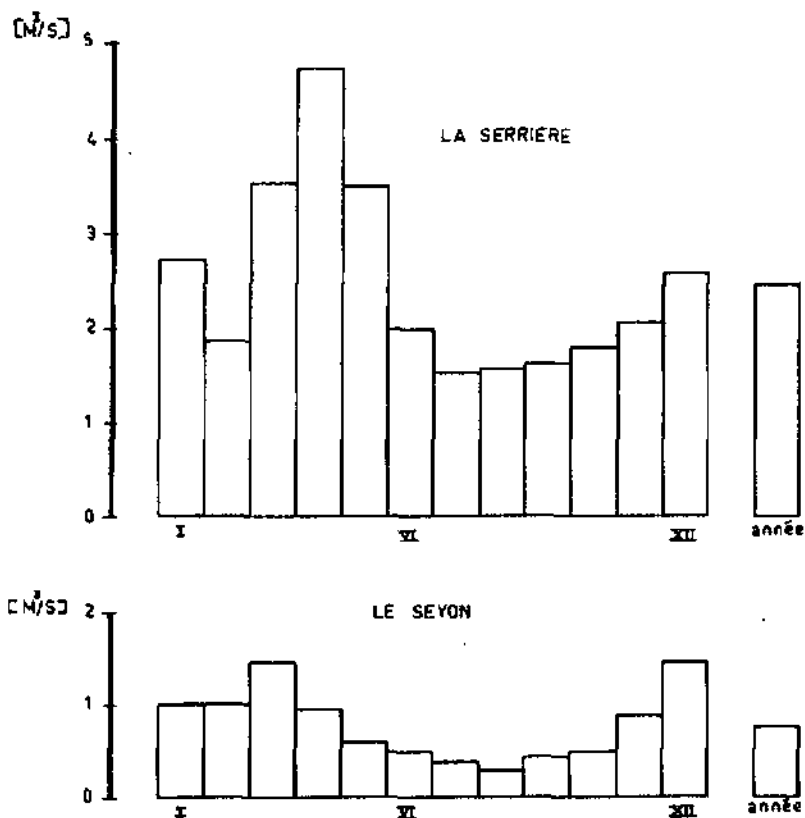


Figure VII - 4 Histogrammes des débits mensuels moyens de la Serrière et du Seyon (1901 - 1925)

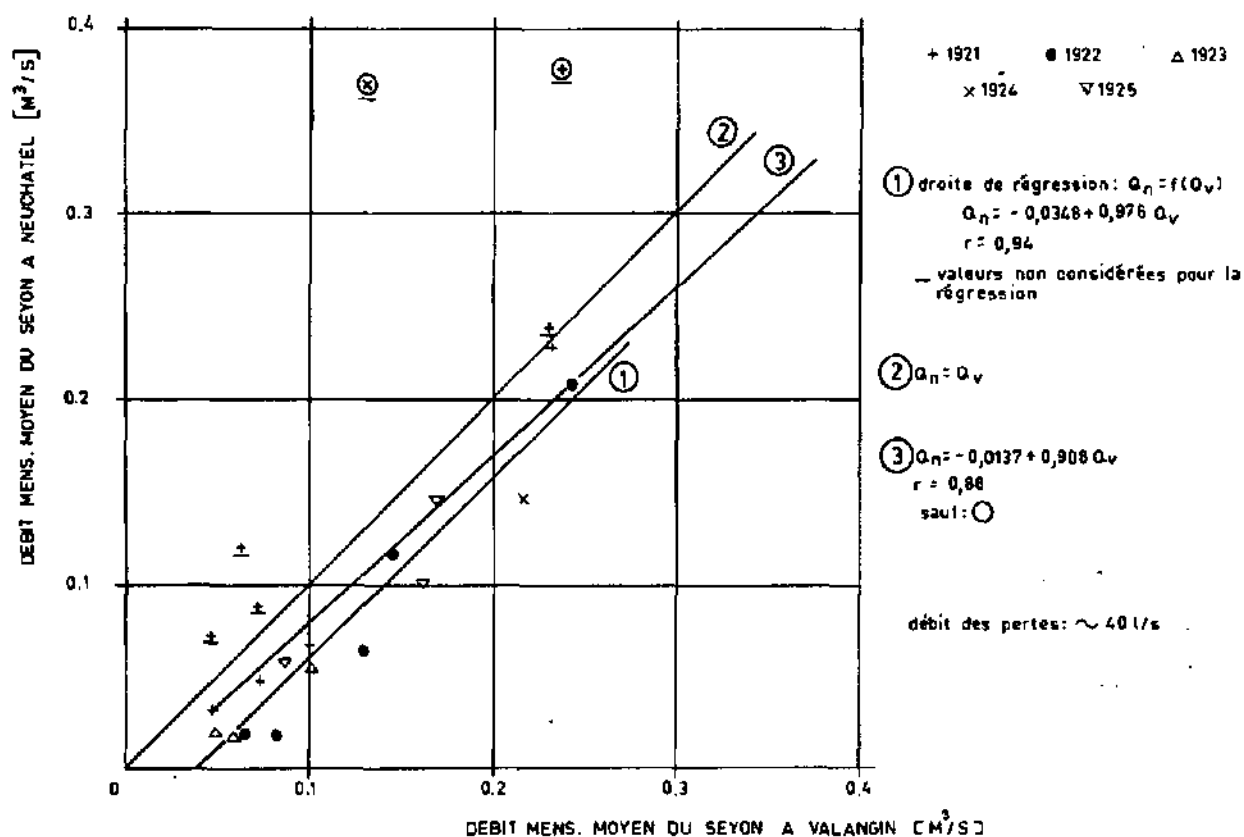


Figure VII - 5 Estimation des pertes du Seyon entre Valangin et Neuchâtel par régression des débits mensuels

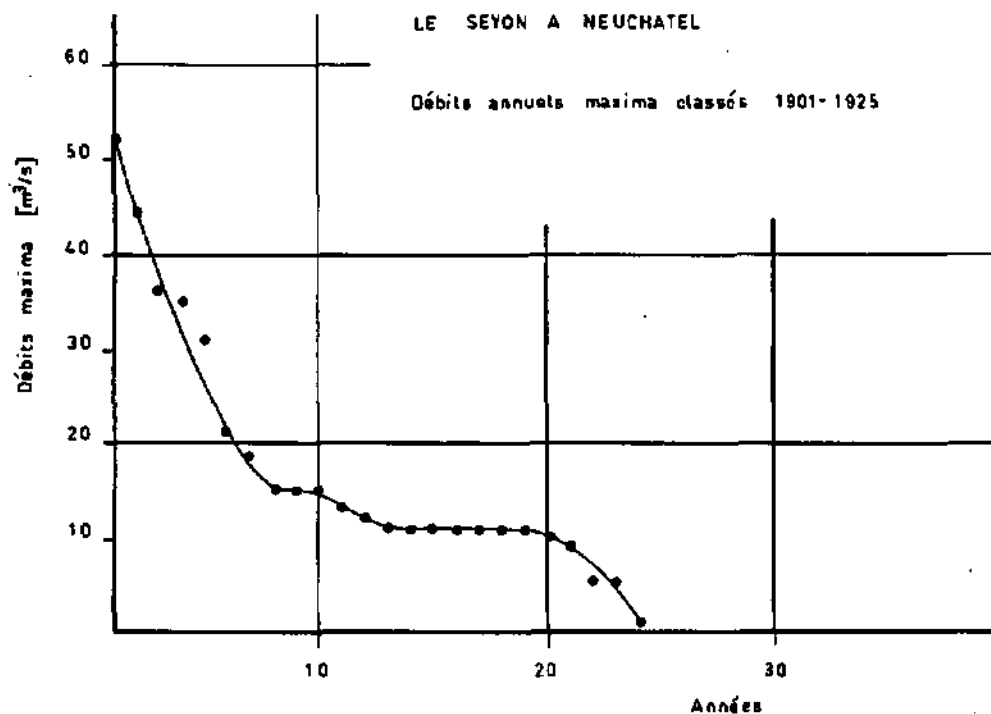


Figure VII - 6 Le Seyon à Neuchâtel. Courbe des débits annuels maxima classés.

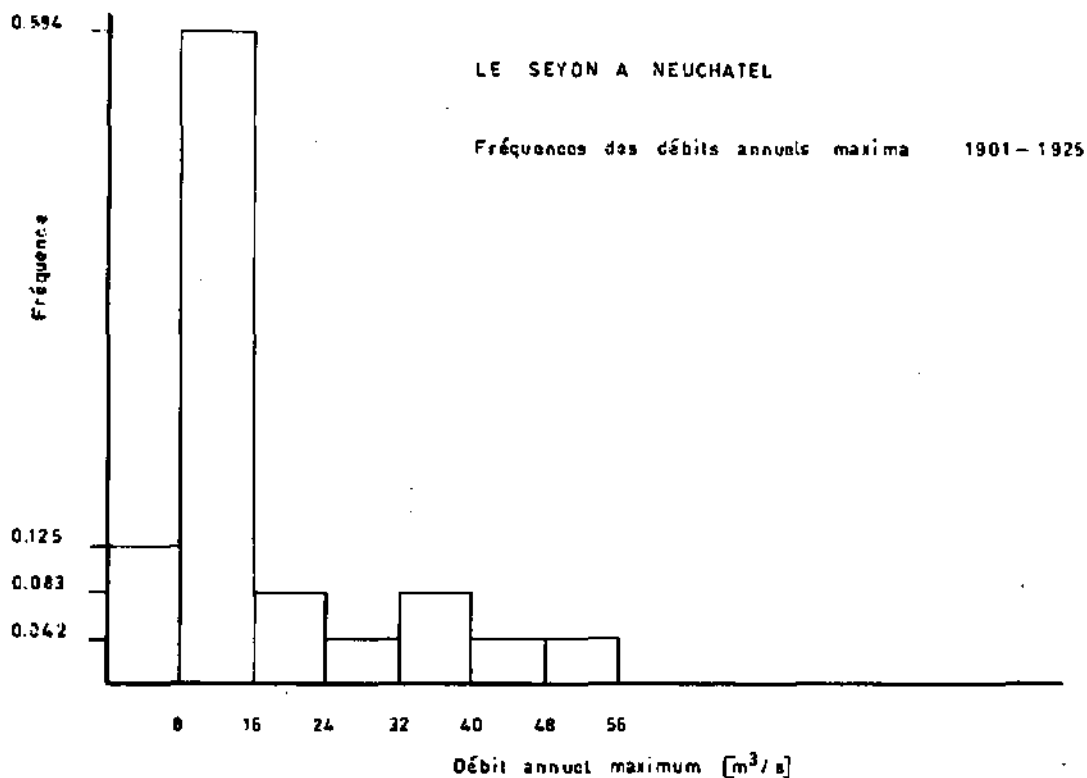


Figure VII - 7 Le Seyon à Neuchâtel. Histogramme des débits annuels maxima

Vu la répartition régulière des précipitations au cours de l'année la courbe enveloppe de l'histogramme traduit bien le déficit d'écoulement. Le débit annuel moyen est de $0,77 \text{ m}^3/\text{s}$ ($s = 0,29 \text{ m}^3/\text{s}$). C'est en 1914 que le débit annuel est le plus élevé ($1,48 \text{ m}^3/\text{s}$) et en 1921 qu'il est le plus faible ($0,17 \text{ m}^3/\text{s}$). La courbe des débits classés du Seyon est donnée à la figure VIII-1.

1.5. Estimation des pertes du Seyon entre Valangin et Neuchâtel.

1.5.1. Période 1918 - 1925.

"Aux basses eaux le Seyon devient si insignifiant que ses eaux se perdent au milieu des gorges sans même atteindre le vallon de Vauseyon à 1 km du lac. Le sol jurassique des gorges absorbe alors toute son eau laquelle se rend probablement à la Serrière". (SCHARDT 1906, op. cit).

A partir des débits relevés simultanément à Valangin et à Neuchâtel, on a tenté d'estimer les quantités d'eau qui s'infiltreraient dans les gorges en direction de la Serrière (chap. IV-2.1.) Le tableau VII-IV donne les valeurs comparées des débits mensuels à Valangin et à Neuchâtel pour la période où les observations concordent pour les mois durant lesquels les débits instantanés n'ont pas dépassé $1 \text{ m}^3/\text{s}$ à Valangin.

En 1918 et en 1919 toutes les valeurs de débit sont supérieures à Neuchâtel. Bien qu'il existe un apport d'eau entre Vauseyon et le lac (ruissellement et drainage dans la région des Dreires) les différences sont à mettre sur le compte d'un mauvais tarage d'une des sections pour ces deux années.

De 1921 à 1925 les débits à Neuchâtel sont toujours inférieurs à ceux de Valangin à l'exception de 5 valeurs (Fig. VII-5).

Une première corrélation (non représentée) comprenant la totalité des valeurs (1901 - 1925) donne des pertes pour les débits mensuels inférieurs à 300 l/s et un apport pour les débits supérieurs. Dans la seconde corrélation où 2 valeurs ont été éliminées (II-1921, VIII-1924) on remarque un accroissement des pertes avec le débit et dans la troisième, où seules les données avec pertes ont été considérées, la droite de régression parallèle à la droite $Q_{\text{NEUCHATEL}} = Q_{\text{VALANGIN}}$ donne une perte moyenne de 40 litres par seconde.

Un essai de corrélation du débit des pertes avec le débit à Valangin (1921 - 1925) donne un coefficient de corrélation proche de 0 ce qui signifie (sous réserve de la qualité des données) que le débit des pertes ne varie pas avec le débit.

Tableau VII-IV

Débits mensuels du Seyon à Valangin et à Neuchâtel pour les mois
où les débits instantanés ne dépassent pas $1 \text{ m}^3/\text{s}$

Année	Mois	Débit		Différence	
		Valangin m^3/s	Neuchâtel m^3/s	m^3/s	en % du débit à Valangin
1918	juillet	0,139	0,349	-0,21	151
	août	0,090	0,419	-0,33	366
	septembre	0,285	0,558	-0,27	95
1919	juin	0,158	0,157	0,00	0
	juillet	0,139	0,790	-0,65	467
	août	0,069	0,152	-0,08	115
	septembre	0,041	0,094	-0,05	116
1921	octobre	0,041	0,122	-0,08	195
	février	0,240	0,380	-0,14	58
	mars	0,098	0,067	0,03	31
	avril	0,072	0,049	0,023	32
	mai	0,231	0,229	0,002	0,8
	juin	0,231	0,236	-0,005	2,1
	juillet	0,070	0,086	-0,016	22,8
	août	0,048	0,029	0,019	40
	septembre	0,064	0,118	-0,054	84
	octobre	0,048	0,086	-0,038	79
1922	juin	0,145	0,116	0,029	20
	juillet	0,080	0,017	0,063	78
	août	0,063	0,017	0,046	73
	septembre	0,130	0,063	0,067	51
	octobre	0,245	0,207	0,038	16
1923	juillet	0,101	0,055	0,046	46
	août	0,059	0,018	0,041	69
	septembre	0,050	0,019	0,031	62
1924	juillet	0,217	0,146	0,071	33
	août	0,133	0,365	-0,232	173
1925	juin	0,156	0,142	0,014	9
	juillet	0,084	0,060	0,024	29
	août	0,161	0,103	0,058	36

1.5.2. Jaugeages.

Trois jaugeages colorimétriques ont été effectués plus récemment en amont du Pont-Noir et à Vauseyon.

Tableau VII-V

Jaugeages du Seyon à Valangin et à Neuchâtel

Date	Débit du Seyon en m^3/s			
	Château de Valangin I	En amont du Pont-Noir II	Vauseyon III	Différence II-III
14.6.1974	0,110	0,137	0,069	0,014
26.6.1974	-	0,103	0,089	0,068
1.7.1974	-	0,886	0,892	-

Ces valeurs restent indicatives, mais on constate que pour des débits de l'ordre de 100 l/s elles sont du même ordre de grandeur ($\sim 40 \text{ l/s}$) que celles obtenues auparavant. Une étude détaillée avec enregistrement des débits et multiplication des jaugeages est souhaitable.

En admettant qu'elles soient constantes ces pertes représenteraient 5,2% du débit annuel moyen du Seyon et 1,6% de celui de la Serrière. Leur importance relativement au bilan hydrologique sera discutée au chapitre XII.

2. PREVISION DES DEBITS DE CRUE DU SEYON

2.1. Choix de la méthode.

Certaines formules utilisent l'aire du bassin alimentaire, d'autres la fréquence des précipitations ou la fréquence des crues. Compte tenu de l'incertitude qui subsiste entre les limites des bassins alimentaires de la Serrière et du Seyon en période de crue, c'est l'étude statistique des crues qui a été retenue.

Les débits considérés sont ceux publiés par DE PERRON (1901 - 1925).

2.2. Fréquence des crues annuelles.

2.2.1. Débits maxima classés.

Le débit instantané maximum de la crue annuelle d'un cours d'eau peut être considéré comme une variable aléatoire dont on recherche la loi de distribution. Celle-ci étant ajustée sur une des lois de probabilité connue (distribution normale, log-normale, gamma, etc) on admet que cette loi reste valable au delà des limites des observations et autorise le calcul du débit pour une période de retour fixée.

Soit un débit Q_{max} atteint ou dépassé K fois en N années. Sa probabilité d'être atteint ou dépassé vaut :

$$Pr \{ Q_{max} \} = \frac{K}{N} \quad \left(= \frac{K}{N} \cdot 100 \text{ en } \% \right)$$

Dans le cas du Seyon $N = 25$

Les débits annuels maxima classés (Fig. VII-6) ont été répartis selon un histogramme des fréquences (Fig. VII-7) puis un histogramme des fréquences cumulées. (non représenté).

La courbe des débits maxima classés révèle une fréquence anormalement élevée des valeurs situées entre 9 et 11 $m^3 s^{-1}$ (9 valeurs sur 25) qui se traduit par l'apparition d'un palier statistique (non représenté). Au-dessus de 11 m^3/s les paramètres réglant l'apparition des crues sont modifiées et pour une fréquence fixée donneront des débits nettement plus forts. Sous réserve d'observations et d'études complémentaires et dans l'hypothèse où les courbes de tarage utilisées restaient valables pour les hauts débits, on peut attribuer cette anomalie à une extension brusque des limites du bassin du Seyon aux dépens de celui de la Serrière au-dessus d'un débit critique se situant au voisinage de 10 $m^3 s^{-1}$. Le cas de l'extension possible du bassin du Seyon aux terrains peu perméables de celui de la Serrière (combes argoviennes, synclinal du Côté) a été discuté aux chapitres IV et V. Dans le cas d'averes d'intensité exceptionnelle, auxquelles s'ajoute souvent la fonte de la lame d'eau retenue sous forme de neige, les phénomènes de ruissellement apparaissent aussi sur les terrains de couverture quaternaire reposant sur les calcaires à la périphérie du bassin du Seyon et dont les eaux s'écoulent habituellement vers la Serrière (région des Hauts Geneveys par exemple).

2.2.2. Recherche d'une loi de distribution.

A défaut d'utiliser une méthode numérique telle que celle développée par MUSY (1974) pour les précipitations, la recherche d'une loi de distribution des fréquences cumulées a été effectuée graphiquement sur papier probabilitaire. Rappelons que sur ce dernier les fréquences cumulées

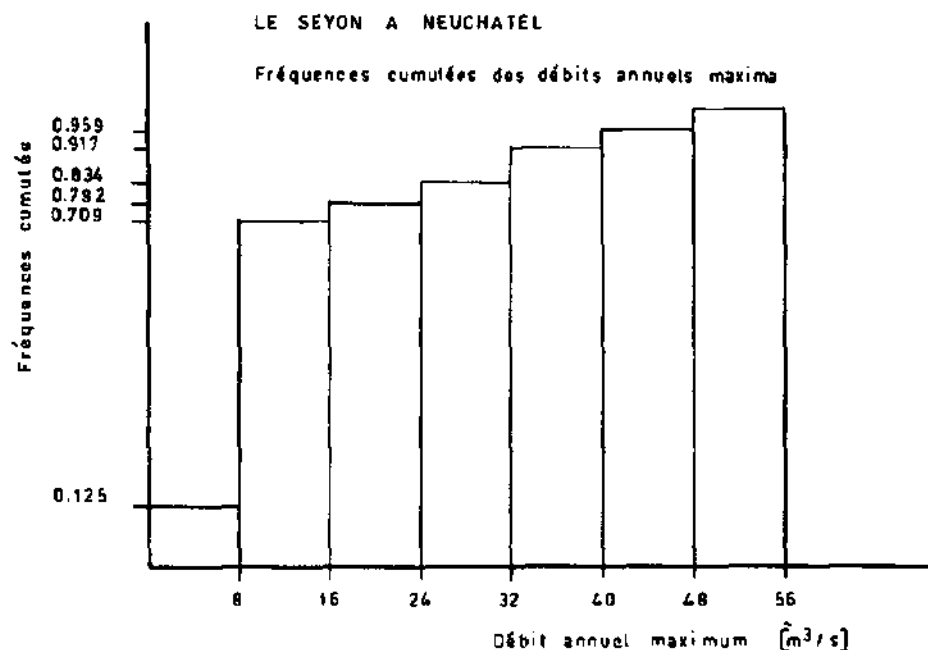


Figure VII - 8 Le Seyon à Neuchâtel. Fréquences cumulées des débits annuels maxima

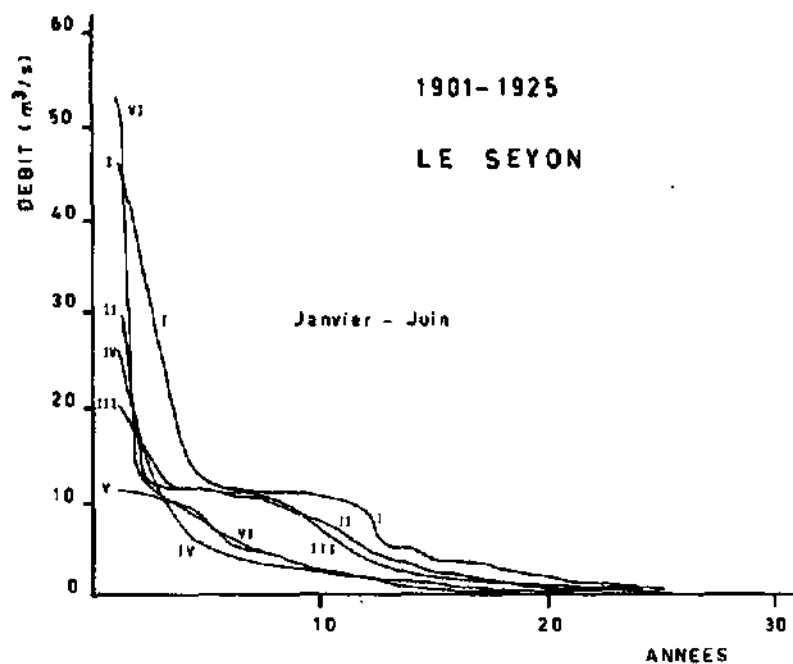
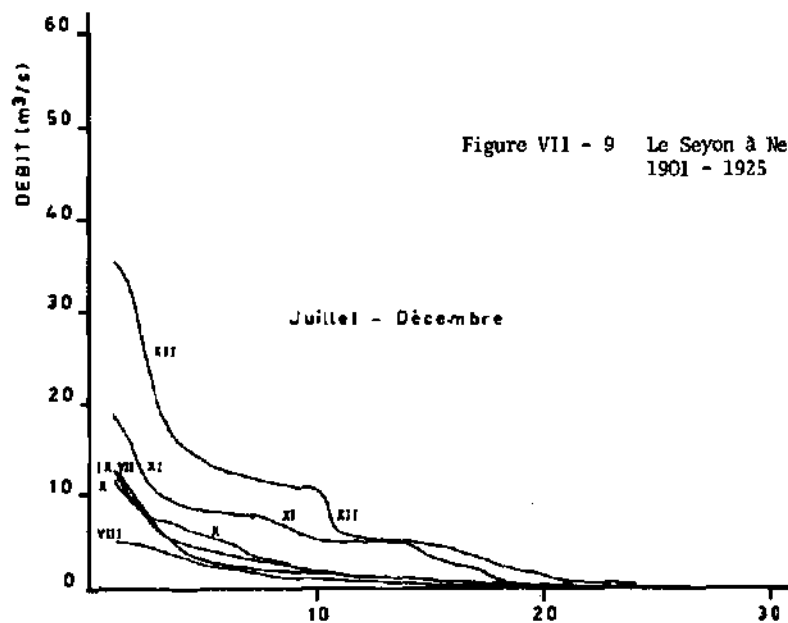


Figure VII - 9 Le Seyon à Neuchâtel. Débits mensuels maxima classés 1901 - 1925



s'ajustent selon une droite si leur distribution est NORMALE. On dira de même que la distribution est LOG-NORMALE si la courbe des fréquences est une droite, la variable étant reportée en échelle logarithmique.

Tableau VII-VI

Débits décennaux, centennaires et millénaires du SEYON à Neuchâtel.
Période d'observation 1901 - 1925

METHODE	DISTRIBUTION	DEBITS CONSIDERES	DEBITS ANNUELS DE FREQUENCE		
			1/10	1/100	1/1000
Formule de FULLER	Normale	0 - 52 m ³ s ⁻¹	31 m ³ s ⁻¹	45 m ³ s ⁻¹	58 m ³ s ⁻¹
Graphique	Normale	11 - 52	34	61	81
Formule de FULLER	Normale	11 - 52	44	64	83
Graphique	Log-normale	0 - 52	30	62	101
Formule de GALTON	Log-normale	0 - 52	30	47	
Graphique	Log-normale	11 - 52	32	95	122
Formule de GALTON	Log-normale	11 - 52	42	67	101
Formule de GUMBEL	Gemma	0 - 52	30	52	69
Formule de GUMBEL	Gemma	11 - 52	42	73	98

L'étude de la distribution des Q_{max} étant envisagée dans le cadre d'une estimation des débits centennaires et millénaires, on a spécialement considéré les valeurs de débit supérieures à 11 m³ s⁻¹. La figure VII-8 représente les fréquences cumulées des débits annuels maxima par classe de 8 m³ s⁻¹. On constate que l'ajustement et l'extrapolation des droites est délicate, en particulier pour les débits inférieurs à 11 m³ s⁻¹ déjà évoqués. Des distributions normales et log-normales, c'est la première qui coïncide mieux aux fréquences observées. ($Q_{max} > 11$ m³ s⁻¹). En admettant une distribution log-normale, on surestime les crues dont la probabilité de retour est inférieure à 0,05 (20 ans).

2.2.3. Débits centennaires et millénaires.

Un certain nombre de formules existent qui permettent d'estimer la valeur des crues de probabilité de retour fixée, généralement 0,1, 0,04, 0,01, 0,001 à partir des débits annuels maxima observés. Trois lois couramment utilisées en hydrologie ont été appliquées, à savoir :

- Loi de GALTON (hypothèse d'une distribution NORMALE)
- Loi de FULLER (" " " LOG-NORMALE)
- Loi de GUMBEL (" " " GAMMA)

Elles ont été appliquées pour l'ensemble des Q_{max} puis pour les Q_{max} supérieurs à 11 m³ s⁻¹. Les résultats obtenus par interpolation graphique et à partir des formules sont donnés au tableau VII-VI.

La distribution normale représente bien la fréquence des débits supérieurs à 11 m³ s⁻¹. La formule de GUMBEL (fonction gamma) utilisée avec succès pour de nombreux cours d'eau corrige la distribution normale pour les valeurs élevées de la variable dont elle augmente la fréquence. Elle fournit une excellente approximation pour les débits centennaires et millénaires (73 et 98 m³ s⁻¹) ainsi qu'une grande sécurité.

En tenant compte de l'ensemble des débits on obtient naturellement des valeurs plus basses, mais en admettant l'extension du bassin du Seyon en période de crue, la sécurité nécessaire à une prévision exige que l'on ne considère ici que les débits supérieurs à 11 m³ s⁻¹.

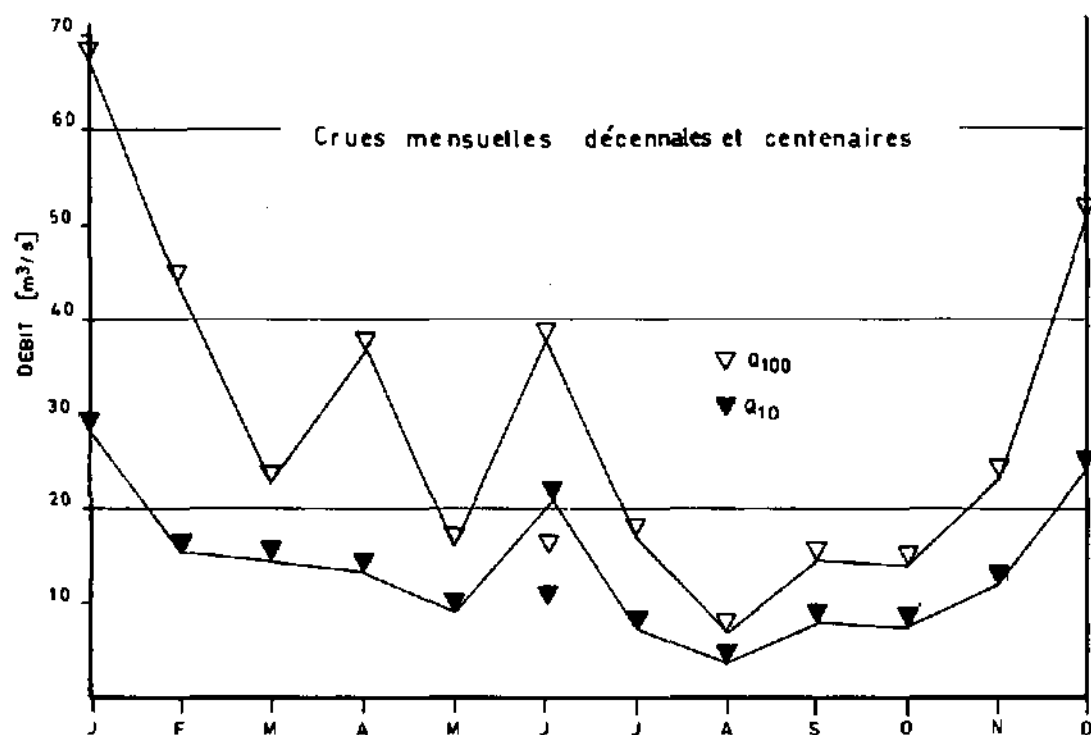


Figure VII - 10 Valeurs des crues mensuelles décennales et centennaires du Seyon à Neuchâtel obtenues sur papier probabilitaire (Distribution normale)

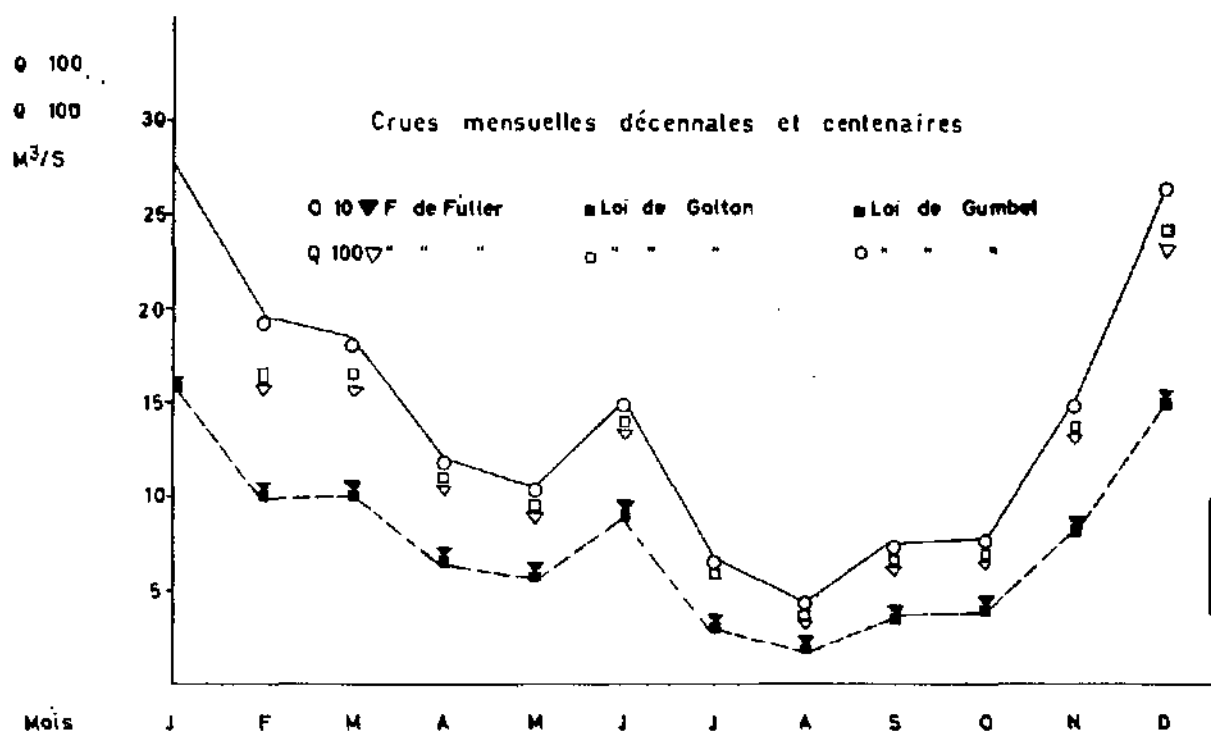


Figure VII - 11 Valeurs des crues décennales et centennaires du Seyon obtenues à partir des formules de Füller, Galton et Gumbel.

2.2.4. Débits décennaux.

Le domaine des débits maxima instantanés ayant une probabilité d'être annuellement atteints ou dépassés de 0,1 se situe dans le domaine des observations. La dispersion des valeurs est donc plus faible ($30 \text{ à } 42 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Pour des raisons de sécurité on retiendra la valeur donnée par la formule de GUMBEL, $42 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

2.3. Fréquence des crues mensuelles.

Le débit instantané maximum de la crue mensuelle peut également être considéré comme une variable aléatoire dont on recherche la loi de distribution. La méthode utilisée pour l'étude des fréquences des crues annuelles peut alors s'appliquer aux crues mensuelles.

A partir des $Q_{\max}$ classées (Fig. VII-9) on établit un histogramme des fréquences cumulées que l'on reporte sur papier probabilitaire (non représenté). L'allure des courbes et par conséquent la distribution des débits maxima varie fortement d'un mois à l'autre et c'est naturellement durant l'été que la probabilité d'observer une crue catastrophique est la plus faible.

Comme dans le cas des débits annuels instantanés, même si le type de distribution (ici normale) qui coïncide avec les observations est la même pour toutes les valeurs ses caractéristiques (moyenne et moments d'ordre 2,3,4) changent au-dessus d'un débit critique, probablement pour des raisons identiques à celles évoquées précédemment, à savoir l'extension du bassin du Seyon avec l'importance de la crue.

Dans le cadre d'une prévision des débits de crue assurant une sécurité suffisante, c'est la tendance générale exprimée par les forts débits qui a été considérée pour une extrapolation des droites de régression (Fig. VII-10).

L'application des formules de FULLER, GALTON et GUMBEL à la totalité des débits maxima de chaque mois donnera naturellement des valeurs nettement inférieures pour les débits de probabilité de dépassement de 0,1 et 0,01 (Fig. VII-11). La différence entre les valeurs obtenues graphiquement et celles des formules est cependant plus faible pour les mois d'hiver (tableau VII-VII).

Tableau VII-VII

Débits mensuels instantanés décennaux et centennaires du Seyon à Neuchâtel

MOIS	Janvier		Février		Mars		Avril		Mai		Juin	
Débit $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$	Q_{10}	Q_{100}	Q_{10}	Q_{100}	Q_{10}	Q_{100}	Q_{10}	Q_{100}	Q_{10}	Q_{100}	Q_{10}	Q_{100}
Méthode graphique	28,7	28,8	15,9	25,4	14,5	22,6	13,7	18,0	9,6	16,3	10,3	17,5
Loi de FULLER	16,7	24,1	10,7	15,5	10,6	15,3	6,9	9,9	6,0	8,7	9,1	13,1
Loi de GALTON	15,9	25,3	10,2	16,3	10,1	16,0	6,6	10,5	5,7	9,1	8,6	13,7
Loi de GUMBEL	15,9	27,9	10,2	17,9	10,1	17,6	6,6	11,5	5,7	10,2	8,6	15,1

MOIS	Juillet		Août		Septembre		Octobre		Novembre		Décembre	
Débit $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$	Q_{10}	Q_{100}	Q_{10}	Q_{100}	Q_{10}	Q_{100}	Q_{10}	Q_{100}	Q_{10}	Q_{100}	Q_{10}	Q_{100}
Méthode graphique	7,3	17,4	3,9	7,0	7,8	14,4	7,7	13,9	12,0	18,4	24,5	51,6
Loi de FULLER	3,5	5,1	2,2	3,1	4,0	5,6	4,3	6,2	8,9	12,7	19,8	22,8
Loi de GALTON	3,4	5,4	2,3	3,3	3,8	6,1	4,1	6,5	8,5	13,5	15,1	23,9
Loi de GUMBEL	3,4	5,9	2,1	3,6	3,8	6,7	4,1	7,1	8,5	14,9	15,1	26,3

Relevons que la crue du mois de juin 1901 qui s'écarte nettement de la tendance générale de la distribution et dont la probabilité de dépassement en juin est certainement inférieure à 0,001 provoque une anomalie dans la répartition saisonnière des probabilités.

Dans le cas de la prédétermination des débits de crue et de leur intervalle de retour on retiendra que l'analyse des fréquences sur papier probabilitaire et la recherche d'une loi de distribution appropriée évitent certaines erreurs qu'amènent l'utilisation de formules même excellentes qui ne tiennent pas compte de situations hydrologiques particulières.

• $50 \text{ m}^3/\text{s}$

Relevons enfin que le choix de la fonction de probabilité coïncident le mieux avec celle de l'événement observé devrait être effectué parmi un éventail de fonctions plus large et testé rigoureusement selon une méthode statistique sûre (test de χ^2 par exemple).

2.3. Prédiction des crues du Sayon à partir des précipitations.

2.3.1. Aboques de prédiction.

Dans le cadre des travaux de canalisation du Sayon à Valangin, le maître de l'oeuvre désirait disposer d'une méthode de prédiction non stochastique des crues qui soit d'un maniement simple et bon marché. Les précipitations journalières étant avec les débits les seules variables dont on disposait, une abaque des crues probables a été établie pour les mois d'avril à novembre par régressions linéaires entre ces dernières, à partir d'une sélection de 72 crues (Fig. VII-12). Il s'agit là d'une technique grossière puisque d'une part on fait l'hypothèse que les crues et les précipitations sont distribuées normalement et que d'autre part ces dernières dont on ne connaissait que l'intensité journalière et non horaire, sont le seul facteur déterminant le débit de crue. Pour les mêmes raisons l'étude analytique du "lag-time" n'a pas été envisagée.

Une corrélation multiple tenant compte du débit précédant la crue qui représente bien l'état hydrologique du bassin versant aurait fourni une prédiction plus précise. C'est la raison pour laquelle une seconde abaque dite de sécurité a été établie à partir des cas les plus pessimistes (Fig. VII-13).

Pour simplifier l'utilisation des abaques une seule station pluviométrique, bien représentative (Dombresson), a été choisie comme station de référence.

2.3.2. Réseau d'observation et d'alerte aux crues.

Un réseau d'observations hydrologiques comprenant 1 station limnigraphique (Valangin), 5 pluviomètres (Cernier, Vilars, Les Vieux-Prés, Les Bugnena) et un pluviographe (Dombresson) permettait au surveillant du chantier d'être tenu téléphoniquement au courant de l'accroissement des précipitations à partir d'une lame d'eau critique intentionnellement assez basse (30-35 mm).

Bien que l'effet de la fonte de la neige sur le débit n'ait pu être envisagé dans le calcul des abaques faute de mesures, la station de Dombresson était équipée d'une sonde à neige permettant à l'observateur de suivre journalièrement les variations de l'équivalent en eau de la neige qui était additionné ou soustrait à la lame d'eau tombée. La crue du Sayon était alors estimée à partir de la relation pluie - débit du mois d'avril.

2.3.3. Validité des abaques.

Les deux années qui ont fait l'objet d'une surveillance des crues ont été caractérisées par une pluviosité relativement faible. Il est intéressant de comparer les valeurs de débit réellement atteint par le Sayon avec les valeurs prévues par les deux abaques. Sur 14 crues étudiées (1970 - 1972) l'abaque des crues probables donne :

- 4 crues dont la valeur a été surestimée de plus de $0,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
- 4 crues dont la valeur a été sous-estimée de plus de $0,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
- 6 crues se situant à $\pm 0,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ du débit observé

L'abaque dite de sécurité qui prévoit le débit instantané maximum donne :

- 10 crues dont la valeur a été surestimée de plus de $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
- 3 crues se situant entre 0 et $0,8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ du débit observé
- 1 crue dont la valeur a été sous-estimée de 47%

*Intervalle de temps séparant le centre de gravité de l'averse du débit instantané maximum.

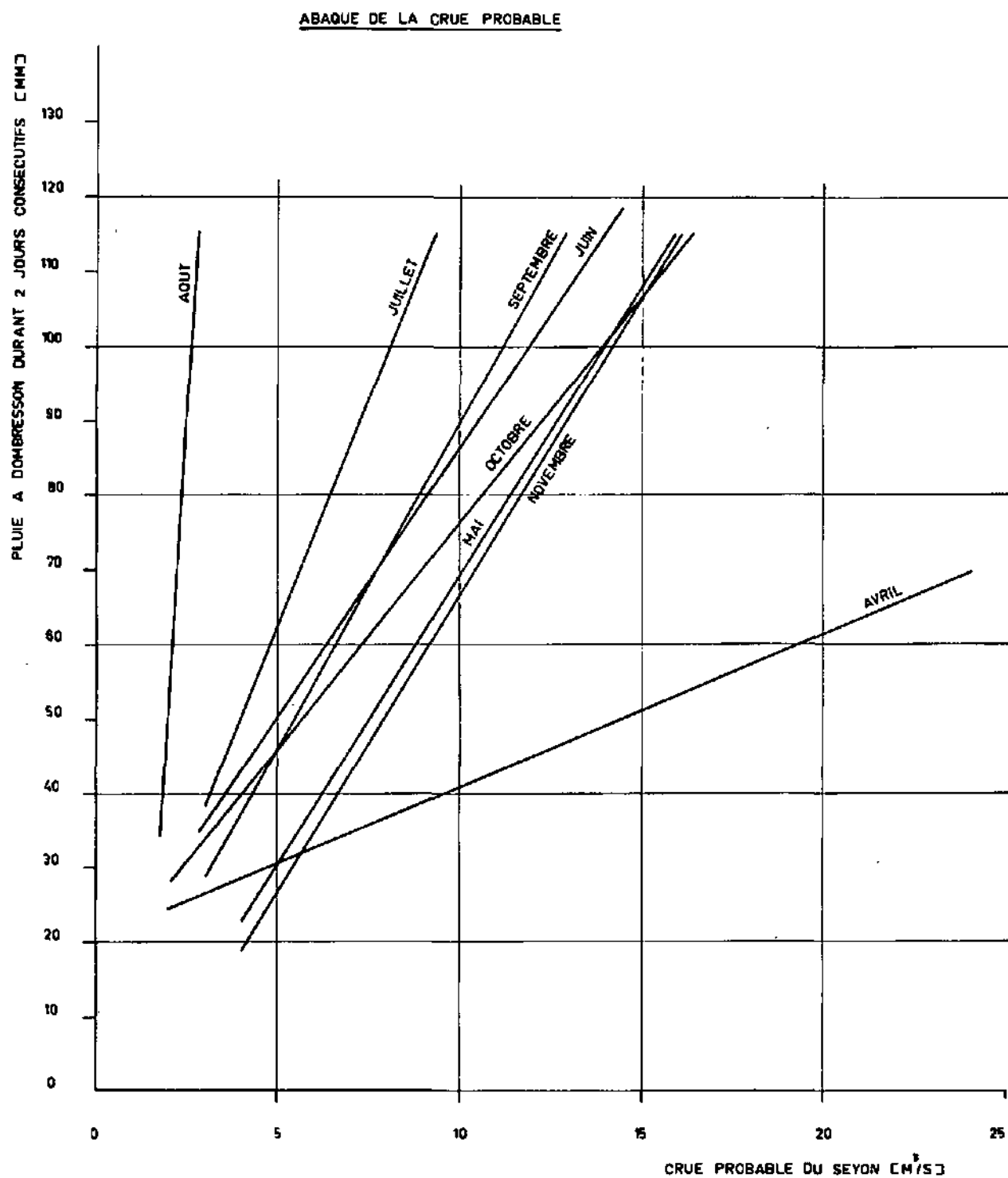


Figure VII - 12 Prévision des crues du Seyon   Valangin à partir des précipitations. ABAQUE DE LA CRUE PROBABLE

ABaque DE SECURITE

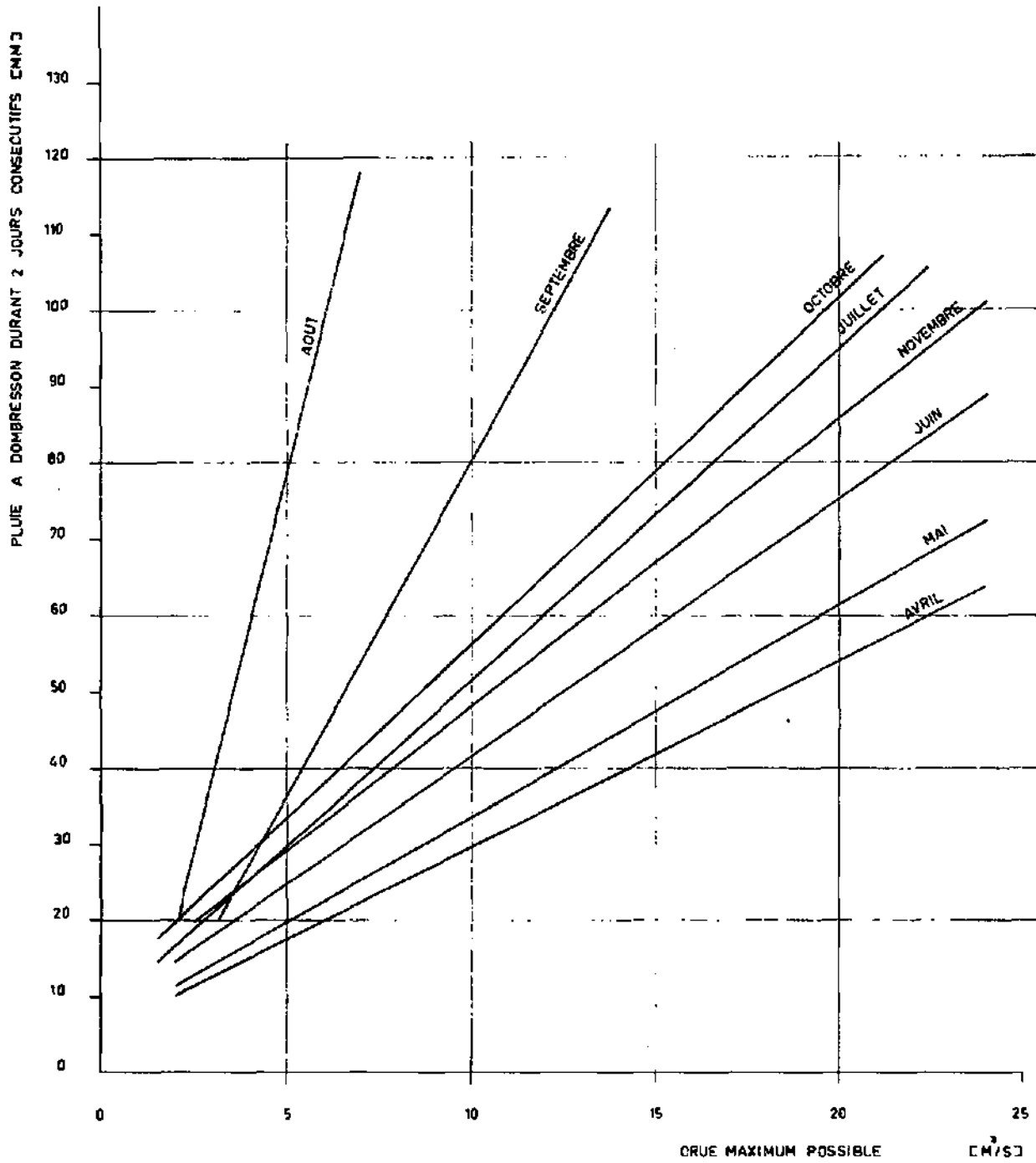


Figure VII - 13 Prévision des crues du Seyon   Valangin à partir des précipitations. ABAQUE DE sécurité.

Les calculs prévisionnels ont donc été démentis une seule fois mais une fois de trop (19.11.1970), que l'on doit attribuer non pas aux méthodes de calcul mais à la précision des données à disposition qui empêchait toute étude sérieuse de l'intensité horaire des précipitations certainement à l'origine de cette sous-estimation.

Il est évident que d'autres méthodes existent qui permettent une prévision déterministe de crues plus précise, mais elles nécessitent l'acquisition et l'enregistrement de paramètres hydrométéorologiques nombreux de façon suivie durant les années qui précèdent des travaux de ce type.

3. LE MODELE CHYN1 : ESSAI DE SIMULATION CONTINUE DU DEBIT DU SEYON

3.1. Introduction.

Les modèles de simulation de bassins consistant en l'assemblage des composants du cycle hydrologique et en leur jeu mutuel dans une séquence de temps continue organisée par un programme de calcul. Le modèle est dit déterministe lorsque les formulations utilisées sont des lois physiques, et statistiques lorsqu'elles sont de type probabiliste. Le modèle CHYN1 décrit ici est du type hybride, certaines fonctions étant de type déterministe, d'autres de type statistique. Ce choix était déterminé par la nature et la précision des données relatives au bassin du Seyon pour lequel il a été conçu.

Le modèle comprend deux parties: la première établit le volume d'écoulement à partir de lois définies statistiquement, la seconde assure sa répartition dans le temps et dans l'espace par une série de fonctions de transfert de type déterministe, (hydrogramme unitaire, tarissement, recharge des eaux souterraines). Les observations faisant défaut, les mécanismes de la fonte de la neige n'ont pas été pris en considération. De par sa conception CHYN1 s'adapte bien aux bassins de petite et moyenne dimension ($10 - 300 \text{ km}^2$). Il nécessite un ordinateur d'au moins 16 K muni d'un compilateur FORTRAN II ou IV. Sur IEM 1130 les temps de calcul sont de 15 à 20 minutes pour une période simulée de 500 heures.

Bien que publié dans le cadre de cet ouvrage, le modèle a été conçu et réalisé en 1970; on pardonnera donc à l'auteur la méconnaissance de travaux récents sur ce sujet.

3.2. Bilan des eaux de surface.

3.2.1. Choix et limite de la méthode.

La méthode de corrélation graphique (méthode coxiale) décrite par LINSLEY et cons. (1949) en vue de l'estimation du bilan des eaux de surface pour des temps très courts (durée de l'averse) a donné des résultats peu satisfaisants en raison de l'absence de données météorologiques horaires. Le développement de fonctions analytiques appropriées se poursuit (SITTNER et cons. 1969) mais elles n'étaient pas opérationnelles à l'époque de la conception de CHYN1. Dans le cas des modèles de STANFORD et SSAR (NEMEC 1973) les paramètres relatifs aux écoulements superficiels et hypodermiques sont le plus souvent ajustés en période de test sans avoir été mesurés. Compte tenu des contraintes imposées par l'espacement des données, l'estimation des paramètres et leurs relations ont été calculées par régression multiple (tableau I-1).

Les relations mathématiques exprimant le bilan des eaux de surface sont alors définies globalement pour toute la durée de l'averse mais ne permettent pas leur utilisation incrémentielle. Dans le cas où on exige une prévision du débit ruisselé alors que l'averse n'est pas terminée, le calcul du bilan à partir des variables utilisées habituellement (API, P, etc) n'est plus possible et nécessite l'emploi de paramètres complémentaires. SITTNER et cons. (op. cit) introduisent dans ce cas un indice de rétention RI en lieu et place de l'API mais dont le facteur de récession plus élevé permet une incrémentation en cours d'averse. Dans le cas des modèles de STANFORD et SSAR, ce problème est résolu par l'ajustement de variables supplémentaires en phase de test.

Dans le cas de CHYN1 encore, la nature des données rendait délicate l'introduction de non linéarités et leur contrôle sur le modèle.

3.2.2. La régression multiple.

Considérons qu'il existe une relation fonctionnelle de première espèce entre plusieurs variables et que l'on exprime cette relation par l'équation

$$X_1 = A_1 + A_2 X_2 + A_3 X_3 + \dots + A_N X_N$$

où $A_1, A_2, A_3, \dots, A_N$ sont des constantes réelles positives ou négatives.

C'est une équation linéaire à plusieurs variables où X_1 est la variable dépendante et $X_2, X_3, \dots, X_N$ les variables indépendantes. L'estimation de cette équation à partir d'une matrice de données par minimisation des carrés des écarts entre les valeurs calculées et observées est appelée régression linéaire multiple. On parle de régression non linéaire multiple lorsque certaines des variables sont d'un degré supérieur à 1. Comme pour la régression simple le coefficient de corrélation (non) linéaire multiple définit le rapport des variations expliquées et totales (tableau 1-1). Le nombre maximum de variables N dépend pratiquement de la capacité de la calculatrice utilisée pour la résolution des équations normales (SPITZEL 1971). Le programme REGRE modifié utilisé ici permettait de traiter simultanément 22 variables (IBM, 1970).

3.2.3. Recherche et optimisation des équations de régression.

Les paramètres utilisés pour l'estimation du bilan des eaux de surface comprennent :

- Un indice d'antécédence des précipitations (API) logarithmique, défini par la relation (LINSLEY et cons. 1949) :

$$API_{(j)} = API_{(j-1)} \cdot F + P_{(j-1)} \quad [\text{mm}]$$

où F est un facteur de récession valant en général 0,9 et $P_{(j)}$ les précipitations mesurées au jour j exprimées en mm.

- Un indice mensuel ou hebdomadaire défini par le numéro d'ordre du mois ou de la semaine durant lequel a lieu l'averse pouvant être remplacé ici par la température moyenne du bassin.
- La durée des précipitations exprimée en heure ou en jours.
- La lame d'eau tombée sur le bassin au cours de l'averse $\sum P_{(j)}$ exprimée en mm.
- Une variable dépendante L_r , qui est la lame d'eau écoulée à l'exutoire pour une averse donnée et exprimée en mm.

Septante-deux averses réparties d'avril à décembre ont été sélectionnées entre 1901 et 1925. Afin d'alléger le dépouillement des données, API, durée de l'averse et $P_{(j)}$ ont été mesurés en une seule station, ici Dombresson. La lame d'eau tombée sur le bassin était obtenue en multipliant la lame d'eau de Dombresson par un coefficient de correction donné par le rapport des modules pluviométriques (1901 - 1925) du bassin du Seyon et de la station pluviométrique. Les données étant journalières il était exclu d'étudier le bilan pour des périodes inférieures à 24 heures avec comme conséquence une moins bonne fiabilité observée du modèle pour les petites averses. La lame d'eau ruisselée (L_r) a été obtenue par planimétrage des hydrogrammes après élimination du flot de base, compte tenu de la recharge des eaux souterraines au cours de l'averse (TRIPET, comm. orale).

Soient :

X1	la lame d'eau ruisselée écoulée à Neuchâtel (mm)
X2	l'API à Dombresson (mm)
X3	le numéro d'ordre de la semaine (1-52)
X4	la durée de l'averse à Dombresson (jours)
X5	la lame d'eau tombée sur le bassin du Seyon (mm)
X6	la température mensuelle moyenne à Cernier (°C)

Les résultats des régressions multiples linéaires et non linéaires sélectionnées ici et les équations de régression sont données aux tableaux VII-VIII, VII-IX. $\bar{x}$, s_x , r_{1-N} sont respec-

Tableau VII-VIII

Bilan des eaux de surface dans le bassin du Seyon.

Résultat des régressions linéaires multiples (72 averses) $t_{0,01} = 2,38$ $t_{0,15} = 1,38$

Variable	$\bar{x}$	s_x	$r_{1 \cdot N}$	AN	t
X1	40,1	34,8			
X2	27,6	19,2	0,01	0,30	1,81
X3	31,4	9,5	0,14	0,08	0,24
X4	6,6	3,9	0,58	2,33	2,12
X5	76,5	42,6	0,68	0,42	4,26

A1 = -18,4

R = 0,71

F = 17,1

 $F_{0,01} = 3,6$

Variable	$\bar{x}$	s_x	$r_{1 \cdot N}$	AN	t
X1	40,1	34,8			
X2	27,6	19,2	0,01	0,36	2,22
X4	6,6	3,9	0,58	1,61	1,41
X5	76,5	42,6	0,68	0,10	4,79
X6	10,4	4,4	-0,19	-1,36	-1,85

A1 = -3,1

R = 0,73

F = 18,9

 $F_{0,01} = 3,6$

Légende : voir dans le texte

Variable	AN	t
X5	0,55	7,77
X6	-1,30	-1,91

A1=11,3 R=0,70 F=32,5

 $F_{0,01}=4,9$

Variable	AN	t
X2	-1,12	-1,39
X4	12,52	1,60
X5	1,246	2,95
X4 · X4	-0,936	-2,52
X5 · X5	-0,003	-1,26
X2 · X3	0,051	1,64
X2 · X4	0,369	1,80
X3 · X4	-1,005	-2,38
X3 · X5	-0,030	-2,44
X4 · X5	0,119	2,21
X2 · X2 · X4	-0,001	-1,03
X3 · X3 · X4	0,021	3,24
X2 · X3 · X4	-0,008	-1,50

A1 = -15,9

R = 0,79

F = 7,6

 $t_{0,01} = 2,6$ $t_{0,15} = 1,0$ $F_{0,01} = 1,8$

Variable	AN	t
X4	3,63	1,37
X5	0,53	1,49
X4 · X4	-0,48	-1,48
X5 · X5	-0,003	-0,91
X2 · X5	0,005	2,27
X6 · X5	-0,019	-2,08
X4 · X5	0,064	1,21

A1 = -11,3 R = 0,75 F = 11,6

 $t_{0,01} = 2,6$ $t_{0,15} = 1,0$ $F_{0,01} = 2,9$ $F_{0,01} = 2,93$

tivement la moyenne, l'écart type et le coefficient de corrélation entre la variable dépendante et une variable indépendante. A1 est l'ordonnée à l'origine, AN les coefficients de régression, R le coefficient de corrélation multiple. La valeur de t qui est le quotient du coefficient de régression par son écart type permet de tester l'hypothèse $AN \neq 0$ pour une limite de signification choisie. Le coefficient F est donné par le quotient des variances dues et extérieures à la régression multiple. Les paramètres sont définis au tableau I-I.

On sait que la température de l'air (X6) est le principal facteur qui détermine l'évapotranspiration potentielle. Pour contrôler l'importance de X3 (numéro d'ordre de la semaine) dont la normalité de la distribution est discutable, une seconde sélection de régressions a été envisagée en remplaçant X3 par X6, d'où une meilleure représentativité du coefficient de régression. On améliorerait certainement la qualité de la prévision en analysant puis en introduisant dans le modèle les températures journalières au moment de l'averse.

L'analyse des coefficients (tableau VII-IX) révèle que c'est la lame d'eau et la durée de l'averse qui sont les facteurs déterminants dans le calcul du bilan. Le rôle de l'API (X2) paraît complexe; bien que stochastiquement indépendant de X1, son coefficient de régression est significatif dans les régressions multiples et doit donc être considéré.

L'équation linéaire exprimant le bilan en eau de surface pour le bassin du Seyon vaut donc :

$$X1 = -18,4 + 0,30 X2 + 0,08 X3 + 2,33 X4 + 0,42 X5$$

En remplaçant X3 par X6 on obtient :

$$X1 = -3,1 + 0,36 X2 + 1,61 X4 + 0,10 X5 -1,36 X6$$

En n'utilisant que 2 variables on aurait :

$$X1 = 11,3 + 0,55 X5 -1,30 X6 \quad R = 0,70$$

L'augmentation progressive du nombre de variables sous la forme de produits et de puissances des 4 variables indépendantes; puis une sélection de celles-ci basée sur les valeurs de t, améliore le coefficient de corrélation multiple. Au total 20 polynômes ayant jusqu'à 22 termes ont été testés.

Bien que la valeur de R s'accroisse toujours avec le nombre de termes du polynôme ($R_{\max} = 0,80$), les coefficients de régression de certains d'entre eux n'étaient pas significatifs et ont dû être écartés. Les deux équations non linéaires sélectionnées pour représenter le bilan en eau de surface sont les suivantes :

$$\begin{aligned} X1 = & -15,9 -1,32 X2 + 12,52 X4 + 1,246 X5 -0,936 (X4)^2 \\ & -0,003 (X5)^2 + 0,051 X2 \cdot X3 + 0,369 \cdot X2 \cdot X4 \\ & -1,005 X3 \cdot X4 -0,030 X3 \cdot X5 + 0,119 X4 \cdot X5 \\ & -0,001 X2 \cdot X2 \cdot X4 + 0,021 X3 \cdot X3 \cdot X4 -0,008 X2 \cdot X3 \cdot X4 \end{aligned}$$

$$\text{où } R = 0,79$$

et en remplaçant X3 par X6

$$\begin{aligned} X1 = & -11,3 + 3,63 X4 + 0,53 X5 -0,48 (X4)^2 -0,003 (X5)^2 \\ & + 0,05 X2 \cdot X5 -0,019 X6 \cdot X5 + 0,064 X4 \cdot X5 \end{aligned}$$

$$\text{où } R = 0,75.$$

On constate que les termes en X4 et X5 sont prédominants et que les termes en X3 sont nettement plus fréquents que les termes en X6.

On remarquera également que l'amélioration du coefficient de corrélation n'est pas considérable malgré la complexité des deux dernières équations d'autant plus qu'en augmentant le nombre de variable on diminue le degré de liberté de la régression et par conséquent le seuil de signification de R.

3.3. Hydrogramme du flot de base.

3.3.1. Ruissellement et infiltration.

Au cours de l'éverse et durant tout le temps que dure le ruissellement, une fraction des précipitations s'infiltre vers la nappe souterraine où elle provoque un accroissement du flot de base. Lorsque le ruissellement s'arrête l'hydrogramme de la rivière représente uniquement le vidage des eaux souterraines. Dans de nombreux cas celle-ci peut être représentée par une fonction exponentielle décroissante de la forme

$$G_t = G e^{-at}$$

où G est le débit des eaux souterraines (flot de base)
et a le coefficient de tarissement.

Si l'estimation des coefficients a est relativement aisée le choix d'une fonction représentant l'accroissement du flot de base est plus délicat.

Une méthode classique consiste à faire l'hypothèse que la recharge de la nappe, donc l'infiltration et l'augmentation du débit des eaux souterraines sont fonction du débit ruisselé et d'un coefficient d'infiltration. La relation peut être représentée par l'équation (SITTNER et cons. 1969)

$$I = Z (Q - G)$$

où I est le débit d'infiltration
 Q le débit total
 G le débit des eaux souterraines
 Z le coefficient d'infiltration

Les coefficients d'infiltration Z et de tarissement $a = 1/K$ étant connus, il est possible d'appliquer la méthode itérative de Muskingum (Muskingum routing, LINSLEY et cons. p. 502, 503) avec $X = 0$ pour calculer le flot de base.

Pour un pas de temps de 1 heure utilisé ici les coefficients de l'équation de Muskingum sont les suivants :

$$C_0 = C_1 = \frac{1}{48 K + 1}$$
$$C_2 = \frac{48 K - 1}{48 K + 1} \quad \text{ou } K = 1/a$$

$$\text{et } G_{t_2} = \frac{Z (C_0) (Q_{t_1} - G_{t_2}) + G_{t_1} (C_2 - Z C_0)}{1 + Z C_0}$$

où Q_{t_1} et Q_{t_2} représentent le débit total de la rivière aux temps t_1 et t_2

G_{t_1} et G_{t_2} représentent le flot de base aux temps t_1 et t_2

Dans le modèle, au temps t_2 , le débit total Q_{t_2} est inconnu, mais peut être obtenu par la différence $(Q_{t_2} - G_{t_2})$ estimée par l'hydrogramme du ruissellement. Une transformation de l'équation est donc nécessaire

$$G_{t_2} = Z (C_0) (Q_{t_2} - G_{t_2} + Q_{t_1} - G_{t_1}) + C_2 G_{t_1}$$

où $Q_{t_2} - G_{t_2}$ et $Q_{t_1} - G_{t_1}$ représentent le débit ruisselé au temps t_2 et t_1 .

Si le ruissellement est nul on obtient une fonction décroissante de type exponentiel

$$G_{t_2} = C_2 G_{t_1}$$

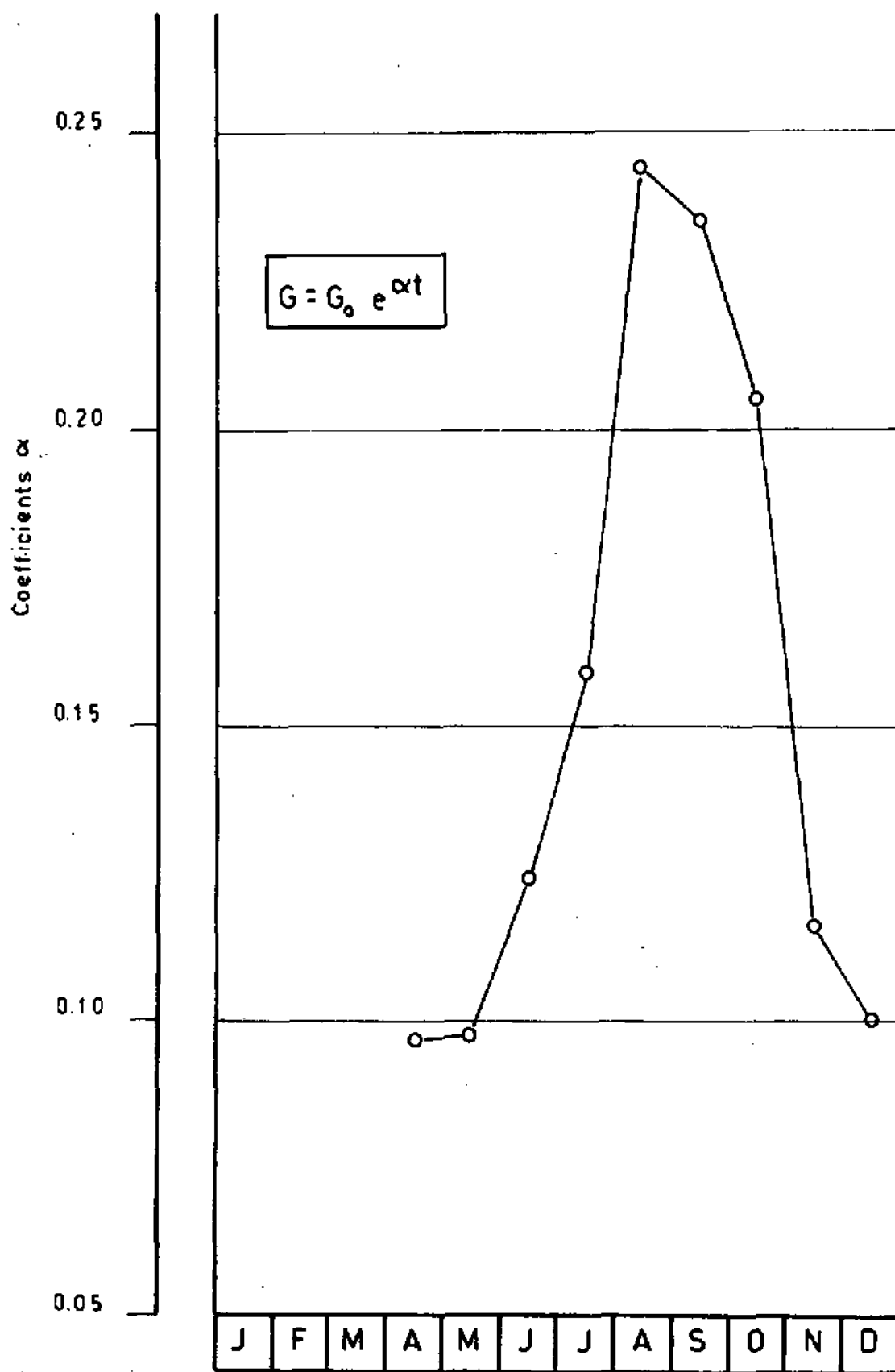


Figure VII - 14 Le Seyon : Valeur des coefficients de tarissement mensuels.
[moyenne de 3 décrues pour chaque mois]

3.3.2. Détermination du coefficient d'infiltration.

Le coefficient Z peut facilement être ajusté en phase de test du modèle par comparaison avec des cas réels.

Une première méthode de détermination consiste à séparer le flot de base et le débit ruisselé pour une sélection d'hydrogrammes de la rivière. Le rapport des lames d'eau infiltrées et ruisselées donne la valeur de Z . On obtient ainsi une valeur moyenne de Z pour toute l'averse.

Il est certain que ce coefficient varie non seulement en cours de l'averse, mais encore en fonction du débit ruisselé ($Z = f(t, Q)$). Compte tenu de la précision des données de débit à disposition la non linéarité de Z n'a pas été envisagée ici.

Une seconde méthode consiste à faire l'hypothèse que le taux d'infiltration est de l'ordre de grandeur du rapport de la surface totale des terrains perméables à l'infiltration alimentant les nappes souterraines, à la surface des terrains peu perméables où le ruissellement est prépondérant.

Dans le cas du bassin du Sayon on connaît bien l'extension des surfaces drainées ($S_D = 29,3 \text{ km}^2$) qui représentent les terrains peu favorables à l'infiltration. Le rapport de la surface des terrains non drainés ($S_A - S_D$) par la surface du bassin ($S_A = 37,3 \text{ km}^2$) constitue une valeur indicative du coefficient d'infiltration. On trouve :

$$Z = (S_A - S_D) / S_A = 0,214$$

et lors que par décomposition de l'hydrogramme on obtient $Z = 0,178$.

On verra en phase de test que le rôle d'accumulateur des terrains drainés joue un rôle non négligeable puisque le coefficient Z ajusté est supérieur à ces 2 valeurs.

3.3.3. Détermination du coefficient de tarissement.

La détermination du coefficient de tarissement est généralement réalisée à partir de l'analyse d'une série d'hydrogrammes de la rivière en phase de tarissement.

$$\begin{aligned} \text{soient } G_{t1} &\approx G_0 e^{-a(t1 - t0)} \\ \text{et } G_{t2} &\approx G_0 e^{-a(t2 - t0)} \end{aligned}$$

les valeurs du flot de base aux temps $t1$ et $t2$.

On a

$$a = \frac{\ln \frac{G_{t1}}{G_{t2}}}{t2 - t1}$$

Le tableau VII-X et la figure VII- 14 donnent les valeurs moyennes des coefficients a observés d'avril à décembre. Pour le Sayon le domaine de variation au cours de l'année est compris entre 0,095 et 0,245. Maximum en août, il est minimum en avril.

L'hypothèse d'une variation du coefficient de tarissement au cours de la décrue n'a pas été testée, mais une fonction du type $a = f(G, t)$ analogue à celle développée pour la source de la Serrière pourrait facilement être adaptée au modèle.

3.4. L'hydrogramme unitaire.

3.4.1. Limites de la méthode.

Dans la plupart des travaux traitant de l'hydrogramme unitaire on fait l'hypothèse fondamentale que le débit écoulé à l'exutoire peut être déduit de la pluie nette par une opération linéaire, et que l'opérateur dépend des caractéristiques physiques, morphologiques et géologiques du bassin versant.

La répartition spatiale des précipitations, le bilan des eaux de surface et la lame d'eau infiltrée étant connue, et l'hydrogramme du flot de base déduit, 2 éverses dont les répartitions spatiale et temporelle sont semblables présenteront un hydrogramme identique.

Il est évident que certains facteurs saisonniers comme le développement de la végétation dans le lit du cours d'eau, le gel, ou les variations de la nature de la couverture végétale exigeraient une approche non linéaire du système. D'autre part la séparation de l'écoulement en flot de base et ruissellement est trop manichéenne et l'on devrait définir un hydrogramme pour l'écoulement hypodermique comme c'est le cas pour le modèle de STANFORD.

Si l'on admet que les paramètres physiques du bassin versant restent constants, la méthode de l'hydrogramme unitaire donnera une estimation des phénomènes de ruissellement.

Au moment de la réalisation du modèle CHYN1, les données à disposition pour le bassin du Seyon ne permettaient pas d'obtenir l'hydrogramme unitaire à partir des débits observés.

Tableau VII-X

Le Seyon à Neuchâtel
Valeur moyenne des coefficients de tarissement

Mois	a	K = 1/a
Avril	0,096	10,4
Mai	0,097	10,3
Juin	0,124	8,1
Juillet	0,159	6,3
Août	0,244	4,1
Septembre	0,235	4,2
Octobre	0,205	4,9
Novembre	0,116	8,6
Décembre	0,100	10,0

3.4.2. Estimation des moments de l'hydrogramme unitaire.

Dans une étude très complète de la théorie de l'hydrogramme unitaire, J.E. NASH (1960), a corrélié les moments de l'hydrogramme unitaire avec une sélection de paramètres physiques de 90 bassins de Grande-Bretagne. L'auteur définit alors plusieurs fonctions qui donnent la possibilité de connaître l'hydrogramme unitaire d'un cours d'eau en l'absence de mesures de débit.

Supposons connu l'hydrogramme unitaire d'un cours d'eau. Les moments m_n de la fonction $u(T)$ sont définis par les équations

$$U_1' = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot u \cdot dt}{\int_0^{\infty} u \cdot dt}$$

$$\text{et } U_r = \frac{\int_0^{\infty} (t - U_1')^r u \cdot dt}{\int_0^{\infty} u \cdot dt}$$

d'après la théorie des moments on a

$$\begin{aligned} m_1 &= U_1' \\ m_2 &= U_2' / (U_1')^2 \\ m_3 &= U_3' / (U_1')^3 \\ m_r &= U_r' / (U_1')^r \end{aligned}$$

où m_1 exprimé en heures représente l'intervalle de temps moyen nécessaire à une goutte d'eau arrivent à la surface du bassin pour parvenir à l'exutoire, appelé aussi "lag-time". m_2 est le coefficient de variation de m_1 et m_3 le coefficient d'asymétrie de la fonction $u(t)$.

Les fonctions $i(t)$ et $q(t)$ qui représentent les précipitations effectives et le débit ruisselé sont obtenues par l'analyse du hyétogramme de l'averse effective et de l'hydrogramme résultant dont on a soustrait le flot de base. On peut démontrer que : (NASH op. cit)

$$\begin{aligned}U'_1 &= Q'_1 - I'_1 \\U_2 &= Q_2 - I_2 \\U_3 &= Q_3 - I_3 \\U_4 &= Q_4 - I_4 - 6 I_2 U_2\end{aligned}$$

où les paramètres $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ et $I_1, I_2, \dots, I_n$ sont obtenus à partir des moments des fonctions $i(t)$ et $q(t)$ observées.

Les moments $m_1, m_2, \dots, m_n$ de l'hydrogramme unitaire peuvent alors être estimés à partir de ces équations.

3.4.3. Equation de l'hydrogramme unitaire.

La résolution des équations différentielles liant le débit ruisselé $q(t)$ et $i(t)$ conduit NASH (op. cit) à exprimer l'hydrogramme unitaire instantané $u(t)$ par l'équation

$$u(t) = \frac{1}{K \Gamma(n)} \cdot e^{-t/K} \cdot (t/K)^{n-1}$$

où K et n sont des constantes définies pour chaque bassin versant

t le temps écoulé depuis le début de l'averse

et $\Gamma(n) = (n-1)!$

On en déduit l'équation générale de l'hydrogramme unitaire de période T

$$u(T, t) = 1/T [I(n, t/K) - I(n, (t-T)/K)]$$

$$\text{ou } I(n, t/K) = \frac{\Gamma(n, t/K)}{\Gamma(n)}$$

$\Gamma(n, t/K)$ est la fonction gamma incomplète d'ordre n pour t/K

Les valeurs de $I(n, t/K)$ peuvent être calculées par intégration numérique ou lues dans des tables (PEARSON 1957).

Les constantes K et n sont liées aux moments de l'hydrogramme unitaire par les équations

$$\begin{aligned}m_1 &= nK \\m_2 &= 1/n \\m_3 &= 2/n^2 = 2 m_2^2\end{aligned}$$

Ayant défini les moments de l'hydrogramme il est donc possible d'exprimer la valeur du débit ruisselé pour tous les multiples de la période T .

Si les observations de débit sont inexistantes ou insuffisantes on estimera les moments de l'hydrogramme à partir des caractéristiques physiques du bassin versant en utilisant les équations définies par NASH (op. cit):

$$\begin{aligned}m_1 &= 27,6 A^{0,3} \cdot (QLS)^{-0,3} \\m_2 &= 1,0 m_1^{-0,2} \cdot (QLS)^{-0,1} \\ \text{ou } m_2' &= 0,41 L^{-0,1}\end{aligned}$$

où A est la surface du bassin versant

OLS la pente moyenne du bassin

L la longueur du cours d'eau principal comptée à partir de la limite du bassin

3.4.4. Détermination de l'hydrogramme unitaire.

Le calcul des moments de l'hydrogramme puis la recherche des valeurs de $I(n, t/K)$ dans les tables est long et fastidieux. Le programme de calcul PARAM, développé à cette occasion estime les moments de l'hydrogramme à partir des paramètres A, OLS et L, puis calcule les coefficients de l'hydrogramme unitaire $U(T, t)$ pour une période T donnée. (tableau VII-IX, figures VII-15, VII-16).

Tableau VII-XI

BASSIN DU SEYON A NEUCHÂTEL MOMENTS DE L'HYDROGRAMME

SURFACE DU BASSIN		35.000 KM2
LONGUEUR DU COURS D'EAU		12.600 KM
PENTE MOYENNE DU BASSIN		11.600 0/0
METHODE PENTE MOYENNE DU BASSIN		METHODE LONGUEUR DU COURS D'EAU PRINCIPAL
M1=	7.257	M2= 0.333
M2=	0.332	N= 2.996
N=	3.010	K= 2.422
K=	2.411	

COEFFICIENTS DE L'HYDROGRAMME UNITAIRE CALCULES A PARTIR DE LA PENTE MOYENNE DU BASSIN

T	T/K	$I(N, T/K)$	$I(N, (T-1)/K)$	$U(T, T)$
1	0.414	0.0085		0.0085
2	0.829	0.0509	0.0085	0.0424
3	1.244	0.1287	0.0509	0.0777
4	1.659	0.2299	0.1287	0.1011
5	2.073	0.3408	0.2299	0.1109
6	2.488	0.4507	0.3408	0.1098
7	2.903	0.5523	0.4507	0.1016
8	3.318	0.6419	0.5523	0.0895
9	3.732	0.7180	0.6419	0.0761
10	4.147	0.7810	0.7180	0.0629
11	4.562	0.8318	0.7810	0.0508
12	4.977	0.8722	0.8318	0.0403
13	5.391	0.9037	0.8722	0.0315
14	5.806	0.9280	0.9037	0.0243
15	6.221	0.9466	0.9280	0.0185
16	6.636	0.9606	0.9466	0.0140
17	7.050	0.9711	0.9606	0.0104
18	7.465	0.9789	0.9711	0.0078
19	7.880	0.9846	0.9789	0.0057
20	8.295	0.9889	0.9846	0.0042
21	8.710	0.9920	0.9889	0.0030
22	9.124	0.9943	0.9920	0.0023
23	9.539	0.9958	0.9943	0.0015
24	9.954	0.9970	0.9958	0.0011
25	10.369	0.9980	0.9970	0.0010
26	10.783	0.9984	0.9980	0.0003
27	11.198	0.9989	0.9984	0.0005

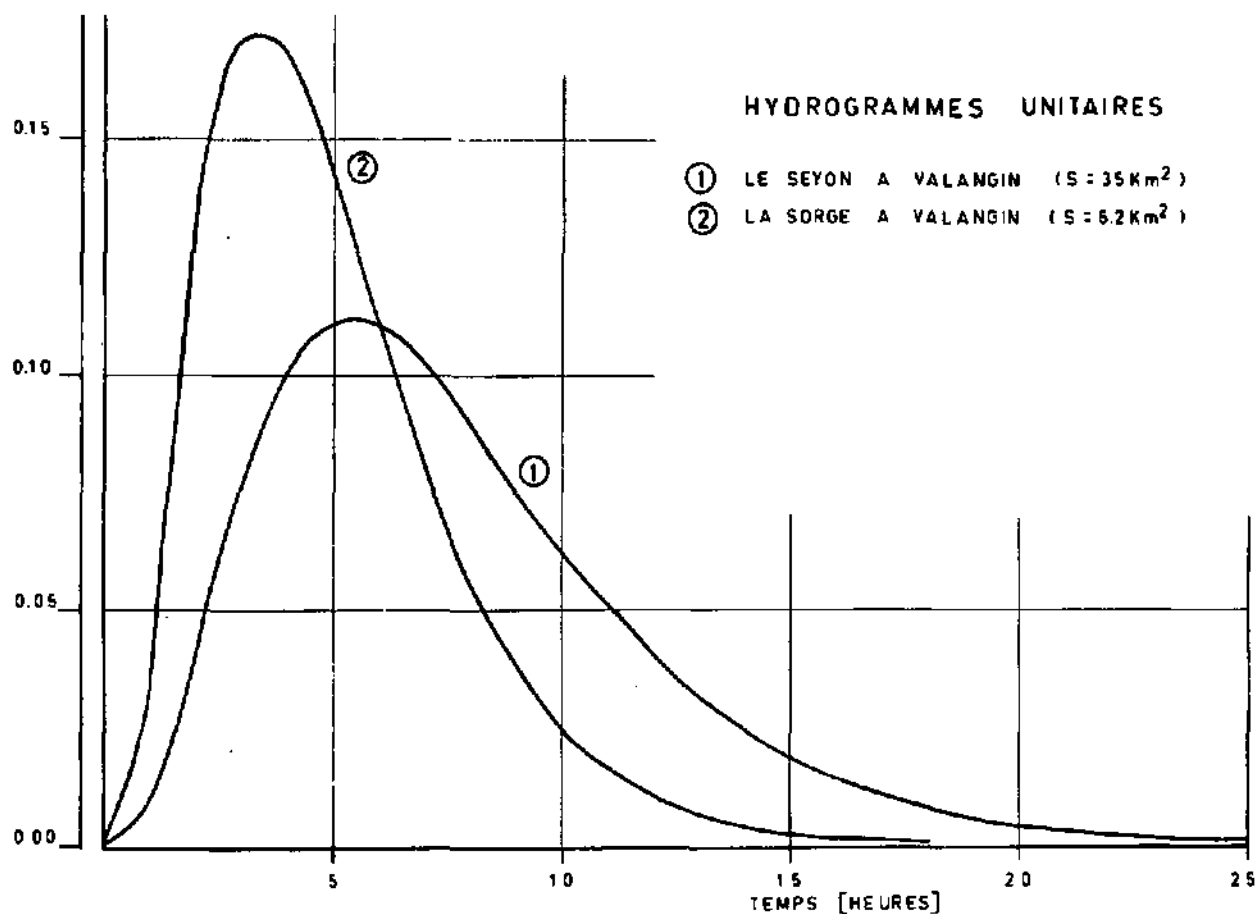


Figure VII - 15 Hydrogramme unitaire du Seyon et de la Sorge calculés à partir de la pente moyenne du bassin

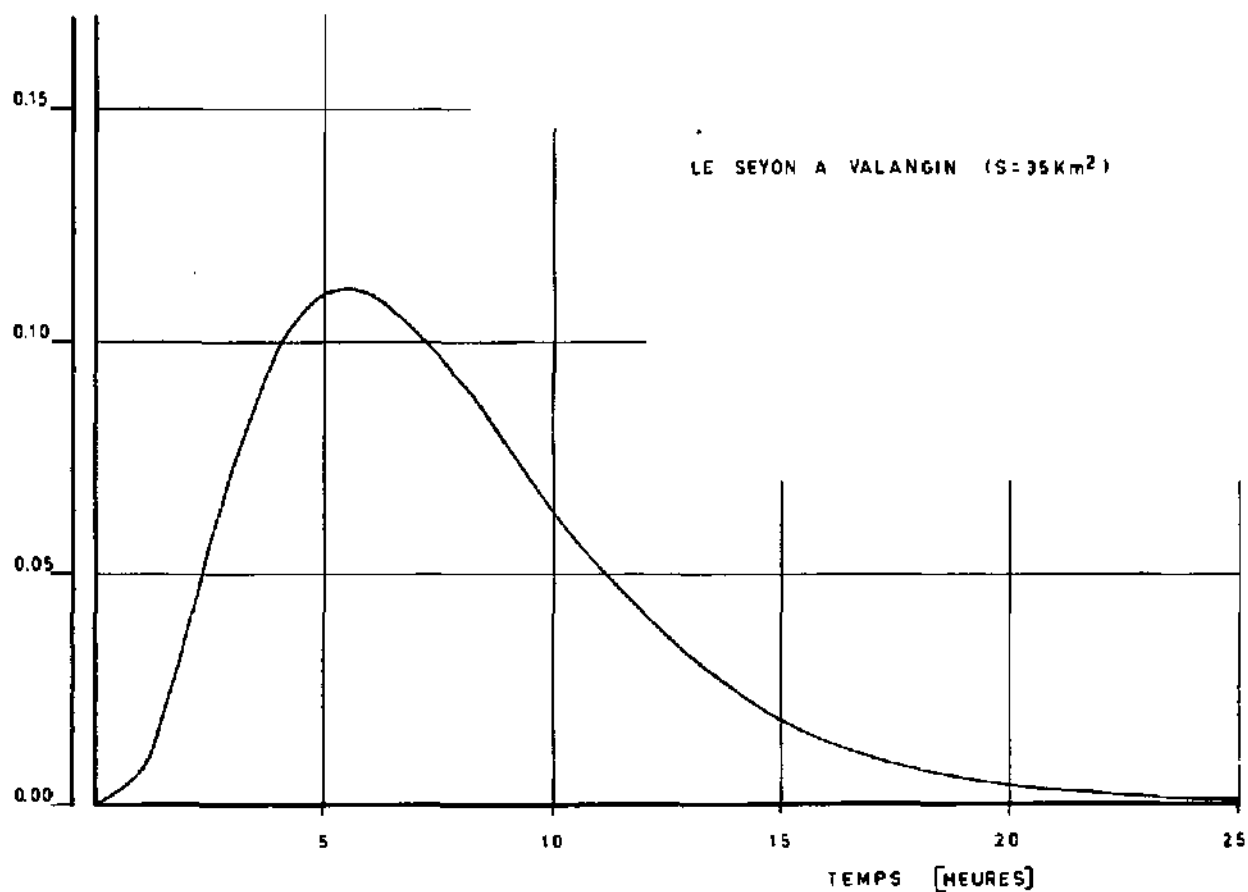


Figure VII - 16 Hydrogramme unitaire du Seyon obtenu à partir de la longueur du cours d'eau

3.5. Organigramme.

La simulation des débits est réalisée par un programme principal (CHYN1) qui traite les données pluviométriques, calcule le bilan des eaux du surface et l'hydrogramme ruisselé. Un sous programme (TEMPA) assure l'incrémentation du temps par pas d'une heure, calcule l'hydrogramme du flot de base à chaque pas de temps et l'API toutes les 24 heures. Trois sous programmes (CADRY, CADRX, PLOT1) pilotent le traceur de courbe pour toutes les séquences de dessin des débits. (Fig. VII-21). La période considérée pour une séquence de calcul est limitée par les dimensions de la mémoire centrale, dans le cas d'un ordinateur de 16 k elle vaut au maximum 500 heures.

3.6. Test du modèle.

L'enregistrement simultané des précipitations horaires à Dombresson et des débits du Seyon à Valengin (XI 1970 - IX 1972) a permis d'ajuster les paramètres du modèle au bassin du Seyon et d'en vérifier la fiabilité.

Après 10 passages de cinq périodes réparties sur l'année hydrologique, suivis chaque fois d'un ajustement des paramètres (Z , K , fraction ruisselée), l'écart entre les débits journaliers moyens mesuré et calculé était inférieur à 10 %. (Fig. VII-17, VII-18, VII-19, VII-20).

Parmi les modifications les plus importantes apportées aux coefficients calculés citons le coefficient d'infiltration λ qui passe de 0,2 à 0,8 marquant ainsi l'importante rétention réalisée au niveau des terrains peu perméables du Val de Ruz.

Les résultats du bilan des eaux de surface a révélé une nette surestimation de la fraction ruisselée, particulièrement pour les mois d'hiver, d'où l'introduction d'un facteur limitatif. Le rapport lame d'eau ruisselée / lame d'eau tombée dépasse en effet rarement 0,45 en hiver et 0,25 en été. L'erreur sur le bilan est certainement plus inhérente à la qualité des données qu'à celle du modèle. En effet, les données à disposition pour la régression multiple comprenaient surtout des périodes pluvieuses s'étendant sur plusieurs jours, d'où une moins bonne réponse du modèle pour les petites averses.

La prévision des débits instantanés maxima est très bonne pour les fortes crues, l'erreur peut atteindre 50 % pour les petites averses (surestimation) car il n'a pas été tenu compte séparément des composantes de la Sauge et du Haut Seyon, dont le maximum peut être décalé d'une à deux heures. L'hydrogramme unitaire calculé est bien représentatif du bassin. Un léger aplatissement qui allongerait un peu sa durée diminuerait favorablement la rupture de pente qui apparaît à la fin de la phase de ruissellement. Les coefficients de tarissement déterminés pour chaque mois sur les décrues 1901 - 1925 ont été divisés par un facteur 2 pour obtenir une bonne reproductibilité des débits 1970 - 1972 à Valengin. On verra là l'influence de la régularisation des débits d'étiage du Seyon par les pompes des communes ainsi que l'absence de pertes dans les Gorges.

L'introduction d'une fonction $\lambda = f(Q)$ estimée à partir de courbes de tarissement 1970 - 1972 provoquait comme dans le cas de la Serrière une stabilisation trop rapide des débits. Si le coefficient de tarissement varie effectivement avec le débit, la variation est certainement discrète, phénomène qui n'a pas été considéré ici.

3.7. Conclusions au paragraphe 3.

Les tests effectués dans le cadre de la simulation continue des débits du Seyon ont révélé la fiabilité des fonctions et des algorithmes retenus pour le modèle conceptuel CHYN1. La poursuite de l'ajustement des coefficients, en particulier ceux de l'hydrogramme unitaire, permettrait certainement d'améliorer encore la précision des résultats.

Le développement d'un programme d'ajustement automatique des paramètres est souhaitable, mais celui-ci devrait pouvoir être testé sur un bassin dont les données hydrométéorologiques sont plus abondantes que dans le cas de celui du Seyon.

Enfin il est certain que l'introduction de non linéarités dans le calcul du bilan des eaux de surface (variation des coefficients de ruissellement et d'infiltration au cours de l'averse) à condition de disposer de données expérimentales suffisantes est une voie qui devrait permettre d'améliorer la représentativité du modèle. A cet effet une meilleure connaissance des écoulements en subsurface ainsi que dans la zone non saturée, en liaison avec la nature minéralogique et la structure des terrains est souhaitable.

LE SEYON DEBITS SIMULES 6. 10. - 4. 11. 1970

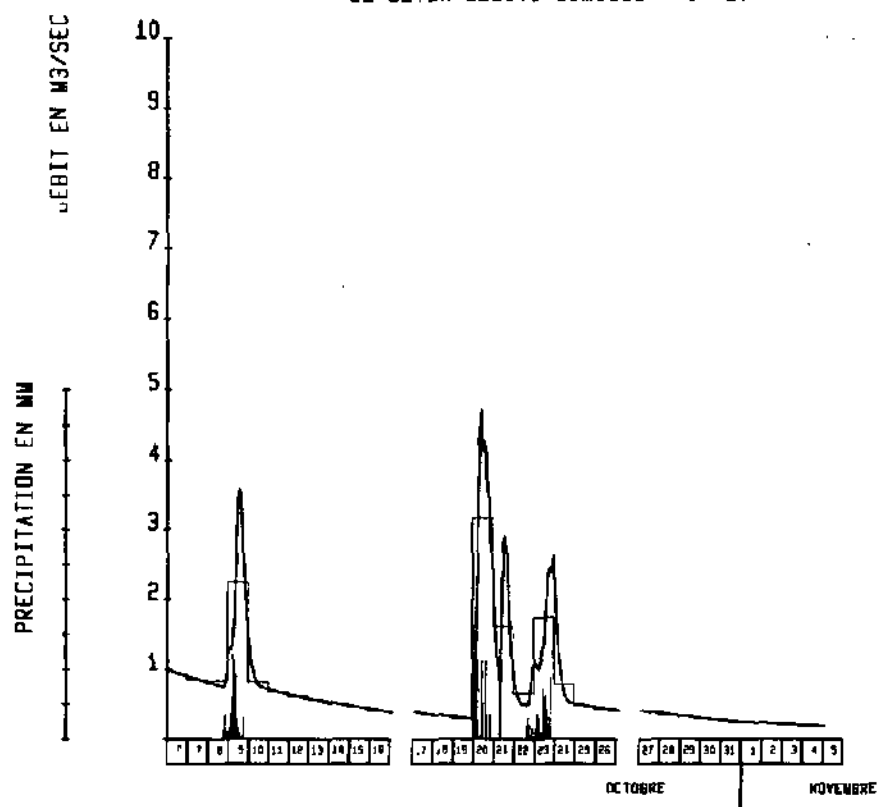


Figure VII - 17

LE SEYON DEBITS SIMULES 3. 11. - 28. 11. 1970

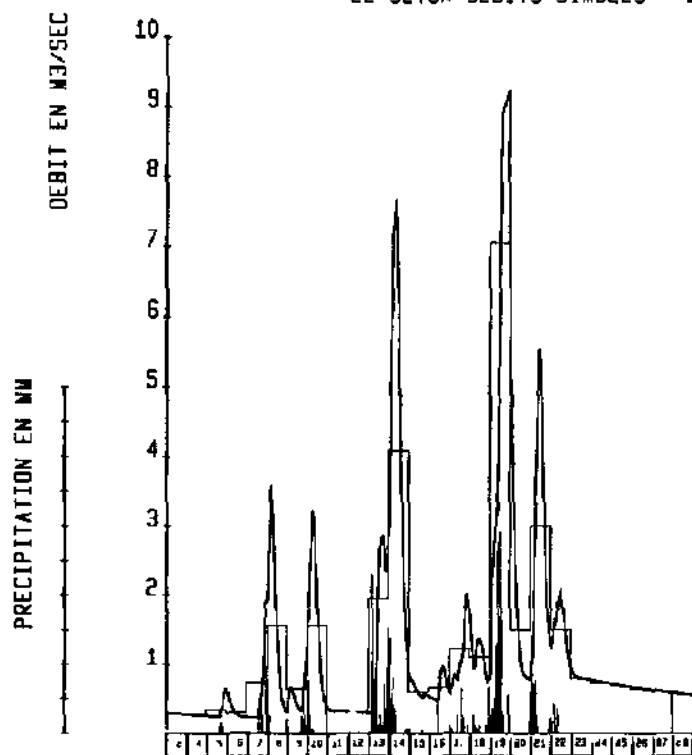


Figure VII - 18

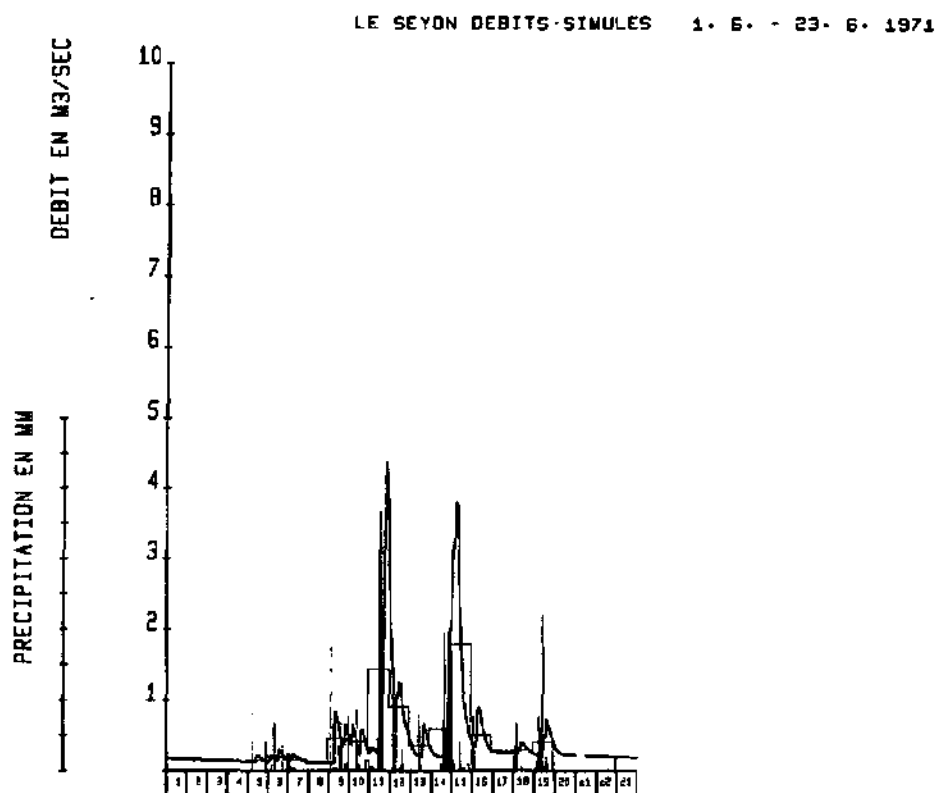


Figure VII - 19

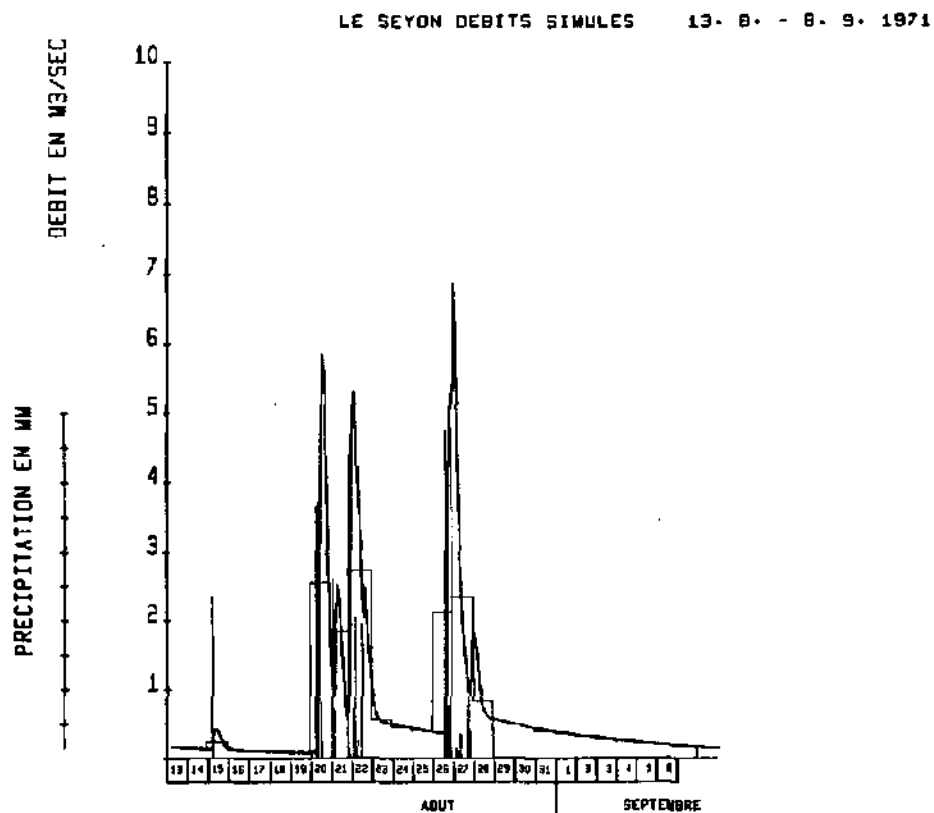


Figure VII - 20

Simulation continue du débit d'un cours d'eau par le programme CHYN1.
Organigramme de calcul.

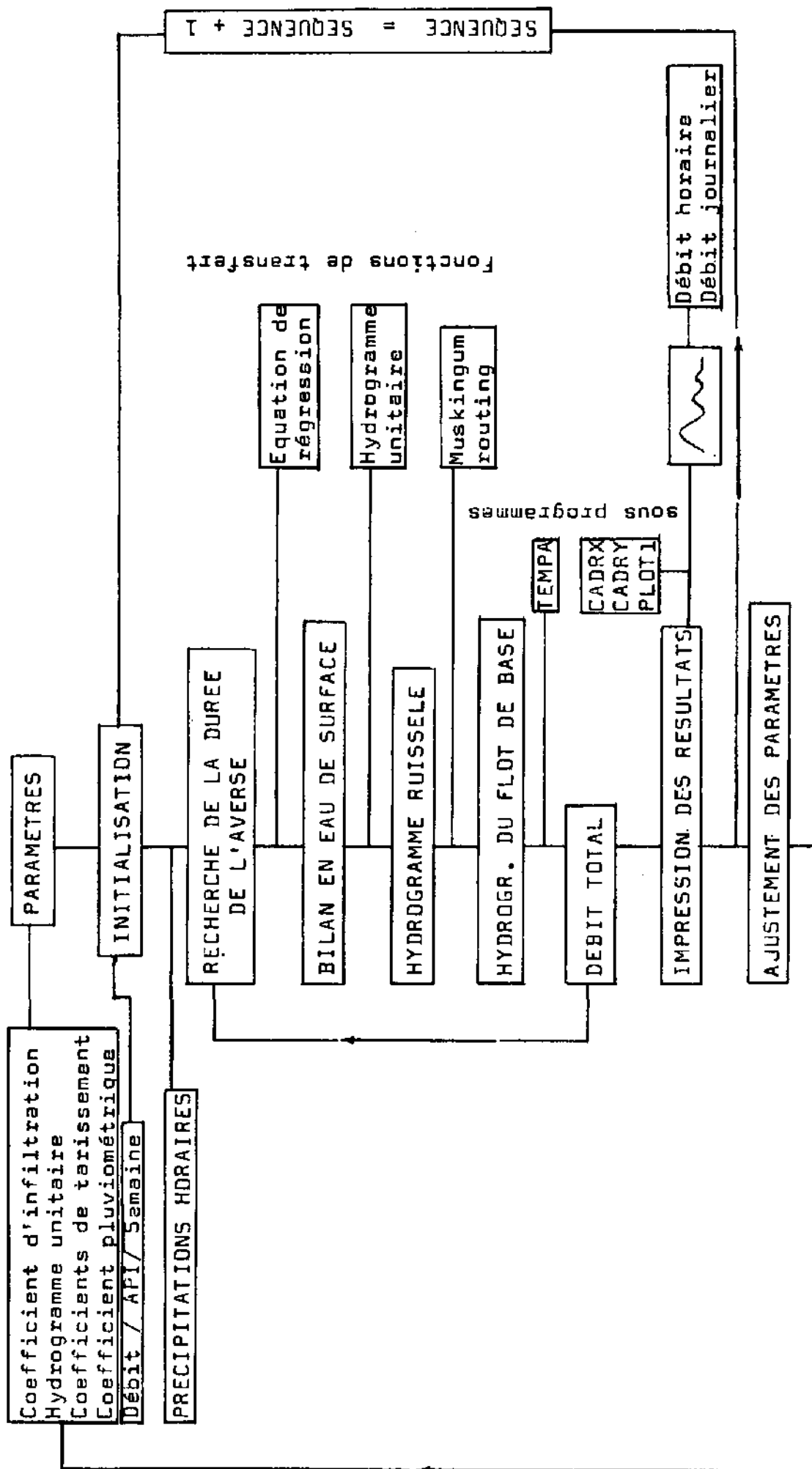


Figure VII - 21

LA SOURCE DE LA SERRIERE

Quand nous faisons une théorie générale dans nos sciences, la seule chose dont nous soyons certains c'est que toutes ces théories sont fausses, absolument parlant.

Claude Bernard
Introduction à l'étude de
la médecine expérimentale.

1. LE DEBIT

1.1. Mesure du débit.

Comme pour la Seyon c'est probablement KNAB (1864) qui réalise les premiers jaugeages de la Serrière. Le 15 mai 1856 il mesure $8 \text{ m}^3/\text{s}$ puis $14 \text{ m}^3/\text{s}$ le lendemain au cours d'une crue exceptionnelle alors qu'en basses eaux (1.2.1858) il donne $0,200 \text{ m}^3/\text{s}$, cette dernière valeur étant probablement sous-estimée.

Dès la fin du siècle et jusqu'en 1925 DE PERRON (tableau VII-1) organise des relevés journaliers qui sont heureusement publiés sous forme graphique. Lorsque le débit est inférieur à 1500 l/s il est estimé à partir de la production des turbines électriques de Suchard. Les débits élevés étaient mesurés sur un limnimètre qui subsiste encore à la hauteur du café du Pont.

De fréquents jaugeages au moulinet permettaient l'étalonnage des sections et des turbines. Les restrictions émises à propos de l'utilisation des mesures journalières du débit du Seyon (chap. VII-1.2) restent valables ici, bien que les erreurs possibles soient moins importantes puisque la source est plus tamponnée que la rivière (tableau VIII-1).

Dans le cadre de la présente étude, des mesures de débit ont été réalisées en 1970 et 1971 dans le canal en pierres sèches à la sortie des turbines Suchard, actuellement recouvert par un bâtiment. Les niveaux de l'eau étaient enregistrés sur un limnigraphe dont le flotteur, protégé par un tube d'acier, plongeait directement dans la rivière. La section de mesure, rectangulaire, a été étalonnée à 5 reprises. Le jeu des vannes d'une scierie à l'aval, dont le remous était sensible jusqu'au limnigraphe a nécessité l'établissement de plusieurs courbes de tarage en fonction de leur ouverture. Le colmatage fréquent du tube protégeant le flotteur, la présence d'un remous autour du tube dans les cas de forts débits conduisent à considérer les résultats avec une certaine réserve, particulièrement pour les débits supérieurs à $7 \text{ m}^3/\text{s}$ qui sont probablement sous-estimés. (tableau VIII-1).

1.2. Régime hydrologique.

Le tableau VII-III situe les débits moyens et extrêmes de la Serrière parmi les 3 principaux cours d'eau et sources qui lui sont proches géographiquement. On constate que la Serrière est la plus tamponnée des trois grosses sources neuchâteloises. Les facteurs qui déterminent le rapport des débits maximum - minimum sont multiples, mais on peut s'étonner que la source de la Noiraigue dans le bassin de laquelle la part du ruissellement et des infiltrations concentrées est élevée présente un rapport aussi bas. Plus que la forme du bassin (les bassins de l'Arcuse et de la Noiraigue sont plus allongés) c'est la perméabilité du réseau karstique particulièrement à proximité de l'exutoire qui

doit être déterminante. SIMEONI (comm. orale et à paraître) a d'ailleurs démontré que la perméabilité mesurée dans les forages dans la vallée de la Brévine était significativement plus élevée que dans ceux de la vallée des Ponts de Martel.

Dans le cas du bassin de la Serrière on a vu que le réservoir karstique peut déborder dans le bassin du Seyon, atténuant ainsi les débits élevés. A l'étiage, l'apport des pertes des gorges du Seyon accroît le débit de la source. En fin la présence du réservoir captif constitué par le Dogger sous le synclinal du Val de Ruz et l'importance de la couverture quaternaire concourent certainement au maintien d'un débit soutenu en étiage.

Tableau VIII-I

La Serrière : débits mensuels 1901 - 1925 m^3/s^{-1}

Station de Serrière

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
1901	1,11	0,64	3,50	7,11	2,61	2,58	1,31	2,38	3,13	1,02	0,97	1,81	2,42
1902	2,55	2,50	4,17	6,00	4,52	1,47	0,83	1,44	0,83	2,31	1,14	2,31	2,51
1903	2,44	1,43	3,22	5,5	3,06	0,94	0,56	2,51	0,81	1,97	1,88	2,56	1,98
1904	1,00	2,94	3,89	6,83	3,72	2,17	0,92	0,92	1,06	1,14	1,36	1,78	2,31
1905	1,27	0,75	3,66	7,50	3,11	1,66	0,861	2,19	3,00	3,16	2,72	2,11	2,66
1906	3,028	1,30	4,96	5,22	4,80	2,33	0,69	0,5	0,44	0,66	3,11	2,33	2,44
1907	1,33	1,05	4,08	6,44	5,05	3,50	2,11	0,66	0,44	0,61	0,69	3,03	2,41
1908	1,19	1,55	2,11	1,03	4,50	2,44	2,50	2,08	2,19	0,61	0,94	1,11	2,10
1909	1,69	1,00	2,44	5,97	2,47	2,75	1,83	1,22	1,30	4,11	1,83	3,91	2,79
1910	4,11	3,77	4,16	4,64	3,33	3,66	3,97	2,27	2,03	0,72	2,53	4,31	1,29
1911	1,53	1,72	4,28	3,81	2,75	2,11	0,97	0,58	0,61	2,22	2,69	3,36	2,21
1912	5,00	3,50	4,94	2,61	1,50	2,11	1,53	3,83	2,61	2,16	2,36	2,86	2,87
1913	3,00	2,58	3,77	3,86	2,83	0,92	1,16	1,11	2,14	0,88	3,00	1,92	2,26
1914	2,58	2,19	6,06	5,86	4,44	2,50	3,39	4,31	4,19	1,25	1,64	2,89	3,44
1915	4,33	1,06	4,33	5,47	4,36	1,47	1,31	2,22	1,39	1,17	2,67	3,72	3,79
1916	3,67	2,72	3,97	5,00	2,81	3,25	3,81	1,14	1,39	2,06	1,14	3,42	3,03
1917	3,61	1,11	1,72	2,19	4,28	1,83	2,08	2,92	2,08	4,17	2,89	1,50	2,53
1918	2,81	1,14	1,61	3,33	2,44	1,83	0,94	0,50	2,61	1,81	1,33	5,36	2,14
1919	3,69	3,69	4,66	4,39	3,89	1,14	1,69	0,83	0,53	0,50	2,50	4,84	2,70
1920	6,89	2,50	3,33	1,86	1,87	1,17	2,11	1,17	1,67	1,89	0,64	0,86	2,31
1921	1,95	0,75	0,87	0,82	1,63	0,76	0,44	0,60	0,71	0,38	1,01	0,55	0,86
1922	3,53	2,91	4,67	5,71	4,89	0,95	0,74	0,55	1,80	1,17	2,93	1,77	2,63
1923	1,88	2,12	4,68	6,03	4,98	2,93	0,79	0,46	0,87	3,53	3,83	3,42	2,70
1924	4,08	0,84	2,50	6,38	5,90	2,01	1,33	1,00	1,33	2,66	2,69	0,55	2,61
1925	0,52	1,31	1,03	3,32	2,45	1,17	0,71	1,96	1,61	1,25	1,33	2,39	1,59
Moyenne	2,73	1,86	3,54	4,76	3,52	1,99	1,54	1,57	1,63	1,82	2,07	2,59	2,50
Ec. type	1,51	0,95	1,31	1,80	1,21	0,83	0,99	1,06	0,96	1,12	0,91	1,27	0,60

* Valeurs obtenues par régression avec les précipitations à Dombresson.

Ecart type toutes les valeurs mensuelles 1,52

1.3. Débits annuels et mensuels moyens.

Les débits mensuels et annuels moyens (1901 - 1925) sont donnés au tableau VIII-I et à la figure VII-4. Les valeurs manquantes de 1901, 1902 et 1903 ont été estimées par régression linéaire avec les précipitations mensuelles mesurées à la station de Dombresson.

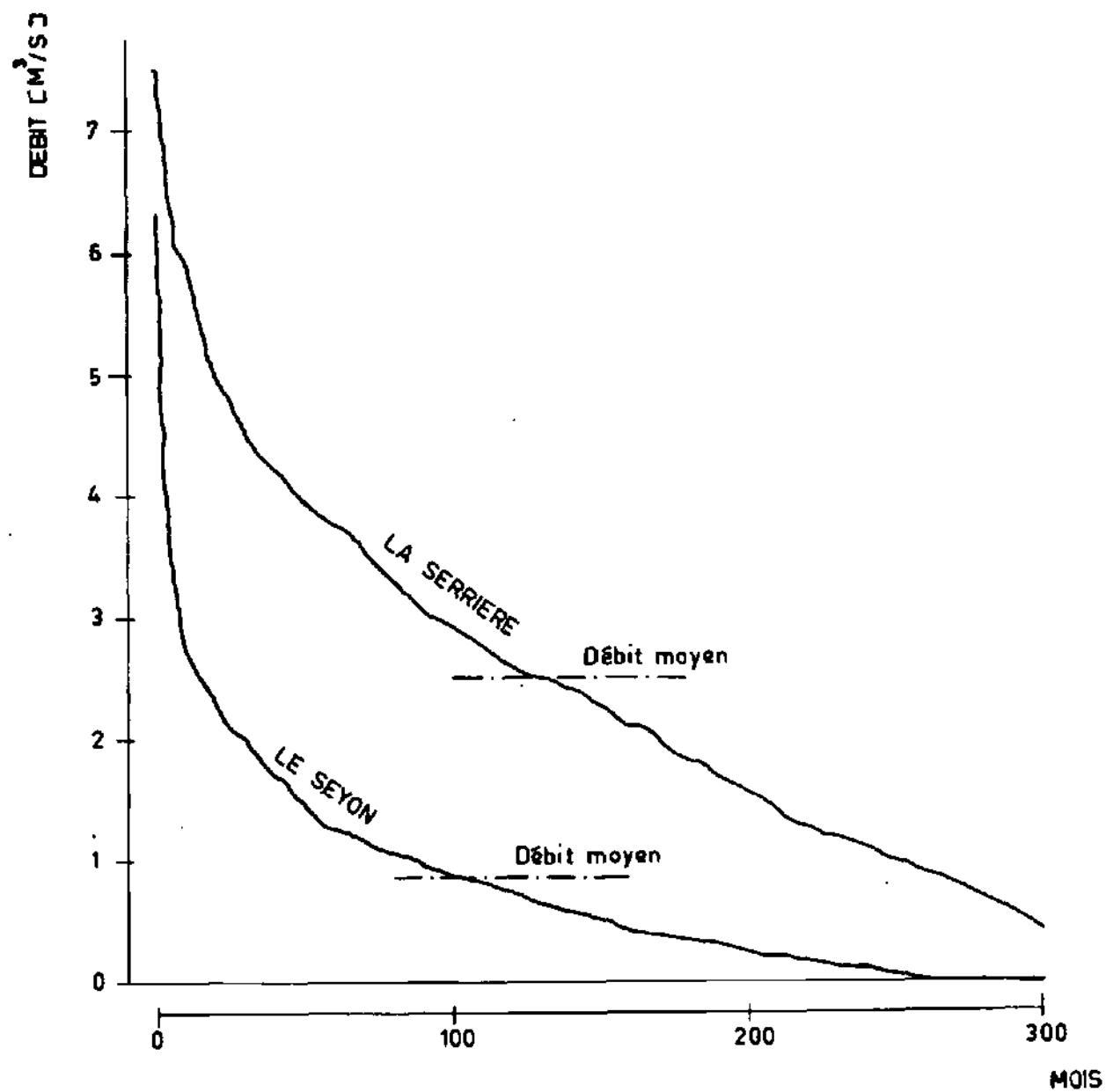


Figure VIII - 1 La Serrière, Le Seyon. Débits mensuels classés
1901 - 1925

Le débit mensuel moyen varie entre 4,76 (IV) et 1,54 m³/s (VII). L'écart type des débits mensuels est toujours inférieur au débit. Maximum en avril, il est minimum en novembre. Il existe un mois de décalage entre les débits mensuels maximum du Seyon et de la Serrière, en raison de la fonte différée de la neige en altitude.

Comme pour le Seyon l'histogramme des débits mensuels moyens que l'on comparera à celui des précipitations révèle l'effet retardateur de la réserve nivale sur l'écoulement. La fonte de la neige a généralement lieu de mars à mai. Durant l'été la courbe enveloppe de l'histogramme représente bien le déficit d'écoulement dû à l'évapotranspiration. Le débit annuel moyen est de 2,50 m³/s. Comme pour le Seyon c'est en 1914 que le débit annuel est le plus élevé (3,44) et en 1921 qu'il est le plus faible (0,86).

Tableau VIII-III

Le Seyon, source de la Serrière, source de la Noiraigue, source de la Doux.
Comparaison des régimes hydrologiques.

Rivière	Période	Débit instantané		Débit mensuel m ³ s ⁻¹			s	R ₁	R ₂
		Max.	Min.	Max.	Min.	May.			
La Serrière	1901-1925	10,9	0,19	7,50	0,38	2,50	1,52	57,3	19,7
La Serrière	IV 1970-X 1971	9,5	0,45	7,17	0,61	1,89	1,73	21,1	11,8
La Noiraigue 1)	1959-1972	13,9	0,17	6,77	0,22	1,98	-	81,7	30,7
La Doux 1)	1959-1972	49,0	0,27	15,90	0,34	4,65	-	181,4	46,7
Le Seyon (Ntal)	1901-1925	52,0	0,0	6,40	0,0	0,77	0,88	-	-
Le Seyon (Valengin)	X 1970-X 1972	9,5	0,53	1,37	0,14	0,49	0,30	17,9	9,8

1) Sources : Annuaire hydrographique
de la Suisse

$$R_1 = \frac{\text{Débit instantané maximum}}{\text{Débit instantané minimum}}$$

$$R_2 = \frac{\text{Débit mensuel maximum}}{\text{Débit mensuel minimum}}$$

2. LE RÉGIME DE LA SERRIERE EN PERIODE DE TAPISSEMENT

2.1. Choix d'une méthode d'analyse.

L'analyse du régime des sources karstiques en période de tapissement a déjà fait l'objet de nombreux travaux sans qu'une solution générale ait vraiment été trouvée. Parmi les études récentes citons TRIPET (1969 et 1972) et DROGUE (1972).

Les formules le plus fréquemment utilisées par l'école française constituent la solution générale de l'équation différentielle :

$$dV / dt + K V^n = 0 \quad (\text{dans TRIPET 1972})$$

où V est le volume d'eau emmagasiné
et K et n sont des constantes

Si n = 1 (formule de Maillet) on a une décroissance exponentielle de la forme :

$$Q(t) = Q_0 e^{-at} \quad \text{ou } Q \text{ est le débit}$$

Pour n ≥ 2 la solution est une hyperbole du type :

$$Q(t) = \frac{3n}{(1 + t)^n}$$

Tableau VIII-IV

La Serrière
Coefficients de tarissement

No	Date	Q_0	Q_1	t_1	a_1	Q_2	t_2	a_2	Q_3	t_3	a_3	Q_4	t_4	a_4
1	24.6 - 14.8 1911	4600	1500	8	0,140	500	28	0,039	425	17	0,0095			
2	2.7 - 6.10 1907	5000	1400	7	0,182	740	25	0,026	390	61	0,0105			
3	10.6 - 6.10 1906	3500	1500	5	0,169	800	8	0,079	325	64	0,0141	315	35	0,001
4	5.10 - 20.11 1908	1000	550	20	0,029	475	26	0,056						
5	10.10 - 3.11 1913	1500	1000	3	0,135	500	21	0,033						
6	1.8 - 9.9 1909	1700	1300	6	0,045	625	25	0,029	600	9	0,0045			
7	26.7 - 9.9 1919	1900	1000	6	0,107	500	22	0,031	425	17	0,0096			
8	22.6 - 1.9 1909	5400	1700	11	0,105	430	33	0,042	275	28	0,015			
9	1.5 - 14.6 1918	5600	2500	7	0,115	1300	15	0,044	625	22	0,033			
10	23.5 - 15.6 1902	7500	2220	8	0,152	1375	10	0,048	1250	5	0,019			
11	10.6 - 11.7 1904	4700	1100	10	0,155	675	21	0,023						
12	20.1 - 25.2 1906	2500	1000	7	0,131	375	30	0,040	373	5	0,0010			
13	31.12 - 20.2 1911	3200	1600	5	0,139	1000	19	0,024	700	26	0,0014			
14	27.1 - 28.3 1918	3200	1400	12	0,069	600	28	0,030						
15	2.1 - 13.2 1919	5600	2500	9	0,089	1060	20	0,042	800	13	0,022			
16	11.11 - 14.12 1922	5250	1800	6	0,178	1150	7	0,064	650	19	0,030			
17	4.11 - 29.12 1924	6000	2000	6	0,183	840	15	0,058	450	24	0,026	375	9	0,002
18	4.2 - 20.3 1909	1500	600	16	0,057	475	28	0,008						
19	1.7 - 20.8 1921	150	230	51	0,0080									

$$Q_0 = Q \cdot e^{-at}$$

$$a_{1,2,3,4} = \frac{\ln Q_{1,2,3,4} - \ln Q_{0,1,2,3}}{t_{1,2,3,4}}$$

Tableau VIII-V

Corrélation des logarithmes des coefficients de tarissement avec les logarithmes des débits initiaux (Q_0), maximum (Q_{max}) et des temps t_1 écoulés depuis le maximum de la crue.

variable(s) indépendante(s)	A_0	A_1	A_2	r	F
$\ln Q_0$	-11,088	1,076 ¹⁾	-	0,92	230 · 0+
$\ln Q_{max}$			-	0,18	
$\ln t_1$	- 2,656	-0,345 ²⁾	-	0,85	116,4 +
$\ln Q_0, \ln t_1$	- 8,619	0,766	-0,133 ³⁾	0,94	194,9 ++
$\ln Q_{max}, \ln t_1$	- 7,474	0,575	-0,361 ³⁾	0,90	95,7 ++

$$N = 46$$

$$+ F_{0,01} = 7,25$$

$$++ F_{0,01} = 5,12$$

$$1) \ln a = A_0 + A_1 \ln Q$$

$$2) \ln a = A_0 + A_1 \ln t_1$$

$$3) \ln a = A_0 + A_1 \ln Q + A_2 \ln t_1$$

LA SERRIERE COURBES DE TARISSEMENT

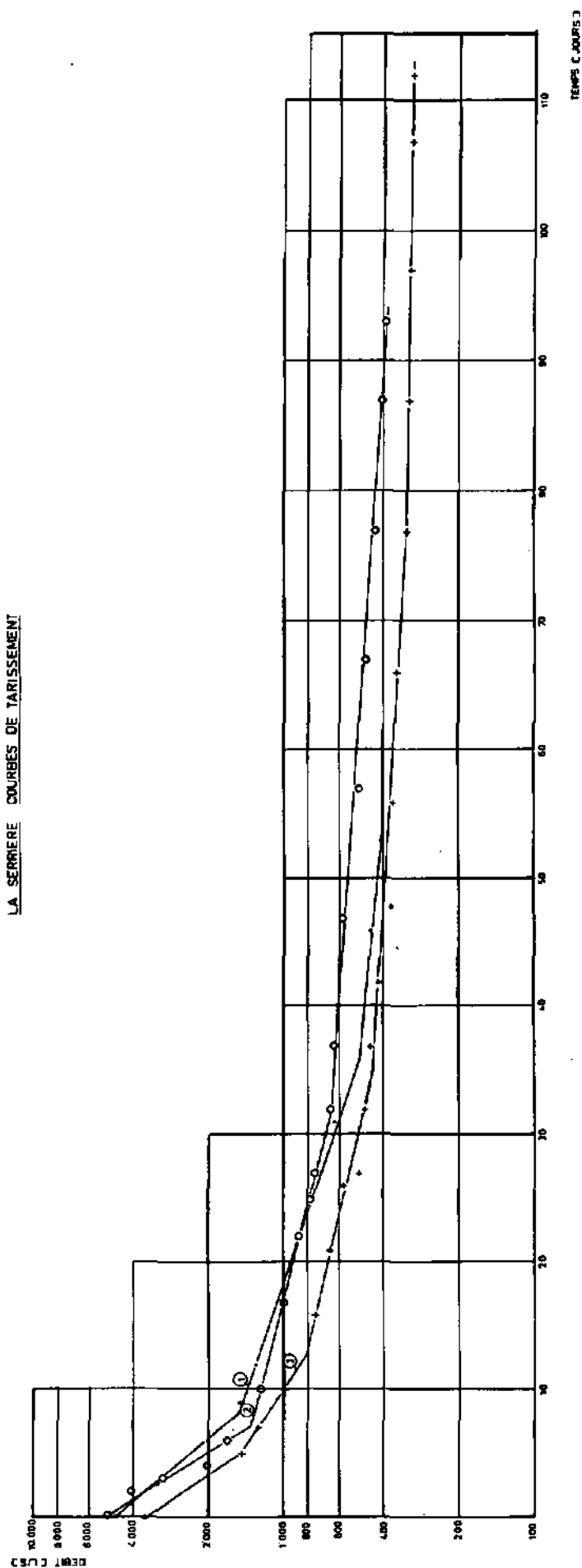


Figure VIII - 2 La Serrière. Courbes de tarissement 1901 - 1925

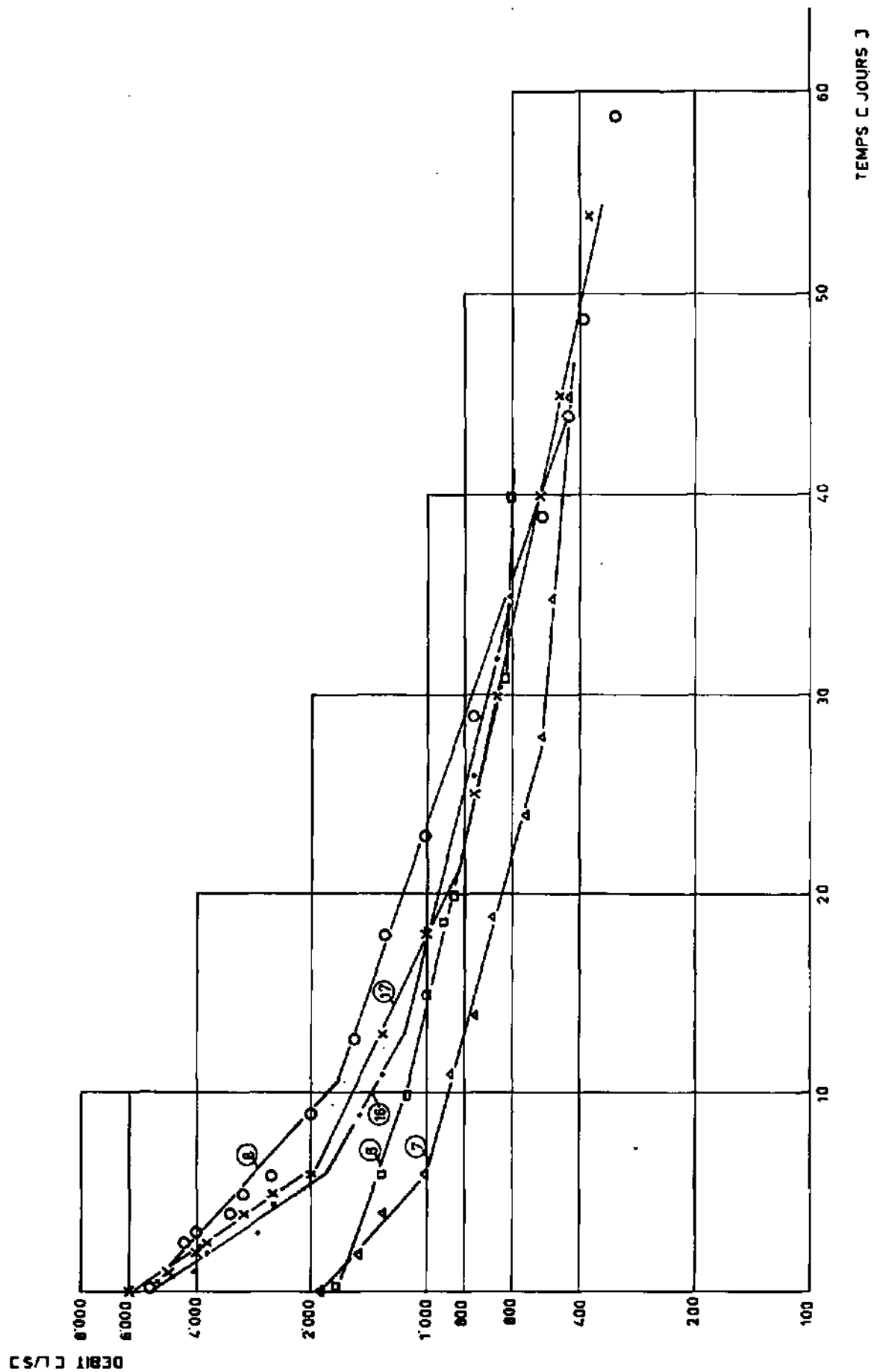


Figure VIII - 3 La Serrière. Courbes de tarissement 1901 - 1925

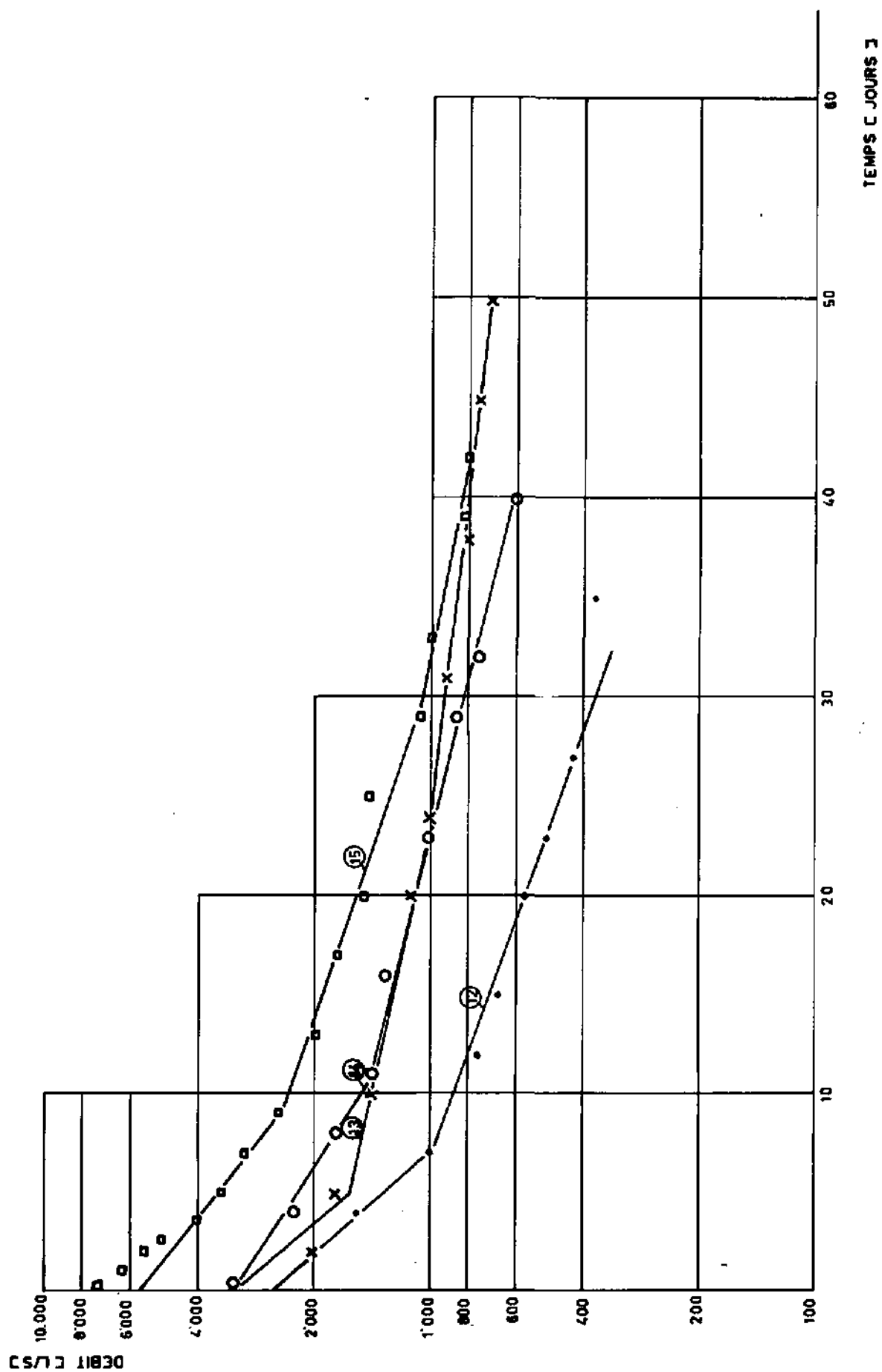


Figure VIII - 4 La Serrière. Courbes de tarissement 1901 - 1925

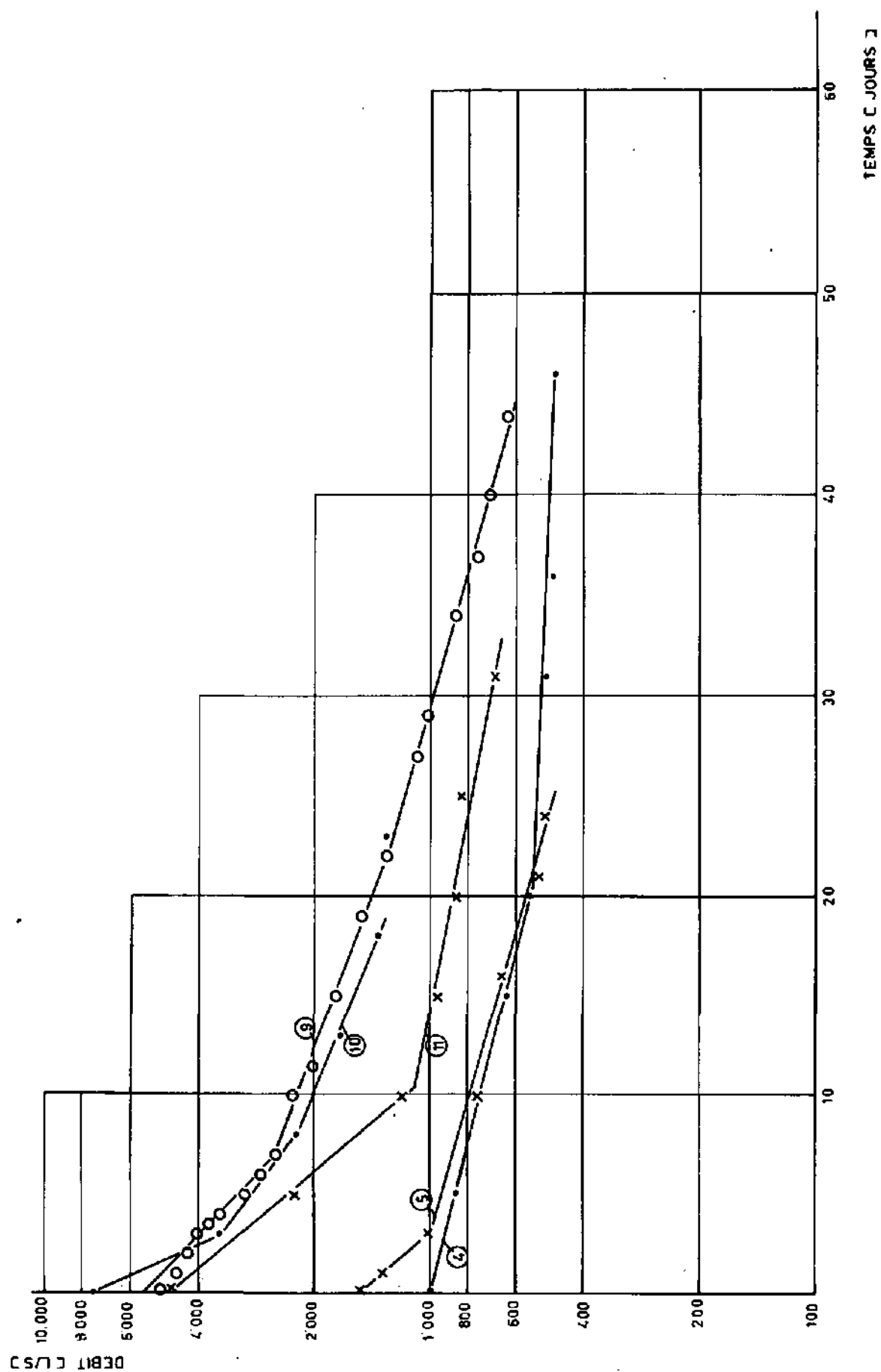


Figure VIII - 5 La Serrière. Courbes de tarissement 1901 - 1925

DROGUE (op. cit) a trouvé que la valeur $n = 3/2$ s'appliquait le plus fréquemment à la totalité de l'hydrogramme décroissant des sources karstiques. Dans une étude plus ancienne BURGER (1956) a montré que la loi de décroissance du débit de l'Areuse était de la forme :

$$Q(t) = \frac{Q_0}{(1 + at)^2} + Q_{p0} e^{-\beta t}$$

Q_0 et Q_p représentent les composants rapides et profonds de l'écoulement, le premier terme s'annulant en période de tarissement avancé. Pour MANGIN (dans PAQUIER 19) le coefficient de décroissance rapide représenterait l'apport de la zone non saturée. L'expérience montre que si celui-ci présente une très forte variabilité il ne s'annule jamais, comme on l'a observé dans le tunnel des Loges.

2.2. Analyse des courbes de tarissement.

Plutôt que d'appliquer une méthode connue, on a jugé intéressant, compte tenu des résultats de l'analyse graphique des débits de rechercher une solution originale de caractère général.

Dix huit décrues de la Serrière ont été sélectionnées puis reportées dans leur totalité sur papier semi-logarithmique. Les points s'alignent selon une série de segments de droites dont la pente (qui est le coefficient a de la formule de Maillat) décroît avec le temps et le débit (Figures VIII-1 à VIII-4).

Dans les jours qui suivent le crue, dans l'hypothèse d'une décroissance de type logarithmique et pour des débits initiaux Q_0 supérieurs à 2000 l/s les coefficients a sont compris entre 0,10 et 0,19 (t est exprimé en jours). Après une période de 6 à 10 jours ils valent de 0,025 à 0,080 selon les débits initiaux (tableau VIII-IV). Au delà de 40 jours les valeurs de a s'abaissent encore une à deux fois selon la durée de la décrue; elles sont alors souvent inférieures à 0,01. La décroissance progressive du coefficient de tarissement apparaît donc comme une des caractéristiques du régime de la source en étiage.

On a alors recherché une loi exprimant a en fonction du temps et (ou) en fonction du débit à partir des 46 segments définis sur les crues sélectionnées. Reportées sur papier doublement logarithmique les valeurs de a en fonction du temps compté depuis le début ou le milieu de la décrue se disposent à l'intérieur de deux segments de droites parallèles (Figure VIII-7). On fait l'hypothèse que la loi de variation est de type

$$\begin{aligned} \ln a(t) &= A_0 + A_1 \ln t \\ \text{et} \quad a(t) &= \exp (A_0 + A_1 \ln t) \end{aligned}$$

De la même façon on constate que la loi exprimant a en fonction du débit initial (Figures VIII-6, VIII-7) ou du débit moyen de la période de décrue est du type :

$$a(Q) = \exp (A_0 + A_1 \ln Q)$$

Dans l'hypothèse d'une décroissance continue de a on aurait donc des lois de tarissement de la forme :

$$\begin{aligned} Q(t) &= Q_0 e^{-t} \exp (A_0 + A_1 \ln Q) \\ Q(t) &= Q_0 e^{-t} \exp (A_0 + A_1 \ln t) \end{aligned}$$

où A_0 , A_1 et A_2 sont des constantes définies pour chacune des lois.

On a alors tenté de diminuer la dispersion des points des graphiques VIII-6 et VIII-7 en exprimant a en fonction de Q et t simultanément. On obtient une loi de la forme

$$Q(t) = Q_0 e^{-t} \exp (A_0 + A_1 \ln Q + A_2 \ln t)$$

Les coefficients A_0 , A_1 et A_2 sont calculés par régression multiple entre les logarithmes des variables a , t et Q . (tableau VIII-V). On constate que a est nettement mieux corrélé avec le débit qu'avec le temps et que la combinaison des deux variables ne suffit pas pour expliquer totalement la dispersion des points, même si les coefficients de corrélation dépassent largement les limites de signification ($\alpha = f(Q_{\max})$ excepté).

SOURCE DE LA SERRIERE

COEFFICIENT DE TARISSEMENT
EN FONCTION DU DEBIT INITIAL Q_0

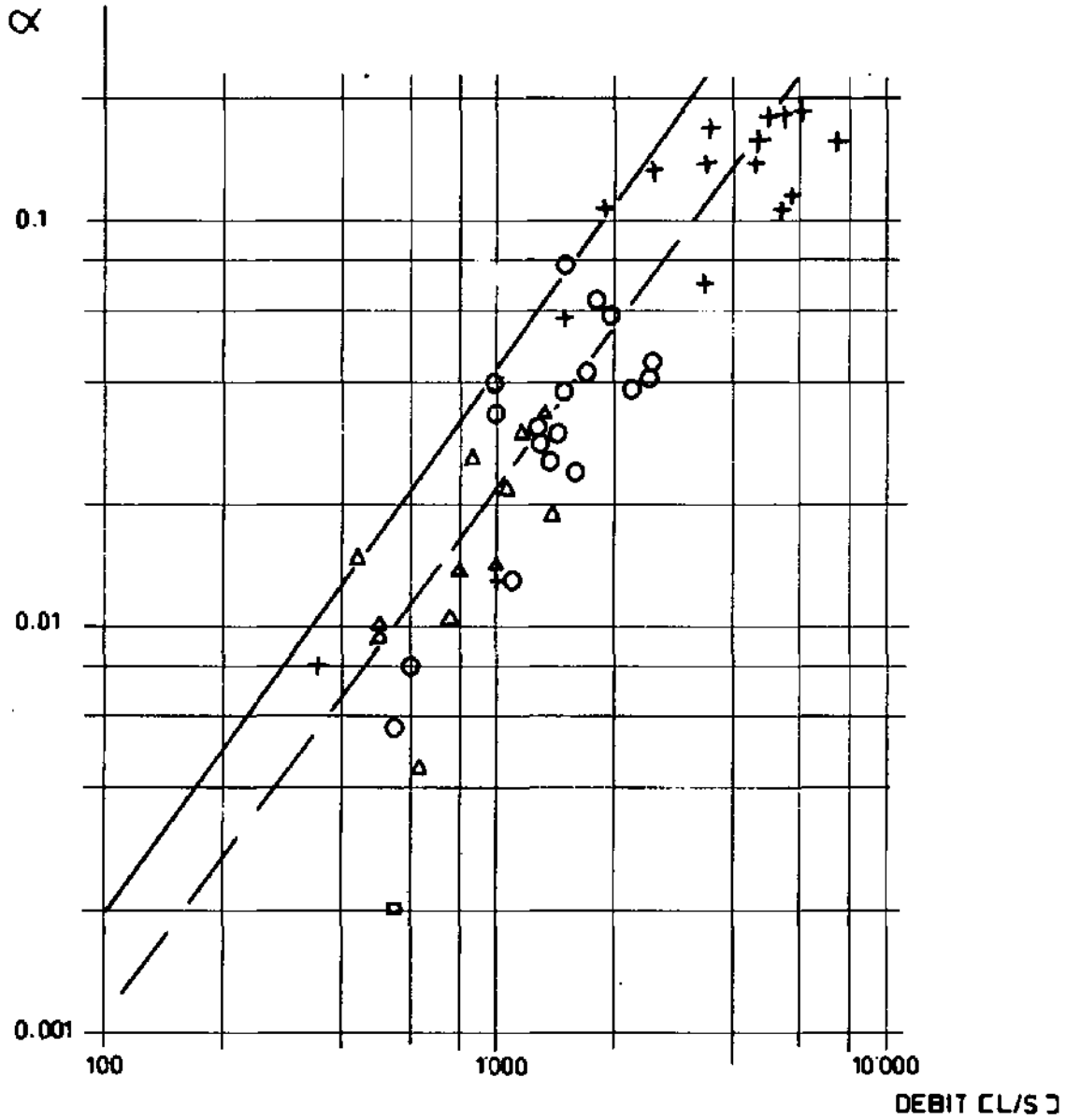


Figure VIII - 6 Coefficients de tarissement de la source de la Serrière en fonction du débit initial Q_0

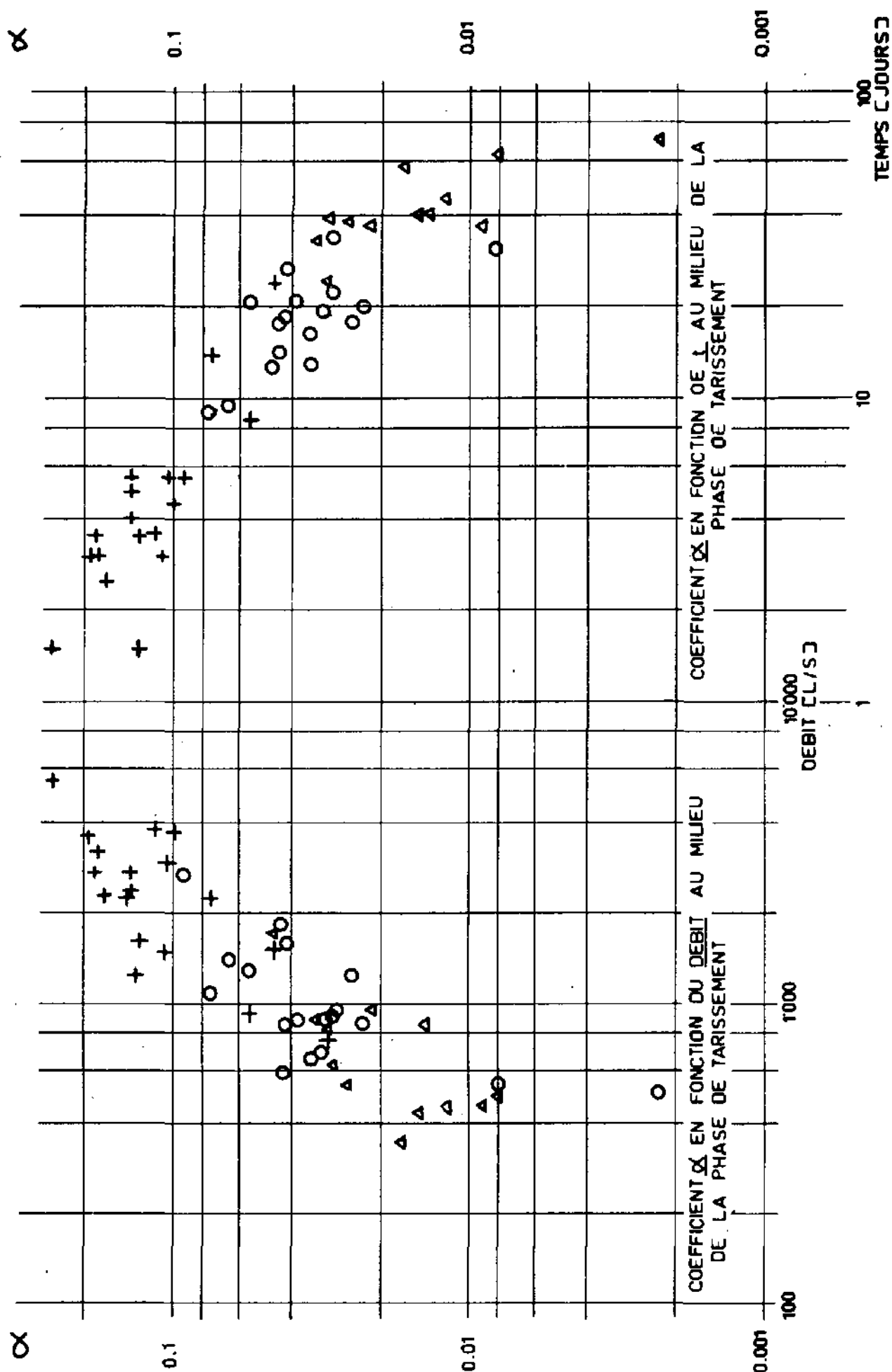


Figure VIII - 7 Coefficients de tarissement en fonction du débit et du temps au milieu de la phase de tarissement avec $\alpha = \text{constante}$

2.3. Simulation du débit de la Serrière en phase de tarissement.

En raison de la complexité des lois ainsi définies et de multiples itérations qu'elles nécessitent, leur vérification a été réalisée à partir du programme de calcul TARIL développé à cet effet qui permet la simulation des débits de la source en phase de tarissement, le débit et le temps initial étant fixés. Quatre versions ont été testées, la quatrième version seule retenue comprenant elle-même 4 variantes.

- Version 1

La décroissance de a est une fonction continue du débit et du temps. Pour les besoins du calcul le temps est discrétisé en pas de 0,1 jour. La fonction est du type

$$Q_t = Q_{t-1} e^{-a t}$$

$$\text{où } a = f(\ln Q_{t-1}), f(\ln(t-1)), f(\ln Q_{t-1}, \ln(t-1))$$

Les résultats non représentés révèlent que le pas de temps de l'incrémentetion agit sur la forme de la courbe de tarissement, quelles que soient les variables choisies. Un pas de temps trop faible abaisse trop rapidement le débit, un pas de temps trop long le maintient trop élevé.

- Version 2

Le coefficient a est une fonction décroissante du débit et du temps comme dans la version 1 et la loi de décroissance de la forme

$$Q_t = Q_0 e^{-a t}$$

où Q_0 est le débit initial.

Quel que soit le pas de temps choisi le débit se stabilise aux environs de 2000 l/s.

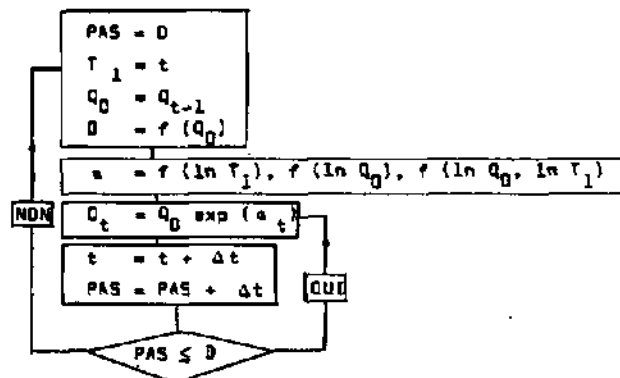
Ces deux premières tentatives ainsi qu'une 3ème non décrite révèlent nettement que la variation de a n'est pas continue, même si ce coefficient est bien une fonction inverse du débit et du temps, d'où l'hypothèse que la décroissance correspond bien à une succession d'exponentielles de durée variable.

- Version 4

On recherche une loi liant la durée de la phase de tarissement avec a constant ou débit (Fig. VIII-9) ou au temps. On constate que pour des débits initiaux supérieurs à 2200 l/s la durée du tarissement est constante (~7 jours). Pour des débits inférieurs la période séparant deux changements de a s'accroît progressivement selon une loi linéaire.

$$D = 48,3 - 0,0184 Q_0$$

L'estimation de a est donc toujours effectuée à partir des lois définies en 2.2 mais pour des périodes de plus en plus longues. L'algorithme retenu est de la forme :



Versaion 4 - Variante 1

$$a = f(Q_0, T_1)$$

Le coefficient de tarissement a est une fonction discontinue du débit et du temps. Les valeurs de a sont un peu trop faibles durant les quinze premiers jours mais coïncident bien avec les courbes observées en fin de décrue. (Fig. VIII-10, tableau VIII-6).

Versaion 4 - Variante 2

$$a = f(Q_{\max}, T_1)$$

La décrue est nettement trop lente dans les premiers jours et trop rapide en fin de tarissement (Figure VIII-10).

Versaion 4 - Variante 3

$$a = f(T_1)$$

Plus encore que dans la variante 2 la gamme de variation des coefficients a est trop faible en début de tarissement et trop fort en fin de décrue. (Figure VIII-11).

Versaion 4 - Variante 4

$$a = f(Q_0)$$

Avec la variante 1, il s'agit de la solution qui coïncide le mieux avec l'ensemble des courbes de tarissement observées. Les résultats sont donnés au tableau VIII-6 et à la figure VIII-11.

Tableau VIII-VI

La Serrière : Valeur des coefficients de tarissement a au cours des décrues simulées.

A) TEMPS jours	Débit initial Q_0 [l/s]			
	8000	6000	4000	2000
0	0,242	0,178	0,115	0,094
5	0,242	0,178	0,115	0,094
10	0,051	0,056	0,054	0,054
20	0,051	0,027	0,026	0,030
40	0,024	0,027	0,026	0,012
60	0,010	0,011	0,011	0,012
80	0,010	0,011	0,011	0,0072
100	0,0065	0,0069	0,0069	0,0072
120	0,0065	0,0069	0,0069	0,0072
140	0,0048	0,0050	0,0050	0,0051

B)

0	0,161	0,129	0,094	0,056
5	0,161	0,129	0,094	0,056
10	0,063	0,059	0,051	0,056
20	0,039	0,038	0,034	0,029
40	0,022	0,020	0,017	0,013
60	0,022	0,020	0,017	0,013
80	0,012	0,011	0,010	0,0080
100	0,012	0,011	0,010	0,0080
120	0,0077	0,0072	0,0067	0,0080
140	0,0063	0,0072	0,0067	0,0098

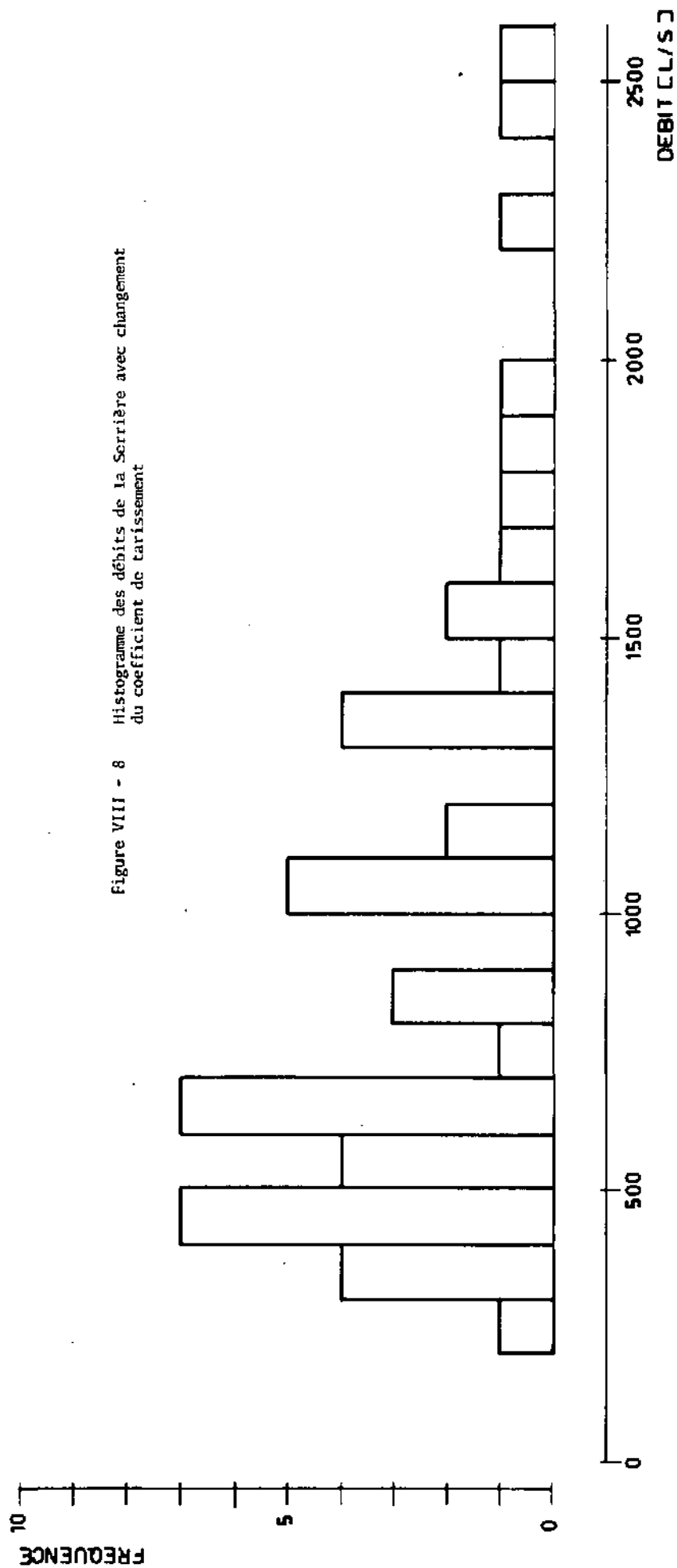
A) $a = f(Q_0)$

B) $a = f(Q_0, T_1)$

2.4. Interprétation des résultats.

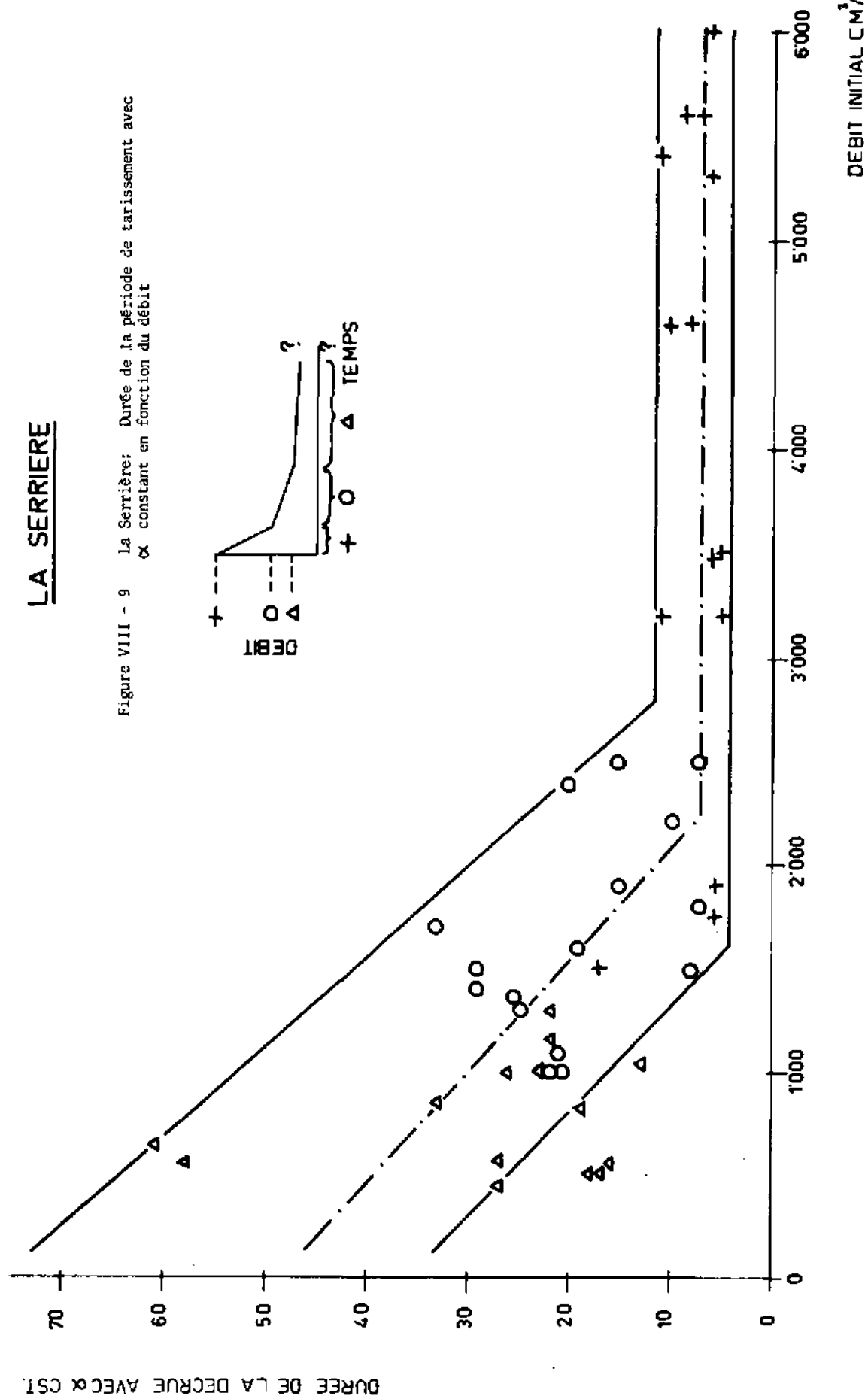
L'explication génétique de la présence de plusieurs segments successifs sur l'hydrogramme de tarissement consiste à imaginer qu'il existe plusieurs "systèmes d'écoulement" juxtaposés mais hiérarchisés de perméabilité décroissante qui sont tour à tour prépondérants dans l'alimentation de la source. A chacun des systèmes correspondrait alors un régime de vidange du bassin et par conséquent une courbe de tarissement propre.

LA SERRIERE



LA SERRIERE

Figure VIII - 9 La Serrière: Durée de la période de tarissement avec α constant en fonction du débit



LA SERRIÈRE

Courbes de tarissement calculées pour différents débits initiaux

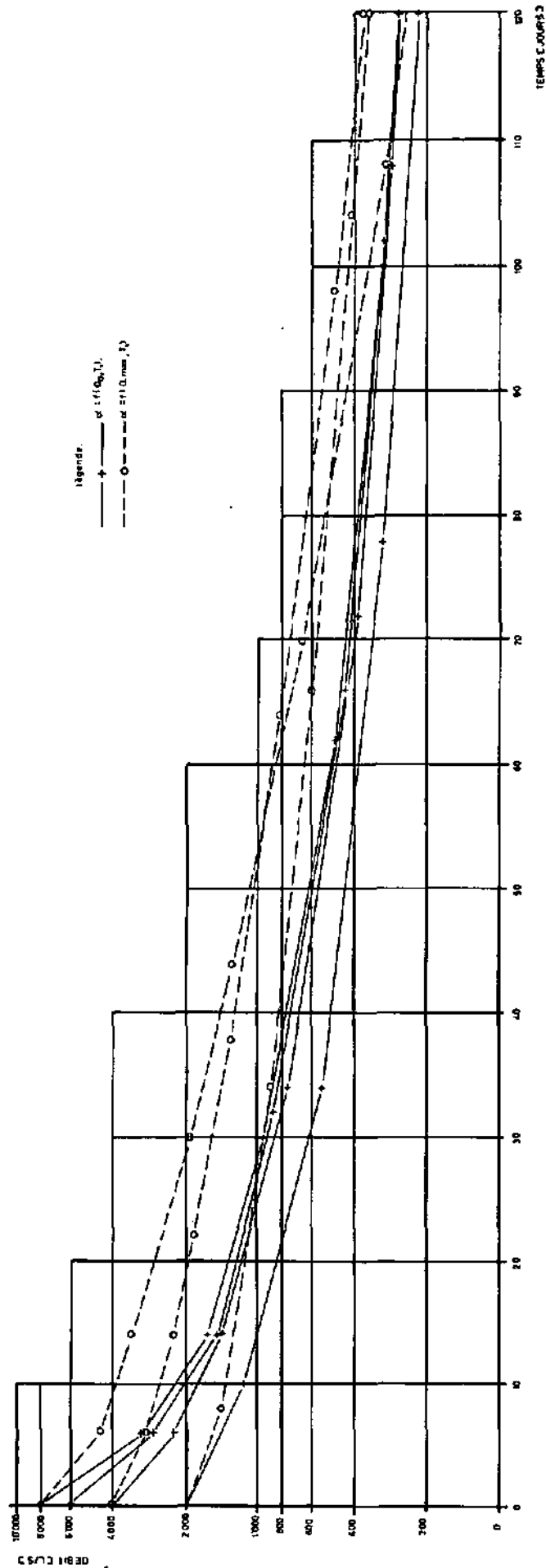


Figure VIII - 10 Courbes de tarissement calculées pour différents débits initiaux.

LA SERRIERE

Courbes de tarissement calculées pour différents débits initiaux

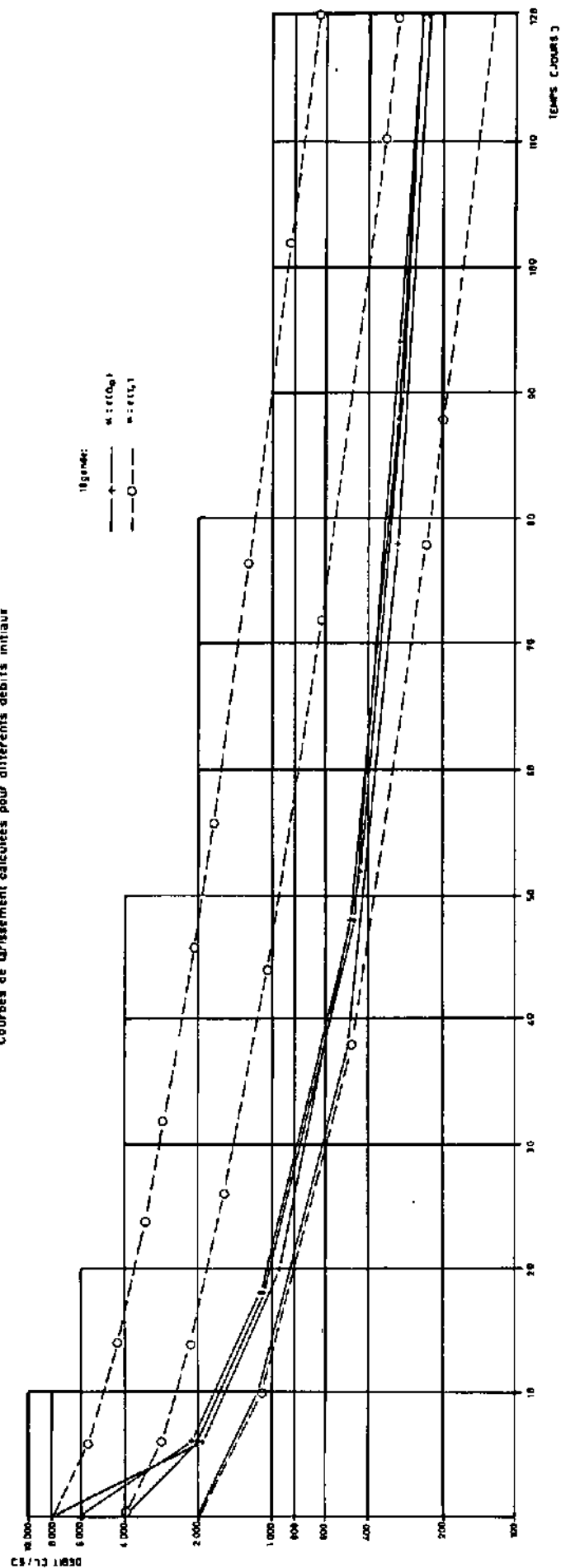


Figure VIII - 11 Courbes de tarissement calculées pour différents débits initiaux

L'existence d'une hétérogénéité de la perméabilité en milieu karstique est maintenant admise. TRIPET (1972) propose pour le bassin de la source de l'Areuse un schéma faisant intervenir deux types de joints, schéma vérifié par BERTAND, MATHEY et MORNOD (1973) dans le bassin de la Serrière. En période de crue les joints les plus perméables (2^{me} ordre), alimentés directement par l'infiltration se mettent rapidement en charge et sont responsables du débit élevé de la source. Ceux-ci alimentent les joints de 1^{er} ordre durant la crue mais lorsque la charge diminue les joints peu perméables se vident dans le réseau de 2^{me} ordre qui fonctionne alors comme un réseau de drainage. En tarissement avancé le régime de la source est régi uniquement par les écoulements dans les petites fissures. Ce schéma est-il suffisant pour expliquer la présence d'un nombre de segments supérieur à 2 sur la courbe de tarissement ou doit-on faire intervenir autant d'ordre de joints qu'il y a de segments ? En testant les versions 1 et 2 du modèle TAR11 on faisait l'hypothèse que α variait de manière continue comme la dimension des joints qui déterminaient le régime de tarissement.

KIRALY (comm. orale, 1974) en simulant sur un modèle mathématique bidimensionnel par éléments finis du bassin de la source de l'Areuse dans lequel les joints de 2^{me} ordre étaient représentés par un réseau de barres très perméables a obtenu des courbes de tarissement faites de 3, 4 voire 5 segments exponentiels.

Si l'hypothèse d'une décroissance logarithmique discrète du coefficient de tarissement est maintenant démontrée, celle-ci n'infirme donc pas le schéma de TRIPET (1972).

Dans le cas du bassin de la Serrière il est certain que la superposition des systèmes d'écoulements représentés par le Dogger, le Malm, le Crétacé ainsi que le Quaternaire agissent sur le régime de tarissement de la source. Seul un modèle tridimensionnel avec des éléments de type barre ou coque permettrait de juger de l'importance relative de chacun d'eux au cours du temps.

2.5. Estimation des réserves souterraines.

L'estimation des réserves du bassin de la Serrière peut être effectuée théoriquement par l'intégration de la fonction de tarissement jusqu'à l'infini. L'extrapolation des lois définies en 2.2 très au delà de la période d'observation constitue cependant une source d'erreur, c'est la raison pour laquelle l'intégration a été arrêtée après 5 ans et de demi. Celle-ci a été réalisée à l'aide du programme TAR11 par incrémentation de 0,1 jour (tableau VIII-VI) pour deux fonctions de α qui donnant des résultats très comparables. Le volume des réserves souterraines est compris entre 12 et 16 millions de mètres cubes selon le débit initial.

Soient A la surface de la zone noyée (m^2)
 ΔV la variation des réserves souterraines (m^3)¹⁾
 S le coefficient d'emménagement
 ΔH la variation de niveau de la zone saturée (m)

$$\text{On a } \Delta H = \Delta V / (A \cdot S)$$

Dans l'hypothèse où la zone noyée est limitée par l'intersection de la courbe 700 m de la surface structurale de l'Argovien (KIRALY 1973) avec les limites du bassin de la Serrière, on obtient $\Delta H = 50,8$ mètres²⁾. Si la zone noyée s'étendait jusqu'aux limites du bassin on aurait $\Delta H = 29,6$ m. Bien qu'indicatives ces valeurs restent faibles en comparaison de l'épaisseur de l'aquifère en amont de la source et aux réserves qu'il représente. On détient ici la preuve que la source de la Serrière fonctionne bien comme source à débordement et que les réserves géologiques du synclinal du Val de Ruz sont certainement 4 à 5 fois supérieures, ce qui est en accord avec les mesures isotopiques (chap. VIII-6). Les temps nécessaires au renouvellement des réserves pour divers débits sont donnés au tableau VIII-VIII.

1) Ici volume écoulé durant 5 ans 1/2

2) $S = 4,5 \text{ } ^\circ/\text{oo}$

Tableau VIII-VII

La Serrière : Estimation des réserves souterraines du bassin de la Serrière au-dessus du niveau de l'exutoire par intégration de la courbe de tarissement

A) $a = f(Q_0, T_1)$

Période jours	$Q_0 = 8000 \text{ [l/s]}$			$Q_0 = 2000 \text{ [l/s]}$		
	$V [10^6 \text{ m}^3]$	$V [\%]$	$Q_{FIN} \text{ [l/s]}$	$V [10^6 \text{ m}^3]$	$V [\%]$	$Q_{FIN} \text{ [l/s]}$
0 - 120	9,6	58	256,3	5,6	45	216,5
0 - 2000	16,4	100	15,2	12,4	100	14,9
120 - 2000	6,8	42	15,2	6,8	55	14,9

B) $a = f(Q_0)$

0 - 120	7,5	47	234,4	5,5	38	225,0
0 - 2000	16,0	100	22,6	14,4	100	22,6
120 - 2000	8,5	53	22,6	8,9	62	22,6

V = volume d'eau écoulé durant la période considérée

Q_0 = débit initial

Q_{FIN} = débit à la fin de la période considérée

Tableau VIII-VIII

Temps nécessaire au renouvellement des réserves (selon tableau VIII-VII)
du bassin de la Serrière au-dessus du niveau de l'exutoire

Débit		Taux de renouvellement jours	
		$V = 16,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	$V = 12,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
Annuel moyen	(2,5)	76 jours	57 jours
Mensuel moyen mini	(1,54)	123	93
Mensuel moyen maxi	(4,76)	40	30

2.6. Conclusions au paragraphe 2.

La reproductibilité de la méthode d'analyse de la source en phase de tarissement développée ici est satisfaisante. On peut lui reprocher de ne pas faire appel à une démarche purement déterministe puisqu'elle nécessite l'analyse statistique des courbes de décrue et de conduire à une formulation assez lourde. Toutefois si la plupart des lois relativement simples utilisées jusqu'à maintenant étaient destinées à fournir une explication génétique du régime d'écoulement en milieu fissuré, on s'aperçoit maintenant grâce aux techniques de simulation (KIRALY, comm. orale cit.) que des lois comme celles de MANGIN (in PASQUIER op. cit) ou BURGER (1956) ne s'accordent pas avec les explications génétiques données par ces auteurs. Souhaitons que les hydrogéologues disposent bientôt de calculatrices dont la capacité s'adapte à des modèles tridimensionnels comprenant la simulation de l'hétérogénéité de la perméabilité des massifs fissurés. La simulation d'un bassin comme celui de la Serrière par la méthode des éléments finis, englobant le Dogger, le Crétacé et la zone non saturée nécessiterait en effet un modèle comprenant plusieurs centaines d'éléments tridimensionnels.

3. TEMPERATURE DE LA SOURCE DE LA SERRIERE

Dans une étude des gradients géothermiques mesurés dans la zone saturée du bassin alimentaire de la source de l'Areuse, (MATHEY, 1974) on a montré qu'une fraction importante du flux géothermique servait au réchauffement des eaux souterraines. Dans le cas du bassin de la Serrière on ne dispose pas pour l'instant de forage en assez grand nombre pour entreprendre une étude semblable et la seule analyse des températures ne suffit pas à fixer la participation du flux géothermique au réchauffement de l'eau sans disposer d'un bilan thermique précis des eaux jusqu'au moment où elles atteignent la zone homotherme.

La température annuelle moyenne de la Serrière est de $8,8^{\circ}\text{C}$, (tableau VIII-XI) soit de $1,2^{\circ}\text{C}$ supérieure à celle de la source de l'Areuse, mais l'écart type des températures est nettement plus faible à la Serrière, indice d'un "tamponnement thermique" plus important. La température annuelle moyenne de la Serrière est de 3°C supérieure à la température moyenne de l'air de son bassin versant (2 à $2,5^{\circ}\text{C}$ pour l'Areuse). (Tableau VIII-IX).

Si l'on admet un flux géothermique de $2,0 \cdot 10^{-6} \text{ cal cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (MATHEY, 1974, op. cit), la puissance dissipée par ce dernier, rapportée à la surface totale des bassins de la Serrière et du Seyon ($\approx 120 \text{ km}^2$) vaut :

$$\begin{aligned} & 2,4 \cdot 10^6 \text{ cal s}^{-1} \\ & \text{ou } 10,0 \cdot 10^6 \text{ W} \\ & \text{soit } 10,0 \text{ MW} \end{aligned}$$

Les quantités de chaleur en présence sont donc relativement faibles, et si l'on sait que le flux solaire représente dans nos régions environ 20'000 fois le flux géothermique, il paraît évident que l'exposition du bassin versant (ici en majeure partie SW) pourra jouer un rôle important sur la température de l'exutoire et explique partiellement les différences que l'on observe entre le bassin de la Serrière et le bassin de l'Areuse. On trouve au tableau VIII-X l'élévation théorique de la température de la Serrière pour divers débits et une participation variable du flux géothermique au réchauffement de l'eau. Relevons que les situations extrêmes ne sont jamais réalisées en raison du tampon thermique représenté par le massif rocheux et des fluctuations saisonnières des débits et température des eaux d'infiltration qui empêchent l'apparition d'un régime de transfert de chaleur stationnaire, même durant les périodes de tarissement exceptionnellement longues. A ce propos un calcul estimatif révèle que dans l'hypothèse où la température des eaux d'infiltration s'élevait brusquement de 1°C , et que cette chaleur était transmise intégralement à la roche, il faudrait plus de 2000 ans pour que les premiers 500 mètres de l'aquifère soient à leur tour réchauffés de 1°C . C'est également le temps qu'il faudrait au flux géothermique pour réchauffer le massif de 1°C . On constate donc que les différences qui existent entre les constantes de temps des phénomènes hydrauliques et thermiques sont considérables.

Plusieurs facteurs conjugués (exposition, altitude, perméabilité et température des précipitations) déterminent la température moyenne de la source et ses fluctuations annuelles, mais il est prématuré dans l'état de nos connaissances de fixer l'influence de chacun d'entre eux.

On verra plus loin que l'application de la méthode des covariogrammes permet d'estimer des vitesses de transfert de chaleur et de masse à l'intérieur du bassin.

4. HYDROCHIMIE DES EAUX DE LA SERRIERE

4.1. Contenu chimique.

Les résultats des mesures et analyses sont donnés aux tableaux VIII-XI et VIII-XII. Les eaux de la Serrière sont de type bicarbonaté calcique avec une teneur en magnésium caractérisant une roche réservoir pauvre en dolomie. (Fig. VIII-12). A l'exception du calcium dont le cas est discuté plus loin, on ne détecte pas de variations significatives entre les deux périodes d'observation.

MISEREZ (1972, p. 89) relève l'analogie des identités chimiques des 3 grandes sources du Jura neuchâtelois, l'Areuse, la Noiraigue et la Serrière. Les valeurs propres qui entretiennent l'équilibre $\text{CaO} - \text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ sont identiquement cohérentes pour les trois sources. En revanche les te-

neurs en Mg^{++} , SO_4^{--} , Cl^- et NO_3^- significativement supérieures pour la Serrière peuvent être attribuées à la nature géologique du bassin versant en particulier à la couverture quaternaire. Un apport sulfaté de la molasse des synclinaux du Val de Ruz et du Côté est d'autre part certain. Oxygène, nitrites, DBO_5 sont des indices de l'état sanitaire de la source. Bien que la contamination bactérienne soit quelquefois considérable (chap. VIII-5) l'oxydation des nitrites est la plus souvent réalisée au moment où les eaux parviennent à l'exutoire, grâce à des teneurs en oxygène proches de la saturation. Solubilité de O_2 entre 8,0 et 9,5°C : 11,8 à 11,4 mg/l). La teneur en matière organique exprimée par la DBO_5 est remarquablement basse si on se réfère aux infiltrations d'eau usée dans le réseau karstique (Montmollin, Chanau).

Si les propriétés de filtration des massifs calcaires est souvent mise en doute, on constate que l'oxygène entraîné dans le réseau karstique par les eaux d'infiltration réalise une oxydation non négligeable de la matière organique présente dans le réseau.

Tableau VIII-IX

Bassin de la Serrière et de la source de l'Areusa.
Analyse statistique sommaire des températures.

Température	Station	Altitude	Moyenne °C	Ecart type °C	Maximum °C	Minimum °C
Air (moy. mensuelle) 1)	La Chaux-de-Fonds	1000	7,8	7,2		
Source de la Serrière 1)	Serrières	1020 *	8,8	0,23	9,2	8,3
Air (moy. mensuelle) 2)	Les Verrières	932	5,5	6,0	14,8	-4,6
Source de l'Areusa 2)	St Sulpice	1115 *	7,64	0,37	8,9	6,4

1) 1969

* bassin versant

2) 1967 - 1969

Tableau VIII-X

Élévation de la température de la source de la Serrière
sous l'effet du flux géothermique.

Débit (1901 - 1925)	Élévation de la température à la source °C		
	100% 1)	60% 1)	30% 1)
Débit annuel moyen ($2,50 \text{ m}^3/\text{s}$)	0,96	0,58	0,29
Débit mensuel maximum ($7,50 \text{ m}^3/\text{s}$)	0,32	0,19	0,1
Débit mensuel minimum ($0,38 \text{ m}^3/\text{s}$)	6,3	3,7	1,9

1) participation du flux géothermique au réchauffement de l'eau.

Tableau VIII-XI

Composition chimique de la source de la Serrière (1969 - 1970)

Analyses : Centre d'Hydrogéologie
Laboratoire de minéralogie

DATE	T °C	pH	pCO ₂ atm	K ₂₀ µmhos/cm	Res. a mg/l	D. tot. mg/l	TAC mg/l	Ca ⁺⁺ mg/l	Mg ⁺⁺ mg/l	Sr ⁺⁺ mg/l	Na ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Cl ⁻ mg/l
27.1.69	8,99	7,09	0,019	386	262	242,5	232,5	42,95	5,78	0,28	2,00	0,70	4,8
1.2.69	9,09	7,18	0,007	401	281	245	240	39,86	5,94	0,28	2,05	0,74	
17.2.69	9,20	7,12	0,007	391	259	245	239	32,01	7,00	0,32	1,69	0,63	
24.2.69	9,20	7,09	0,037	378	-	237,5	225	36,77	5,87	0,23	1,86	0,70	
1.3.69	9,20	7,22	0,057	400	278	247,5	235	34,27	6,42	0,30	2,22	0,87	
10.3.69	9,20	7,29	0,057	400	273	247,5	232,5	33,32	6,81	0,26	2,22	0,87	
17.3.69	8,55	7,27	0,048	359	249	225	212,5	39,03	3,82	0,15	1,22	0,65	
24.3.69	8,48	7,22	0,045	365	268	212,5	212,5	34,27	4,40	0,15	1,06	0,51	
31.3.69	8,80	7,26	0,029	373	-	232,5	222,5	30,70	6,29	0,20	1,21	0,55	1,21
7.4.69	8,70	7,30	0,050	367	262	230	220	37,96	4,76	0,22	1,23	0,55	
14.4.69	8,40	7,14	-	336	199	210	197,5	46,76	3,25	0,14	0,84	0,44	
21.4.69	8,58	7,16	-	364	240	217,5	207,5	34,39	4,43	0,16	1,28	0,59	
28.4.69	8,40	7,19	-	328	221	202,5	190	36,29	3,12	0,12	0,86	0,40	
5.5.69	8,45	7,30	0,008	334	234	200	180	39,5	3,35	0,13	1,12	0,58	
12.5.69	8,50	7,38	0,012	352	228	215	207,5	34,74	4,35	0,19	1,01	0,48	2,57
19.5.69	8,78	7,32	0,009	367	238	217,5	212,5	35,58	5,91	0,25	1,11	0,50	
26.5.69	8,98	7,24	0,011	378	-	227,5	222,5	32,24	6,48	0,28	1,18	0,58	
2.6.69	9,10	7,16	0,011	370	230	237,5	225	33,08	7,13	0,30	1,31	0,58	
9.6.69	8,88	7,27	0,009	356	224	222,5	212,5	33,91	4,83	0,23	1,26	0,59	
16.6.69	8,92	7,22	0,010	355	247	230	212,5	38,19	4,76	0,27	1,10	0,61	
22.6.69	8,80	7,30	0,011	358	-	227,5	210	36,29	4,11	0,20	1,18	0,62	
30.6.69	8,70	7,23	0,013	369	234	235	212,5	37,72	4,09	0,20	1,04	0,52	
7.7.69	8,60	7,25	0,012	371	224	237,5	220	38,55	5,68	0,23	1,27	0,58	2,87
14.7.69	8,70	7,20	0,011	371	234	225	217,5	34,03	5,70	0,22	1,11	0,57	
21.7.69	8,88	7,29	0,010	376	242	235	225	50,09	6,27	0,31	1,23	0,70	
28.7.69	8,92	7,26	0,012	367	268	230	222,5	40,69	6,2	0,29	1,12	0,55	
4.8.69	8,95	7,26	0,007	377	258	245	230	36,05	5,61	0,31	1,33	0,69	
11.8.69	8,85	7,25	0,011	380	-	243	227,5	47,12	7,18	0,35	1,36	0,64	
18.8.69	8,92	7,26	0,010	376	255	245	225	43,07	7,40	0,35	1,42	0,69	
25.8.69	8,88	7,29	-	368	248	240	220	47,71	6,38	0,34	1,42	0,61	
1.9.69	8,60	7,36	-	378,0	253	240	225	42,84	4,64	0,27	1,19	0,66	2,70
8.9.69	8,50	7,26	-	367,6	251	247,5	222,5	44,74	4,09	0,18	1,01	0,68	
15.9.69	8,55	7,28	0,009	363	-	250	220	43,19	4,88	0,19	1,09	0,63	
22.9.69	8,72	7,24	0,012	375	-	235	222,5	37,72	5,95	0,22	1,26	0,56	
29.9.69	8,85	7,27	0,012	376	-	235	222,5	39,5	6,60	0,29	1,22	0,65	
6.10.69	8,95	7,25	0,011	381	-	235	222,5	46,64	7,08	0,31	1,28	0,62	
13.10.69	8,52	7,29	0,014	385	-	237,5	225	60,33	7,40	0,31	1,30	0,63	
20.10.69	9,10	7,27	0,015	384	-	237,5	227,5	44,5	7,33	0,33	1,32	0,61	
27.10.69	9,15	7,26	0,012	363	245	242,5	227,5	39,88	7,80	0,33	1,32	0,67	3,01
3.11.69	9,15	7,26	0,014	363	261	240	227,5	44,62	7,75	0,34	1,31	0,65	
9.11.69	9,20	7,28	0,015	371	365	242,5	227,5	59,85	7,82	0,35	1,32	0,61	
16.11.69	8,85	7,28	0,011	370	243	227,5	215	57,35	4,97	0,28	1,24	0,66	
23.11.69	8,78	7,25	0,009	405	257	240	227,5	74,73	5,07	0,28	1,21	0,80	
1.12.69	8,75	7,21	0,010	387,2	276	252,5	235	53,07	5,39	0,28	1,38	0,76	
8.12.69	9,82	7,25	0,008	394	-	242,5	232,5	79,25	5,95	0,31	1,56	0,76	
15.12.69	8,90	7,26	0,008	391	255	245	237,5	54,38	5,19	0,30	1,47	0,77	
22.12.69	8,85	7,24	0,010	392	253	240	330	54,38	5,77	0,27	1,48	0,68	4,22
29.12.69	8,75	7,31	0,009	-	265	242,5	230	62,35	6,01	0,29	1,53	0,82	

(à suivre)

Tableau VIII-XI (suite)

DATE	T °C	pH	pCO ₂ atm	K ₂₀₀ µmhos/cm	Res.s mg/l	D.tot mg/l	TAC mg/l	Ca ⁺⁺ mg/l	Mg ⁺⁺ mg/l	Sr ⁺⁺ mg/l	Na ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Cl ⁻ mg/l
5.1.70	8,88	7,31	0,007	393	242	242,5	230	64,85	6,35	0,27	1,46	0,82	3,7
12.1.70	8,50	7,34	0,006	364	242	225	210	61,28	4,20	0,34	1,63	0,55	
19.1.70	8,50	7,34	0,005	379	251	232,5	217,5	60,80	4,79	0,22	1,73	0,62	
26.1.70	8,60	7,32	0,005	379	256	235	225	62,83	5,68	0,23	1,58	0,62	
2.2.70	8,60	7,32	0,004	384	245	235	220	65,92	5,72	0,25	2,02	0,83	
9.2.70	8,30	7,24	0,006	372	253	230	215	71,87	5,16	0,23	1,32	0,64	
16.2.70	8,58	7,29	0,007	387	278	247,5	225	76,04	6,31	0,31	1,56	0,77	4,2
23.2.70	8,58	7,32	0,006	367	250	222,5	207,5	75,32	4,83	0,23	1,73	0,79	
2.3.70	8,65	7,34	0,006	401	263	242,5	222,5	74,61	6,65	0,26	1,50	0,67	
9.3.70	8,82	7,33	0,005	381	252	242,5	227,5	75,08	7,27	0,31	1,45	0,66	
15.3.70	8,90	7,35	0,005	383	247	240	227,5	74,25	7,62	0,31	1,58	0,77	

DATE	SD ₄ mg/l	NO ₃ mg/l	SiO ₂ mg/l	DATE	SD ₄ mg/l	NO ₃ mg/l	SiO ₂ mg/l
12.1.70	6,8	4,15	2,70	16.2.70	6,85	6,50	3,60
19.1.70	5,9	5,50	2,95	23.2.70	8,20	6,80	3,10
26.1.70	5,2	4,95	3,20	2.3.70	6,90	6,50	3,55
2.2.70	6,1	5,50	3,20	9.3.70	6,15	6,10	3,65
9.2.70	6,3	5,95	3,10	15.3.70	6,00	6,10	3,60

Tableau VIII-XII

Composition chimique de la source de la Serrière (1971 - 1974)

Analyses : Service des Eaux de la
ville de Neuchâtel.
(R. STETTLER)

ANNÉE	1971							1972				1973				1974	$\bar{x}$
JOUR, MOIS	14.6	12.7	9.8	6.9	4.10	1.11	6.12	20.3	10.7	2.10	11.12	5.3	28.5	6.8	25.10	21.1	16.4
pH	7,43	7,40	7,36	7,37	7,58	7,46	7,44	7,45	7,49	7,30	7,50	7,37	7,35	7,00	7,35	7,50	7,30
K ₂₀₀ µmhos/cm	368	381	390	392	394	390	400	378	385	443	378	422	354	379	356	357	353
Dureté totale mg/l	218	226	229	232	234	242	233	220	228	231	245	237	211	226	226	214	214
TAC mg/l	212	218	226	227	228	229	218	208	221	224	212	223	204	211	192	200	209
Ca ⁺⁺ mg/l	74	77	76	76	75	75	75	71	72	71	74	73,5	74	72,5	71,5	73,7	66,5
Mg ⁺⁺ mg/l	6,0	5,9	7,1	5,3	7,5	7,9	5,4	4,1	6,8	8,1	5,0	8,5	5,85	4,05	4,4	4,5	6,6
Na ⁺ mg/l	1,46	1,31	1,6	1,36	1,44	1,45	1,81	1,89	1,55	1,7	1,6	2,3	0,75	0,95	1,05	1,55	1,05
K ⁺ mg/l	0,80	0,64	0,77	0,74	0,7	0,74	0,82	0,7	0,72	0,67	0,65	0,90	0,55	0,75	0,7	0,52	0,37
Cl ⁻ mg/l	4,08	3,55	3,98	3,44	3,2	5,58	5,54	5,04	4,01	4,05	5,4	5,45	5,3	3,55	4,08	5,29	3,37
NH ₄ ⁺ mg/l	+	0,02	+	+	+	+	+	+	0,04	+	+	+	+	+	+	+	-
NO ₃ ⁻ mg/l	-	5,76	6,79	6,84	6,24	4,66	8,9	7,08	6,37	7,05	8,3	9,55	9,4	11,2	7,1	7,3	6,3
O ₂ mg/l	10,33	10,57	10,38	9,84	~	-	-	11,9	9,91	9,73	10,69	9,79	10,88	11,45	10,78	12,71	10,76
ORP ₅ mgO ₂ /l	0,69	1,29	0,89	0,84	~	-	-	3,22	0,5	0,35	0,56	0,67	0,64	0,41	0,37	0,58	0,82

+ ≤ 0,01

Tableau VIII-XIII

Composition chimique de la source de la Serrière.

Valeurs moyennes, maximum et minimum.

PERIODE	27.1.1969 - 26.1.1970					14.6.1971 - 16.4.1974				
VARIABLE	N	$\bar{x}$	s	x_{max}	x_{min}	N	$\bar{x}$	s	x_{max}	x_{min}
Température °C	52	8,8	0,23	9,2	8,3	-	-	-	-	-
pH	52	7,25	0,06	7,38	7,05	17	7,39	-	7,58	7,00
pCO ₂ atu	46	0,0158	0,0138	0,057	0,005	-	-	-	-	-
K ₂₀ mhos · 10 ⁻⁶	52	373	16,3	405	328	17	383	-	443	353
Résidu sec mg/l	40	289	17,3	281	199	-	-	-	-	-
Dureté totale mg/l	52	234	11,7	247,5	200	17	228	-	242	211
Dureté temp. mg/l	52	221	11,3	240	180	17	215	-	229	199
Calcium Ca ⁺⁺ mg/l	52	44,7	11,5	79,2	30,7	17	73,4	-	77	66,5
Magnésium Mg ⁺⁺ mg/l	52	5,7	1,2	7,8	3,1	17	6,06	-	8,1	4,1
Strontium Sr ⁺⁺ mg/l	52	0,25	0,06	0,35	0,12	-	-	-	-	-
Sodium Na ⁺ mg/l	52	1,3	0,3	2,2	0,86	17	1,46	-	1,85	0,75
Potassium K ⁺ mg/l	52	0,63	0,09	0,87	0,40	17	0,69	-	0,90	0,37
Chlore Cl ⁻ mg/l	8	3,5	0,8	4,8	2,6	17	4,41	-	5,58	3,20
Sulfate SO ₄ ⁻⁻ mg/l	8	4,26	-	3,70	6,9	-	-	-	-	-
Nitrates NO ₃ ⁻⁻ mg/l	-	-	-	-	-	16	7,4	-	11,2	4,66
Oxygène O ₂ mg/l	-	-	-	-	-	14	10,7	-	12,7	9,8
DBO ₅ mg O ₂ /l	-	-	-	-	-	14	0,85	-	3,22	0,50

4.2. Relation entre les paramètres chimiques.

La figure VIII-13 représente l'évolution des teneurs des principaux paramètres chimiques de la source de la Serrière. Elle permet de visualiser les concordances qui peuvent apparaître entre chacun d'eux.

MISEREZ (1973, p. 138) donne un tableau des coefficients de corrélation de ces paramètres, en vue de rechercher des associations minéralogiques particulièrement cohérentes. On ne dispose malheureusement pas ici comme dans le bassin de l'Arçuse de possibilités de comparaison avec les phénomènes existants au moment de l'infiltration et dans la nappe. Pour MISEREZ (op. cit) à l'exception des covariations pH - pCO₂, les variables du système CaO - CO₂ - H₂O n'ont pas de relations statistiques entre elles et l'évolution individuelle des éléments à la dilution et leur réponse aux sollicitations saisonnières induisent des corrélations qui n'ont souvent rien de physicochimique.

Essayons cependant de dégager quelques associations minérales particulièrement cohérentes pour en tirer une explication génétique.

Pour des raisons analytiques, dureté totale et dureté temporaire sont bien corrélées, d'autant plus que la teneur en sulfates est faible et peu variable. L'effet de la teneur en chlorure est sensible sur la conductivité électrique de l'eau, mais celle-ci est mieux corrélée avec la teneur en carbonate (duretés totale et temporaire). Relativement que Mg⁺⁺ et Ca⁺⁺ ne sont pas corrélés entre eux. Si l'association Na⁺ - Cl⁻ est évidente la corrélation entre K⁺ et Cl⁻ est nettement moins bonne. Mg⁺⁺ et Sr⁺⁺ sont très bien corrélés entre eux et apparemment liés à la température. On peut en déduire une origine génétique commune et limitée dans l'espace (Portlandien). Chlorures et sulfates sont bien corrélés entre eux, mais ces derniers sont absolument indépendants de la température et de pCO₂.

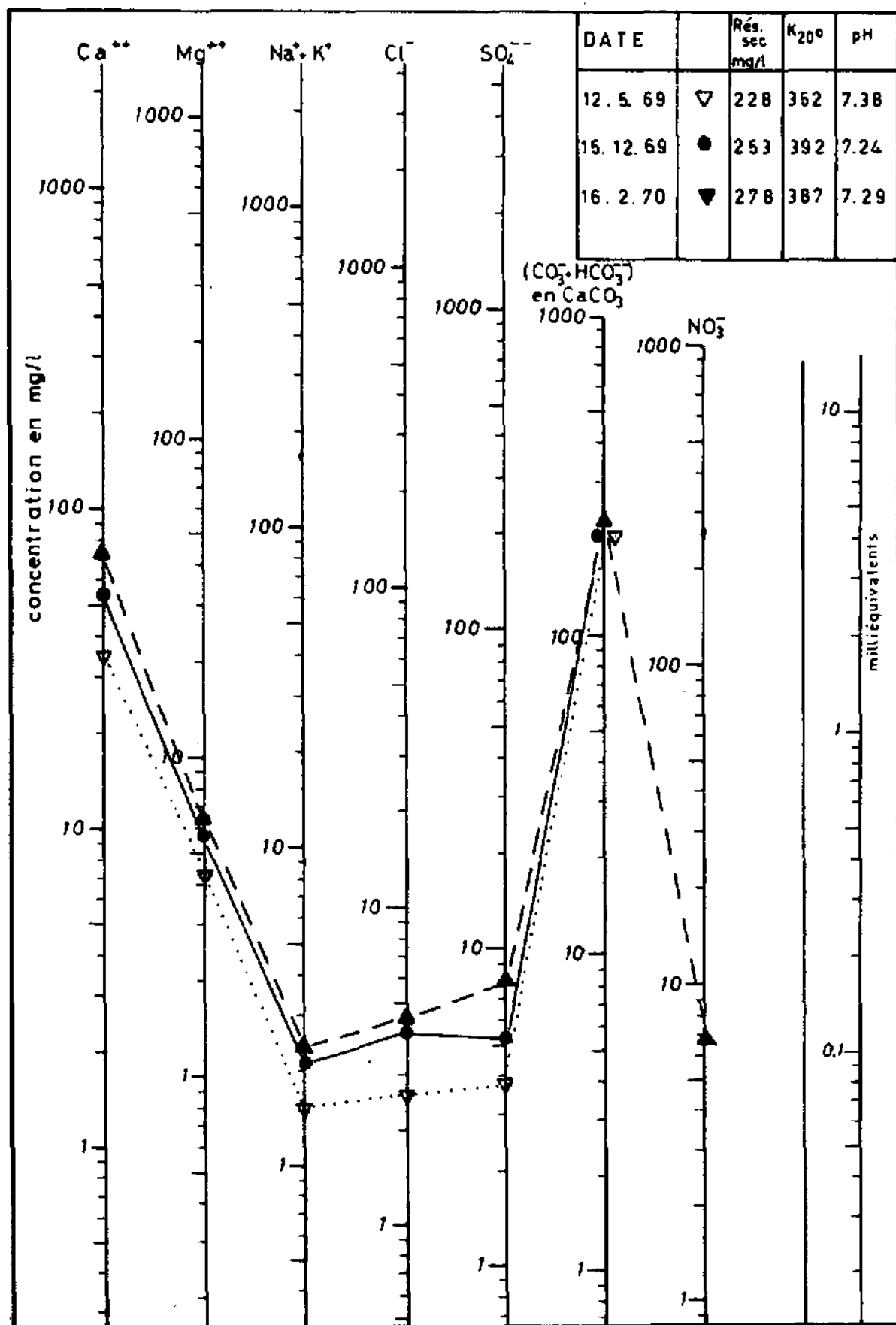


Figure VIII - 12 La Serrière. Composition chimique de la source.

Dans le cas où SiO_2 proviendrait de l'altération des phyllosilicates on devrait observer une bonne corrélation de la silice avec Na^+ et K^+ ce qui n'est pas le cas ici alors que la corrélation de SiO_2 avec Ca^{++} et Mg^{++} est bonne.

4.3. Variations saisonnières du contenu chimique.

Hydrauliquement la Serrière est l'aboutissement de plusieurs systèmes d'écoulement souterrains déterminés par la lithologie et la structure de son bassin versant (Malm, Dogger, Crétacé, Quaternaire). Mise en solution ou dépôt dépendant de la composition minéralogique de la roche et des conditions physico-chimiques régnant dans chacun des systèmes d'écoulement (vitesse de filtration, température, pH, pCO_2 , etc). Le contenu chimique de la source est donc la somme des apports de chaque système et s'il existe un déphasage entre les variations saisonnières de chacun d'eux, les rythmes annuels à la source ne seront pas aussi nets que dans un système d'écoulement simple et limité dans l'espace comme c'est le cas par exemple pour la nappe de Paulière (Bassin du Seyon) étudiée par MATHEY et SIMIONI (1973).

Essayons de dégager quelques tendances générales des diagrammes de la figure VIII-13.

- La température : minimum de mars à mai, elle s'élève rapidement après la fonte des neiges pour fluctuer ensuite sous l'effet des crues estivales ou automnales.
- Le pH : on ne décèle pas de tendance saisonnière nette, mais dureté et pH sont généralement en opposition de phase, ce qui est en accord avec les lois d'équilibre des eaux carbonatées calciques.
- La conductibilité électrique et les duretés totale et temporaire évoluent dans le même sens. Minimum de mars à mai, la minéralisation est maximum au début de l'hiver.
- Le calcium : teneurs faibles en 1969 mais doublant à la fin de l'année et restant élevée et presque constante durant les années suivantes (1971 - 1974, tableau VIII-XII). La comparaison avec les duretés et la conductibilité électrique permet de penser qu'on est en présence d'une erreur d'analyse. (précipitation du calcium au cours de la conservation des échantillons ?).
- Magnésium et potassium sont bien corrélés et évoluent de façon similaire. Minimum de mars à mai, les concentrations s'élèvent durant les étés.
- Sodium et potassium évoluent de façon synchrone avec des concentrations qui s'accroissent progressivement au cours de l'été.

A l'exception des crues printanières liées à la fonte des neiges où les vitesses de filtration sont accélérées et où l'apport depuis le Malm prend le pas sur les autres systèmes au régime de vidange plus régulier, on constate que les variations du contenu chimique de la Serrière sont bien la résultante de plusieurs systèmes d'écoulement au régime physico-chimique différent.

5. BACTERIOLOGIE DES EAUX DE LA SERRIERE

L'intérêt que présentait la source de la Serrière pour l'alimentation en eau du littoral neuchâtelois conduit la Commission cantonale des Eaux à organiser à partir de 1941 des prélèvements relativement espacés pour analyses bactériologiques. Ceux-ci mettent déjà en évidence une contamination temporaire de la source.

Plus récemment le Service des Eaux de la Ville de Neuchâtel (R. STETTLER) réalise des analyses bactériologiques dont les résultats sont donnés au tableau VIII-XIV. La contamination bactérienne de la source est de type "bruit de fond" avec de brusques élévations du nombre de germes en liaison, mais non systématique, avec l'augmentation du débit. Les mesures du débit de la Serrière faisant défaut à cette époque on a accompagné les valeurs du tableau VIII-XIV des débits journaliers de la source de l'Areuse.

- Les germes totaux : (1 ml à 20°C durant 3 jours, sur gélose nutritive).

Ce type d'analyse met en évidence les microbes saprophytes et pathogènes. Leur très grande abondance en période de hautes eaux confirme la médiocre qualité filtrante des terrains de couverture et la

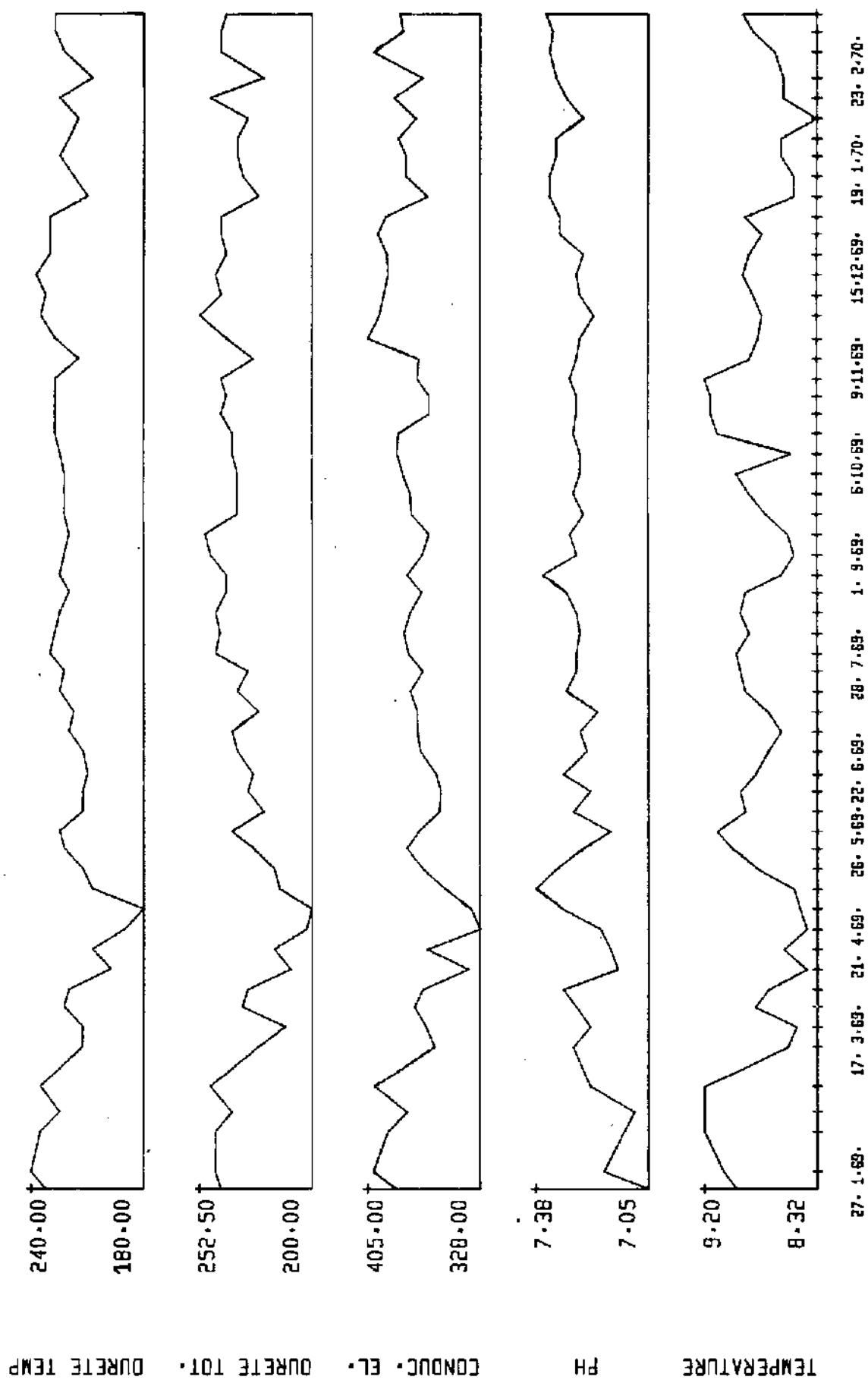


Figure VIII - 13 La Serrière. Hydrochimie 1969 - 1970

SOURCE DE LA SERRIERE HYDROCHIMIE (II)

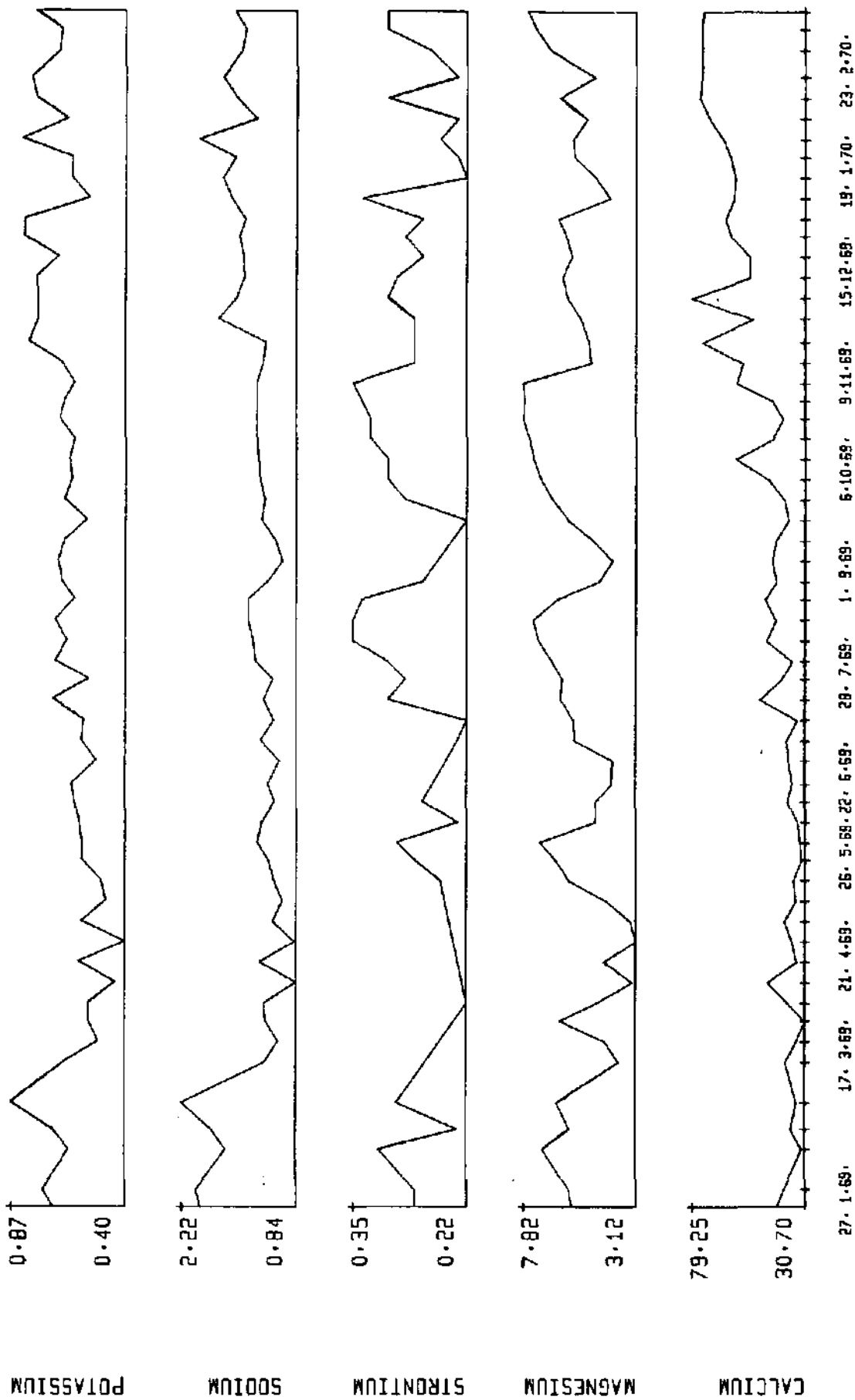


Figure VIII - 13

rapidité avec laquelle les germes sont entraînés à l'exutoire. Les rapports maximum - minimum sont à l'image du régime de la source.

- Les germes banaux : (100 ml à 27°C durant 2 jours en milieu endo).

Les Salmonelles, les Shigelles, le Vibrion colérique, sont difficiles à mettre en évidence. En revanche, ils sont toujours accompagnés d'un nombre beaucoup plus important de germes intestinaux banaux (STETTLER, comm. orale). Indices d'une pollution d'origine fécale, animale ou humaine, leur teneur peut être très élevée, mais leur présence constante en étiage est un premier constat d'une contamination fécale permanente de la Serrière et de sa non potabilité.

- Coliformes : (100 ml à 37°C durant 2 jours sur milieu endo).

Ces germes ont une spécificité suffisante pour confirmer la contamination fécale humaine de la Serrière et leur abondance même en étiage révèle l'ampleur de cette pollution.

- Entérocoques : (100 ml à 37°C durant 2 jours sur Enterococcus Agar).

Relativement moins nombreux que les coliformes, ils confirment à leur tour la pollution fécale de la Serrière.

Le faciès bactériologique de la Serrière rappelle donc par moment celui d'un égout bien dilué. Les concentrations des différents germes sont relativement bien corrélées entre elles, mais la corrélation avec les débits n'est pas systématique (1.10.1974). Des prélèvements très rapprochés mettraient sans doute en évidence le retard de la crue "bactérienne" par rapport aux débits, phénomène observé par BAKALOWICZ (1974) et ROUCH (1974) dans le karst du Beget. En étiage prolongé le nombre de germes est fortement abaissé en raison de l'augmentation du temps de séjour moyen dans le milieu souterrain. Les essais de coloration ont révélé l'existence de pertes ponctuelles aboutissant à la Serrière et souillées par des eaux usées : ancien étang de Montmollin, pertes du Seyon dans les gorges, pertes du ruz Chesseran. Le temps de transit souterrain de ces eaux est inférieur à un mois (même en étiage) ce qui est insuffisant pour assurer une destruction totale des micro-organismes pathogènes. Ces infiltrations sont probablement responsables du "bruit de fond" qui pourrait être abaissé, voire supprimé par l'élimination des infiltrations localisées infectées.

Quels sont les effets des débits antécédents, des épandages de purins et de fumier, de l'intensité des précipitations sur l'évolution de la charge bactérienne de la source ? Analyse factorielle, corrélogrammes, pourraient conduire à l'établissement d'un modèle mathématique de type déterministe tenant compte de la production, du transfert et de la destruction des bactéries assurant une bonne prévision de la contamination des sources karstiques.

6. TRITIUM ET OXYGENE 18 DANS LE BASSIN DE LA SERRIERE

Une première étude isotopique des eaux de l'Arèuse et de la Serrière a été réalisée par BURGER, MARCE, MATHEY et OLIVE (1971). On y trouve un rappel des notions d'hydrologie isotopique nécessaires à la compréhension de ce paragraphe.

Si on compare les moyennes annuelles des teneurs en H-3 et en O-18 dans les précipitations et aux sources de l'Arèuse et de la Serrière, on constate qu'on a affaire à un ensemble où les eaux de l'année ont une part prépondérante (BURGER et cons. 1971). L'examen de la figure VIII- révèle que l'amortissement isotopique à la source de la Serrière est beaucoup plus élevé qu'à la source de l'Arèuse, ce qui est en accord avec les différences observées entre les rapports des débits extrêmes.

- Le Tritium

Les teneurs en H-3 s'accroissent de septembre à décembre sous l'effet du vieillissement des eaux avec la décrue d'automne. La crue exceptionnelle du printemps 1970 provoque un rejuvenissement général des eaux qui se prolonge jusqu'à l'automne en raison de l'importance de la crue. Durant l'année hydrologique 1969 - 1970 le décalage entre les teneurs des précipitations et de la source est de 6 à 7 mois. Cette valeur donne assurément une bonne idée du temps de séjour moyen des eaux dans le bassin et du temps de renouvellement des réserves. En année sèche, celui-ci pourrait être plus long encore.

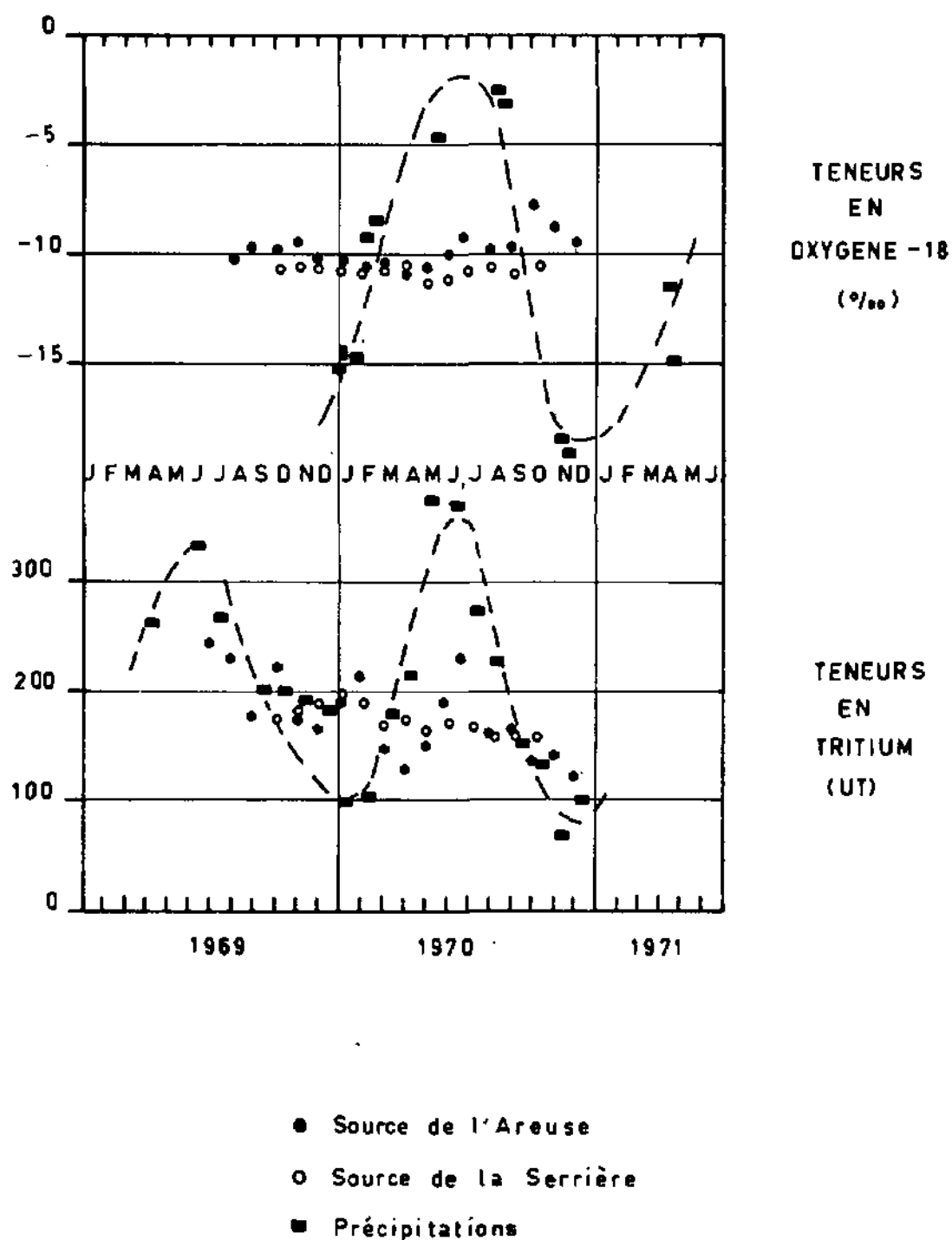


Figure VIII - 14 Tritium et oxygène - 18 dans les bassins de l'Areuse et de la Serrière. (D'après BURGER et cons. 1971).

- L'Oxygène 18

L'évolution des teneurs en O-18 au printemps 1970 traduit bien l'apport différentiel de chacune des tranches d'altitude. La fonte des neiges débute en mars dans les parties basses du bassin et provoque une élévation des teneurs relatives en O-18. Celles-ci chutent brusquement (mai) avec la fonte retardée en altitude. L'état d'équilibre est progressivement atteint au cours de l'été.

Si on compare la moyenne annuelle en O-18 des sources de l'Areuse (-9,90/00) à celle de la Serrière (-10,70/00), l'altitude moyenne du bassin versant de la Serrière devrait être plus élevée que celui de l'Areuse. En effet selon la relation de DANSGAARD entre la composition isotopique annuelle moyenne en O-18 et la température annuelle au sol (t en °C).

$$\delta\text{o}/\text{oo} = 0,7 t - 13,9 \quad (\text{dans BURGER et cons. op. cit})$$

et les gradients thermométriques

$$\begin{aligned} t &= 11,6 - 56 \cdot 10^{-4} H & (\text{La Serrière 1901 - 1925}) \\ t &= 11,3 - 52 \cdot 10^{-4} H & (\text{l'Areuse dans BURGER 1959 op. cit}) \end{aligned}$$

On obtient une altitude moyenne des précipitations de 1250 mètres pour le bassin de la Serrière et 1075 mètres pour le bassin supérieur de l'Areuse. Les mesures hypsométriques donnent respectivement 1064 mètres pour la Serrière et 1115 mètres pour l'Areuse.

Si la différence est acceptable pour ce dernier, il est difficile d'admettre pareille altitude pour le bassin de la Serrière, alors que celle de l'aire alimentaire du Dogger seul est de 1240 m.

Soit $P = 1565$ mm l'estimation de la lame d'eau moyenne tombée sur le bassin de la Serrière en 1970. On obtient l'altitude où tombe la lame d'eau moyenne en résolvant les équations linéaires ou quadratiques liant les précipitations et l'altitude (Flg. VI-5, tableau VI-VII).

$$\begin{aligned} P_H &= 815 + 0,70 H \\ \text{et } P_H &= 1020 + 0,17 H + 0,00031 H^2 \end{aligned}$$

On trouve respectivement $H = 1071$ et $H = 1055$ mètres. Hypsométrie et précipitations semblent donc concorder. La réduction de l'aire alimentaire du bassin de la Serrière dans les parties basses suggérée par BURGER et cons. ayant déjà été considérée pour l'établissement des limites définies au chapitre V, seule une anomalie des teneurs en O-18 en fonction de l'altitude paraît pour l'instant acceptable pour justifier la différence observée. Souhaitons que de nouvelles mesures isotopiques tant de la source que des précipitations apportent un jour une solution.

7. ESTIMATION DES TEMPS DE TRANSIT DANS LE BASSIN A PARTIR DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES

7.1. Le gaz carbonique.

L'activité biochimique au niveau du sol est déterminante pour son enrichissement en CO_2 . Les eaux qui s'infiltrant vers la nappe au travers de la terre végétale vont donc acquérir une teneur en CO_2 , par conséquent une agressivité, maximum durant les mois où la production de CO_2 est la plus forte, c'est-à-dire lorsque le sol est chaud et humide (BURGER, 1972 b). La production de CO_2 tendra donc à suivre le cycle thermique annuel, et présentera un maximum fin juillet début août, ce qui est en accord avec les travaux de BILLES, CORTEZ et LOSSAINT (1971, dans MISEREZ, 1973). La mise en solution des carbonates par le CO_2 du sol sera synchrone et donc maximum durant les mois d'été. Compte tenu de l'évolution du contenu carbonaté à la source de la Serrière il doit alors être possible d'estimer le déphasage (lag-time) entre la mise en solution des carbonates et leur arrivée à l'exutoire à partir de la température de l'air ou la température du sol, à défaut de mesure de la pression partielle en CO_2 dans le sol.

7.2. La méthode des cross-covariances.

Le principe de la méthode des cross-covariances (covariances croisées, covariogramme), fréquemment utilisée dans l'analyse de séries temporelles, est illustré par la figure VIII-15. Soient deux séries de valeurs distribuées dans le temps représenté par les vecteurs A et B. On appelle covariance le produit des écarts des valeurs par rapport à la moyenne. Décalons progressivement et selon un pas de temps donné le vecteur B vers la gauche, alors que le vecteur A reste fixe et calculons chaque fois la covariance. Il résulte de la définition de la covariance que celle-ci est maximum lorsque les deux vecteurs sont en phase et minimum lorsque le déphasage est maximum. Dans le cas des covariances S, B reste fixe et c'est le vecteur A qui se déplace vers la gauche.

Si T représente la période du phénomène étudié et ΔTR et ΔTS les retards à l'écoulement, on a théoriquement :

$$\Delta TS = T - \Delta TR$$

On verra qu'en raison de la diminution progressive de la longueur des deux vecteurs ce n'est pas toujours le cas.

A une covariance R maximum correspond théoriquement une covariance S minimum et réciproquement, le décalage entre le maximum et le minimum de R ou S étant de $T/2$.

Les vecteurs R et S ont été calculés à l'aide d'un programme développé à cet effet (YCAROS) et les résultats représentés sur les figures VIII-16 et VIII-24. Le titre donne dans l'ordre la dénomination des vecteurs A et B. Sur l'échelle horizontale sont représentés les déphasages exprimés ici en semaine (LAG). Relevons qu'après chaque décalage la dernière valeur de A et la première de B sont éliminées, les vecteurs perdant chaque fois un terme. Ceci explique la forte divergence des covariances qui peut apparaître au delà du 50ème pas, le nombre des termes de A et B étant alors inférieur à 10.

Les données étudiées ici proviennent d'échantillons récoltés entre janvier 1969 et mars 1971. (tableau VIII-XI).

7.3. Analyse des résultats.

- Température de la source (Fig. VIII-16)

Bien que troublé par des oscillations de courtes périodes, le décalage entre la température de l'air et la température de l'eau est net et la synchronisation apparaît après 8 semaines.

- pH (Fig. VIII-17).

La périodicité du phénomène en liaison avec la température de l'air n'est pas nette. Un minimum (pH et pCO_2 sont inversement corrélés) apparaît après 4 semaines. Des erreurs d'analyses ne sont pas exclues.

- Conductibilité électrique (Fig. VIII-18)

Alors que la périodicité des duretés est nettement mise en évidence il est plus difficile de déceler un cycle annuel pour la conductibilité électrique. Relevons un minimum des covariances S pour un décalage de 13 semaines et un maximum après 35 semaines.

- Duretés totale et temporaire (Fig. VIII-19, VIII-20)

Maxima et minima des covariances R et S concordent bien. Température de l'air et dureté étant corrélées positivement, on voit que le déphasage entre les deux phénomènes est compris entre 12 et 14 semaines pour la dureté totale et 14 à 16 semaines pour la dureté temporaire, soit 3 mois environ.

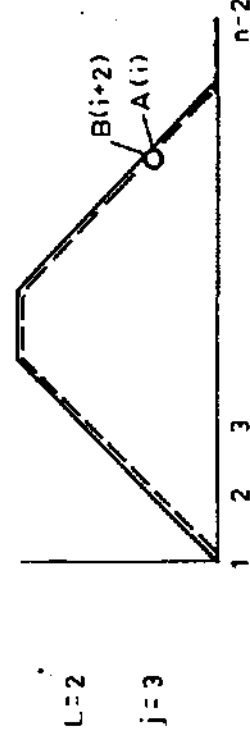
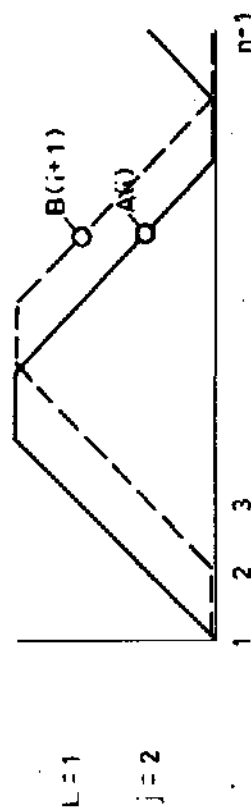
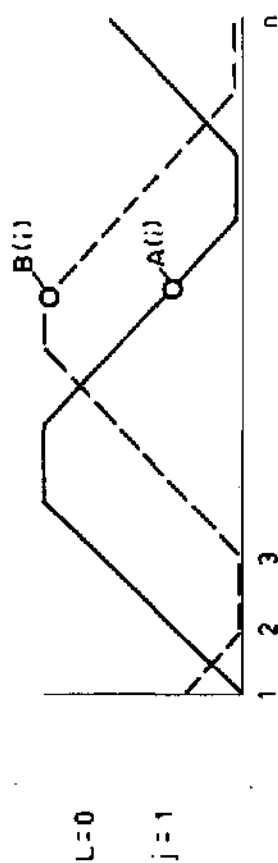
- Strontium et magnésium (Fig. VIII-21, VIII-22)

Le caractère cyclique des courbes apparaît nettement avec un déphasage par rapport à la température de l'air compris entre 14 et 16 semaines.

- Le calcium (non représenté)

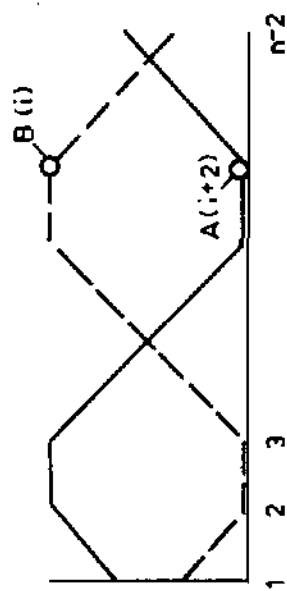
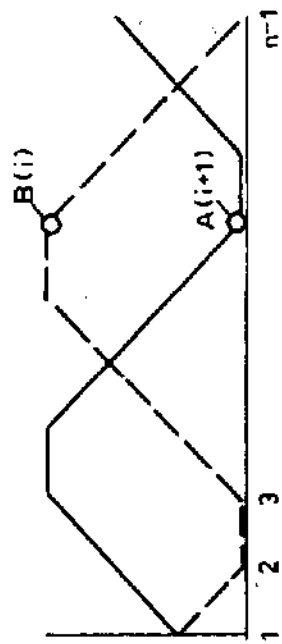
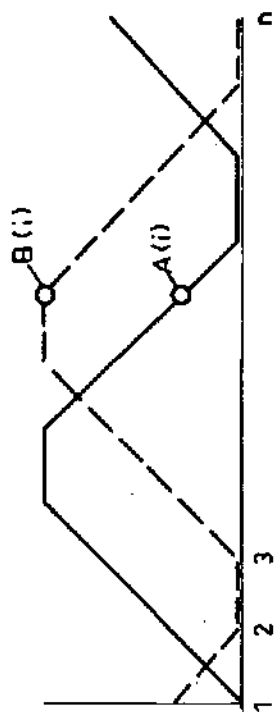
Probablement en raison des erreurs analytiques relevées plus haut le calcium ne présente pas de déphasage significatif.

CROSS-COVARIANCE R



$$R(j) = \frac{1}{n-j+1} \sum_{i=1}^{n-j+1} (A_i - \bar{A})(B_{i+j} - \bar{B})$$

CROSS-COVARIANCE S



$$S(j) = \frac{1}{n-j+1} \sum_{i=1}^{n-j+1} (A_{i+j-1} - \bar{A})(B_i - \bar{B})$$

Figure VIII - 15 Méthode des cross - covariances

CROSS-COVARIANCES

TEMPERATURE DE L'AIR A LA CHAUX DE FONDS

TEMPERATURE DE LA SOURCE DE LA SERRIERE

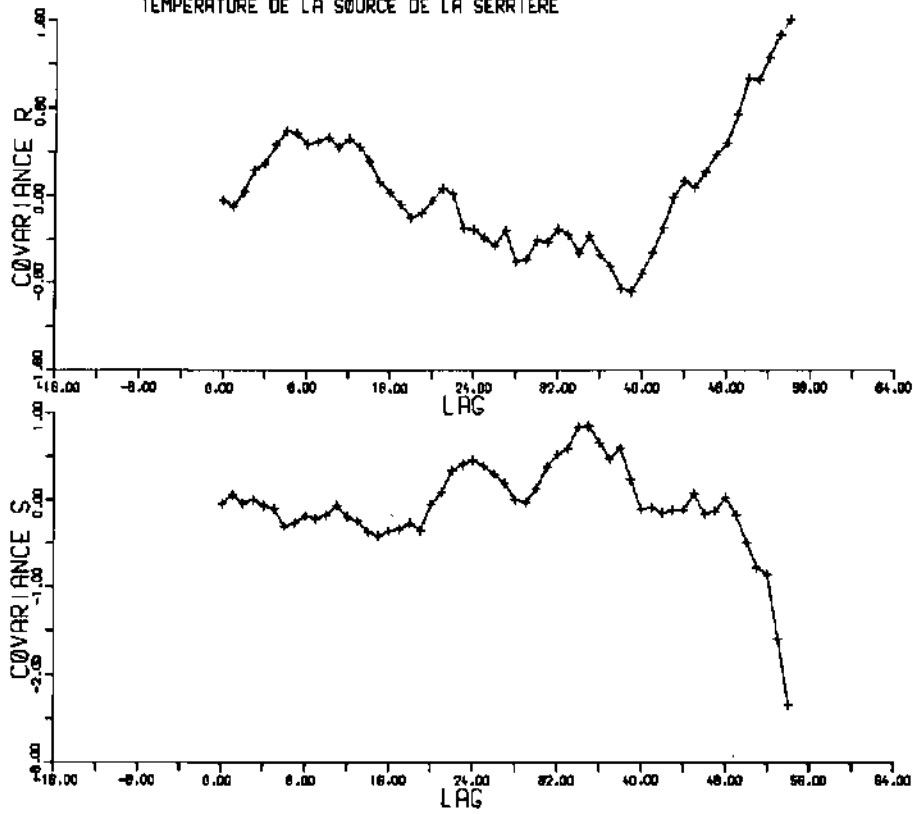


Figure VIII - 16

TEMPERATURE DE L'AIR A LA CHAUX DE FONDS

PH DE LA SOURCE DE LA SERRIERE

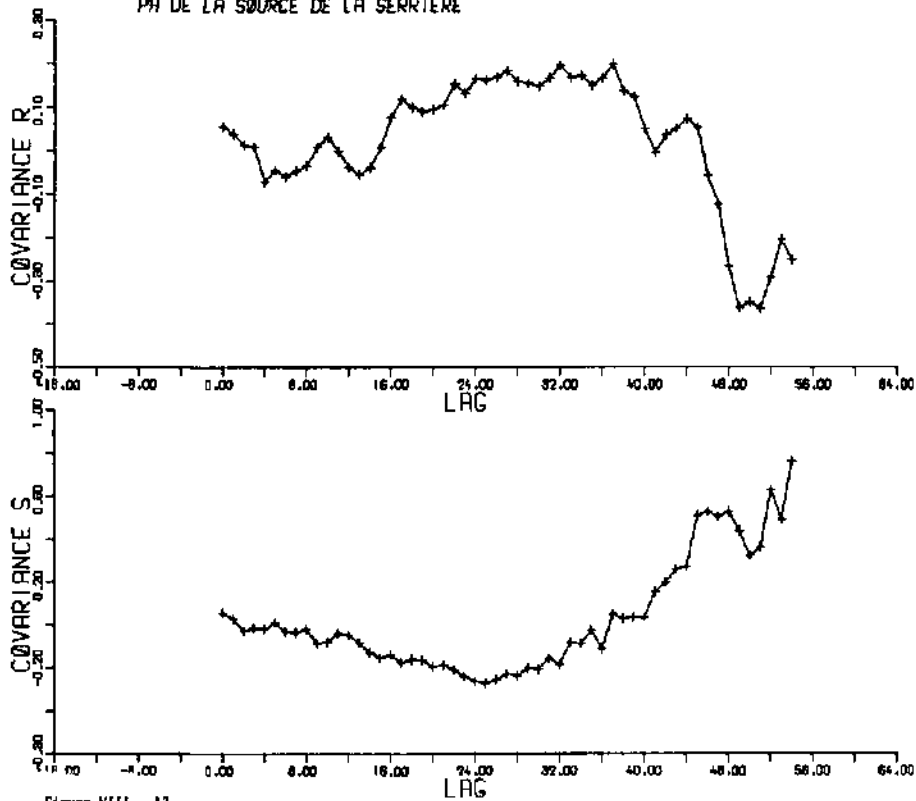


Figure VIII - 17

CROSS-COVARIANCES

TEMPERATURE DE L'AIR A LA CHAUX DE FONDS

CONDUCTIBILITE ELECTRIQUE DE LA SOURCE DE LA SERRIERE

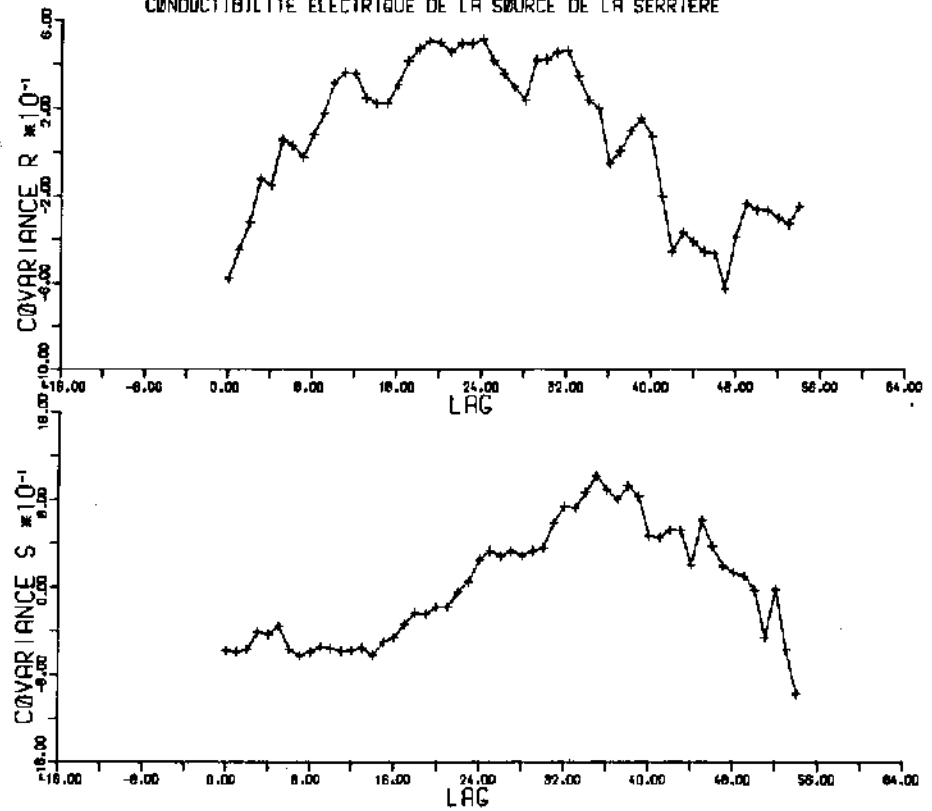


Figure VIII - 18

TEMPERATURE DE L'AIR A LA CHAUX DE FONDS

DURETE TOTALE DE LA SOURCE DE LA SERRIERE

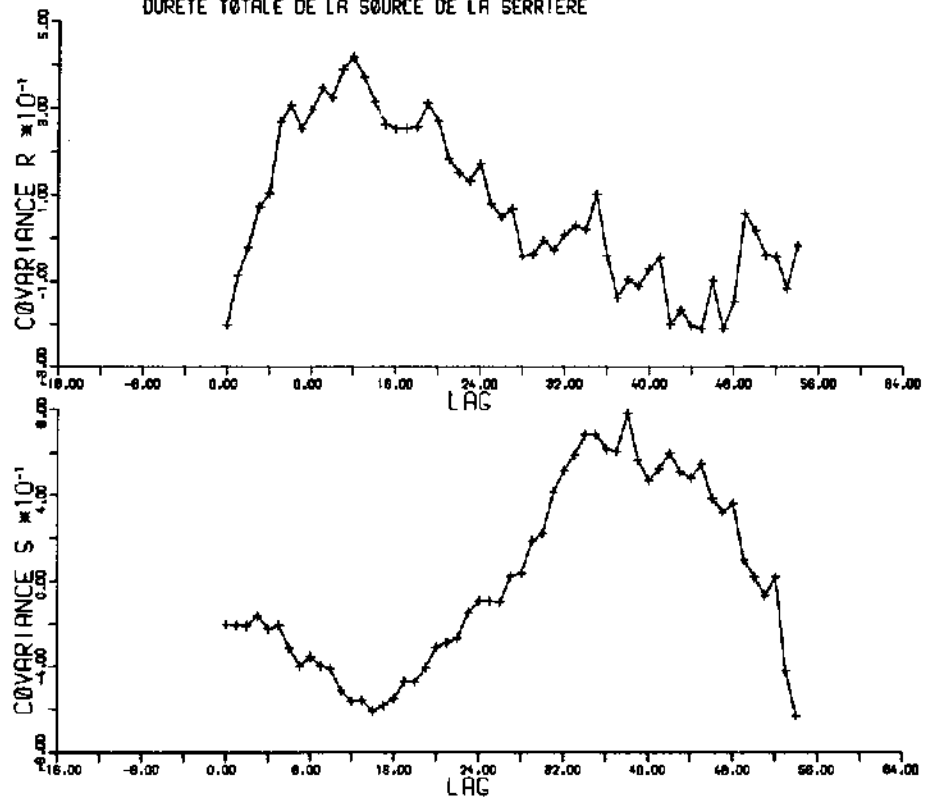


Figure VIII - 19

CROSS-COVARIANCES

TEMPERATURE DE L'AIR A LA CHAUX DE FONDS
DURETE TEMPORAIRE DE LA SOURCE DE LA SERRIERE

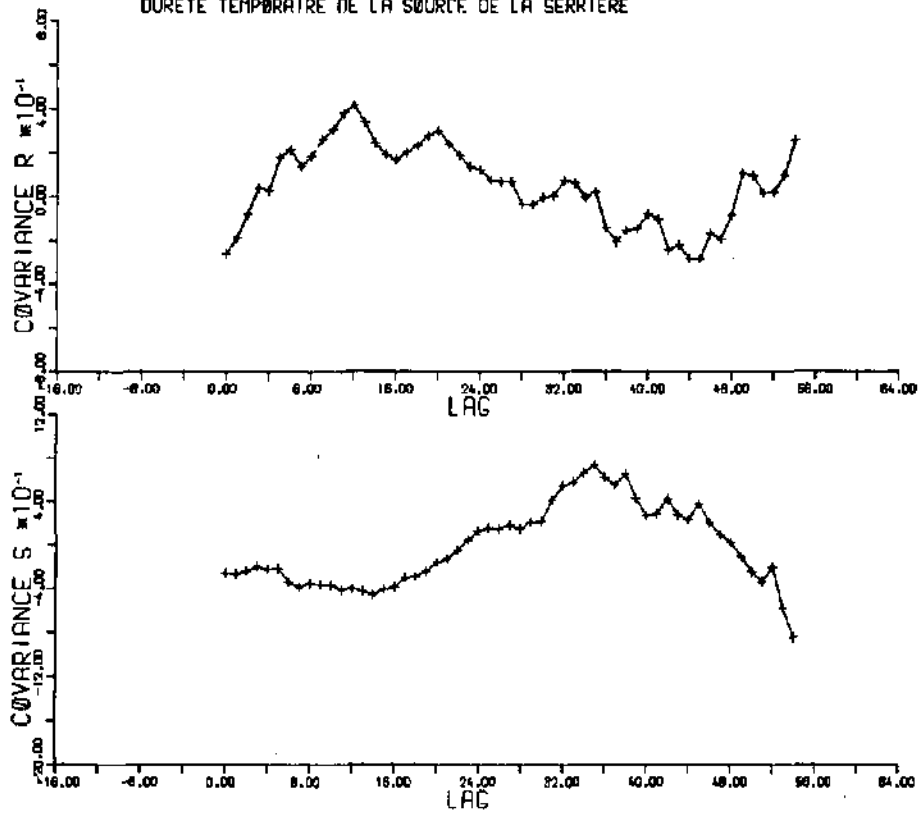


Figure VIII - 20

TEMPERATURE DE L'AIR A LA CHAUX DE FONDS
TENEUR EN STRONTIUM DE LA SOURCE DE LA SERRIERE

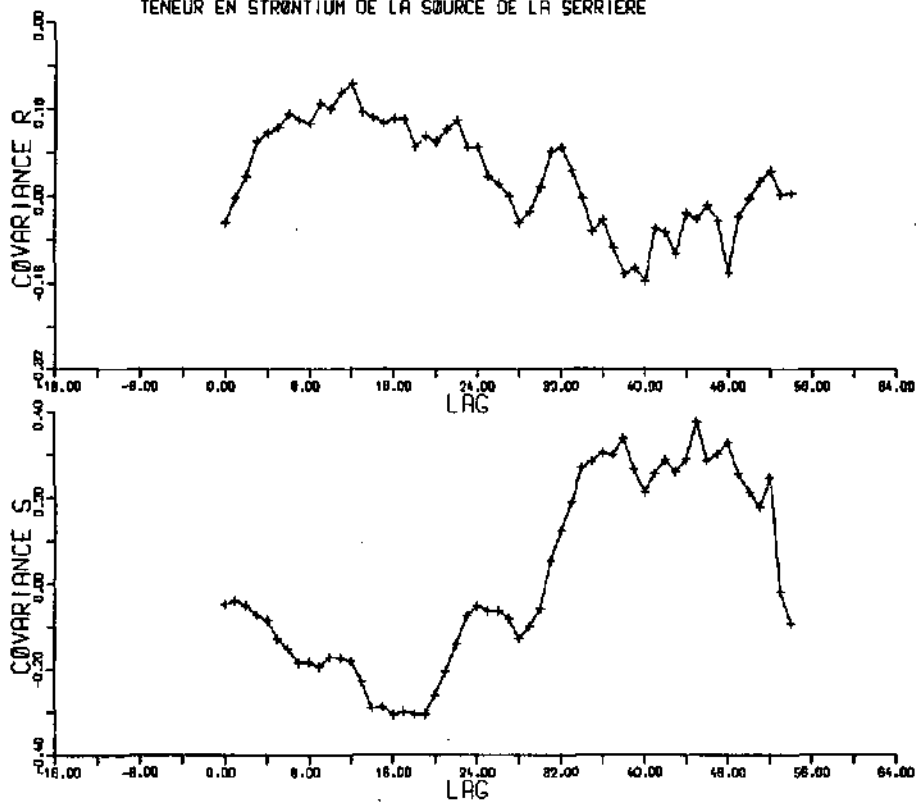


Figure VIII - 21

CROSS-COVARIANCES

TEMPERATURE DE L'AIR A LA CHAUX DE FONDS

TENEUR EN MAGNESIUM DE LA SOURCE DE LA SERRIERE

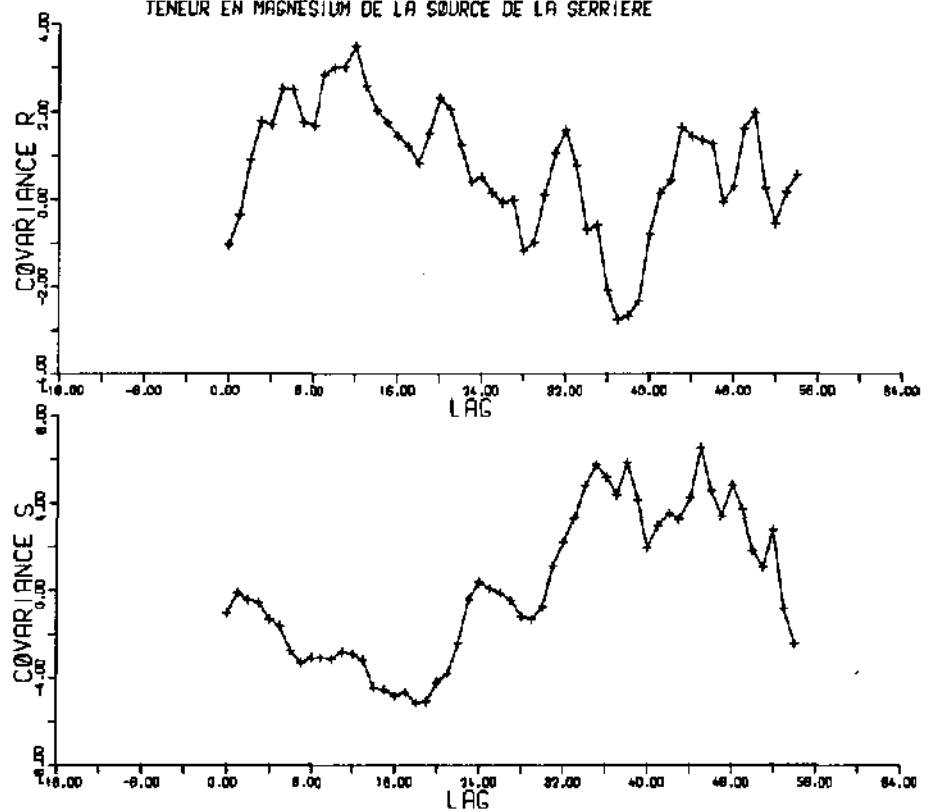


Figure VIII - 22

TEMPERATURE DE L'AIR A LA CHAUX DE FONDS

TENEUR EN SODIUM DE LA SOURCE

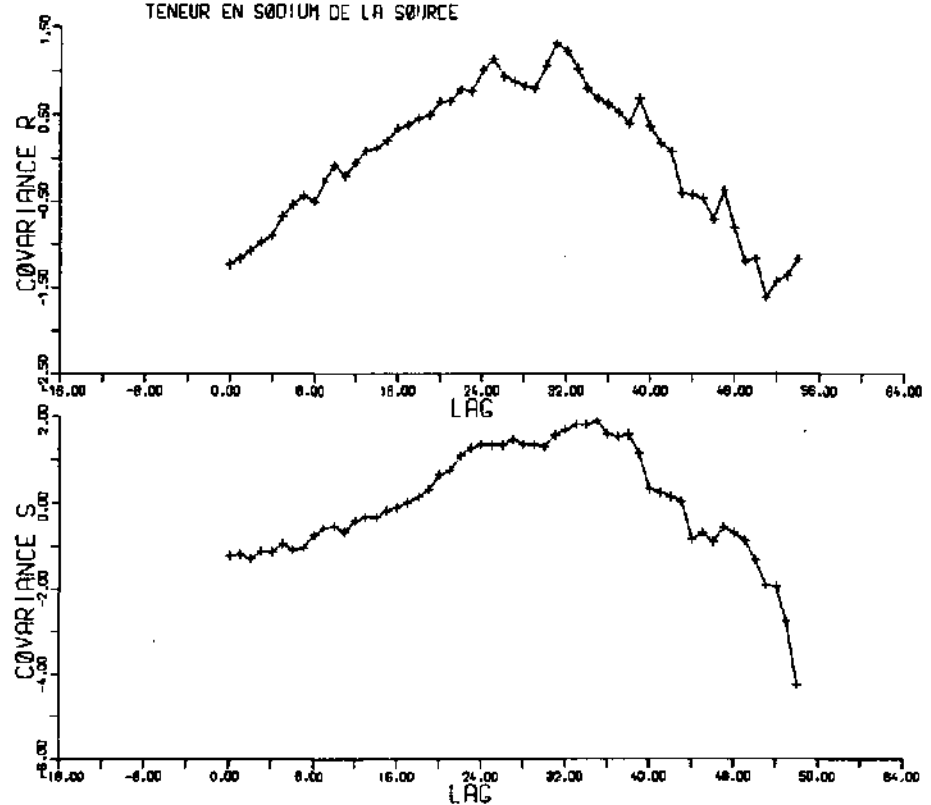


Figure VIII - 23

- Sodium et potassium

La mise en solution de ces deux éléments n'est pas conditionnée par le CO_2 et donc par la température, on en trouve une confirmation dans les résultats contradictoires fournis par les cross-covariances 8 et 5.

7.4. Interprétation des résultats.

L'analyse isotopique (Tritium et O-18) de la Serrière donne un âge moyen des eaux de 6 à 7 mois pour l'année hydrologique 1969 - 1970. Quelle est alors la signification d'un déphasage entre la température de l'air et de l'eau de 8 semaines ou de 12, voire 16 à 18 semaines pour certains des paramètres physico-chimiques ? La diffusion thermique ou chimique dont les coefficients sont très bas comparés aux vitesses d'écoulement n'explique pas des transferts de masse ou de chaleur aussi rapides.

On connaît la nature hétérogène de la perméabilité du milieu karstique qui implique celle du champ des vitesses d'écoulement (chap. VIII-2.4). On sait également que le réseau de la Serrière est alimenté par plusieurs formations dont l'apport relatif varie au cours de l'année hydrologique. Celui des grands chenaux du Malm est prépondérant en période de hautes eaux et c'est la chimie de ses eaux qui subit les variations majeures, et qui marque les grandes fluctuations saisonnières de la charge dissoute ou de la température de la source. C'est davantage par des eaux à circulation rapide que se réalise la synchronisation des covariogrammes, les eaux d'étiage étant nettement trop tamponnées pour agir significativement sur les covariances. En milieu karstique, on se garde donc d'interpréter les décalages entre le contenu chimique et les paramètres météorologiques pour fixer le temps de séjour moyen des eaux dans le bassin. En revanche, à l'échelle de crues individualisées, à partir de données analytiques très rapprochées et en tenant compte du débit, les résultats sont beaucoup plus probants.

Tableau VIII-XIV

Le Serrière : Résultats des analyses bactériologiques 1971 - 1973
Analyses : R. STEFFLER - Laboratoire du Service des Eaux de la Ville de Neuchâtel

DATE	GERMES TOT. par ml à 20°C en 3 j 30°C en 3 j	GERMES INT. par ml à 37°C en 3 j 30°C en 3 j	GERMES BANAUX par 100 ml à 37°C en 2 j.	EXIFORMES par 100 ml à 37°C en 2 j.	ENTEROCO- QUES par 100 ml à 37°C en 2 j.	SOURCE DE L'AREUSE Débit journ. m ³ /q	DATE	I	II	III	IV	V	VI
14.6.1971	730	1190	1000	900	780	5,77	19.9.72	-	64	100	199	29	0,56
28.6	1400	2900	420	790	64	6,76	2.10	48	130	21	28	-	0,39
12.7	74	274	240	100	1	1,37	17.10	4	194	70	60	5	0,66
26.7	1600	9100	820	1300	19	0,86	30.10	19	99	50	70	2	2,45
9.8	180	830	200	230	20	0,62	13.11	9	22	380	350	-	12,7
23.8	560	1560	3600	3700	81	1,07	27.11	-	-	17	20	11	4,92
6.9	1400	3100	530	760	26	0,73	11.12	4300	9500	350	630	190	4,51
21.9	-	650	430	690	-	0,62	26.12	320	800	84	34	-	1,24
4.10	160	370	100	290	2	0,46	8.1.1973	260	570	136	60	4	0,87
19.10	-	1080	141	204	1	0,83	22.1	100	175	6	9	1	0,69
1.11	1700	-	350	770	1	0,66	5.2	620	1040	30	70	54	0,87
6.12	-	10	700	300	5	1,71	19.2	90	180	39	50	2	0,54
11.1.1972	130	320	60	110	4	1,17	5.3	120	260	2	8	2	0,65
24.1	180	580	80	160	7	0,90	19.3	1030	2740	13	27	-	0,77
7.2	-	160	320	630	2	3,58	2.4	980	2510	180	180	15	9,62
20.2	280	820	60	310	21	2,22	16.4	94	346	130	100	12	2,75
6.3	75	200	60	110	1	1,66	30.4	3400	9900	1500	1500	260	30,0
20.3	30	42	200	700	82	6,72	14.5	370	800	160	130	2	5,35
11.4	21000	40000	950	1000	166	4,92	28.9	100	310	30	90	7	1,43
24.4	2600	5200	280	800	16	4,20	12.6	8500	11700	1100	1900	96	1,56
15.5	100	280	70	190	7	1,98	25.6	15200	29200	16000	20800	320	21,5
29.5	83	252	50	220	9	4,98	9.7	630	1490	400	500	35	1,50
12.6	4800	8600	6800	5000	167	4,02	23.7	530	1660	360	780	56	5,00
26.6	620	1620	470	770	70	1,53	6.8	720	1600	140	180	25	4,32
10.7	61	204	1200	2000	130	1,66	20.8	50	260	40	320	14	1,43
24.7	-	-	59	115	42	2,13	3.9	45	118	47	58	-	1,31
7.8	102	427	1700	5600	65	1,31	18.9	90	280	23	48	10	0,82
21.8	600	1900	600	1300	25	0,84	1.10	44400	56800	28300	28300	468	1,37
4.9	1	41	17	70	2	0,50	15.10	580	1370	50	130	21	9,67
							29.10	910	1530	90	320	6	1,69
							12.11	86	248	17	43	2	1,76
							26.11	440	870	130	160	17	3,60
							10.12	13400	26900	3100	4860	238	8,96
							7.1.1974	62	186	50	180	20	3,02

CROSS-COVARIANCES

TEMPERATURE DE L'AIR A LA CHAUX DE FONDS

TENEUR EN POTASSIUM DE LA SOURCE DE LA SERRIERE

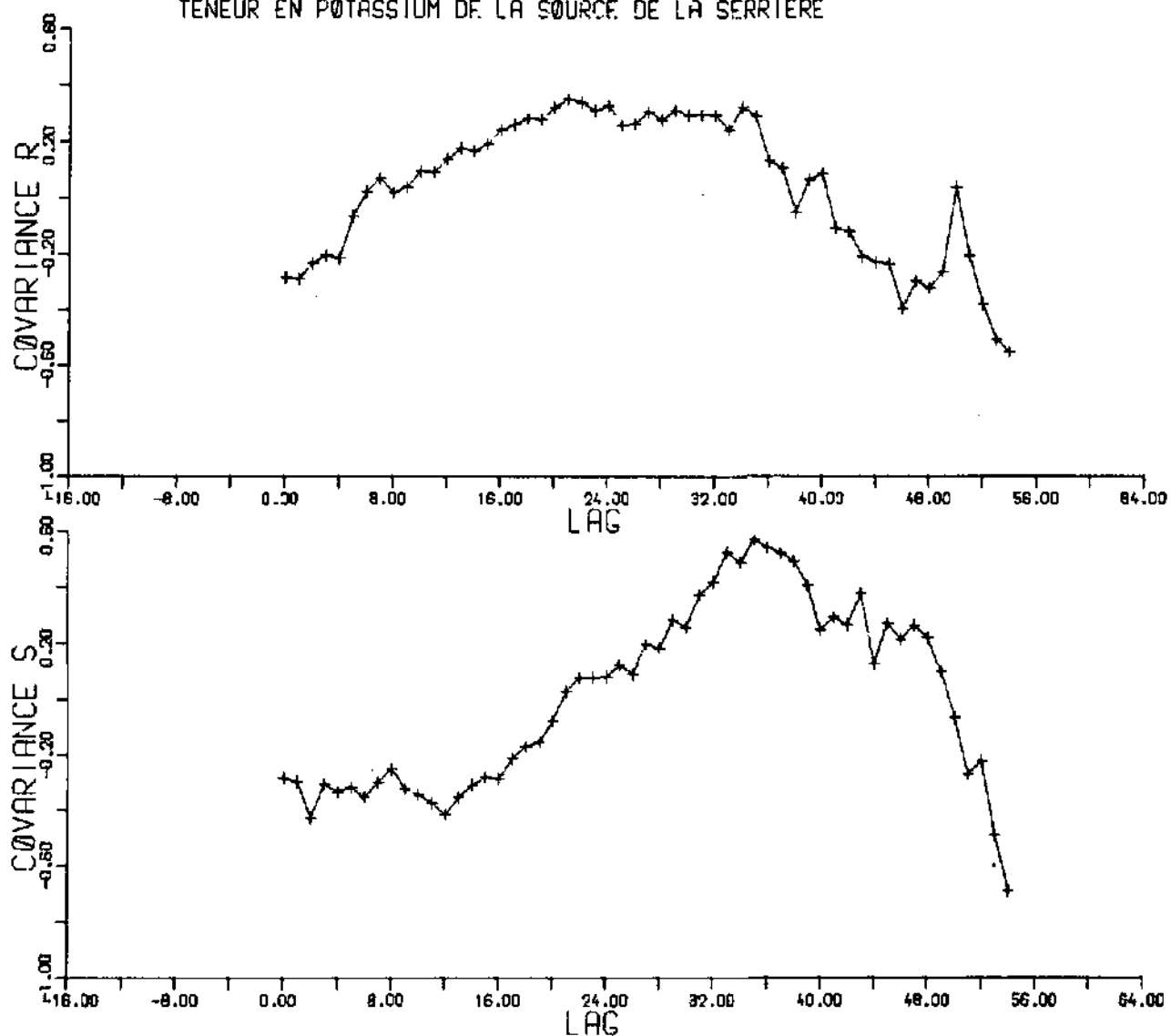


Figure VIII - 24

CHAPITRE IX

HYDROGEOLOGIE DES TERRAINS CALCAIRES

Répétone-le Messssseieurs

Quand on le laisse seul

Le monde mental

Ment

Monumentalement

J. Prévert

Paroles

1. ECOULEMENT SUPERFICIEL ET DE SUB-SURFACE

1.1. Terres d'altération des calcaires.

La couche d'argile de décalcification qui constitue la majeure partie des sols des pâturages possède en général une perméabilité suffisante pour assurer une infiltration rapide des précipitations atmosphériques. (BURGER, 1959 op. cit.).

Des phénomènes de ruissellement peuvent apparaître sur les terres d'altération des calcaires au cours d'averses d'intensité exceptionnelle, telle que celle qu'a étudiée MONBARON (1973 b) dans le Val de Travers. Après une averse de près de 100 mm en une heure, les terres où la couverture de lohm d'altération masquait complètement le substratum calcaire présentaient de fortes traces de ruissellement alors qu'en forêt la couverture humique avait absorbé la totalité des précipitations.

L'analyse comparée de la fissuration et de la morphologie (JAMIER, MATHEY, 1977) révèle cependant l'existence de facteurs complémentaires à la tectonique comme la pente du terrain agissent sur l'orientation de la morphologie, qui pourraient résulter d'une action érosive due au ruissellement ou à l'écoulement hypodermique sur de courtes distances.

On connaît d'ailleurs les canelures et petites sillons qui se forment sur les dalles de calcaire mises à nu et qui sont orientées selon le gradient de la pente topographique.

1.2. Température et humidité du sol.

La zone non saturée, particulièrement dans les premiers mètres sous la surface du sol, joue un rôle fondamental dans la régulation de la température des eaux d'infiltration.

Des mesures hebdomadaires de température et d'humidité ont été effectuées en 6 stations réparties dans les bassins de la Serrière et du Seyon à l'aide de cellules combinées Soiltest. (Fig. IX-1, tableau IX-1).

Minimum entre janvier et mars, la température du sol est maximum de juillet à août. Les écarts entre les extrêmes dépendent de l'exposition du terrain, plus que de l'altitude. Aux Prés Royer, la présence de la nappe phréatique à faible profondeur (0,5 à 1,5 mètre) atténue l'élévation de la température estivale du sol, ce qui n'est pas le cas à Valangin où la nappe est plus profonde.

De novembre à juin l'humidité du sol varie peu et reste proche de la saturation. Dès le mi-juin apparaissent temporairement des périodes avec déficit en eau dans le sol, rapidement compensé après les averses estivales.

Aux Prés Royer, on constate le rôle déterminant du niveau de la nappe phréatique dans l'évolution de la teneur en eau du sol. La cellule de la Montagne de Cernier était placée à 8 centimètres sous la surface, au contact d'une dalle de calcaire sub-horizontale. Les variations de l'humidité (non représentées) y sont très rapides avec des écarts entre les extrêmes considérables en raison des faibles réserves hydriques de la couche de terre végétale peu épaisse.

Une tentative destinée à mettre en évidence une relation entre l'indice d'antécédence des précipitations (API) et l'humidité du sol n'a pas donné les résultats espérés. (CHY-MATHEY, rapport inédit). Le démarche consistait à rechercher par la méthode des corrélogrammes une valeur optimum du coefficient de décroissance pour le calcul de l'API, et de donner ainsi à cet indice une signification physique. Le raison de cet échec est à rechercher d'abord dans la fréquence trop faible des observations; il est certain qu'avec des enregistrements continus de l'humidité à diverses profondeurs, ce problème trouverait une solution, probablement non linéaire.

Tableau IX-I

Température et humidité du sol : moyenne et écarts types.

STATION	COORDONNÉE	ALTITUDE PROFONDEUR		TEMPERATURE °C		HUMIDITE % *	
		m	m	m	m	m	m
VALANGIN	558.475/ 207.520	725	-0,45	11,8	4,8	26,4	7,9
LES PRES ROYER	562.245/ 212.645	722	-0,40	7,7	3,5	59,1	4,4
Mgne DE CERNIER **	557.650/ 213.270	1185	-0,08	9,5	6,6	86,9	45,8
LES VIEUX PRES 1 ⁺	561.140/ 214.520	1088	-0,45	5,8	4,0	53,2	5,3
LES VIEUX PRES 2	561.870/ 214.870	1035	-0,40	8,2	5,3	65,4	13,2
LES Hts GENEVEYS ⁺	556.780/ 211.535	1050	-0,40	-	-	52,5	5,3

* en % du poids sec

+ en forêt

N = 67

** incomplet

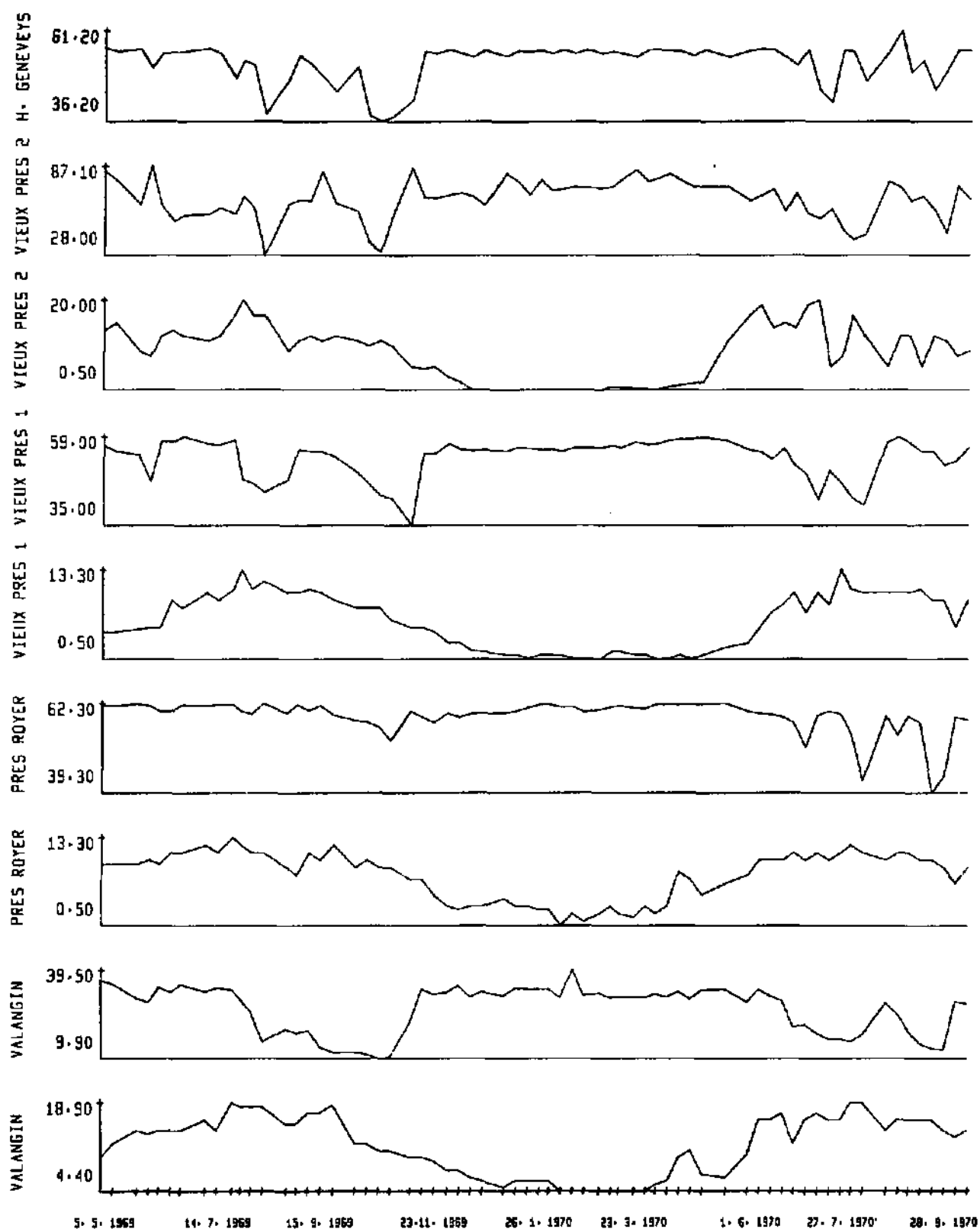
2. ECOULEMENT DANS LES TERRAINS D'ALTERATION DES NIVEAUX MARNO-CALCAIRES

2.1. Marno-calcaires du Dogger.

Aux effleurements marno-calcaires (Mernes blanches, Couches à *Datres acuminata*, Calcaires roux sableux) sont associés tous les phénomènes morphologiques des terrains peu perméables en pays calcaire (combes, dolines, etc). Le ruissellement superficiel y est toutefois limité dans l'espace en raison de la faible épaisseur de ces formations. Les terres calcaires qui les bordent absorbent très vite les eaux de ruissellement, d'où la formation de systèmes d'écoulement superficiels locaux comme le marais de la Joux du Plène sur les Calcaires roux sableux, ou la combe des Mernes blanches que recoupe la combe des Aulx. Citons également la combe esléienne à l'Ouest du Gurnigel.

La présence d'un niveau phréatique dans la couche d'altération est attestée par une végétation de rone humide voire les étangs qui jalonnent les affleurements des Mernes blanches et des Calcaires roux sableux entre le Gurnigel et Derrière Pertuis.

TEMPERATURE ET HUMIDITE DU SOL



2.2. Les marno-calcaires argoviens.

2.2.1. Ruissellement et crues.

Les conditions de circulation de l'eau dans la zone d'altération de l'Argovien ont été décrites par BURGER (1959, op. cit., p. 126).

Au Nord du bassin, le Ruz Chesseran collecte les eaux de ruissellement des affleurements de l'Argovien, soit des Combes Mauley, Berthière et Biosse ainsi que de la région des Bugnenets. Le détournement des eaux du ruisseau dans le gouffre de Pertuis et la description des parties du Ruz Chesseran en amont du Pâquier ont été décrites au chapitre IV.

En traversant la cluse de Cheneu, le Ruz Chesseran qui s'est accru du débit des sources qui jaillissent des terrains quaternaires dans la région du Pâquier (celles-ci constituent son flot de base) se perd habituellement à l'entrée de la cluse. A Cheneu son débit dépasse très exceptionnellement 100 litres par seconde.

De mémoire d'homme on ne se souvient pas pour cet affluent du Seyon de crues catastrophiques comme celles qui ont été observées dans la Mauvaise Combe par BURGER (1959, op. cit., p. 129) ou dans le bassin de la Mosse par MONBARON (1973 b, op. cit.). Ce dernier estime le débit spécifique au maximum de la crue à $25 \text{ m}^3/\text{s km}^2$ et le débit spécifique moyen à $10 \text{ m}^3/\text{s km}^2$. Bien que très rares, des crues de cette intensité ne doivent pas être exclues dans le bassin du Ruz Chesseran; les surfaces imperméables en présence ($0,8 \text{ km}^2$ pour les Combes Mauley et Berthière à Pertuis, $0,7 \text{ km}^2$ pour le Combe Biosse) sont comparables à celles du bassin de la Mosse. La recherche de l'hydrogramme unitaire du Ruz Chesseran et de ses affluents permettrait la simulation des crues à l'aide d'un modèle du type CHYN1, d'où la possibilité de mieux dimensionner les ouvrages (casseaux, ponts) le long de son cours.

2.2.2. Les sources argoviennes.

La présence d'une circulation à faible profondeur dans la zone d'altération de l'Argovien est attestée par les nombreuses sources, captées par drainage, dont le débit moyen est généralement inférieur à 1 litre par minute. (Sources de la Combe Mauley, des Bugnenets, de la Combe Biosse).

Les dolines argoviennes, souvent alignées comme à la Joux du Plâne, dont le creusement ne cesse de se poursuivre, témoignent également de l'existence d'une circulation à faible profondeur. La présence d'un niveau saturé dans l'Argovien est démontrée des puits, certains recouverts d'un dôme en pierres sèches, tels qu'on en trouve Derrière-Pertuis.

La minéralisation des eaux y est d'une variabilité remarquable. Le pH, en raison probablement d'une forte charge en substances humiques, y est très bas en été. La température de l'eau s'abaisse considérablement en hiver. (Figures IX-2, IX-3 et X-1).

3. ECOULEMENT DANS LA ZONE NON SATURÉE DU KARST

3.1. Trois sources karstiques de faible débit.

Trois sources appartenant chacune à une des trois grandes formations calcaires (Doggar, Malm, Crétacé) et dont l'exutoire est proche de la zone alimentaire ont été suivies durant une année.

- La source Jean Favre (La Joux du Plâne).

Elle est captée par drainage au contact des Calcaires roux sableux et de la Dalle nacrée. Son bassin alimentaire est un pâturage partiellement boisé.

- La source séquanienne des Bugnenets.

Il s'agit d'une venue fissurale d'un litre par minute en moyenne, tarissant en étiage, qui jaillit dans la carrière à l'Ouest de la route cantonale au-dessus des Bugnenets.

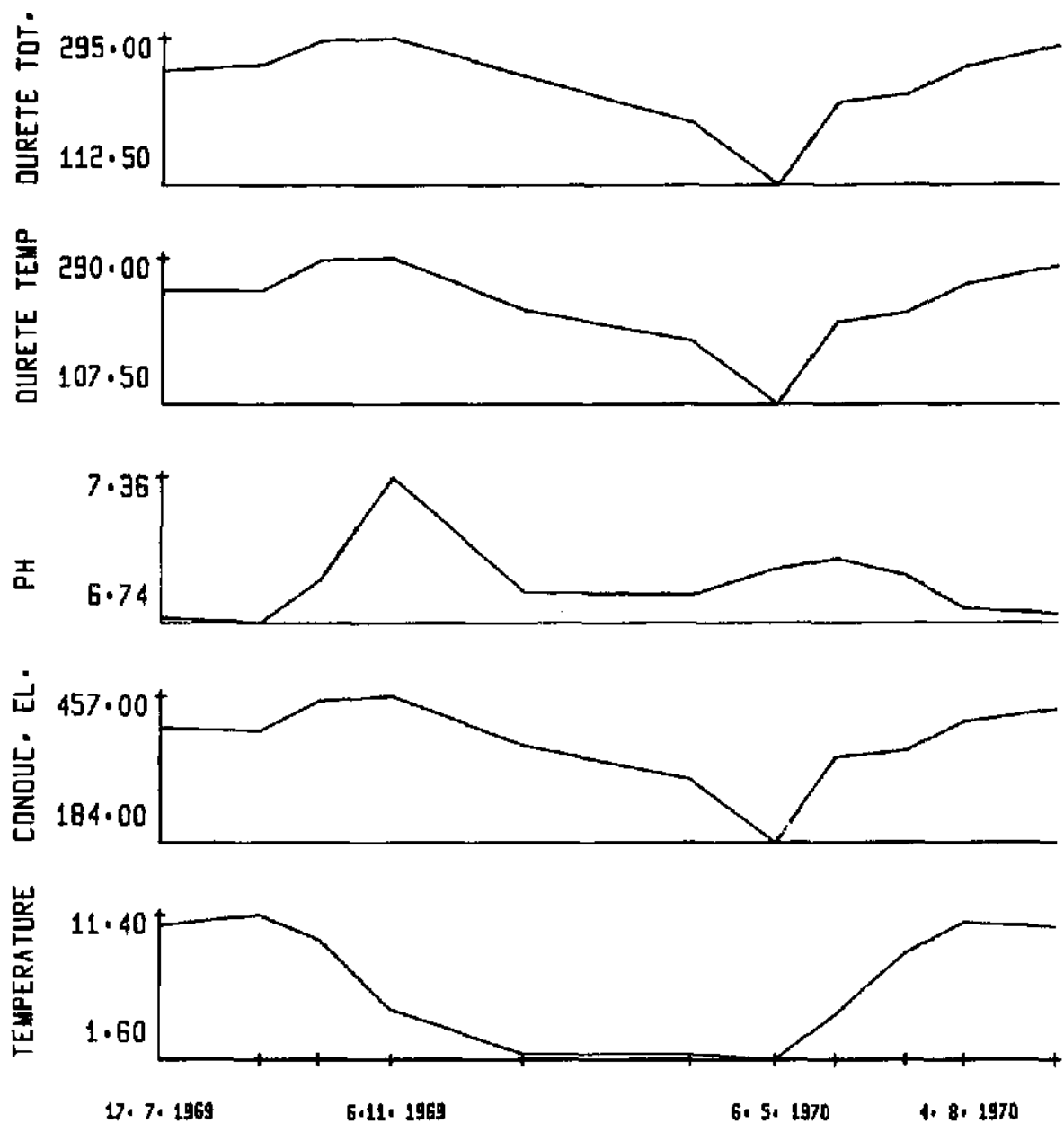


Figure IX - 2 Derrière Pertuis, Puits. Evolution de quelques paramètres physico-chimiques durant l'année hydrologique 1969 - 1970.

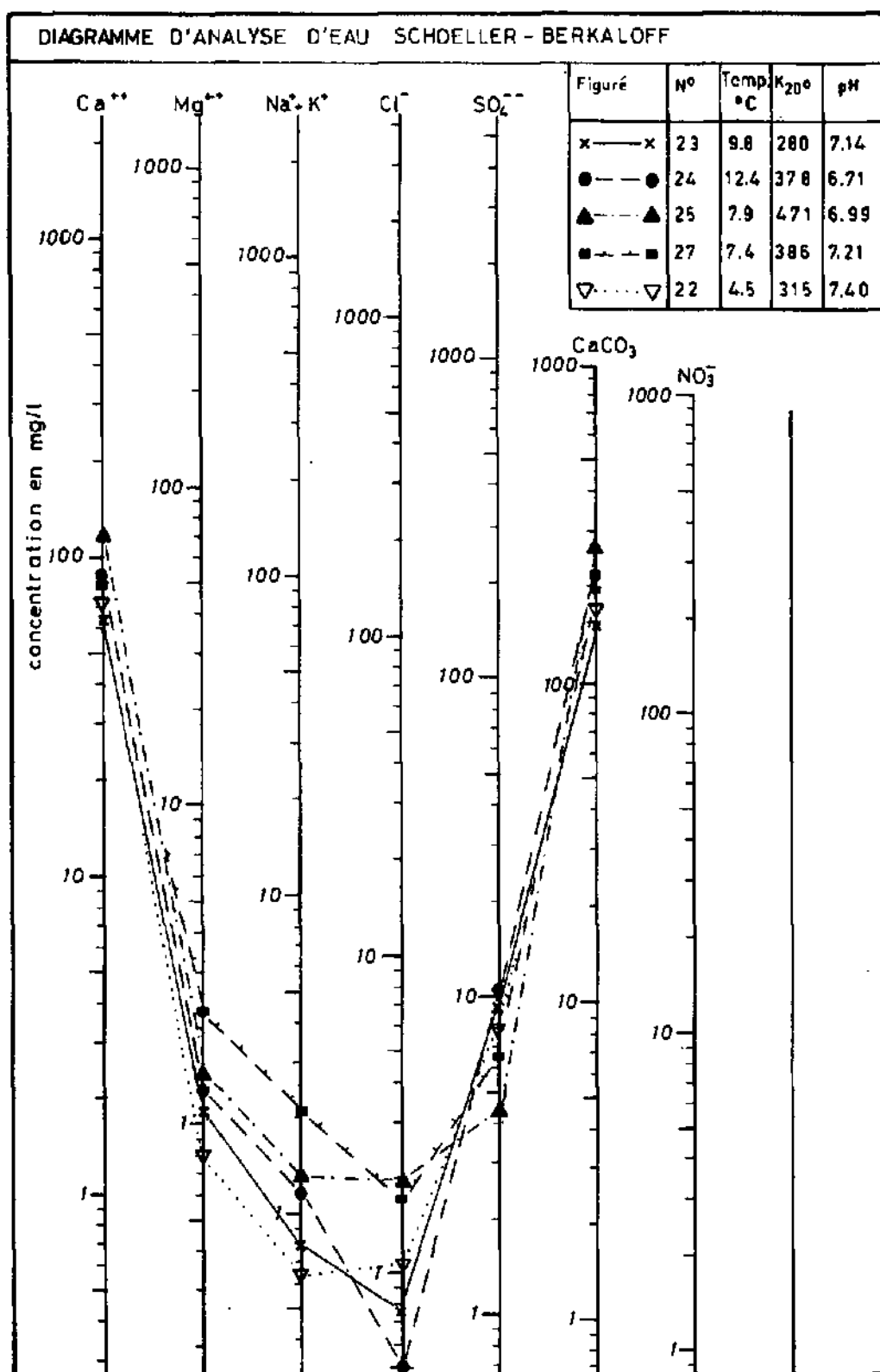


Figure IX - 3

Contenu chimique de 5 sources dans le bassin de la Sorrière (26.8.71). X = Fontaine Jean Favre à la Joux de Plâne.
 ● puits Derrière Pertuis. ▲ Source des Jouxes. ■ Sources du tunnel des Loges (total). ▽ Les Bugnquets, source séquanienne.

- Le source des Joûmes.

Venue fissurale dans l'Hauterivien supérieur au contact des marnes hauteriviennes à proximité de la route Les Vieux Prés - Pertuis, son bassin alimentaire est entièrement recouvert de forêt.

On constate que la minéralisation carbonatée est presque totalement acquise, malgré un parcours souterrain très bref, ce qui est en accord avec les observations de MISEREZ (1973) à la grotte de Vere-Chez-Le-Brandt (Fig. IX-3). En revanche, la mise en solution des alcalins paraît plus lente à s'établir ce qui est confirmé par les teneurs un peu plus élevées (mais inférieures à celles de la Serrière) des sources du tunnel des Loges où la distance parcourue dans le massif est plus longue.

L'évolution saisonnière des paramètres physico-chimiques est cohérente : maximum au début de l'hiver, la minéralisation et la température sont minimum au début de juin, alors que les pH et les débits ont un régime inverse. (Figures IX-4 et IX-5). La variabilité du contenu chimique est un peu faible pour la source des Joûmes.

Relevons que l'on ne distingue pas de relation entre le contenu chimique des 3 sources et la minéralogie des formations dont elles sont issues.

3.2. Les sources du tunnel des Loges.

3.2.1. Situation.

Lors de la perforation du tunnel ferroviaire des Loges les responsables de la surveillance géologique pensaient rencontrer d'abondantes venues d'eau (JACCARD, 1883), hypothèse infirmée au cours des travaux, le niveau saturé du karst ne s'élevant que très exceptionnellement au-dessus de l'altitude du tunnel (~ 1040 m). JACCARD (op. cit) signale l'existence en période de forte crue (elle jaillissait au printemps 1970) d'une venue fissurale par escandum à 650 mètres de l'entrée Nord du tunnel donnant un débit de 5'000 à 6'000 litres par minute en décembre 1982.

Les venues pérennes jaillissent surtout du Dogger (Bethonien) et partiellement du Malm (Séquenien) (Fig. IX-6). Il s'agit toujours de venues par escandum qui sont captées par la commune de Fontainemelon, fortement troublées par des suspensions argileuses après les averses, elles doivent être filtrées sur boue calcaire avant d'être distribuées dans le réseau.

3.2.2. Température, conductibilité électrique, bactériologie.

La température des sources décroît du Sud au Nord (Fig. IX-6) sous l'effet combiné de l'élévation de l'altitude et du changement de l'exposition du bassin versant. Les venues du Dogger sont donc nettement plus froides. En revanche, la minéralisation des sources séquenienues qui est nettement plus basse que celles du Bethonien pourrait indiquer des temps de séjour moyen plus courts et par conséquent des perméabilités différentes pour les deux bassins formateurs. (tableau IX-II).

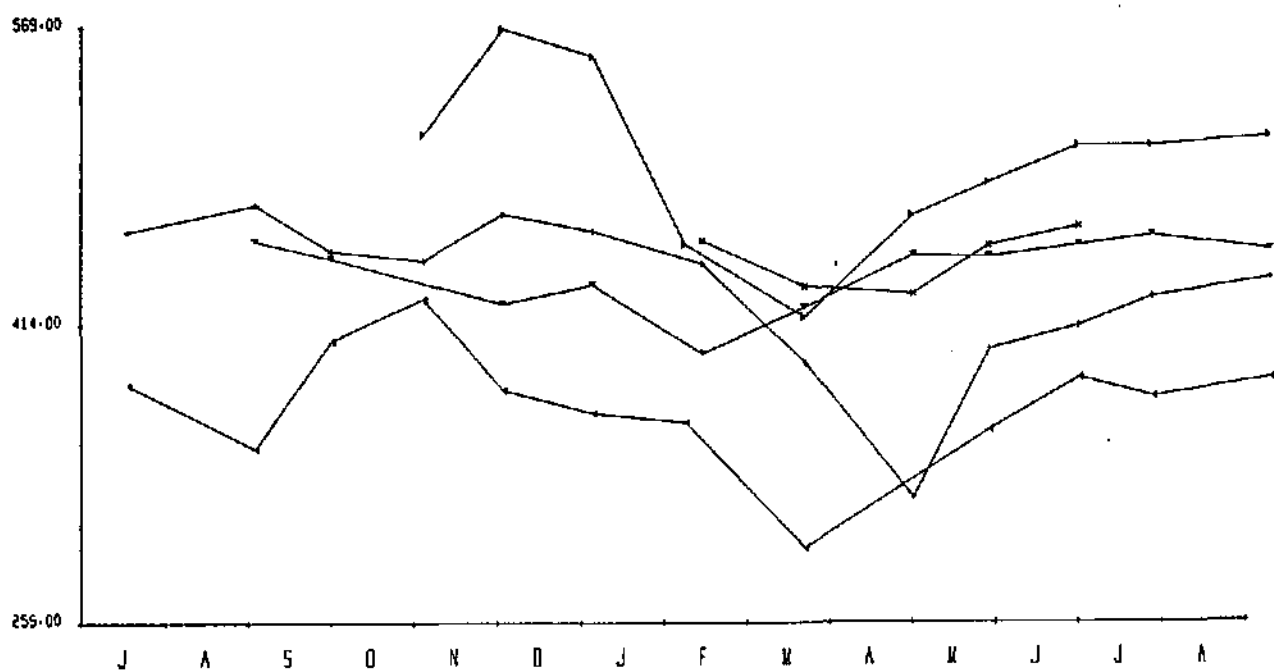
Du point de vue bactériologique on constate la présence presque permanente, mais en nombre variant selon les conditions hydrologiques, de colobacilles dans toutes les sources.

3.2.3. Régime des sources.

Le débit total des sources 1 à 6 a été relevé par le bureau P. AUBRY pour le compte de la commune de Fontainemelon, durant deux années consécutives à la sortie Sud du tunnel. (Fig. IX-7, tableau IX-III). En raison de la proximité de la zone alimentaire et de l'hétérogénéité de la perméabilité la variabilité des débits est très élevée (>150).

L'analyse des courbes de tarissement a été effectuée pour une sélection de 5 périodes (tableau IX-IV). Les débits ont été reportés en fonction du temps sur un diagramme semi-logarithmique,

CONDUCTIBILITE ELECTRIQUE ($\mu\text{mhos/cm}$)



TEMPERATURE °C

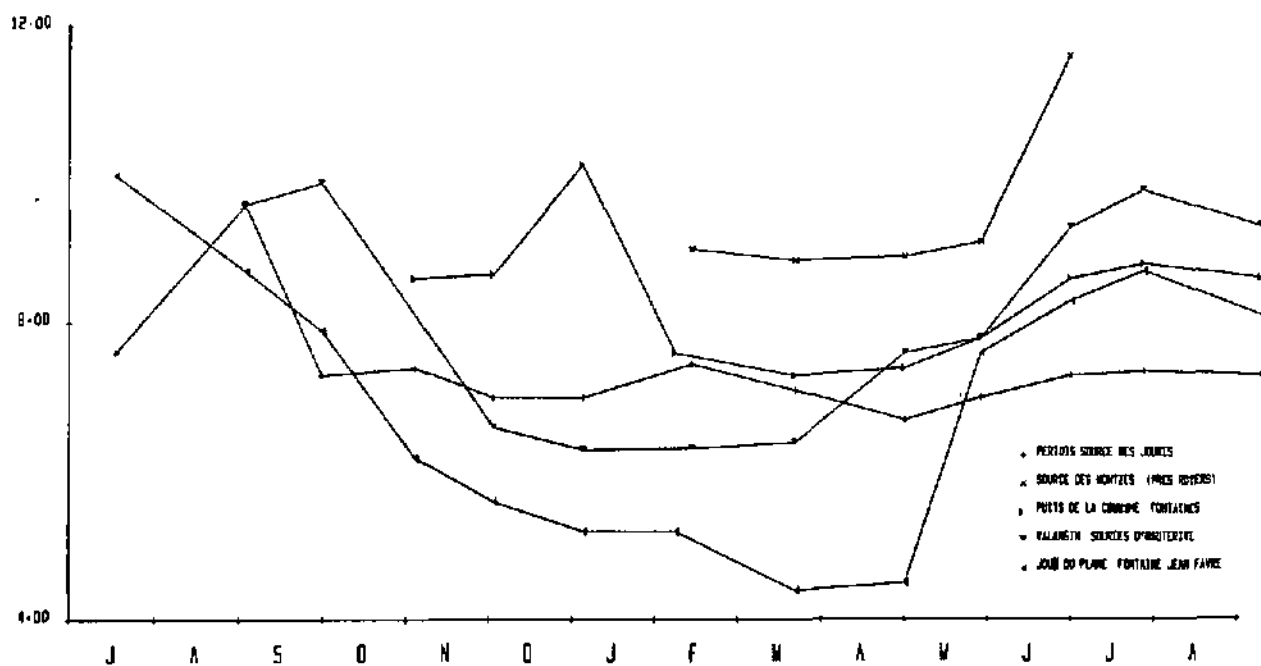
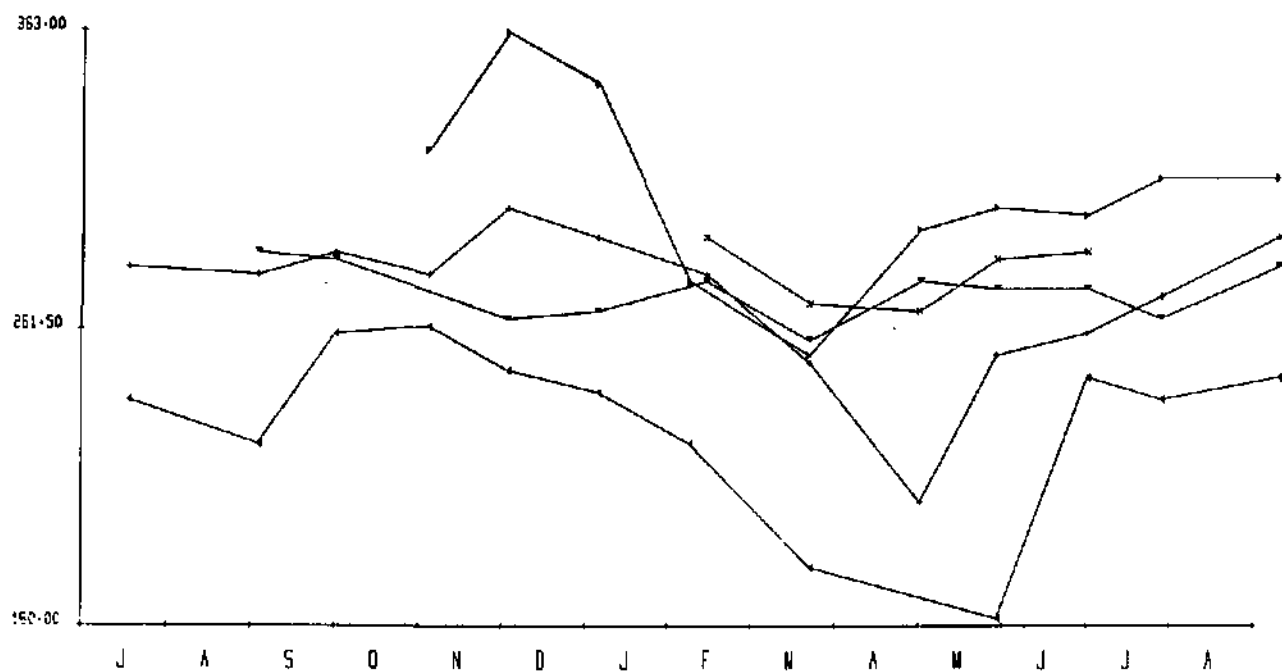
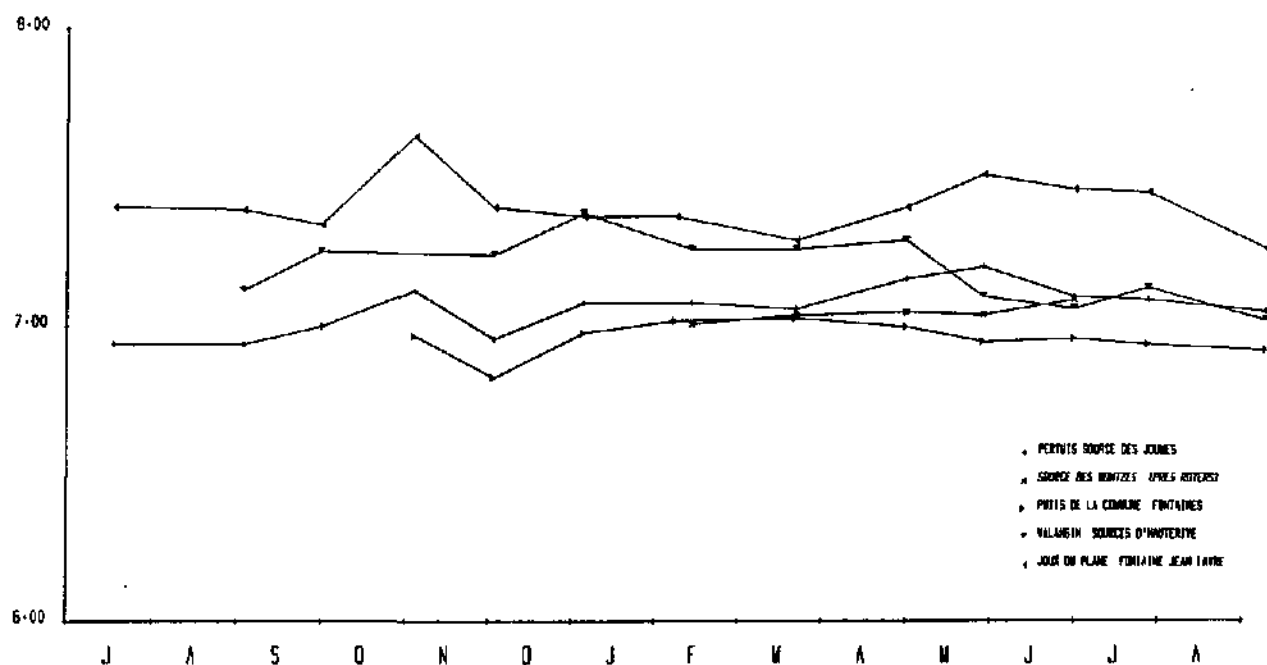


Figure IX - 4 Bassin de la Serrière et du Seyon. Température et conductibilité électrique de cinq sources crétacées durant l'année hydrologique 1969 - 1970.

Dureté totale (mgCaCO₃/l)



pH



- Puits de la Combe
- Vallée
- Jardins
- Seyon
- Serrière

Figure IX - 5

Bassin de la Serrière et du Seyon. Dureté totale et pH de cinq sources Crétacées durant l'année hydrologique 1969 - 1970.

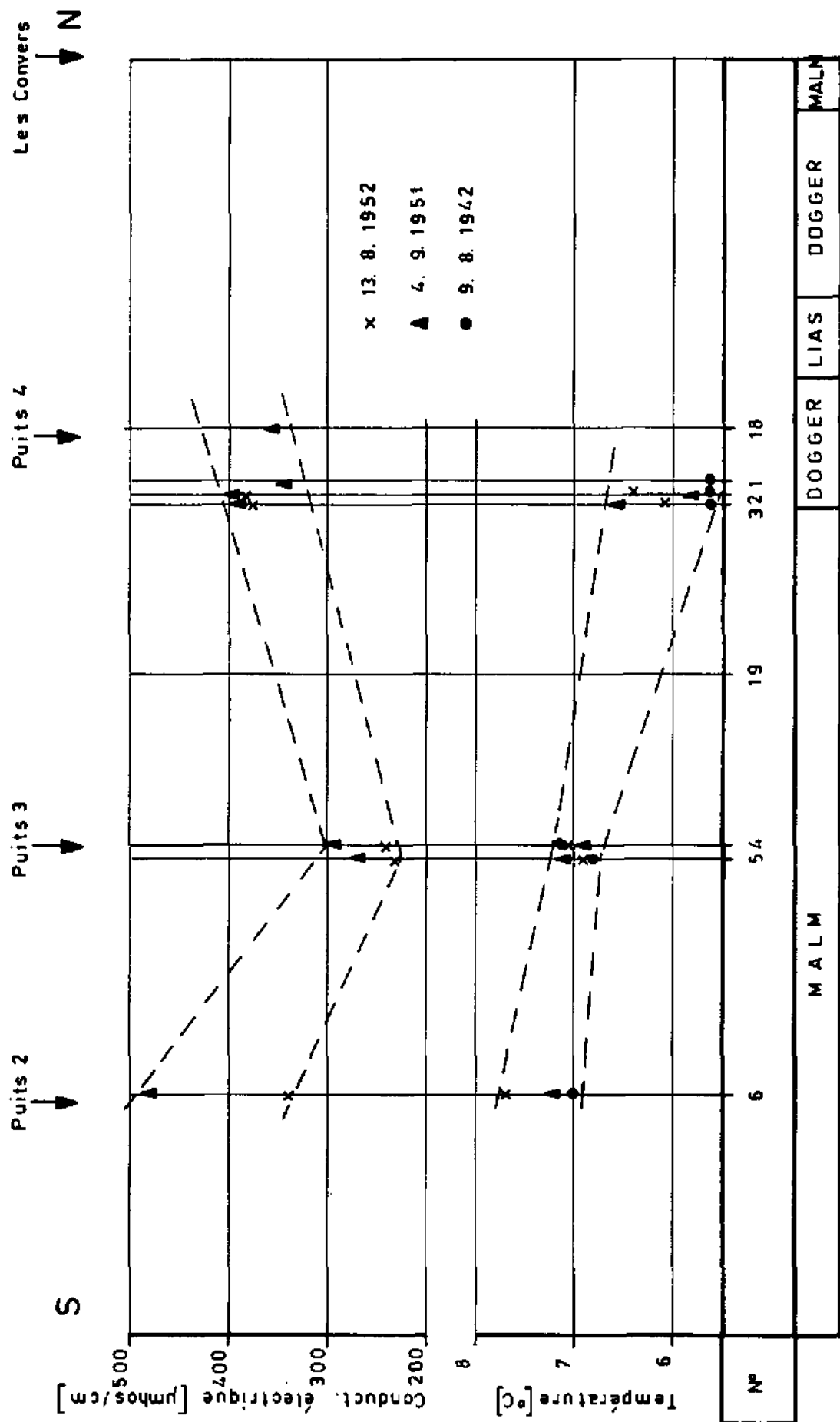


Figure IX - 6 Tunnel des Loges. Température et conductivité électrique des sources.

le débit initial correspondant toujours au maximum de la crue (Fig. IX-8). Les coefficients de tarissement décroissent de façon discontinue au cours de la décrue. Très élevés durant les 2 ou 4 premiers jours (0,618 à 0,345), ils sont généralement voisins de 0,04 après 15 à 20 jours. Observation apparemment contradictoire : le tarissement est souvent plus lent quand le débit initial est élevé, alors que c'est l'inverse qui est habituellement constaté. Si dans le cas de la décrue d'hiver la fonte retardée de la neige explique la lenteur de la décrue, ce phénomène pourrait caractériser le régime de tarissement d'un milieu karstique non saturé. On manque malheureusement de données expérimentales et les techniques de simulation de la zone non saturée en milieu hétérogène ne sont pour l'instant pas assez développées pour envisager une vérification de cette hypothèse.

Constatons cependant que l'apport de la zone non saturée à la zone noyée est permanent, même en étiage et que celui-ci agit donc toujours sur le régime de la source.

Une estimation rapide des éléments du bilan à partir des précipitations et de la température de l'air donne pour l'aire alimentaire des sources une surface comprise entre 0,15 et 0,17 km². Cette surface doit naturellement être soustraite du bassin de la Serrière au profit de celui du Seyon.

Tableau IX-II

Sources du Tunnel des Loges : situation, débit, température et conductibilité électrique.

Source No	Formation géologique	Km l) Cff	Débit l/min		Températures °C		Conductibilité électrique 10 ⁻⁶ mhos/cm	
			I	II	I	II	I	II
18	Bathonien	25,057	30	10	-	8,9	378	388
1	Bathonien	24,917	130	-	5,8	8,9	348	354
2	Bathonien	24,912	30	20	5,8	6,4	395	386
3a	Bathonien	24,830	110	4	6,6	6,1	398	382
19	Séquanien moy.	24,578	-	-	-	-	-	-
4a	Séquanien moy.	24,234	10	8	6,9	7,2	293	249
5	Séquanien moy.	24,222	-	8	7,1	6,9	268	236
6	Séquanien sup.	23,748	-	4,3	7,2	7,7	485	346

Données et numérotation : Cassier sanitaire cantonal

I 4.9.1951

II 13.8.1952

1) Portail sud km 22,508

Portail nord km 25,768

Tableau IX-III

Sources du tunnel des Loges : débits 1956 - 1957

Année	Débits (l/min)			Précipitations
	moyen	maximum	minimum	La Chaux-de-Fonds
1956	390	2400	55	1475 mm
1957	255	2600	16	1284 mm

SOURCES DU TUNNEL DES LOGES DÉBITS 1956-1957

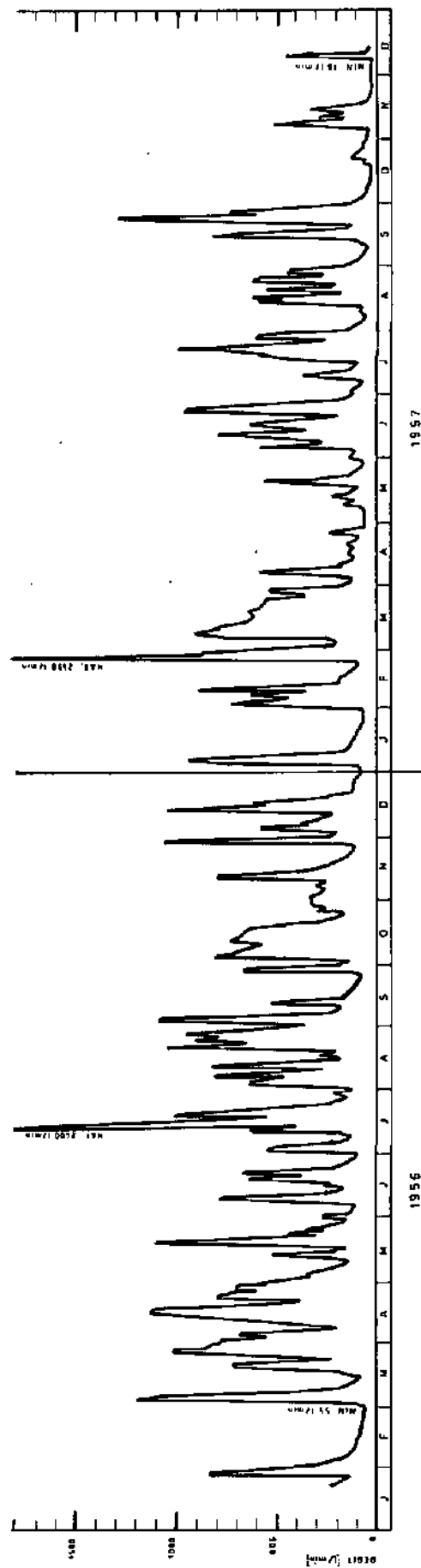


Figure IX - 7 Sources du tunnel des Loges. Débits 1956/1957.

SOURCES DU TUNNEL DES LOGES COURBES DE TARISSEMENT

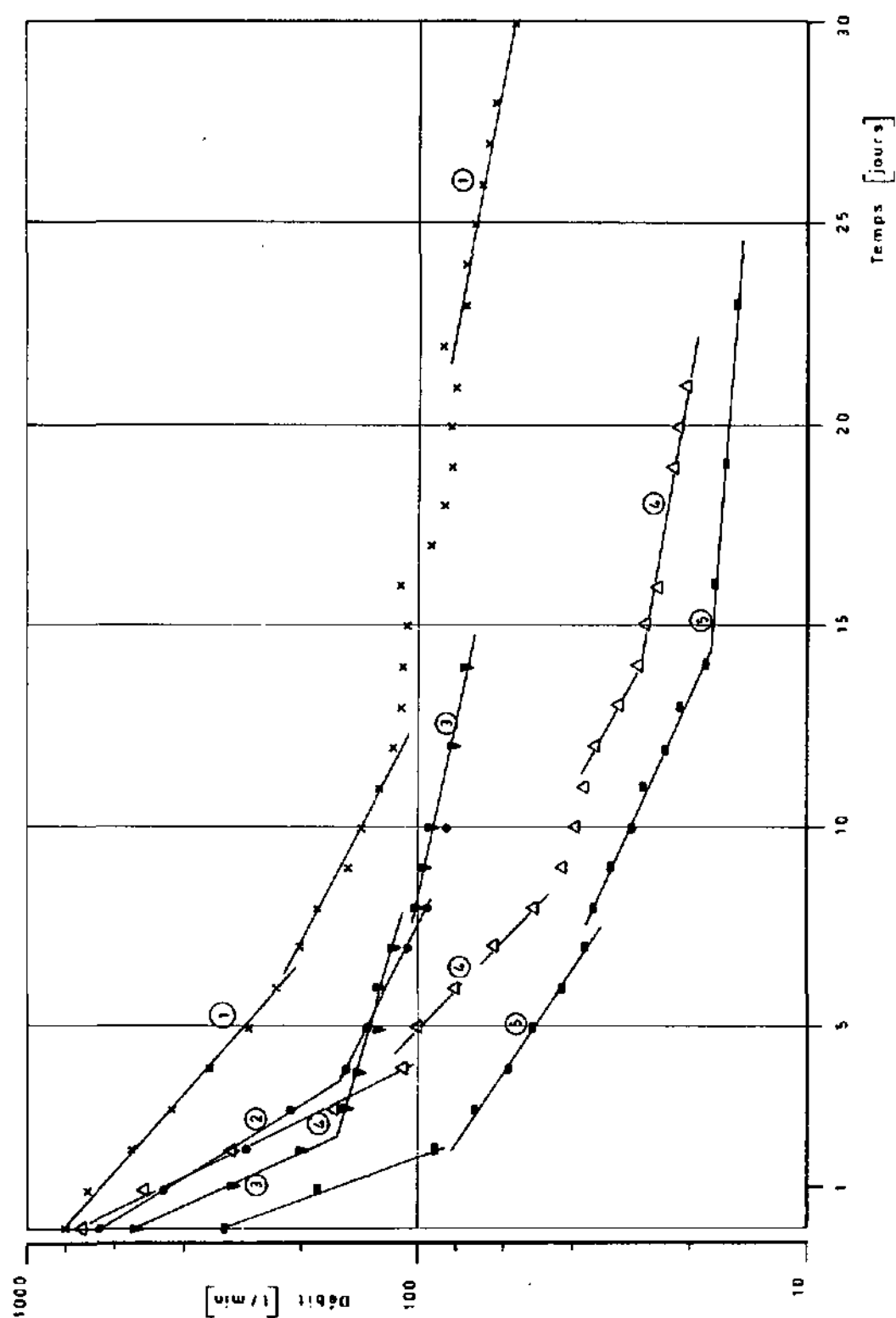


Figure IX - 8 Sources du tunnel des Loges : Courbes de tarissement.
L'identification des courbes et la valeur des coefficients
de tarissement sont donnés au tableau IX - IV.

Tableau IX-IV

Sources du tunnel des Loges - Valeur des coefficients de tarissement.

Q_1 l/s	Q_2 l/s	t jours	α	No	Date
810	230	6	0,224	1	27.1.56 - 28.2.56
230	110	6	0,122		
80	56	8	0,045		
630	175	3,8	0,345	2	21.6.56 - 1.7.56
175	95	4,2	0,145		
520	160	2,3	0,512	3	11.9.56 - 25.9.56
160	115	4,7	0,070		
100	75	6	0,047		
720	115	4	0,458	4	26.9.57 - 16.10.57
100	50	3	0,231		
35	27	2	0,129		
310	90	2	0,618	5	14.11.57 - 7.12.57
82	37	5	0,159		
35	21	5	0,102		
17,5	15	9	0,017		

4. HYDROGÉOLOGIE DES CALCAIRES DU DOGGER

4.1. Lithologie et perméabilité.

On a vu au chapitre IV la difficulté de fixer avec sûreté les limites du bassin versant de la Serrière dans le Dogger en raison de la méconnaissance du champ des pressions hydrauliques et de ses variations au sein de cette formation. Compte tenu de l'augmentation de la pluviosité avec l'altitude celle-ci représente près du 15 % de l'alimentation de la Serrière.

Le Lias constitue le socle imperméable du Dogger. Le Bejocien, puissante série calcaire se comporte comme une formation karstique. Le Bathonien, marqué par de nombreuses intercalations marneuses (marnes blanches, couches à *Ostrea acuminata*, calcaires roux sableux) est recouvert par un Cellovien calcaire. Les séquences calcaires sont karstifiables, témoin ce petit lapier que l'on observe dans une boutonnière de Grande-Dolithe à la Joux du Plâne.

Les manifestations hydrologiques dans le Dogger sont peu nombreuses et généralement liées aux niveaux peu perméables qui déterminent des systèmes d'écoulements locaux.

4.2. La Combe des Aulx.

BURGER (1959, op. cit) décrit un certain nombre de sources dans les combes des Cugnats et des Aulx à l'Ouest de Tête de Ren. A proximité du plan chevauchement de l'anticline jaillit une source temporaire bathonienne dont le débit peut atteindre 100 l/s. Un forage (~50 m) effectué à l'emplacement de la source révèle la présence d'un niveau saturé dans le Bathonien. L'examen de la figure IX-9 montre que celui-ci peut s'abaisser au-dessous du fond du forage (1120 m) en période de tarissement. Les perméabilités (non mesurées) sont de l'ordre de 10^{-7} m/s.

Les profils thermométriques (non représentés) relevés par les Services Industriels du Locle dans le cadre de l'étude hydrogéologique du bassin de la Noiraigue, ne montrent pas d'augmen-

tation significative de la température avec la profondeur, mais l'amplitude des fluctuations est importante et la moyenne très basse s'explique par l'altitude et l'exposition Nord du bassin versant (Figure IX-9).

4.3. Circulation karstique et décharge des eaux du Dogger.

Si l'alternance de niveaux perméables et imperméables favorise la création de systèmes locaux dans les régions où affleure le Dogger, la majorité des eaux d'infiltration s'écoule vers des exutoires très éloignés de la zone alimentaire. A la périphérie du bassin de la Serrière les zones de décharge du Dogger sont d'une part la zone drainante représentée par le décrochement de la Ferrière et les sources qui lui sont associées dans la région de Biaufond, voire certaines sources du vallon de St Imier (La Torrent) et d'autre part les sources jaillissant à l'aval du Plan de l'Eau sur le versant Nord des gorges de l'Areuse (altitude 690 - 720 m).

Les essais de coloration de la Combe des Aulx et des Savagnières ont cependant démontré que les marno-calcaires de l'Argovien ne formaient pas un imperméable généralisé et confirmé que la source de la Serrière représentait également une décharge du Dogger. Dans le forage de la Combe des Aulx, le niveau saturé est situé entre 1100 et 1170 mètres; dans le tunnel des Loges il est généralement inférieur à la cote des sources (~1040 mètres) grâce au drainage créé par le décrochement de la Ferrière et ses diverticulatons dans l'anticlinal entre Tête de Ran et Montperreux.

Les résultats des essais de coloration, (chapitre IV) seules informations dont on dispose sur les circulations profondes du Dogger sont contradictoires. Les vitesses y sont la plus souvent très lentes, mais l'essai des Savagnières prouve qu'en période de crue au moins il existe des chenaux à circulation rapide connectant le Malm et le Dogger.

5. HYDROGEOLOGIE DES CALCAIRES DU MALM

5.1. Bassin versant et sources.

Son épaisseur (400 - 450 m) et son extension font de cette formation l'unité hydrogéologique dominante du bassin de la Serrière. Les observations directes de la nappe sont malheureusement rares et limitées au flanc Sud de la Montagne de Chézard.

L'appartenance hydraulique des calcaires du Malm de cette région au bassin de la Serrière a été démontrée par essai de coloration. (chapitre IV).

- La source du Torrent

Source temporaire jaillissant de la couverture d'éboulis des calcaires, rarement plus d'une fois par an et durant quelques jours seulement, la source du Torrent fonctionne comme source de débordement du réseau du Malm dès que le niveau saturé s'élève au-dessus de 750 mètres d'altitude. Elle sort au moment où le débit de la Serrière dépasse 7 à 8 m³/s.

La figure IX-10 représente le débit du Torrent durant l'année 1969 - 1970 mesuré au déversoir établi sous le pont de la route cantonale Chézard - Dombresson. L'hydrogramme traduit bien le caractère de déversoir de crue de la résurgence.

Voici quelques dates récentes de sorties du Torrent :

DATE		DUREE	DEBIT MAXIMUM
Début	Fin		
21.4.1968	non contrôlé		
23.9.1968	non contrôlé		
15.3.1969	21.3.1969	7 jours	1 m ³ s ⁻¹
23.4.1969	25.4.1969	6 jours	0,9
28.4.1969	29.4.1969	2 jours	0,3
3.2.1970	5.2.1970	3 jours	1,1
18.4.1970	27.5.1970	40 jours	2,5

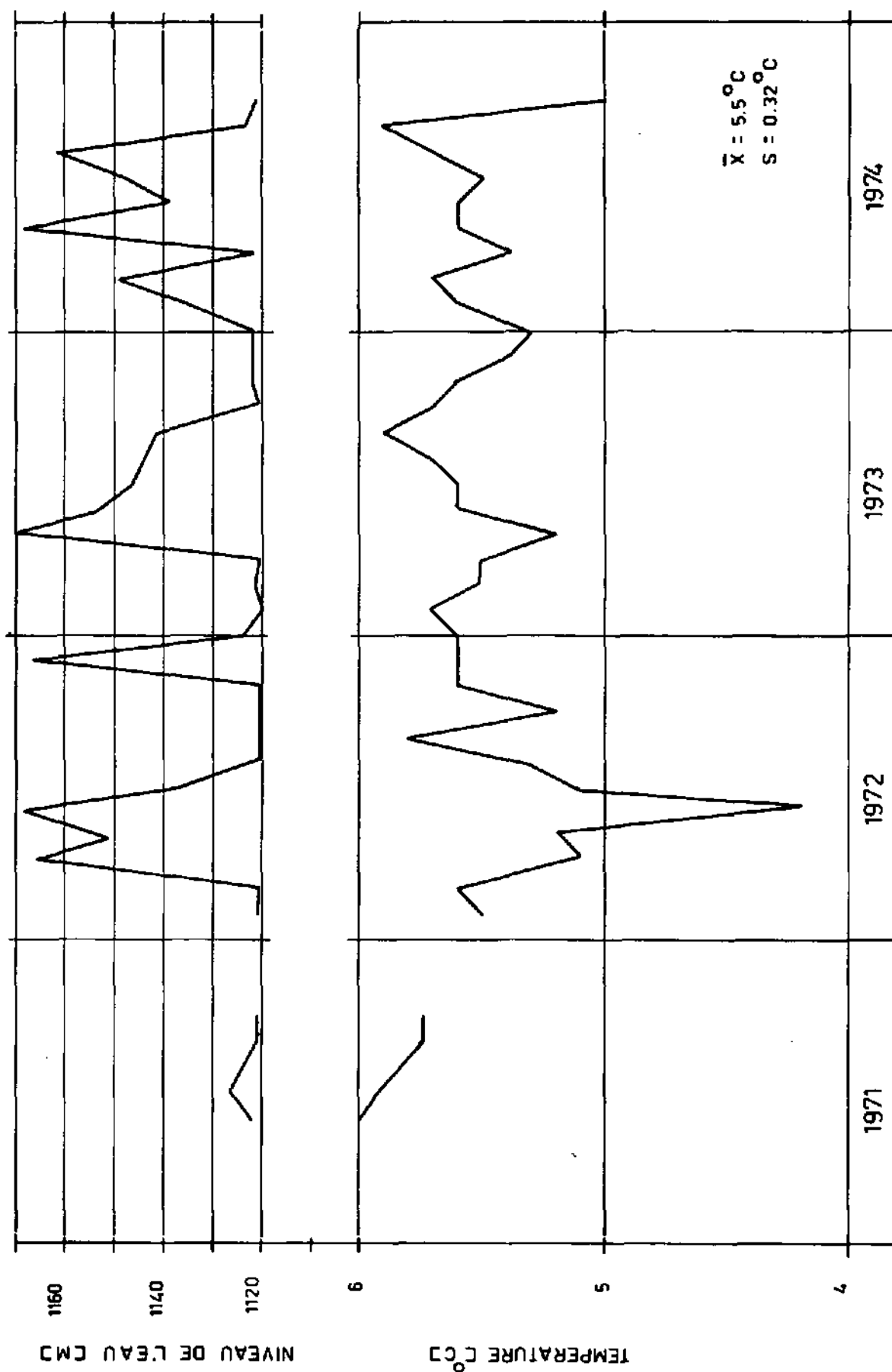


Figure IX - 9

Forage de la combe des Aulx. Niveau et température de l'eau.

En cas de crue exceptionnelle (26.4.1970), la mise en charge de l'aquifère du Malm et du Valanginien provoque la réurgence d'un grand nombre de venues karstiques, en particulier celle du Vieux Torrent à l'Ouest et au Sud de plusieurs venues dans le Valanginien. Ceci permettait de supposer que le Valanginien et le Malm ne formaient qu'une seule unité hydrogéologique, hypothèse vérifiée lors de la perforation du forage des Montres (MORNOD, 1970). Le 26 avril 1970 une source ascendante apparaissait dans la gravière maintenant comblée au SW du Torrent (562.300/213.480). Son chimisme permet de supposer qu'il s'agit également d'une venue profonde.

- La source du Taque-Mouche

Source temporaire, elle jaillit tous les 20 à 30 ans des calcaires du Valanginien d'une reculée au NW du village de Villiers (coord. 564.400/213.970, alt. ~ 775 m). Son débit ne dépasse pas quelques dizaines de litres par seconde. Sa parenté chimique avec le système Malm - Valanginien est évidente (Fig. IX-10). Elle a fonctionné quelques jours en avril 1970.

- Les sources de Cheneau

Une série de sources de débordement sur le Pürbeckien jaillissent au nord de la route cantonale au-dessus de Villiers (565.000/213.360, 785 m), en cas de crue exceptionnelle seulement (avril 1970). Leur débit total est de quelques mètres cubes par minute.

Rapportés au volume d'eau annuel moyen écoulé à Valangin, les échanges hydrauliques entre les bassins du Sayon et de la Serrière sur le flanc sud de la Montagne de Chézerd restent toutefois inférieurs au 1 % du débit du Sayon.

5.2. Perméabilité de l'aquifère du Malm.

Deux forages ont été implantés dans le Malm au cours d'une campagne de recherches hydrogéologiques menée par MORNOD (1970, op. cit.). Le forage S1 est situé à l'aplomb de la source du Torrent, le forage S2 à 350 m au sud de S1 au lieu dit "Les Montres", (Fig. XI-2). Leur profondeur vaut respectivement 300 et 372 mètres. Des essais d'injection de type Lugeon ont été effectués par passes de 5 mètres durant la perforation. (BERTRAND, MATHEY, MORNOD, 1973).

- Forage S1

La perméabilité des calcaires dans les zones peu fissurées est comprise entre 2 et $5 \cdot 10^{-7}$ m/s. Dans les zones très fissurées (-70 et -100 mètres) des essais de pompage par air lift ont montré qu'elle pouvait atteindre 10^{-2} m s⁻¹.

- Forage S2

Malgré quelques valeurs supérieures à 10^{-6} m/s la perméabilité des calcaires est assez homogène et comprise entre $2 \cdot 10^{-7}$ et $4 \cdot 10^{-7}$ m/s. Ces valeurs sont voisines de celles mesurées dans la partie profonde de S1.

Dans les niveaux peu perméables ces résultats sont du même ordre de grandeur que ceux obtenus par TRIPET (1972) dans le Malm du bassin de la source de l'Arsuaz et peuvent être étendus à l'ensemble du réservoir calcaire de la Serrière dans les zones faiblement fissurées.

La présence de deux zones très fissurées en liaison avec les conduits karstiques de la source du Torrent place le forage S1 dans une situation très particulière, démontrant ainsi la très forte hétérogénéité de la perméabilité des calcaires signalée en particulier par TRIPET (1972, op. cit.) et DROGUE (1971).

Relayons enfin que dans S1 comme dans S2 on ne distingue pas de décroissance significative de la perméabilité avec la profondeur.

5.3. Variations du niveau piézométrique.

Les variations du niveau piézométrique dans les forages S1 et S2, seule regarda sur la zone saturée du Malm du bassin de la Serrière ont été étudiées par BERTRAND, MATHEY, MORNOD (op. cit.). L'amplitude des fluctuations du niveau saturé est impressionnante et compte tenu

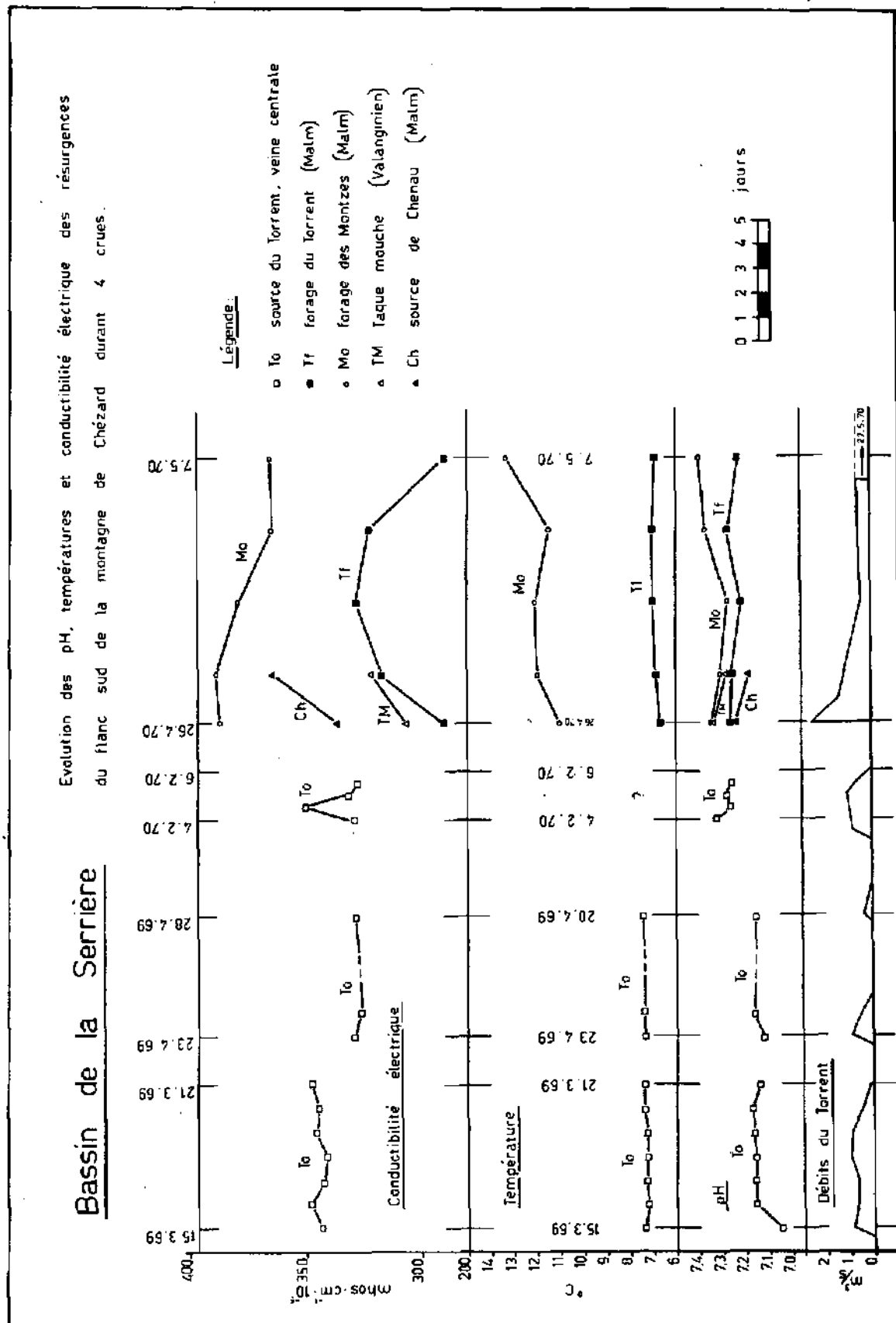


Figure IX - 10

Bassin de la Serrière : Evolution des pH, température et conductibilités électriques des résurgences du flanc Sud de la montagne de Chéizard durant 4 crues.

de l'artésianisme en période de crue, atteint 200 mètres à l'aplomb de la source du Torrent. (altitude : 600 à 800 mètres). Elle est un peu inférieure en S2.

- En période de crue le niveau de l'eau souterraine dans S1 s'élève rapidement au-dessus de S2 (écart maximum observé : 44 m).

- Au début de la décrue le niveau dans S1 descend très vite au-dessous de celui de S2, la différence de niveau pouvant atteindre 50 mètres.

- En phase de tarissement, le niveau de S2 est toujours supérieur à celui de S1 (écart ≈ 10 m), mais les deux niveaux tendront à se rejoindre.

On constate donc une inversion temporaire du gradient hydraulique entre ces deux forages situés à 150 m de distance. Ces observations s'intègrent parfaitement dans le schéma théorique imaginé par TRIPET (op. cit) et rappelé au chapitre VIII-2.4.

L'effet de l'hétérogénéité de la perméabilité est encore souligné par les différences de température entre les eaux jaillissant des deux forages au cours de la crue du printemps 1970. Si celle de S1 ne dépassait pas 7,6°C, celle de S2 atteignait rapidement 13°C.

5.4. La nappe en phase de tarissement (Malm + Valanginien)

En reportant les logarithmes des niveaux piézométriques de la nappe en fonction du temps en période de tarissement (forages S1 et S2) (Fig. IX-11) on constate qu'ils s'alignent selon des segments de droite correspondant chacun à l'équation

$$H_t = H_0 \cdot e^{-at}$$

où H_0 est l'altitude de la nappe au temps t_0

H_t " " " " " " " t

a est le coefficient de tarissement

L'altitude de la surface piézométrique est donnée par rapport au niveau de l'exutoire (ici la Serrière).

Les coefficients de décroissance sont compris entre 0,0230 et 0,0010 pour le forage des Montres (S2) et 0,0046 et 0,0023 pour le forage du Torrent (en période de tarissement avancé seulement).

L'espacement des observations ne permet pas de fixer si la décroissance de a est discrète ou continue, voire de rechercher une loi de variation de a avec le niveau ou le temps selon une méthode développée pour la source de la Serrière.

On constate cependant que le niveau de l'eau tend à se stabiliser dans S1 et S2 au voisinage de la cote 600 soit 125 mètres au-dessus du niveau de la source de la Serrière. Le gradient hydraulique entre les forages et celle-ci vaut alors 12,5‰ soit une valeur nettement plus élevée que celle observée dans le bassin supérieur de l'Areuse (2 à 5‰).

Entre Chaumont et la Montagne de Boudry l'entlinal de la première chaîne subit un abaissement axial de près de 500 mètres. Dans la zone abaissée la substratum imperméable de la nappe du Malm (Argovien) reste constamment au-dessous du niveau de la source de la Serrière. Il n'existe donc théoriquement aucun seuil justifiant ce gradient apparent trop élevé.

Si on admet que la perméabilité des réservoirs souterrains des sources de la Serrière et de l'Areuse est du même ordre de grandeur, seule une diminution de la section d'écoulement ou un accroissement des débits peut expliquer cette différence. La région comprise entre le Torrent, Villière et Savagnier correspond effectivement à une zone de concentration des filets de courant provenant de la périphérie du bassin. Une hypothèse qui n'est pour l'instant étayée par aucune donnée géologique consiste à imaginer une réduction de la section d'écoulement de la nappe du Malm par un accident tectonique longitudinal : abaissement du mur de la molasse le long d'un pli faille prolongeant le chevauchement du versant Nord de Chaumont, visible à Clémesin, en direction de Fenin et Coffrane. On aurait alors une situation géologique similaire à celle révélée par le forage des Cottards au Sud du lac des Taillères.

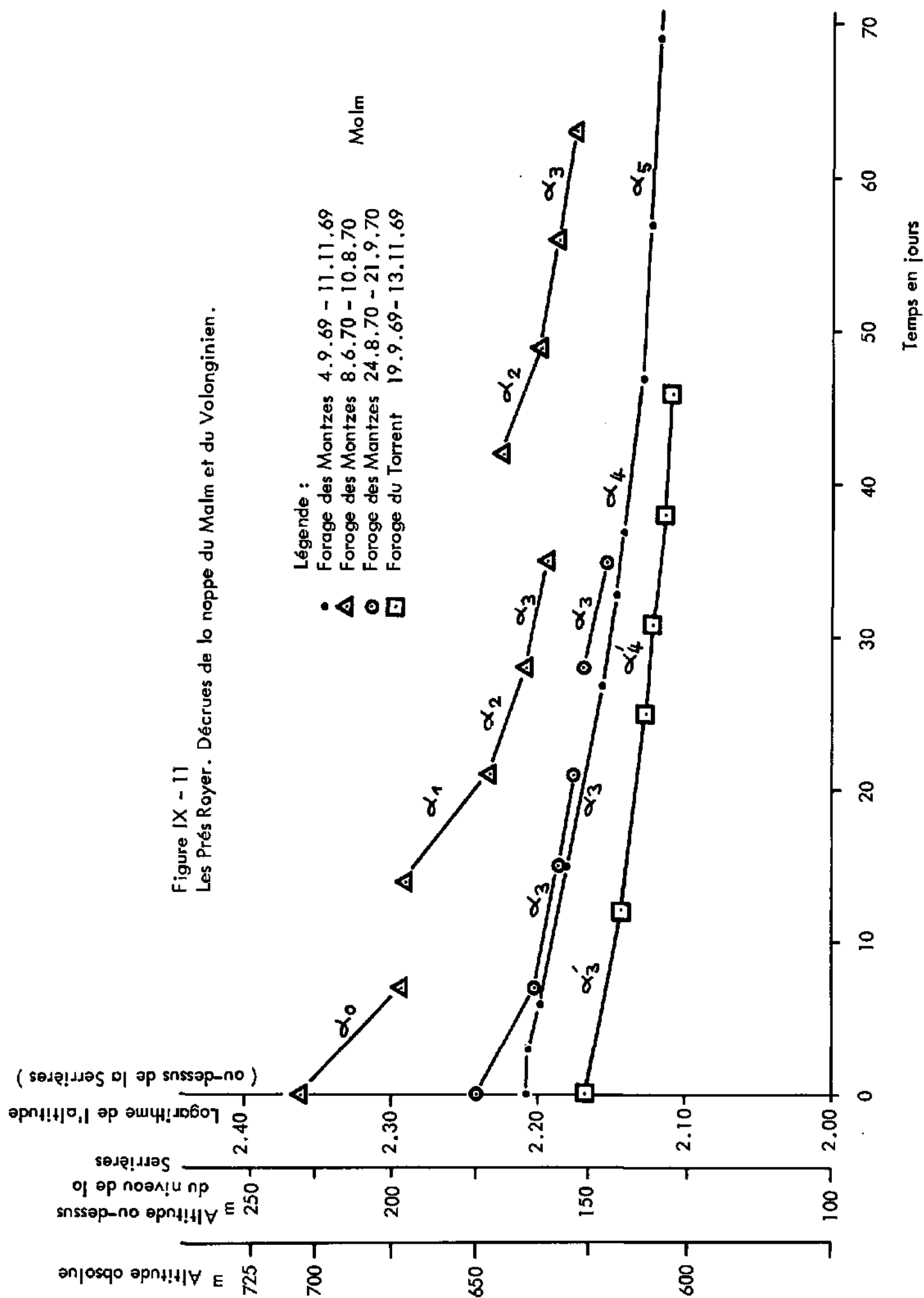


Tableau IX-V

Comparaison du contenu chimique des eaux du Malm

	Unités	La Serrière	Forage S1 (Le Torrent)		Forage S2 (Les Montres)	
Date		26.2.1969	21.11.1969	21.5.1970	23.10.1969	21.5.1970
Débit		8,5 m ³ /s	1)	300 l/min	2)	10 l/min
Température	°C	9,2°C	7,8	6,7	12,8	13,0
pH		7,5	7,3	7,75	7,95	7,8
Dureté totale	mg/l	244	240	228	246	231
Dureté temp.	"	233	238	183	235	184
Cond.él.	µmhos cm ⁻¹	400	413	283	366	320
Résidu sec	mg/l	268	300,1	-	264	-
O ₂ dissout	"	-	10,86	12,08	-	6,47
Sodium	"	-	-	0,88	1,18	-
Potassium	"	-	-	0,65	0,83	-
Chlorures	"	10	2,1	-	6,0	-
Nitrites	"	0,0	0,06	0,0	0,01	0,003
Nitrates	"	4,0	3,0	3,2	3,0	3,7
Sulfates	"	10,0	3,1	1,7	traces	3,6
Oxydabilité	"	4,99	34,2	-	8,11	-
Germe totaux	par ml	-	-	1960	-	1
Bact. coli.	"	-	-	10	-	0

1) profondeur -300 m

2) profondeur -360 m

Analyses : MORMOD (1970), Laboratoire cantonal/
Neuchâtel

Tableau IX-VI

Extension des affleurements crétacés et tertiaires dans les bassins du Seyon et de la Serrière.

Formation	Surface des affleurements	Surface des affleurements sous le quaternaire		
		Val de Ruz et Côté	Val de Ruz	Le Côté
Oligocène	0,2 km ²	26,4 km ²	inconnu	26,4
Méotivien	1,7	7,7	2,5	10,2
Valanginien	2,8	7,6	1,5	9,1

5.5. Composition chimique des eaux du Malm.

La composition chimique des eaux recueillies dans les forages profonds du Torrent et des Montres reflète bien l'hétérogénéité des vitesses de circulation dans le karst (tableau IX-V). Les eaux qui se déplacent dans le réseau peu perméable sont naturellement plus minéralisées et leur conductivité électrique est comparable à celle des eaux de la Serrière. Leur déficit en oxygène est manifeste, nitrates et sulfates y sont plus abondants. On relève l'absence de germes bactériens dans le forage des Montres.

La source de la Serrière contient davantage de sulfates et de chlorures que les eaux des forages, apport probable de la couverture quaternaire et de la molasse. Dans les forages, les teneurs en

chlorure sont particulièrement élevées au moment de la fonte des neiges.

Température, conductivité électrique et pH des réaurgences du Malm au pied de l'anticlinal des planches ont été mesurés durant plusieurs crues successives. La régularité de la température des eaux du Torrent d'une crue à l'autre est remarquable (Fig. IX-10), alors que sa conductivité varie davantage. On relèvera l'augmentation de la conductivité de la source du Torrent au début de la crue qui passe par un maximum et reprend son niveau initial au cours de la décrue. Torrent et Taque Mouche évoluent conjointement alors que les sources de Chenau ont une conductivité se rapprochant davantage de celle du forage des Montzès.

6. HYDROGEOLOGIE DES TERRAINS CRETACES

6.1. Aquifères et aquicludes.

Même si localement les marno-calcaires du Fürbeckien peuvent jouer le rôle d'un imperméable, leur épaisseur (et leur étanchéité ?) est insuffisante pour qu'ils fonctionnent comme aquiclude à l'échelle du bassin. Par conséquent et dans l'état de nos connaissances, on admettra que les calcaires du Valanginien sont hydrologiquement associés au Malm, comme on a pu l'observer dans la région du Torrent.

En revanche, l'Hauterivien supérieur grâce à son mur imperméable se comporte comme une unité hydrogéologique indépendante mais dont les échanges hydrauliques avec les formations sus et sous jacentes sont nombreux.

Une estimation de la surface d'affleurement des formations crétacées et tertiaires avec et sans couverture glaciaire est donnée au tableau IX-VI. On constate la disproportion qui existe entre les surfaces ante et post quaternaires particulièrement pour l'Oligacène et l'Hauterivien. Le bassin alimentaire réel des calcaires hauteriviens est toutefois délicat à estimer : la couverture glaciaire est généralement imperméable et intercepte les eaux météoriques; dans d'autres cas comme au SW de Coffrane, les eaux qui s'infiltrent dans la marne graveleuse atteignent la molasse puis s'écoulent vers le bordure du synclinal où elles peuvent se décharger dans l'Hauterivien.

Dans les bassins de la Serrière et du Seyon les sources purement hauteriviennes sont rares et la somme de leur débit ne représente qu'une fraction des eaux qui transitent par cette formation. Un exemple en est donné par les sources d'Hauterive à Valangin (chap. IX-7).

6.2. Région de Fontaines.

6.2.1. Situation.

Le puits de la commune, situé à proximité du centre du village et profond de 23 mètres est arrêté sur les calcaires hauteriviens. Son régime hydrologique (fortes variations du débit et des niveaux) permet de penser qu'il est alimenté en grande partie par cette formation.

A la suite d'une campagne de recherches géophysiques deux forages ont été implantés, l'un 50 mètres au Nord du puits (forage Zbinden), le second à la Longe Maule (tableau IX-VII). Peu après la perforation du toit des calcaires à la Longe Maule, le niveau de l'eau est brutalement remonté dans le forage, avec un débit estimé alors à 35 litres par minute indiquant le caractère captif de la nappe des calcaires hauteriviens. Dans le forage Zbinden le niveau de l'eau était situé à -9,5 m donc non captif en raison du rebattement provoqué par le puits de la Commune.

6.2.2. Essais de pompage.

Deux essais de pompage ont été réalisés dans le forage de la Longe Maule, l'un à débit constant, l'autre à niveau constant (Fig. IX-12). Les conditions imposées pour le calcul de la perméabilité sont :

FONTAINES PUIITS DE LA LONGE MAULE

Figure IX - 12 Fontaines, puits de la Longe Maule. Essai de pompage du 10.6.1975.

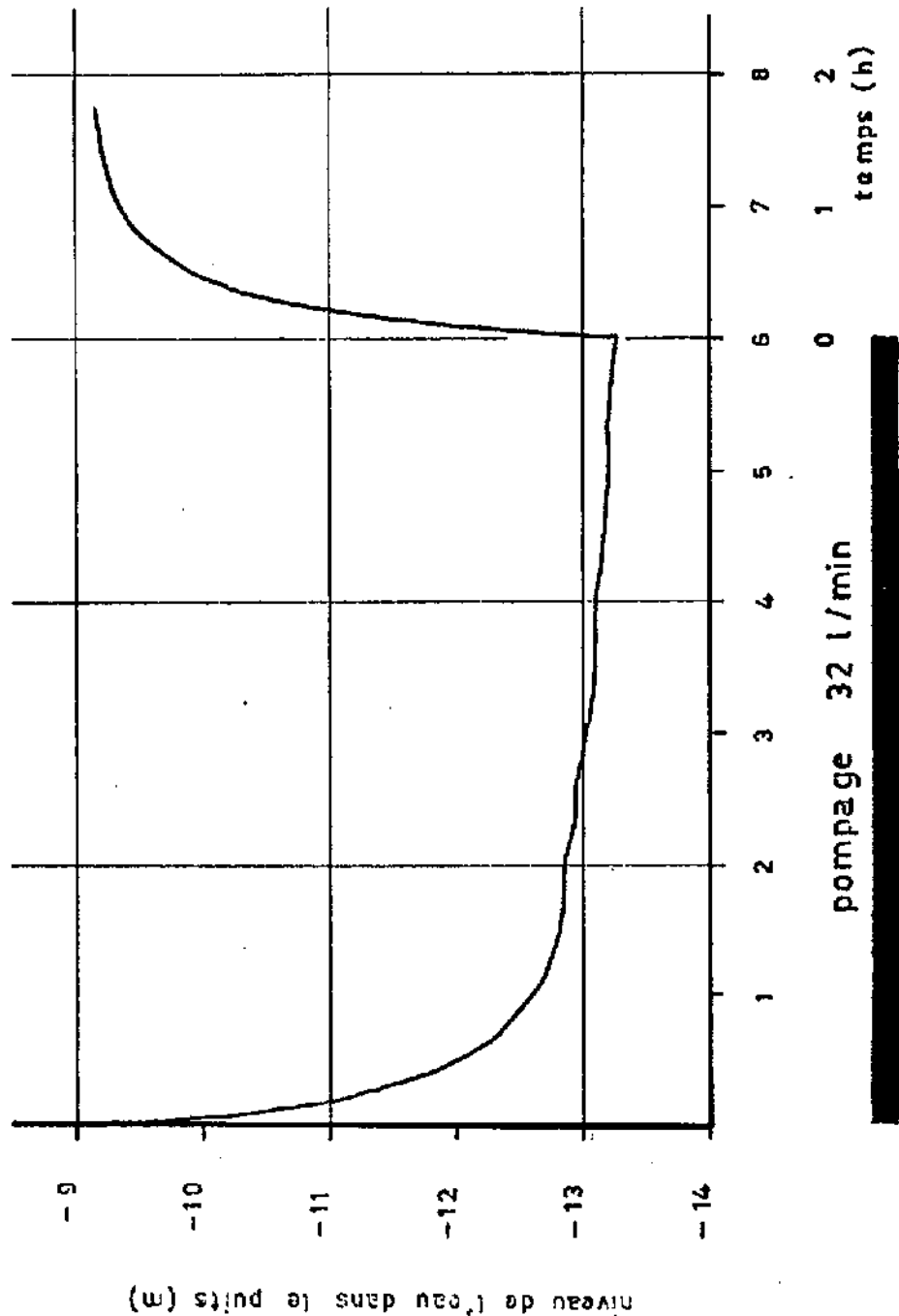
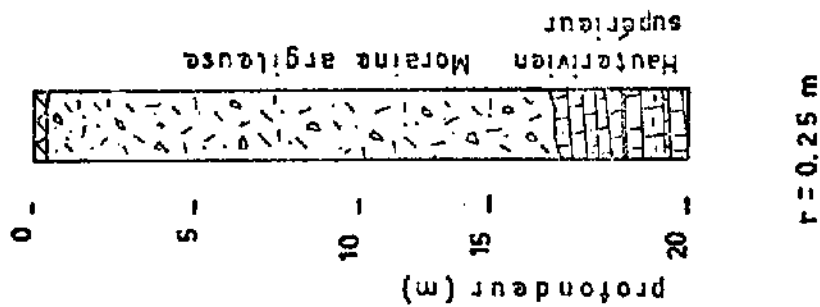


Figure IX - 12 Fontaines, puits de la Longe Maule. Essai de pompage du 10.6.1975.



- l'aquifère est captif
- la puits est incomplet
- on ne dispose pas de piézomètre de contrôle
- il n'y a pas de véritable stabilisation du niveau

Pour l'interprétation en régime permanent deux formules ont été retenues qui respectent les trois premières conditions (KRUSEMAN et RIDDER, 1970)

$$1) K = \frac{Q}{\Delta} \cdot 0,37 \frac{\log 4L / 2r}{L} \quad (\text{Théodosiadis})$$

$$\text{avec } L = 4 \text{ m} \quad r = 0,25 \text{ m} \quad Q = 5,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \quad \Delta = 4,3 \text{ m}$$

on trouve $K = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$

$$2) K = \frac{1}{C_g \cdot r} \cdot \frac{Q}{\Delta} \quad (\text{Zanger})$$

$$\text{avec } C_g = 3,30 \quad \text{et } r = 0,25$$

on trouve $K = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ cette valeur étant nettement surestimée

En régime non permanent l'interprétation est plus délicate puisque aucune formule à notre connaissance ne s'adapte parfaitement à ce cas. Deux formules ont été utilisées :

$$1) T = \frac{Q}{4\pi\Delta} \cdot W(u, r/L) \quad S = \frac{4 T t U}{r^2} \quad (\text{puits complet, aquifère semi-captif})$$

on trouve pour la courbe d'abaissement du 1er essai

$$T = 2,37 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \quad \text{avec } r/L = 0,4$$

et pour la courbe de remontée du second essai

$$T = 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \quad \text{avec } r/L = 0,4$$

L'absence de piézomètre ne permet pas de calculer véritablement le coefficient d'emmagasinement et la valeur de la perméabilité de la couche semi-perméable (ici la quaternaire).

2) Méthode du point d'inflexion (puits complet, aquifère semi-captif)

$$p = 1/2 \quad \Delta m = \frac{Q}{4\pi K a} K_0\left(\frac{r}{L}\right) \quad \text{avec } T = K \cdot a$$

On trouve pour la courbe d'abaissement du premier essai :

$$T = 8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \quad r/L = 0,19$$

L'ensemble des résultats révèle que la transmissivité des calcaires est probablement voisine de $5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ et la perméabilité de $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$.

6.3. Région des Prés Royer.

6.3.1. Bassin versant et sources.

La surface alimentaire des calcaires hauteriviens entre Chézard et Villiers est comprise entre 0,5 et 0,8 km² mais on a vu qu'il est difficile d'estimer l'apport de la couverture quaternaire. En période de crue la décharge de l'hauteurivien se manifeste par des venues d'eau dispersées dans les champs au sud de la route Chézard - Dombresson de part et d'autre du Torrent, la décharge ponctuelle étant représentée par la source temporaire des Montzas (coord. 562.235/213.175, alt. 720,9 m)

Lorsque celle-ci tarit, généralement au début de l'été, la vidange des calcaires hauteriviens devient totalement souterraine et se réalise essentiellement vers la couverture quaternaire. (nappes artésienne et phréatique : chapitre XI).

6.3.2. Fluctuations de la surface piézométrique.

L'existence d'une zone saturée dans l'Hauterivien supérieur dans la région des Prés Royer a été mise en évidence par les forages S2 (Les Montres : coord. 562.405/213.300 alt. 728 m) et S3 (Les Prés Royer : 562.460/212.075 alt. ~ 722 m) (MORNOD 1970 op. cit.).

Dans S3 la nappe de l'Hauterivien est en charge sous la molasse avec un léger artésianisme en surface, dont on ne connaît pas les fluctuations saisonnières. Dans le forage des Montres les fluctuations naturelles de la surface piézométrique sont comprises entre les cotes 728 m et 717 m mais celle-ci peut s'abaisser au-dessous de la cote 716 m lorsque la nappe artésienne quaternaire est exploitée. En période de crue l'eau peut déborder du forage et dépasser la cote 728 m.

La figure IX-3 représente la nappe de l'Hauterivien en phase de tarissement au cours de 3 décrues dont 2 durant l'exploitation de la nappe artésienne. On constate que l'exploitation de la nappe artésienne (ici un pompage dans la fouille du chantier de la station d'épuration) accélère l'abaissement du niveau dans le forage des Montres et constitue la preuve d'une liaison hydraulique entre les 2 aquifères.

La complexité de cette liaison est toutefois soulignée par la contradiction entre les niveaux des nappes en présence. Si le niveau de la nappe artésienne en régime non influencé oscille entre 725 et 730 mètres, celui de la nappe hauterivienne aux Montres lui est toujours inférieur (717 à 728 m). Il est probable que cette dernière se décharge à la fois dans la nappe phréatique dans la région des Montres et dans la nappe artésienne plus à l'Ouest. L'hypothèse d'une alimentation de la nappe hauterivienne à partir du versant Nord de l'anticlinal de Chaumont peut être écartée car elle serait en contradiction avec les données hydrochimiques. (absence de sulfates en particulier)

6.3.3. Perméabilité de l'aquifère hauterivien.

Des essais d'injection de type Lugeon ont permis à MORNOD (1970 op. cit) de mesurer la perméabilité des formations secondaires aux Prés Royer (tableau IX-VII).

Tableau IX-VII

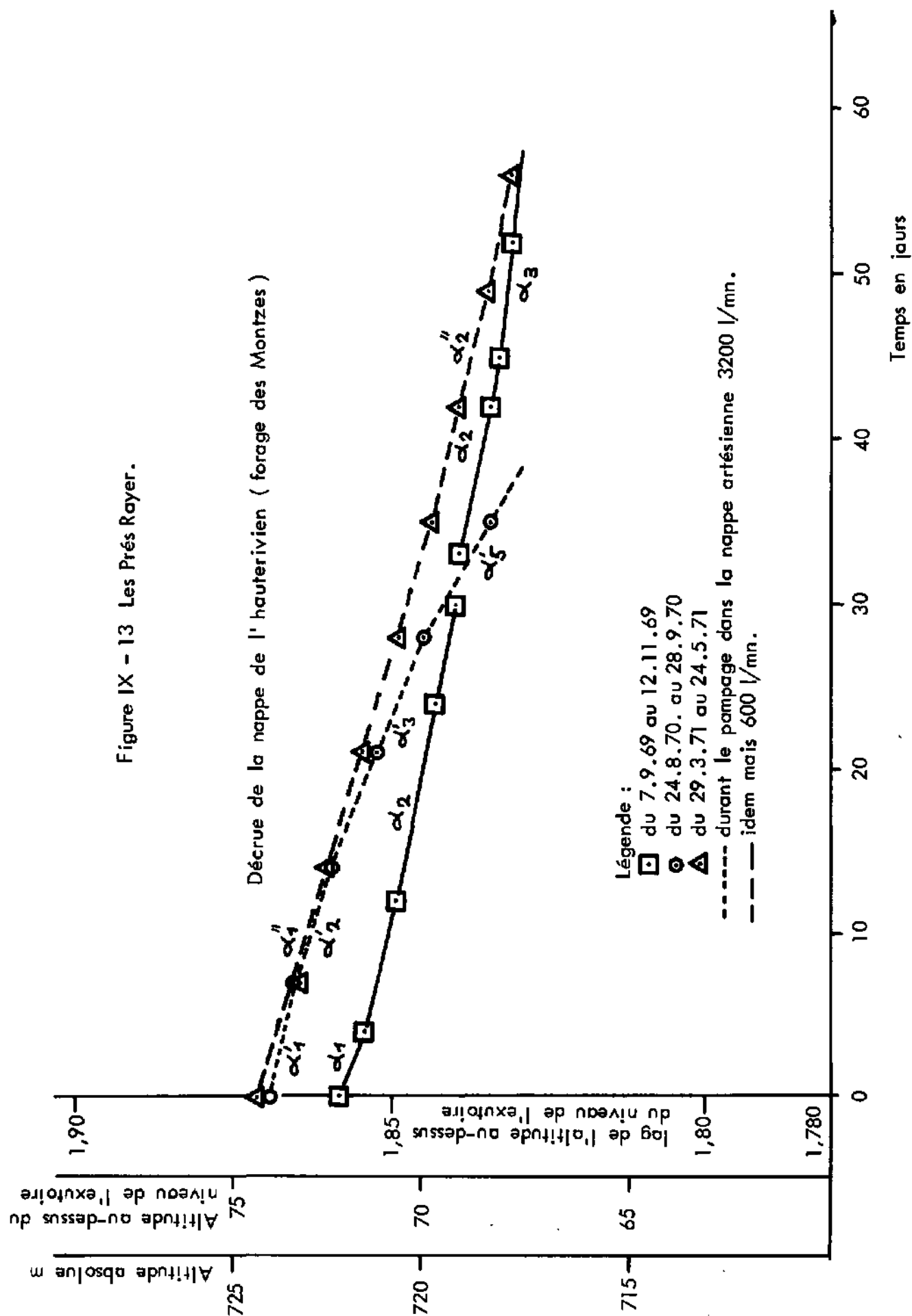
Perméabilités mesurées dans le forage des Montres.

Formation	Perméabilité (10^{-7} m s^{-1})		
	maximum	minimum	moyenne
Hauterivien calcaire	35,0	0,85	5,9
Hauterivien marneux	absorption nulle		
Valanginien	10,0	3,3	6,3
Pürbeckien	4,6	3,5	4,3 1)

1) non représentatif de l'ensemble de la formation.

Le forage des Montres, tant pour la partie crétacée que pour le Malm sous jacent (chap. IX-5.2) était manifestement implanté dans une région peu karstifiée. Son approfondissement ultérieur s'est d'ailleurs traduit par une nette diminution de sa transmissivité.

Figure IX - 13 Les Prés Rayer.



6.4. Le synclinal du Côté.

Si l'imperméabilité des marnes hauteriviennes était partout effective, la décharge de l'Hauterivien supérieur se manifesterait par une résurgence pérenne à l'entrée Nord de la cluse de Chenau, au voisinage de la cote 860, ce qui à notre connaissance n'a jamais été observé, même en période de crue. Il existe donc quelque passage préférentiel au travers des marnes qui permet la décharge de la nappe vers le Valanginien et la Malm. Un forage profond de 30 mètres, implanté au cœur du synclinal, 1000 mètres à l'Ouest de la Croix (564.060/216.040) sur les conseils d'un sourcier, a rencontré les calcaires Hauteriviens sous 9 mètres de marnes.

En janvier 1959, le niveau saturé était situé à la cote 870 (-12 mètres), mais la très faible perméabilité des calcaires n'a pas permis l'exploitation ultérieure de l'esquifère. Un forage dans le prolongement de la cluse de Chenau où on peut espérer rencontrer une perméabilité plus élevée donnerait d'utiles informations sur les niveaux de l'eau dans la Malm et le Crétacé, et permettrait peut-être d'accroître les ressources en eau de cette région.

6.5. Hydrochimie et bactériologie.

L'eau des calcaires hauteriviens du versant Nord du synclinal du Val de Ruz se distingue par une minéralisation plus élevée que les eaux du Malm et souvent des nappes quaternaires (tableau IX-VIII).

Les déficits en oxygène y sont également plus élevés. A Fontaines la sous-alimentation du puits communal par l'Hauterivien est confirmée par une minéralisation élevée en étiage. A la Longe Maule les teneurs en fer et en manganèse un peu supérieures aux normes admises pour des eaux de boisson laissent supposer que les vitesses de circulation sont faibles. Les résultats des analyses du forage et de la source des Montres sont comparables, ce qui confirme que la source représente bien la décharge des calcaires.

Sous la molasse, les eaux de l'Hauterivien retrouvées par le forage 53 présentaient une minéralisation extrêmement élevée. A 160 et 180 mètres de profondeur le résidu sec des eaux rencontrées était respectivement de 2044 et 2112 mg/l avec de très fortes teneurs en Na^+ et Ca^{++} (MORNOD 1970, op. cit). La contamination de l'esquifère par des eaux de la molasse est évidente mais on peut s'étonner que les teneurs s'accroissent avec la profondeur et soient plus élevées que dans la molasse elle-même.

La composition chimique des sources d'Hauterive à Valangin ne permet pas de les rattacher avec certitude au système hauterivien. L'évolution saisonnière de la température, de la conductibilité électrique, du pH et de la dureté totale est donnée aux figures IX-4 et IX-5.

On ne dispose pas d'analyses systématiques du contenu bactériologique des eaux de l'Hauterivien supérieur. A Fontaines les eaux du puits sont fréquemment souillées mais probablement par des infiltrations proches du puits.

A la Longe Maule les résultats bactériologiques traduisent la contamination des eaux par les travaux de forage. L'eau de la source des Montres contenait le 26 février 1969 un nombre réduit de germes et aucun colibacille (MORNOD 1970, op. cit).

7. LES SOURCES DE LA COMMUNE D'HAUTERIVE A VALANGIN

7.1. Captages et sources.

L'entrée de la cluse du Seyon constitue le point topographiquement le plus bas des affleurements de l'Hauterivien supérieur du Val de Ruz. Si l'imperméabilité des marnes hauteriviennes était totale on devrait donc y trouver une ou plusieurs résurgences importantes. Plusieurs sources totalisant près de 500 litres par minute en étiage jaillissent effectivement dans cette région mais on verra qu'elles ne peuvent être totalement attribuées à cette formation. Le premier groupe est constitué par les sources de la commune de Valangin qui jaillissent entre

660 et 685 mètres des graviers morainiques en contact de la moraine argileuse voire de la molasse. (Fig. IX-14). Ce sont les sources des Huitains du Haut (559.300/207.090, 682 m) au débit compris entre 25 et 100 litres par minute et les sources des Huitains du bas constituées par 3 venues distinctes : supérieure (559.330/207.090, 679 m) médiane (559.380/207.120, 668 m) et inférieure 559.405/207.035) dont le débit total est compris entre 90 et 200 litres par minute. Les sources des Huitains du bas alimentent actuellement la commune d'Hauterive.

Le second groupe comprend les eaux captées par drainage dans le moraine dans l'ancien lit de la Sorge à l'Ouest de la colline du Château. Ce sont les sources du Verger des Pontins (559.480/207.210, 660 m) dont le débit est compris entre 50 et 150 litres par minute.

Le troisième groupe est constitué par les captages de l'Ancienne Teinturerie qui recueillent par drainage les eaux qui jaillissent sur la rive droite du Seyon au pied de la falaise hauterivienne dont elles sont apparemment issues. On distinguera les nouvelles sources captées en 1943 (8a, 8b, 8c) des sources anciennes (3a, 3b, 3c) (Figure IX-14).

Notons que des observations répétées n'ont pas permis de mettre en évidence des venues karstiques dans le lit du Seyon à proximité des marnes hauteriviennes. On relève également la situation anecdotique des captages : la commune d'Hauterive située sur le stratotype de l'Hauterivien est alimentée en eau par des sources qui jaillissent pro parte de l'Hauterivien à proximité du stratotype du Valanginien.

Tableau IX-VIII

Contenu chimique des eaux de l'Hauterivien supérieur à
Fontaines et aux Prés Royer.

PARAMETRE	UNITE	LONGE MAULE (-16 m)	MONTZES (-38 m)	PRES ROYER (53)		
				-160 m	-180 m	-48 m molasse
Date		13.6.1975	17.10.1968	26.2.1969	18.3.1969	16.10.1968
Température	°C	9,1	7,0	6,0	7,4	9,5
pH		7,02	7,45	8,8	8,35	7,5
K ₂₀ °C	µmhos cm ⁻¹	374	525	2200	2300	1320
Dureté totale	mg/l	224	319	480	501	9000
Dureté temp.	"	202	310	112	120	220
O ₂ dissout	"	6,1	-	-	-	5,23
Chlorures	"	3,0	13,0	8,0	5,0	2,0
Nitrites	"	0,022	0,2	0,1	0,002	0,005
Nitrates	"	7,6	10	<0,1	<0,1	2,0
Sulfates	"	0,00	<0,1	1310	-	875
Oxydabilité	"	4,55	8,7	3,74	4,75	3,79
Germe tot.		7200	-	140	-	20
Bact. cell.		3000	-	0	-	0

Analyses : Laboratoire cantonal,
MORNOD (1970)

7.2. Régime des sources.

Le débit des sources relevé 2 fois par mois d'août 1966 à mai 1967 par le Service des Ponts et Chaussées est d'une régularité remarquable pour des eaux en relation avec les calcaires. (tableau IX-IX.) Les sources 1 et 3a ont les écarts-types de débit les plus élevés, mais les sources placées

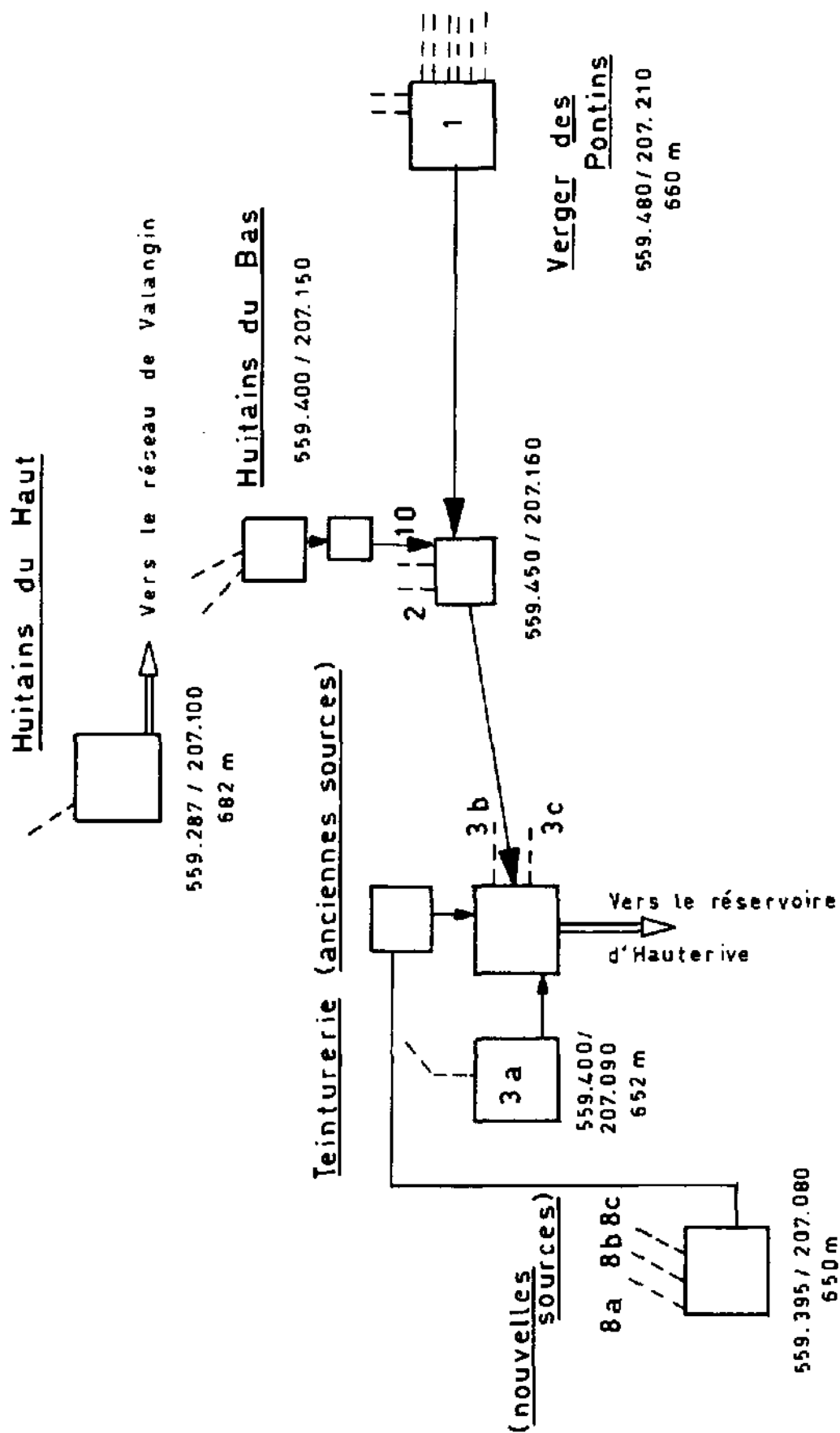


Figure IX - 14

Sources d'Hauterive à Valangin. Situation schématique des captages.

Tableau IX-IX

SOURCES D'HAUTERIVE A VALANGIN DEBITS 1966-1967 en l/min

DATE	SOURCE 1	SOURCE 3c	SOURCE 3b	SOURCE 3a	SOURCE 8c	SOURCE 8b
19. 8. 1966	108.00	39.00	85.00	12.00	76.00	35.00
2. 9. 1966	104.00	37.00	84.00	10.00	80.00	35.00
23. 9. 1966	106.00	36.00	82.00	9.00	79.00	34.00
7. 10. 1966	103.00	38.00	82.00	10.00	83.00	35.00
21. 10. 1966	98.00	36.00	82.00	9.00	83.00	35.00
4. 11. 1966	102.00	38.00	82.00	10.00	82.00	35.00
18. 11. 1966	104.00	37.00	82.00	11.00	82.00	35.00
2. 12. 1966	118.00	41.00	88.00	11.00	88.00	37.00
16. 12. 1966	160.00	46.00	92.00	24.00	93.00	38.00
30. 12. 1966	171.00	48.00	98.00	41.00	95.00	39.00
13. 1. 1967	141.00	46.00	92.00	25.00	88.00	38.00
27. 1. 1967	154.00	54.00	107.00	55.00	98.00	41.00
10. 2. 1967	138.00	45.00	95.00	23.00	94.00	36.00
24. 2. 1967	190.00	47.00	97.00	30.00	91.00	37.00
3. 3. 1967	154.00	47.00	97.00	32.00	90.00	36.00
17. 3. 1967	148.00	49.00	98.00	28.00	94.00	36.00
31. 3. 1967	143.00	44.00	97.00	30.00	90.00	37.00
14. 4. 1967	129.00	43.00	92.00	23.00	90.00	37.00
28. 4. 1967	114.00	40.00	90.00	18.00	86.00	37.00
12. 5. 1967	108.00	40.00	88.00	19.00	86.00	37.00
MAXIMUM	171.00	54.00	107.00	55.00	98.00	41.00
MINIMUM	98.00	36.00	82.00	9.00	76.00	34.00
MOYENNE	127.45	42.45	90.50	21.50	87.40	36.50
ECART TYPE	23.95	5.19	7.20	12.27	9.97	1.67

SOURCES D'HAUTERIVE A VALANGIN DEBITS 1966-1967 en l/min

DATE	SOURCE 8a	TOTAL
19. 8. 1966	68.00	409.00
2. 9. 1966	67.00	401.00
23. 9. 1966	67.00	393.00
7. 10. 1966	68.00	400.00
21. 10. 1966	68.00	388.00
4. 11. 1966	66.00	389.00
18. 11. 1966	67.00	392.00
2. 12. 1966	70.00	431.00
16. 12. 1966	73.00	509.00
30. 12. 1966	76.00	537.00
13. 1. 1967	74.00	474.00
27. 1. 1967	79.00	553.00
10. 2. 1967	74.00	473.00
24. 2. 1967	76.00	511.00
3. 3. 1967	77.00	511.00
17. 3. 1967	75.00	509.00
31. 3. 1967	75.00	495.00
14. 4. 1967	73.00	469.00
28. 4. 1967	72.00	438.00
12. 5. 1967	72.00	430.00
MAXIMUM	79.00	553.00
MINIMUM	66.00	388.00
MOYENNE	71.85	455.70
ECART TYPE	3.95	54.70

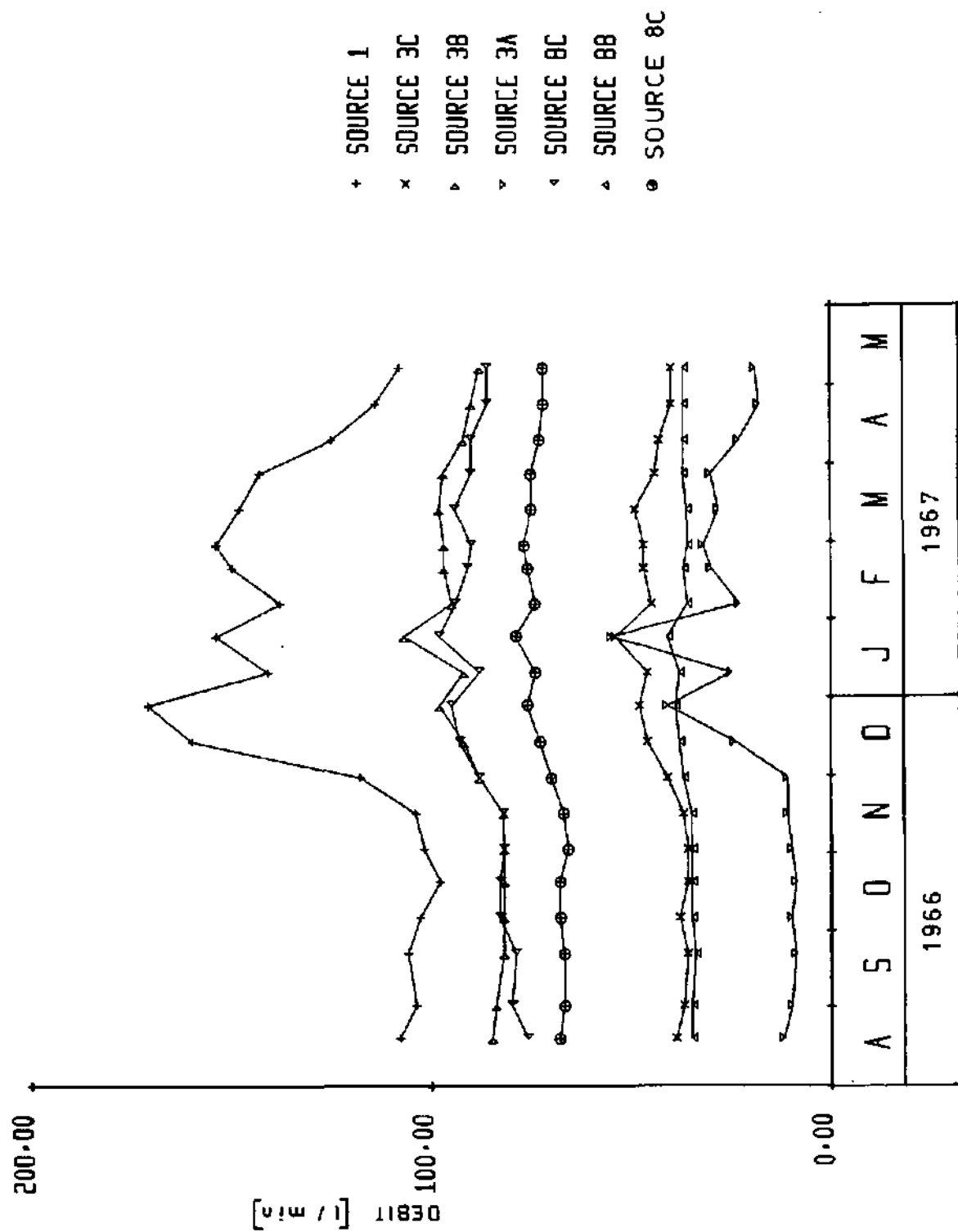


Figure IX - 15 Sources d'Hauterive à Valangin. Débits 1966 - 1967

topographiquement le plus haut ne présentent pas la régime de source de débordement. La stabilité des débits des sources 3a, 3b, 3c et 8a, 8b, 8c dont l'alimentation par les calcaires hauteriviens est certaine implique l'existence d'un niveau saturé dans les calcaires et un coefficient d'emmagasinement relativement élevé pour cette formation.

La matrice des coefficients de corrélation (tableau IX-X) établie en vue de détecter des différences significatives entre le régime de chacune des sources n'apporte pas les renseignements que l'on pourrait attendre sur leur origine. Les débits des sources 3b et 3c sont bien corrélés entre eux et avec la source 8a. Les venues 8b et l'ensemble des sources 1 ont des régimes plus autonomes.

7.3. Hydrochimie.

Le contenu chimique est souvent révélateur du trajet souterrain des eaux et permet d'en distinguer l'origine. Le contenu bicarbonaté des sources karstiques est généralement plus bas que celui des sources qui jaillissent du quaternaire. C'est pour cette raison que RITTER, MOTZ et SCHARDT (1901) admettaient à partir d'une seule série d'analyse de la dureté que les sources du Verger des Pontins s'apparentaient aux sources 3a, 3b, 3c et 8a, 8b, 8c, auxquelles ils attribuaient une origine karstique. L'interprétation des analyses effectuées par le laboratoire cantonal en 1971 - 1972 (Figure IX-16, tableau IX-XI) exige une interprétation plus nuancée. Si la source 3a dont on sait que le captage est placé en contact de la barre hauterivienne, possède une minéralisation nettement plus faible, celle des sources 3b, 3c, 8a, 8b, 8c captée dans la moraine à proximité des calcaires garde la trace d'un passage au travers des sédiments quaternaires. La minéralisation plus élevée des sources du Verger des Pontins, qui s'apparente davantage à celle de la source des Huitains du bas, infirme les conclusions de ces auteurs et dans l'état actuel de nos connaissances ne nous permet pas de décider si celles-ci sont sous-alimentées par les calcaires.

Les teneurs en potassium (tableau IX-XII) indiquent plutôt une origine karstique. Faibles teneurs pour les groupes 3 et 8 avec un minimum pour 3a, teneurs moyennes pour les sources des Huitains et du Verger des Pontins mais qui restent nettement inférieures à celles de la nappe de Bussy - Sorgeraux. Les sources de Biolley et de l'Ancienne lessiverie, aux besoins alimentaires limités et proches de la surface ont des teneurs en K^+ très basses alors que leur minéralisation est élevée. Il semble donc que la mise en solution du potassium est lente et donne pour les terrains quaternaires un bon indice du temps de séjour de l'eau.

Le calcul de la matrice des coefficients χ^2 appliqué aux conductibilités électriques (tableau IX-XII) constitue une dernière tentative pour séparer les diverses venues. En effet le test de χ^2 en comparant les fréquences des distributions observées permet de décider si celles-ci diffèrent significativement. Lorsque les valeurs du test sont proches de 0, celles-ci sont identiques et elles diffèrent significativement lorsqu'elles dépassent une valeur théorique qui est fonction du degré de liberté.

Si dans l'ensemble les résultats ne permettant pas de séparer les sources par leur conductibilité électrique on constate que celles du Verger des Pontins se distinguent nettement par des valeurs élevées. Les sources 3a, 3b, 3c ont une distribution identique et la source des Huitains du Bas (10) s'apparente davantage au groupe 8.

7.4. Bassin alimentaire et bilan hydrologique.

L'étude du régime physico-chimique des sources d'Hauterive et des Huitains révèle que celles-ci sont alimentées pro-parte par le quaternaire et l'Hauterivien supérieur. Il est toutefois délicat de fixer quelle part du contenu chimique s'est fixé à proximité de l'exutoire (le plus souvent quaternaire), dans l'aquifère lui-même (hauterivien et quaternaire) ou à proximité de la zone d'infiltration (le plus souvent quaternaire). En effet une fraction (qui reste à estimer) des eaux qui s'infiltrant dans les moraines gravelluses au Sud de Coffrane passe dans les calcaires hauteriviens puis s'écoule soit vers la Serrière, soit vers Valangin. Une campagne d'essais de traçage permettrait de mieux définir les limites exactes des bassins versants, y compris celui de la nappe de Bussy - Sorgeraux.

Le rôle drainant des calcaires hauteriviens entre Serroux et Valangin est démontré par les pertes de l'étang de la gravière de Rives (~556.150/205.650) (pertes favorisées par quelques charges d'explosifs dans les calcaires au fond de l'étang) et les pertes d'eau à l'avancement dans le forage de la Combe de Bussy (pt741).

L'équation du bilan des sources d'Hauterive et des Huitains peut s'écrire :

$$P = ETR + Q$$

Si Q est le débit moyen des sources en $l\ s^{-1}$, ETR et P l'évapotranspiration réelle et les précipitations en mm, on peut estimer la surface du bassin alimentaire à partir de la formule définie au chapitre X - 2.7, facteur constant valant ici 23,5 puisque les observations ne s'étendent que sur 9 mois.

$$\begin{aligned} \text{Soit } P &= 784 \text{ mm (VIII - IV 1967)} \\ ETR &= 306 \text{ mm (THORNTON)} \\ Q &= 8,3 \text{ l s}^{-1} \\ \text{On trouve } S &\approx 0,41 \text{ km}^2 \end{aligned}$$

Cette surface est un peu inférieure à celle du Plateau de Bussy dont une partie appartient certainement au bassin alimentaire des sources, sans que l'on connaisse pour l'instant sa limite SW.

Tableau IX-X

Sources d'Hauterive à Valangin
Matrice des coefficients de corrélation des débits.

Variable	1	3a	3b	3c	8a	8b	8c	Total
1	-							
3a	0,86	-						
3b	0,88	0,95	-					
3c	0,92	0,93	0,97	-				
8a	0,69	0,93	0,97	0,94	-			
8b	0,71	0,85	0,80	0,81	0,78	-		
8c	0,86	0,85	0,89	0,90	0,89	0,79	-	
Total	0,97	0,93	0,96	0,97	0,96	0,80	0,91	-

$$N = 19 \quad r_{0,99} = 0,69$$

Tableau IX-XI Sources d'Hauterive à Valangin : moyennes et écarts types de quelques paramètres physico-chimiques.

Source	No	Température °C		pH		K _{20°C} µmhos/cm		Dur. totale mg/l CaCO ₃		Dur. tempor. mg/l CaCO ₃		Cl ⁻ mg/l	
		$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s
Verger des Pontins	1	8,5	0,6	7,45	0,08	487	39	288	3,4	263	9,9	10,4	0,5
Tainturerie anc.	3a	8,0	2,9	7,53	0,08	435	21	256	6,9	225	6,9	8,0	1,2
" "	3b	8,0	0,3	7,38	0,10	482	19	280	4,7	248	8,2	6,9	0,6
" "	3c	8,0	0,3	7,38	0,11	457	24	276	8,4	248	5,6	7,0	0,4
Tainturerie nouvelle	8a	8,2	0,2	7,39	0,13	474	17	275	12,3	249	7,8	6,5	0,4
" "	8b	8,2	0,2	7,38	0,11	474	12	274	13,6	253	12,7	6,8	0,7
" "	8c	8,1	0,2	7,46	0,11	465	27	273	16,4	250	9,7	6,9	0,9
Huitains du bas	10	8,0	1,2	7,63	0,08	472	17	282	6,3	252	9,3	7,0	0,8
Nombre d'observations N		14		10		9		9		9		9	

Tableau IX-XII

Sources d'Hauterive à Valangin.
Matrice des χ^2 pour les conductibilités électriques.

	1	3a	3b	3c	8a	8b	8c	203
1	-							
3a	10,8	-						
3b	11,4	0,3	-					
3c	12,2	0,4	0,5	-				
8a	13,3	2,3	2,1	2,3	-			
8b	13,6	2,7	1,7	2,5	0,7	-		
8c	21,3	7,5	6,7	7,0	3,8	4,1	-	
10	15,2	6,0	4,4	5,3	2,6	2,2	6,4	-

 $\nu = 8$ $\chi^2 = 13,4$
0,90 $\chi^2 = 20,1$
0,99

Tableau IX-XIII

Région de Valangin
Hydrochimie sommaire (18.10.1968)

Source	Altitude m	Température °C	pH	K ₂₀ µmhos/cm	X * mg/l
Vergor des Pontins	660	9,8	7,06	499	1,70
Taintorerie 3a	652	9,5	7,10	453	0,60
" 3b	652	8,7	7,04	471	0,92
" 3c	652	8,9	7,01	473	0,92
" 8a	650	8,7	7,07	469	0,92
" 8b	650	8,7	7,01	471	0,90
" 8c	650	8,7	7,04	471	0,85
Muiteins du bas	670	9,4	7,22	485	1,25
Muiteins du haut	682	9,4	7,10	489	1,00
Font. cimetière	698	10,0	7,21	465	1,05
Bussy puits (15)	712	10,0	7,00	492	2,95
" Val 16	710	8,5	7,00	515	3,12
" Val 17	710	8,7	7,06	500	3,22
" Val 18	708	7,9	7,15	480	2,55
S. du Biolet	684	8,1	7,24	531	0,48
Anc. lessiverie	685	10,5	7,21	496	0,48

VALEURS MOYENNES ET EXTREMES DE QUELQUES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES

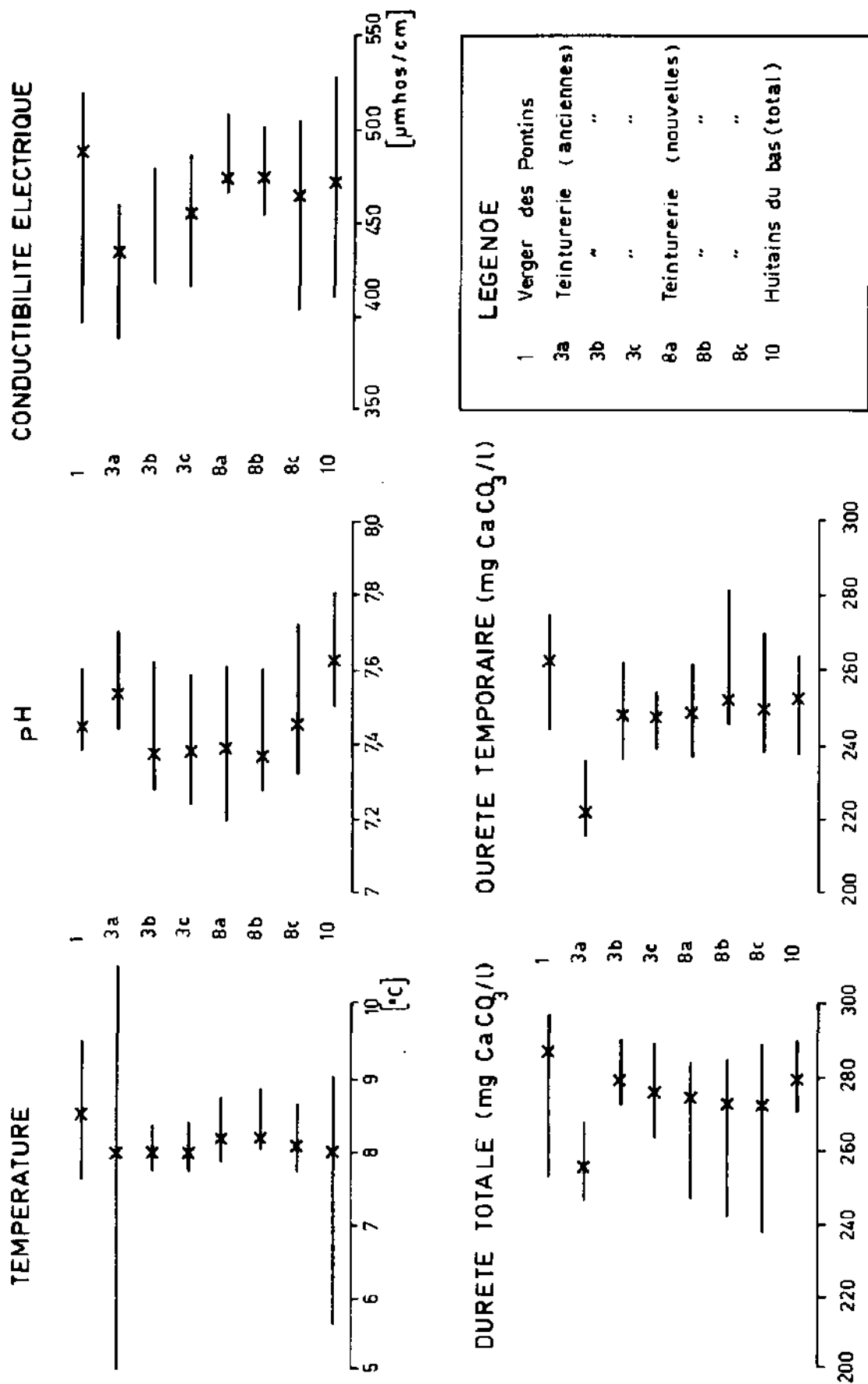


Figure IX - 16

Sources d'Hauterive à Valangin. Domaine de variation de quelques paramètres physicochimiques.

CHAPITRE X

HYDROGEOLOGIE DES TERRAINS QUATERNAIRES

"Tout ce qui existe dans l'univers est le fruit du hasard et de la nécessité".
Quand j'ai découvert cette citation de Démocrite, j'en avais presque les larmes aux yeux: penser que cela avait été écrit il y a 2'500 ans.

J. MONOD

1. Ecoulements dans les formations morainiques peu perméables

1.1. Le réseau de drainage.

De nombreux puits implantés dans la moraine argileuse attestent l'existence d'un niveau saturé dans cette formation, souvent très proche de la surface.

De gigantesques travaux d'assainissement par drainage effectués sous la direction de CHANDORA entre 1890 et 1920 ont provoqué un abaissement général du niveau saturé et accéléré la vidange de la moraine.

L'extension des zones drainées est donnée à la figure IV-1. De très petit diamètre intérieur (0,03 à 0,04 m) les drains sont habituellement espacés de 20 mètres et raccordés à des collecteurs souterrains qui se déversent dans des ruz au tracé le plus souvent rectiligne. Ils sont enfouis, sans massif filtrant, dans la moraine argileuse, parfois dans la zone d'altération de la molasse lorsque celle-ci est subaffleurende, à une profondeur comprise entre 0,7 et 1,8 m.

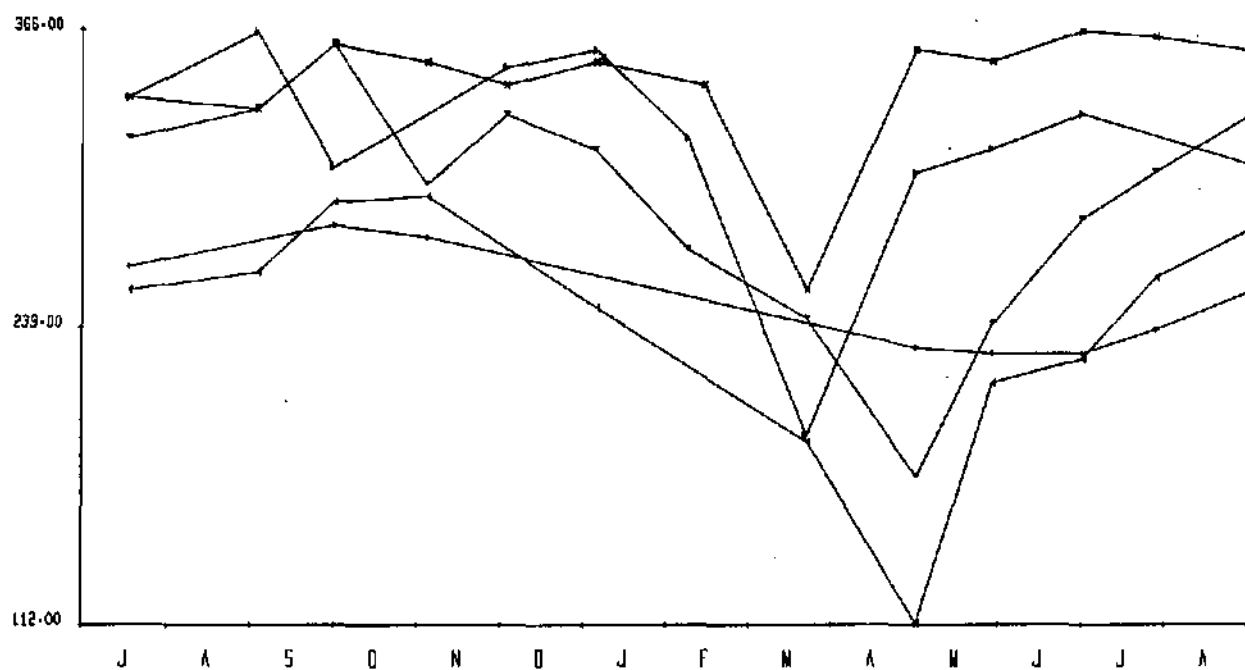
En étiage, l'apport du réseau de drainage dans l'alimentation du Sayon devient négligeable, un grand nombre de collecteurs s'asséchant lorsque l'eau gravitaire est totalement absorbée par évapotranspiration (tableau X-I). La variabilité des débits est impressionnante; les écarts types sont près du double des débits moyens. Bien que les prélèvements soient assez espacés, les débits spécifiques de chacun des 3 sous bassins considérés au tableau X-I et X-II sont comparables. Les différences entre les débits spécifiques s'expliquent pour Bottes par un prélèvement dans le bassin par les captages de la commune de Boudevilliers et pour Dombresson (Les Sagnes) par un apport de la nappe des Prés Royer qui se décharge temporairement dans le collecteur d'où la difficulté de fixer les limites exactes du bassin versant.

La température de l'eau, qui évolue par paliers successifs, traduit le rôle des crues dans le régime thermique en subsurface. Toujours proches ou supérieures à la saturation, les teneurs en oxygène passent par un maximum à la fin de l'hiver. Les variations du contenu chimique mesurées dans un collecteur souterrain au SE de Dombresson (Fig. X-1) sont à l'image des débits; conductibilité électrique et duretés passent du simple au double entre le printemps et la fin de l'été.

1.2. Région de Coffrane - Les Geneveys-sur-Coffrane.

En venant de l'Ouest, c'est dans cette région qu'après les accumulations morainiques de retrait on rencontre les premiers affleurements de moraine argileuse. Les ressources en eaux locales sont constituées par des venues dispersées (tableau X-IV), captées par drains, dont le débit

DURETE TOTALE [mg CaCO₃ / l]



CONDUCTIBILITE ELECTRIQUE [μmhos / cm]

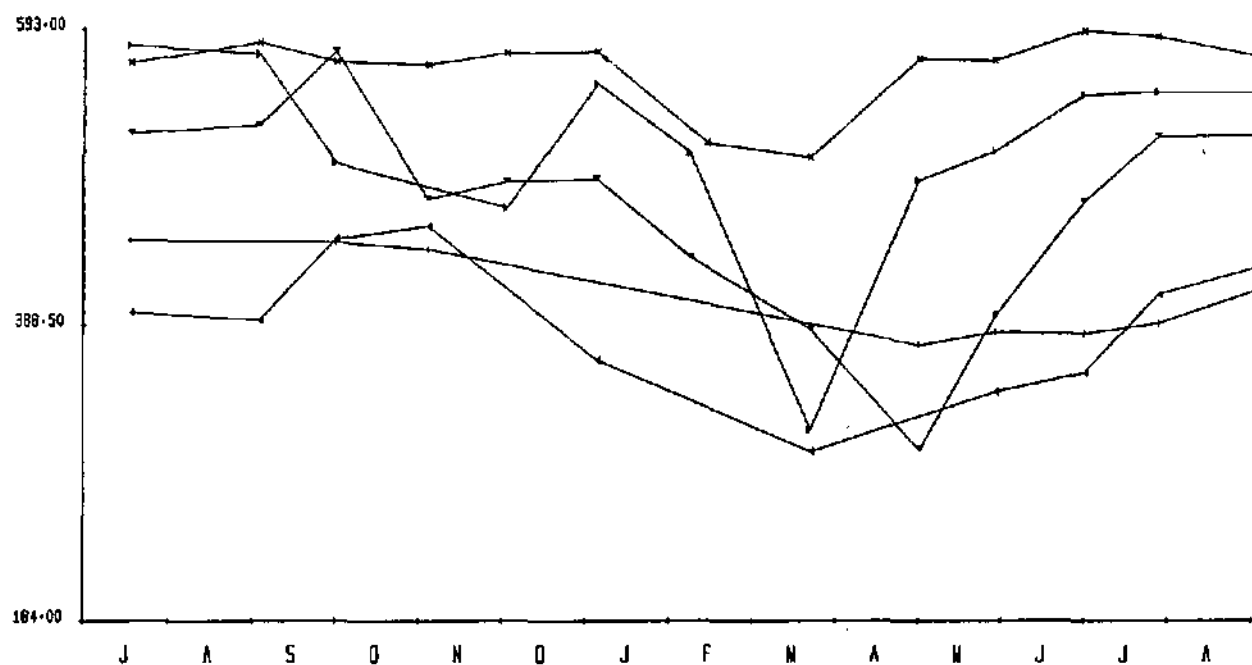
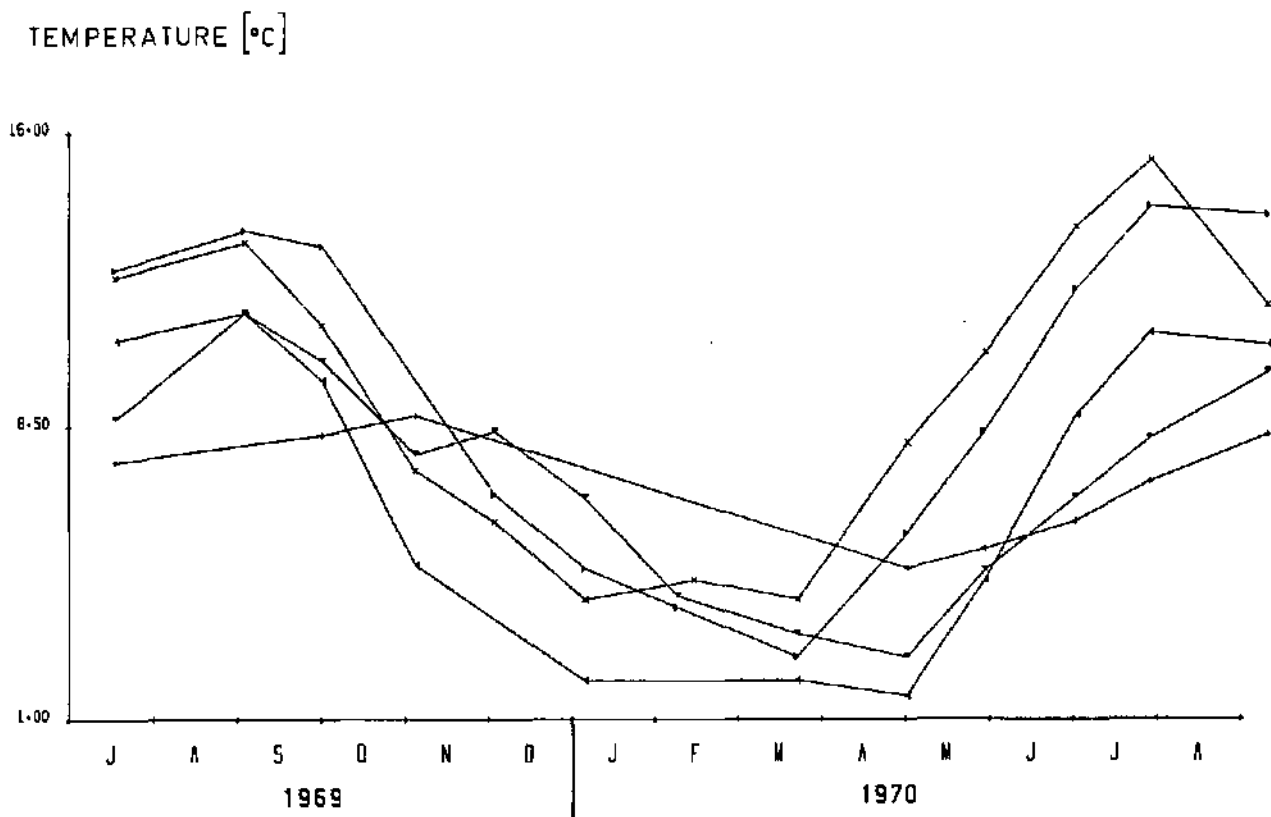
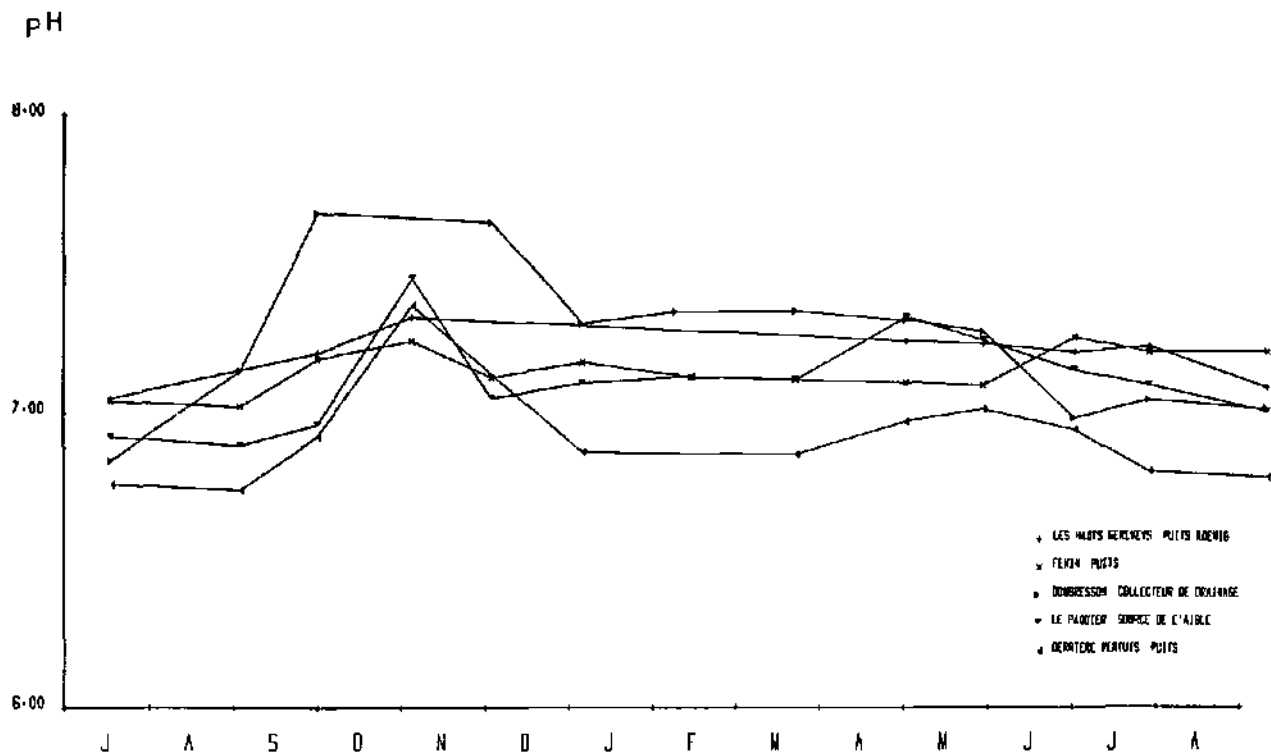


Figure X - 1 Température, pH, conductibilité électrique et dureté total de 3 puits et 2 sources des bassins du Seyon et de la Serrière.



très variable atteint quelques litres par minute en étiage, certaines tarissant lors de sécheresses prolongées. La nappe de Paulière et une conduite ascensionnelle reliée au réseau de Nauchâtel assurent le complément nécessaire à l'alimentation des communes de Montmollin, Coffrane et des Geneveys-sur-Coffrane.

La source de la Brasserie aux Geneveys-sur-Coffrane (5 - 150 l/min) et la source du Lion à Coffrane (0 - 300 l/min) sont les plus intéressantes. Cette dernière est constituée d'un puits de 7 mètres de profondeur dans lequel aboutit un drain à ramifications multiples, visitable en étiage. De 1955 à 1970, la source du Lion a fourni un débit moyen de 40,3 l/min, sans tenir compte de l'eau évacuée par le trop plein.

Comme les puits le plus souvent désaffectés dans le village de Coffrane, cet ouvrage révèle la présence d'un niveau phréatique dans la moraine qui s'étend au Sud-Ouest de la localité. La décharge naturelle de cette nappe s'effectue dans le réseau de drainage au NE et dans les gravières de retrait au SE, où les eaux rejoignent un niveau saturé plus profond, voire les calcaires heurtiviens. L'exploitation de la gravière des Genevrets a mis à jour à 1,5 mètre de profondeur une venue concentrée actuellement non captée dont le débit varie entre 30 et 375 litres par minute. (Coord. ~556.660/206.370).

Bien que vulnérable aux pollutions, cette nappe mériterait une étude détaillée en vue d'une exploitation plus rationnelle. Le tableau X-IV donne un aperçu de la composition chimique des eaux que l'on rencontre dans ces terrains. Les températures varient selon la profondeur des ouvrages de captage plus qu'en fonction du débit. Bicarbonatées calcaires elles sont plus minéralisées que les eaux de la moraine graveleuse de Paulière et l'on constate des différences importantes entre des venues même très voisines. Les teneurs en chlorure élevées traduisent la vulnérabilité des captages aux pollutions. (engrais potassiques).

Tableau X-I

Débit, température et teneur en oxygène de 3 collecteurs de drainage
à ciel ouvert dans le bassin du Seyon.

EMPLACEMENT	BOTTES (557.850/207.790)			FONTAINES (560.070/210.390)			DOMBRESON (562.740/212.560)		
DATE	Débit l/s	Tempér. °C	O ₂ mg/l	Débit l/s	Tempér. °C	O ₂ mg/l	Débit l/s	Tempér. °C	O ₂ mg/l
11.8.1973	0,1	14	8,1	0,7	14,5	4,9	1,7	13	2,8
8.9	0,0	-	-	0,0	-	-	0,17	14,5	5,9
27.9	0,0	-	-	0,0	-	-	2,0	9	9,6
29.9	1,0	9	8,3	0,8	-	-	2,0	8,5	7,2
6.10	0,0	-	-	0,0	-	-	0,2	9	9,6
17.11	144	8	11,0	65,3	8,0	11,0	150	8	12,7
27.12	56,2	5	11,8	29,9	4,0	12,1	30	5	11,9
26.1.1974	22,5	4,5	12,7	8,2	4,0	13,4	35,5	5	12,2
16.3	40,3	4,5	12,3	33,7	4,0	12,3	35,5	5	14,1
30.3	18,5	11,2	11,8	1,6	11,5	12,4	12,8	10	15,0
25.4	1,0	8	11,5	0,2	9,0	12,0	4,1	9	11,4
5.5	0,7	10	10,7	0,1	10,5	12,3	2,6	9	12,6
11.5	1,7	9	11,3	0,22	9,0	11,7	5,6	9	11,1
24.5	0,1	10	8,7	0,02	12,0	12,5	3,1	9	12,3
1.7	37,5	13	9,3	26,3	13,0	8,75	64	11,5	9,4
21.7	0,2	15,5	9,5	0,11	15,5	10,2	0,6	13,5	9,8
Moyenne	20,2	9,3	10,5	10,5	9,5	11,1	21,8	9,2	10,5
Écart type	37,6	3,5	1,6	19,0	4,0	2,3	38,8	2,8	3,1
Surface du bassin versant	1,17 km ²			0,49 km ²			0,87 km ²		

Prélèvements et analyses : STRAUB et cons.

Tableau X-III

Débits spécifiques des trois collecteurs de drainage.

Collecteur de drainage	Bassin alimentaire km ²	Débit moyen 1973 - 1974 l/s	Débit spécifique	
			l/s km ²	mm/an
Bettes	1,17	20,2	17,3	545
Fontaines	0,49	10,5	21,4	674
Dombresson (Les Segnes)	0,87	21,8	25,1	791

Tableau X-IV

Coffrane - Les Geneveys-sur-Coffrane
Hydrochimie des eaux de la moraine.

Source	Date	Coordonnées	Altitude m	Temp. °C	Débit l/min	pH	K _{20°C} µmhos cm ⁻¹	Dureté tot. mg/l	Dureté temp. mg/l	Cl ⁻ mg/l
Les Crotons 1	12.8.74	554.535/206.945	945	9,4	1	7,26	484	311	285	14,4
" " 2	"	554.370/206.905	977	10,0	-	7,0	511	325	322	2,8
" " 8	"	554.440/206.890	963	12,6	-	7,14	489	299	274	18,2
" " 9	"	554.510/206.865	946	10,6	-	7,47	476	298	276	15,2
Pranchete	"	554.830/206.870	896	10,4	2,3	7,44	514	314	289	11,6
Murquier	"	554.975/207.155	882	9,5	4,0	7,39	517	304	266	8,6
3 Suisses	"	554.775/207.045	915	11,6	6,5	7,29	466	285	262	11,6
Perregaux	"	555.270/207.520	875	11,5	7,5	7,74	473	280	262	8,7
Bresserie	"	555.770/207.930	855	10,8	50	7,35	468	280	258	8,6
F. Eglise	"	556.190/206.770	810	13,0	4,5	7,88	436	296	265	7,6
Lion	"	556.130/206.920	805	8,6	-	7,40	494	293	252	12,9
Nappe de Peulière	"	557.180/207.265	784	12,4	-	7,52	397	220	191	12,1
-Puits sud -S. Favergat- tes	"	557.340/207.300	774	10,4	-	7,50	430	251	220	13,3

Prélèvements et analyses : Laboratoire cantonal/
Neuchâtel

1.3. Région de Boudevilliers - Malvilliers - La Jonchère.

1.3.1. Sources et captages.

La couverture morainique peu perméable a ici aussi nécessité l'établissement d'un réseau de drainage. Des noyaux plus graveleux ont favorisé par endroit la concentration de venues d'eau captées par drainage ou par puits.

La nappe de Peulière avec les captages de Suclos et la nappe des Vernea à Malvilliers constituent les principales ressources en eau de la commune de Boudevilliers. A la Jonchère plusieurs puits

Tableau X-III

Date du prélèvement: 26.8.1971

Composition chimique de quelques sources des bassins de la Serrière et du Seyon.

Source - Puits	No	Coordonnées	Altitude m	Débit l/min	Temp. °C	K _{20°C} µmhos/cm	pH	TAC mg/l	D. temp. mg/l	Ca ⁺⁺ mg/l	Mg ⁺⁺ mg/l	Na ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Cl ⁻ mg/l	SO ₄ ⁻⁻ mg/l	SiO ₂ mg/l	Géol. de l'exutoire
La Rueu / St Blaise	1	566.030/207.800	485	~1500	9,85	444	7,24	240	250	86,5	11,9	1,4	0,0	3,0	7,5	3,8	Crétacé
La Vigner / St Blaise	2	566.020/207.220	435	~300	11,9	455	7,21	262	255	84	15,4	1,2	0,6	2,9	6,5	4,3	Crétacé
Suintemante / Serrière	3	559.015/203.470	445	10	16,5	421	7,94	195	125	66,5	8,1	9,4	5,2	12,2	45,5	19,2	Crétacé
Les Fontenettes/Auvernaz	4	557.540/203.050	440	8	10,5	667	7,12	212	250	111,5	5,8	4,7	3,2	15,3	21,5	9,1	Quat.
Forage Freyrol	5	551.830/196.670	450	2000	11,8	429	7,30	245	240	70,0	18,6	2,8	0,5	2,9	5,3	6,1	C + M
S. d'Heuterive Ja / Velangin	6	559.400/207.100	645	40	12,0	469	7,26	263	240	92,0	10,4	3,3	0,8	7,5	12,0	6,6	C (+ Q)
P. Val 15/Le Sorgeraux	7	558.540/207.490	712	-	7,0	528	7,16	285	260	105,5	6,7	7,0	3,3	11,5	10,0	5,4	Quat.
S. Val 17/Le Sorgeraux	8	558.550/207.485	710	15	8,2	534	7,14	292	270	108,0	8,0	6,7	3,0	11,7	10,0	6,0	Quat.
S. Val 17/Le Sorgeraux	9	558.570/207.480	710	10	8,2	497	7,22	275	248	94,5	11,6	4,1	1,7	8,4	10,5	5,5	Quat.
Puits Sud / Peulière	10	557.180/207.265	794	-	13,0	441	7,06	245	228	91,0	5,5	4,2	1,9	6,3	13,5	3,6	Quat.
S. Favergettes/Peulière	11	557.340/207.300	774	10	11,2	438	7,05	270	-	100,0	6,3	4,0	1,5	6,4	12,0	3,7	Quat.
Les grevillers/Serroue	12	556.060/205.660	760	-	16,0	114	7,95	55	42	20,5	1,4	1,0	1,1	1,3	8,5	2,2	Quat.
Puits / Fontaine	13	559.070/210.590	765	-	8,7	555	6,88	322	300	93,5	6,1	2,6	0,6	9,1	7,3	7,1	Quat.
Puits/Vernes/Melivilliers	14	556.350/209.070	845	-	8,3	509	7,04	290	280	113,0	5,7	1,7	0,5	7,2	8,0	6,2	Quat.
Puits / Fanin	15	560.690/208.380	752	-	12,8	604	7,03	343	338	100,0	22,2	6,5	8,1	6,1	12,0	10,6	Quat.
Puits/Savagnier	16	562.200/212.055	720	-	12,9	652	6,95	362	292	137,5	10,8	9,5	1,7	12,8	9,8	5,6	Quat.
Puits/Dombresson	17	562.440/212.580	723	-	10,3	652	7,03	270	245	101,0	4,1	3,6	4,0	8,3	8,5	5,0	Quat.
P. Artésien/Cornier	18	562.340/212.590	725	-	9,0	544	7,10	310	270	107,0	11,0	3,5	1,7	6,4	36,2	5,8	Quat.
Puits Cornier	19	562.310/212.820	723	-	8,4	533	6,96	297	277	117,5	4,4	3,6	2,4	8,1	16,5	4,7	Quat.
Collect. drainage/ Dombresson	20	563.940/213.325	746	1200	15,0	446	7,10	253	235	95,5	4,1	2,6	1,2	8,3	10,7	5,4	Quat.
S. de l'Aigle/Le Piquier	21	565.825/216.400	890	10	10,3	495	6,98	175	278	116,5	2,1	1,1	0,2	2,9	4,5	3,5	Quat.
Fleure/Les Bégnenets	22	566.625/219.050	1110	20	4,5	315	7,40	162	170	71,5	0,8	0,5	0,2	1,1	8,0	1,5	Séquan.
S. Jaen Favre/La Joux du Pléne	23	565.405/218.090	1150	60	9,8	280	7,14	163	150	63,5	1,1	0,4	0,4	0,7	9,2	4,0	Dogger
P. Derrière Pertule	24	561.720/216.850	1155	12	12,4	378	6,71	222	218	88,5	1,3	0,6	0,7	0,5	10,8	6,3	Argovien
Les Jumeaux/Pertule	25	561.760/215.440	1030	12	7,9	471	6,99	265	268	113,5	1,4	1,1	0,4	1,9	4,5	3,2	Crétacé
P./Les Haute Ganeveys	26	557.080/211.180	990	-	8,3	509	7,24	285	268	117,5	2,9	2,4	1,6	3,5	3,8	5,1	Quat.
S. Tunnel des Loges	27	557.850/212.050	990	350	7,4	386	7,21	218	213	85,5	2,3	0,9	1,2	1,7	6,5	3,3	Séquan. + Bath

* Nature géologique de l'exutoire

Q : quaternaire

M : Melm

D : Dogger

C : crétacé

A : Argovien

anciens recueillent les eaux qui s'accumulent dans le moraine au-dessus des marnes pürbeckiennes. C'est probablement une situation géologique identique qui donne lieu à quelques sources, dont celle des Rechettes (10 - 15 litres par minute en étiage).

Entre Malvilliers et les Vernes, la moraine argileuse est recouverte par endroits de dépôts morainiques de retrait plus graveleux qui sont le siège d'une circulation souterraine active, dont les sources des Vernes forment l'exutoire naturel. (tableau X-V).

Au Sud des Vernes une zone marécageuse marque la terminaison du placage graveleux. Huit forages de reconnaissance effectués sous la direction de E. FREI en 1945 ont mis en évidence une petite nappe, dans des formations morainiques très hétérogènes, parfois artésiennes, dans la zone d'exutoire. Le puits Chollet à l'Est et le puits des petites Vernes à l'Ouest fournissent respectivement 30 et 25 m³ par jour en étiage, auxquels s'ajoutent 15 à 20 m³ par jour des sources des Grandes Vernes.

Tableau X-V

Région de Boudevilliers- Malvilliers - Le Jonchère
Hydrochimie des sources et captages le 19.4.1971.

Source	Coordonnées	Altitude m	Temp. °C	pH	K _{20°C} µmhos/cm	Dur.tot. mg/l	Dur. temp. mg/l	Chlorures mg/l
Les petites Vernes	556.215/208.955	851	5,9	7,45	459	280	261	5,3
" " "	556.380/209.070	847	7,1	7,45	484	300	260	10,9
" " "puits	556.220/209.065	855	7,2	7,45	464	286	268	3,5
Les gdes Vernes	556.040/208.570	855	6,0	7,60	481	263	291	3,6
" " "	556.075/208.475	852	6,5	7,65	476	284	243	3,3
" "	556.170/208.450	844	4,9	7,55	497	299	295	1,1
Les Cholets	556.830/208.280	804	5,4	7,35	527	314	291	8,8
Suclos puits SW			6,8	7,45	466	271	251	9,8
" puits S			7,6	7,50	476	295	270	9,2
" puits SSW			7,6	7,60	412	242	208	7,1

Source : Laboratoire cantonal/Neuchâtel

Entre Malvilliers et Bottes plusieurs sources jaillissent de la moraine : la source Cholet, la source Ferregeux et la source de la Creuse qui fournissent 20 litres par minute en étiage. Le captage de la Creuse, effectué par RITTER au début du siècle fut approfondi en 1933 avec comme conséquence une forte diminution du débit (FREI 1944, rapport inédit, archives communales, Boudevilliers).

1.3.2. Hydrochimie.

Le tableau X-V fournit les principaux paramètres physico-chimiques des sources citées plus haut, peu après la crue printanière. Les eaux de nappes (Suclos - Paulière et puits des petites Vernes, figure X-5), ont une conductibilité électrique et une minéralisation plus faible que les eaux drainées dans la moraine argileuse. Les écarts de température entre les sources sont importants, ils soulignent les différents modes de circulation. Certaines teneurs en chlorure élevées sont probablement dues à des fumures minérales ou aux fondants chimiques.

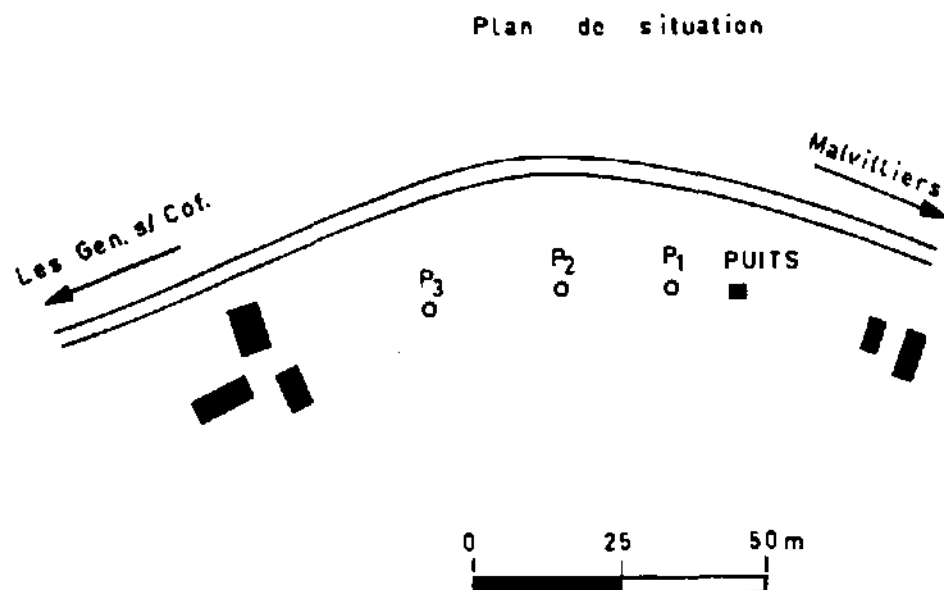


Figure X - 2 Malvilliers, nappe des petites Vernes, situation des puits et piézomètres.

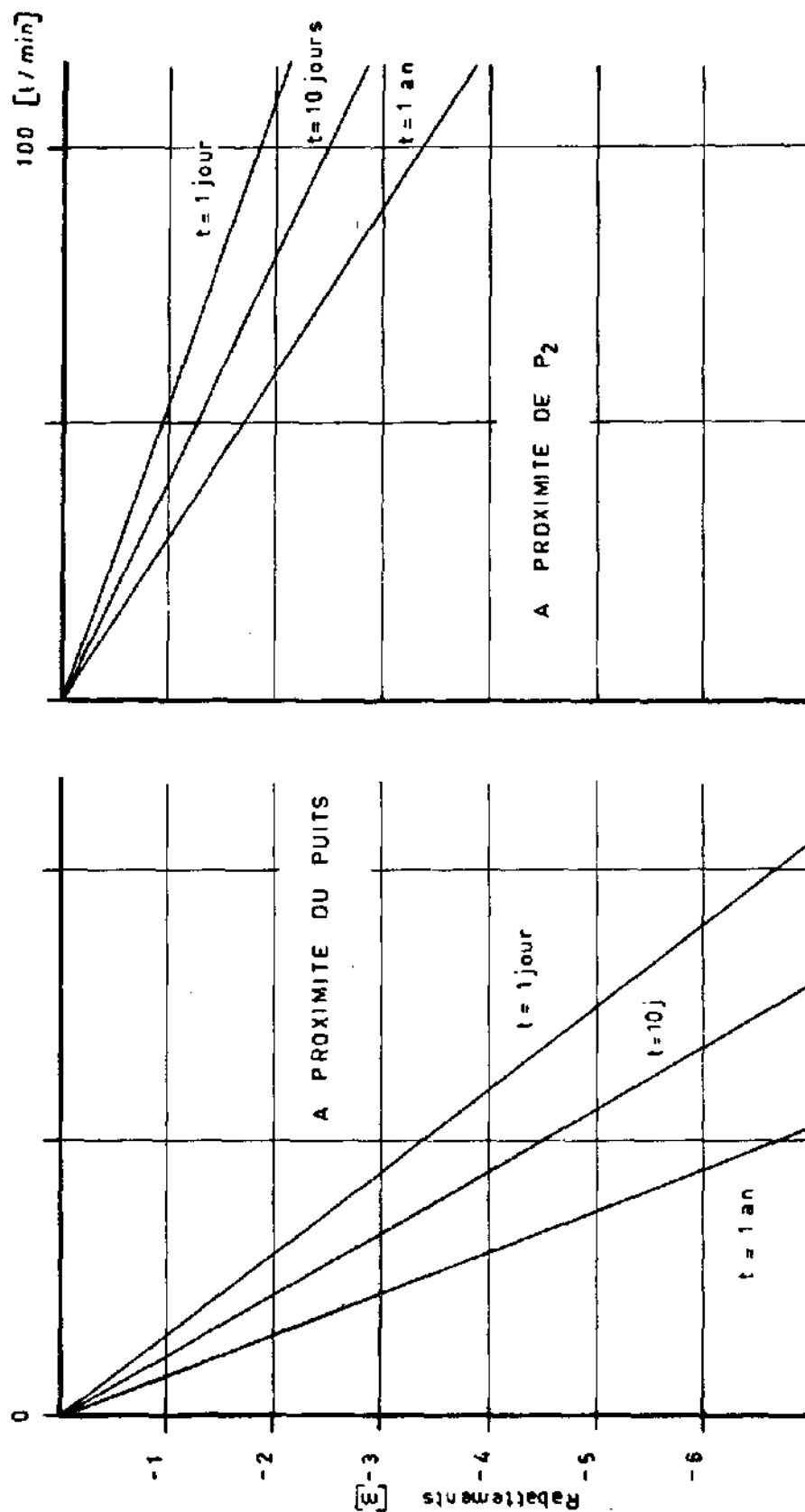


Figure X - 3 Malvilliers, puits des petites Vernes. Courbes caractéristiques de la nappe à proximité de puits actuel et de piézomètre P_2 (rayon du puits: $r = 0,6\text{m}$).

1.3.3. La nappe des petites Vernes : caractéristiques hydrodynamiques.

Un essai de pompage d'une durée de 4 jours a été réalisé dans le puits des petites Vernes peu après sa construction (document inédit, archives communales, Boudevilliers). Bien que le débit n'ait pas été maintenu constant durant toute la durée de l'essai, (il valait 25 litres par minute à la fin de l'essai) il est possible d'en interpréter les résultats par les méthodes classiques.

La figure X-2 représente la position du puits et des 3 piézomètres observés.

La formule de Dupuits appliquée au puits à la fin de l'essai donne :

$$K = 4,0 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1} \\ \text{et } T = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

alors qu'on trouve par la formule de Thiem pour les terrains compris entre les piézomètres P1, P2 et P3 :

$$K_{P1 - P2} = 4,6 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1} \\ K_{P1 - P3} = 6,0 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1} \\ K_{P3 - P2} = 2,2 \cdot 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$$

On constate que la perméabilité tend à augmenter lorsqu'on s'éloigne du puits, ce que confirme l'interprétation en régime non permanent. La valeur de $K_{P3 - P2}$ est cependant quelque peu surestimée.

La méthode Theis appliquée au même essai de pompage avec :

$$\Delta = \frac{Q}{4 \pi T} \cdot W(u) \quad \text{et } t = \frac{r^2 S}{4 T} \cdot \frac{1}{u}$$

dont on tire le transmissivité T et le coefficient d'emmagasinement S donne pour les 3 piézomètres (RECORDON 1968, op. cit)

	Piézo 1	Piézo 2	Piézo 3
$T \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$5,2 \cdot 10^{-4}$	$4,4 \cdot 10^{-4}$
S %	3,5	4,2	4,1

En admettant pour l'aquifère une épaisseur de 4 à 8 mètres selon les piézomètres on retrouve des valeurs comparables à celles obtenues par les méthodes de THIEM et DUPUIT. On constate là également une tendance à l'augmentation de la perméabilité en direction des piézomètres P2 et P3, c'est-à-dire vers le centre de la dépression morainique.

Les coefficients d'emmagasinement faibles, témoignent de l'abondance d'éléments fins au sein de l'aquifère.

Des valeurs de T et S on déduit les équations des courbes caractéristiques de l'aquifère en exploitation. (Fig. X-3).

A proximité du puits on a :

$$\Delta = 663,1 \cdot Q \cdot W(u) \quad \text{avec } u = 72,9 \frac{r^2}{t}$$

et entre les piézomètres P2 et P3

$$\Delta = 165,7 \cdot Q \cdot W(u) \quad \text{avec } u = 17,7 \frac{r^2}{t}$$

Alors qu'une exploitation de 100 litres par minute durant 1 an à proximité du puits actuel se traduirait par un rabattement de 13,3 mètres (> épaisseur de l'aquifère), celui-ci ne serait que de 3,4 mètres entre P1 et P2. L'implantation d'un puits dans cette partie de la nappe aurait donc fourni un débit 3 à 4 fois plus abondant que le puits actuel des Petites Vernes, soit 50 - 70 l/min au lieu de 15 à 20 l/min.

1.4. Région de la Côtière (Fenin - Vilars - Seules - Savagnier).

1.4.1. Sources et captages.

Le moraine argileuse accumulée entre le Seyon et le pied de Chaumont contient une nappe phréatique visible dans de nombreux puits en pierres sèches, dont le niveau est habituellement situé entre 1 et 2 mètres de profondeur. De nombreux captages et le réseau de drainage en constitue la décharge naturelle.

Sur le territoire de la commune de Fenin - Vilars - Seules il existe une dizaine de puits, souvent désaffectés ainsi qu'une vingtaine de captages privés ou publics au débit très variable qui fournissaient au total 60 litres par minute le 15.11.1968. Deux sources captées dans les éboulis au pied de Chaumont le long de la Vy Marchand alimentent le réservoir communal (6 l/min le 15.11.1968). Entre Seules et Savagnier, au Sud de la Vy Marchand, la moraine par endroit recouverte d'éboulis, repose sur les calcaires du Malm et du Crétacé. Vu l'absence de manifestation hydrologique, on peut en déduire que les eaux d'infiltration rejoignent les calcaires.

A Savagnier des captages par drains ou galeries dans la coteau, alimentent les fontaines du village. Leur débit le 22.11.1968 valait au total 63 litres par minute, alors que les sources de Sous la Mont fournissaient 180 litres par minute au réservoir communal. Relevons que l'une des sources qui alimente la fontaine de la Fontanette est captée par drainage sur les marnes hauteriviennes.

1.4.2. Hydrochimie.

La moyenne des températures des puits et des sources est voisine, indiquant qu'il s'agit d'eau circulant sensiblement à la même profondeur. (tableau X-VI). La variabilité de la conductibilité est nettement plus forte entre les puits et le dégazage dû au départ de CO_2 élève les pH de l'eau. Dans la région de Savagnier la conductivité électrique moyenne des sources était un peu inférieure ($\bar{x} = 538$, $s = 44$) alors que le débit moyen était un peu supérieur.

La variabilité élevée du contenu chimique d'un puits témoin à Fenin durant l'année hydrologique 1969 - 1970 (Figures X-1 et X-4) est bien représentative de l'évolution saisonnière des eaux de la moraine argileuse. La proximité des habitations et l'engraisement des prairies rendent ces sources très vulnérables aux pollutions bactériennes.

Tableau X-VI

Fenin - Vilars - Seules
Moyennes et écarts-types de 3 paramètres physico-chimiques de
9 puits et 20 sources le 15.11.1969

Paramètre	Température (°C)		$K_{20^{\circ}\text{C}}$ ($\mu\text{mhos cm}^{-1}$)		pH	
	P	S	P	S	P	S
Moyenne $\bar{x}$	9,7	9,8	622	575	7,31	7,08
Ec. types s	0,9	0,6	201	48	0,36	0,23

P = puits

S = sources

1.5. Région de Valengin.

Le cas des sources d'Hauterive a été discuté au chapitre IX-7, celui de la nappe de Bussy - Sorgereux est envisagé plus loin (chap. X-2). Une série de sources d'importance inégale jaillissent au contact de la moraine argileuse ou de la molasse à la périphérie du plateau de Biolet. Citons la source du Biolet ou des fontaines du village dont le débit moyen est de l'ordre de

30 l/min et la source de la fontaine de la lessiverie (~ 15 l/min). On a relevé les faibles teneurs en potassium de ces 2 sources (tableau IX-XIII).

Rive droite de la Sorge, plusieurs captages, complétés par un réseau de drainage, récoltant les eaux qui jaillissent au contact de la moraine argileuse, au Nord et à l'Est des Essarts (source Badertacher et source du cimetière).

1.6. Région des Hauts Geneveys - Fontainemelon - Cernier.

Aux Hauts Geneveys, quelques captages dans la moraine alimentent le réseau des fontaines. Un puits en pierres sèches (puits Pré Koenig : 557.000/211.180) indique l'existence d'un niveau saturé dans les accumulations moreiniques qui dominent le village. Le niveau de l'eau oscille entre 2 et 4 mètres sous la surface du sol. La minéralisation carbonatée et les teneurs en alcalins y sont très basses (Fig. X-1 et X-4).

L'absence de réseau de drainage indique que les eaux qui circulent dans la moraine se déchargent dans le Malm ou le Crétacé sous-jacents. C'est également le cas à Fontainemelon et à Cernier où la proximité des calcaires empêche l'accumulation d'eau dans le Quaternaire.

Région d'Engollon - Landeyeux.

Trois venues captées par drainage de la moraine au Sud de Fontaines (Les Nécertelles) constituent les seules ressources en eau d'Engollon. Leur débit est irrégulier mais elles fournissent 15 à 20 litres par minute en étiage. En période de crue elles sont vulnérables aux pollutions bactériennes, bien que leur faible teneur en chlorure ne révèle pas de contamination par des fertilisants.

Plus au Sud, deux captages dans la moraine argileuse recueillant les eaux destinées au hameau de Landeyeux. Les débits y sont de quelques litres par minute en étiage. La minéralisation de l'eau est nettement plus élevée qu'aux Nécertelles.

Tableau X-VII

Engollon - Landeyeux - La Borcarderie
Hydrochimie des eaux de la moraine.

Source	Date	Coordonnées	Altitude m	Temp. °C	Débit l/min	pH	K ₂₀ µmols/ cm	Dur. tot mg/l	Dur. temp mg/l	Cl ⁻ mg/l
Engollon 2a	10.5.1971	559.045/209.550	747	9,5	4	7,60	436	267	262	2,2
3a	"	559.060/209.550	746	9,6	-	7,75	438	269	262	2,4
Landeyeux 20	8.4.1974	559.105/209.360	774	7,2	-	7,24	527	327	280	19,4
La Borcarderie										
sup. est	2.4.1975	560.150/207.830	720	8,0	-	7,35	509	332	313	9,5
sup. sud	"	"	720	6,4	4,5	7,42	570	332	312	7,6
inf. sud	"	560.110/207.960	710	7,0	36,0	7,63	545	333	316	8,8
inf. est	"	"	710	7,6	9,0	7,78	530	324	308	7,9

1.7. Région de Chézard - St Martin.

Le versant crétacé est le plus souvent recouvert de moraine argileuse peu perméable, siège d'une nappe phréatique attestée par les puits en pierre sèches, au nombre de 40, échelonnés entre le Grand Chézard et St Martin.

Un essai de pompage a été réalisé dans cinq d'entre eux par le Département des travaux publics (tableau X-VIII).

Les graphiques d'abaissement du niveau à débit constant (300 l/min), non représentés, sont des droites car le débit entrant dans le puits est considérablement plus faible que le débit pompé (inférieur à 1 l/min). Les coefficients de perméabilité calculés par la méthode de Dupuits sont compris entre 0,6 et $6,2 \cdot 10^{-6}$ m/s, avec un accroissement des valeurs d'Ouest en Est, sans que l'on puisse affirmer que cette tendance est significative.

Leur présence à proximité des fermes rend ces puits très vulnérables aux pollutions bactériennes; ils sont maintenant désaffectés. L'analyse chimique révèle une minéralisation, un déficit en oxygène et une oxydabilité élevée, indices de la très médiocre qualité de l'eau. La minéralisation relativement faible du puits 38 N 33 pourrait être la conséquence d'une longue stagnation de l'eau provoquant sa déminéralisation par départ de CO_2 .

Tableau X-VIII

Essai de pompage dans cinq puits de Chézard - St Martin
Données techniques et hydrochimie.

Numéro selon cadastre sanitaire	38 N 33	38 N 41	38 N 46	38 N 54	38 N 64
Coordonnées	560.340/ 212.440	560.660/ 212.660	560.845/ 212.710	561.120/ 212.770	561.530/ 212.950
Profondeur du puits m	5,7	3,9	4,5	5,2	5,1
Diamètre du puits m	3	4	3	4	3
Hauteur d'eau avant pompage H m	3,82	2,4	3,13	3,97	3,87
Rebatement m	1,55	1,64	2,33	2,82	1,71
Débit naturel du puits à la fin du pompage l/min	0,35	0,9	0,25	0,45	-
Coeff. K de perméabilité 10^{-6} m/s	0,6	2,5	4,4	6,2	-
Température de l'eau °C	9,9	10,4	10,6	9,8	9,6
Résidu d'évaporation mg/l	265	385	315	317	710
Résidu de calcination mg/l	245	360	305	305	620
Dureté totale mg CaCO_3 /l	255	345	300	305	505
Dureté temporaire mg CaCO_3 /l	245	325	260	295	275
Oxygène dissout mg/l	2,2	0,9	5,2	1,6	0,8
Déficit en oxygène %	81	92	53	86	93
Oxydabilité mg KMnO_4 /l	37,9	44,3	34,7	37,9	72,7
Chlorures mg Cl^- /l	6	12	7	4	46
Fer total mg/l	1,4	0,7	<0,1	<0,1	0,2
Nitrites mg NO_2^- /l	0,3	0,2	0,0	0,0	5,0
Ammoniaque libre mg NH_3 /l	0,26	0,4	0,04	0,04	0,24

Source : Département des travaux publics
Canton de Neuchâtel

1.6 Région de Dombresson - Villiers - Clémessin.

Un réseau de plusieurs centaines de mètres de drains récoltant les eaux de la moraine à l'Ouest de Dombresson alimentait autrefois les fontaines de la localité.

Captées par drainage des champs à l'Ouest du village, les sources des fontaines de Villiers débitent au total 15 à 20 l/min en étiage.

Dans le coteau qui va de Villiers à Clémessin une dizaine de captages recueillent les eaux de la moraine. Leur conductivité électrique est élevée à deux exceptions près : les sources de la fontaine de Clémessin du Haut et du restaurant de Sous-le-Mont qui, captées dans les éboulis du pied

de Chaumont se rapprochent par leur chimisme des sources de Sous-le-Mont.

1.9. Région du Côté - Le Pâquier.

1.9.1. Captages et sources.

Du contexte géologique précisé par des recherches géoélectriques décrit au chapitre III-3.4 découle la situation hydrogéologique suivante :

- Au Nord du Pâquier, les eaux qui s'infiltrant dans les buttes moreiniques graveleuses atteignent les calcaires ou la moraine argileuse au contact de laquelle elles sont recueillies par 3 galeries en pierres sèches. Ce sont les captages des Crozats, Madorn et du Collège, ce dernier long de 35 mètres.

- Plusieurs puits sous le village, maintenant désaffectés, témoignent de l'existence d'un niveau saturé dans la moraine argileuse. Cette nappe qui se décharge dans les coteaux qui bordent le ruz Chassezan est exploitée par 3 captages; la source de l'Affûtament, la source du Grand Verger, et rive gauche, la source de l'Aigle.

- Au centre du vallon une petite nappe phréatique a été révélée par sondage dans des graviers grossiers très compacts (fluviogléciaire ?) dont le niveau oscille entre 2 et 4,5 mètres de profondeur. (Figure X-5). Il est possible qu'elle soit éliminée en période de crue par le ruz Chassezan, mais la médiocre perméabilité du matériau ne permettait de soutirer du puits qu'une dizaine de litres par minute. Un captage par tranchée drainante le long du ruisseau permettrait d'en extraire davantage.

L'ensemble des sources collectées pour l'alimentation du réseau communal débite 15 litres par minute en étiage avancé, déficit qui est compensé par un réservoir de 1000 m³, réalimenté durant les périodes humides.

Entre le Pâquier et la Crotaille, sur le versant Nord du Côté, on trouve plusieurs sources captées dans la moraine, dont deux par galerie en pierres sèches pénétrant dans le coteau.

A l'Est de la Crotaille, un puits profond de 12 mètres effectué en 1957 dans des cailloutis compacts probablement alluvionnaires en bordure du ruz de Pertuis, a mis en évidence une nappe phréatique. (coord. 562.930/215.980). Un essai de pompage donnait 12 litres par minute en régime stabilisé. Une investigation par géoélectricité permettrait sans doute de trouver une zone plus perméable et par conséquent plus productive. (BURGER, comm. orale).

1.9.2. Hydrochimie.

Si la température de l'eau ou le pH ne sont pas déterminants pour fixer la nature du bassin souterrain des sources du Pâquier, la minéralisation carbonatée, représentée par les duretés et la conductibilité électrique, permet bien de séparer les eaux de la moraine argileuse (très minéralisées) de celles issues des moraines graveleuses peu minéralisées. (Figures X-1 et X-4) (tableau X-IX). L'oxydabilité, les nitrates, les chlorures, le sodium et le potassium lorsqu'ils sont en concentration élevées, indiquent une contamination par des engrais chimiques et organiques. C'est le cas de la source de l'Affûtament dont le bassin alimentaire est situé sous le village et de la source du Grand Verger.

La source de la fontaine aux Dizeaux, captée dans les éboulis calcaires au bas de la Combe Biosse en zone forestière donne une idée des valeurs naturelles de ces paramètres en absence de pollution chimique. On remarquera sa dureté très basse, caractéristique des eaux percolant dans les dépôts de pente.

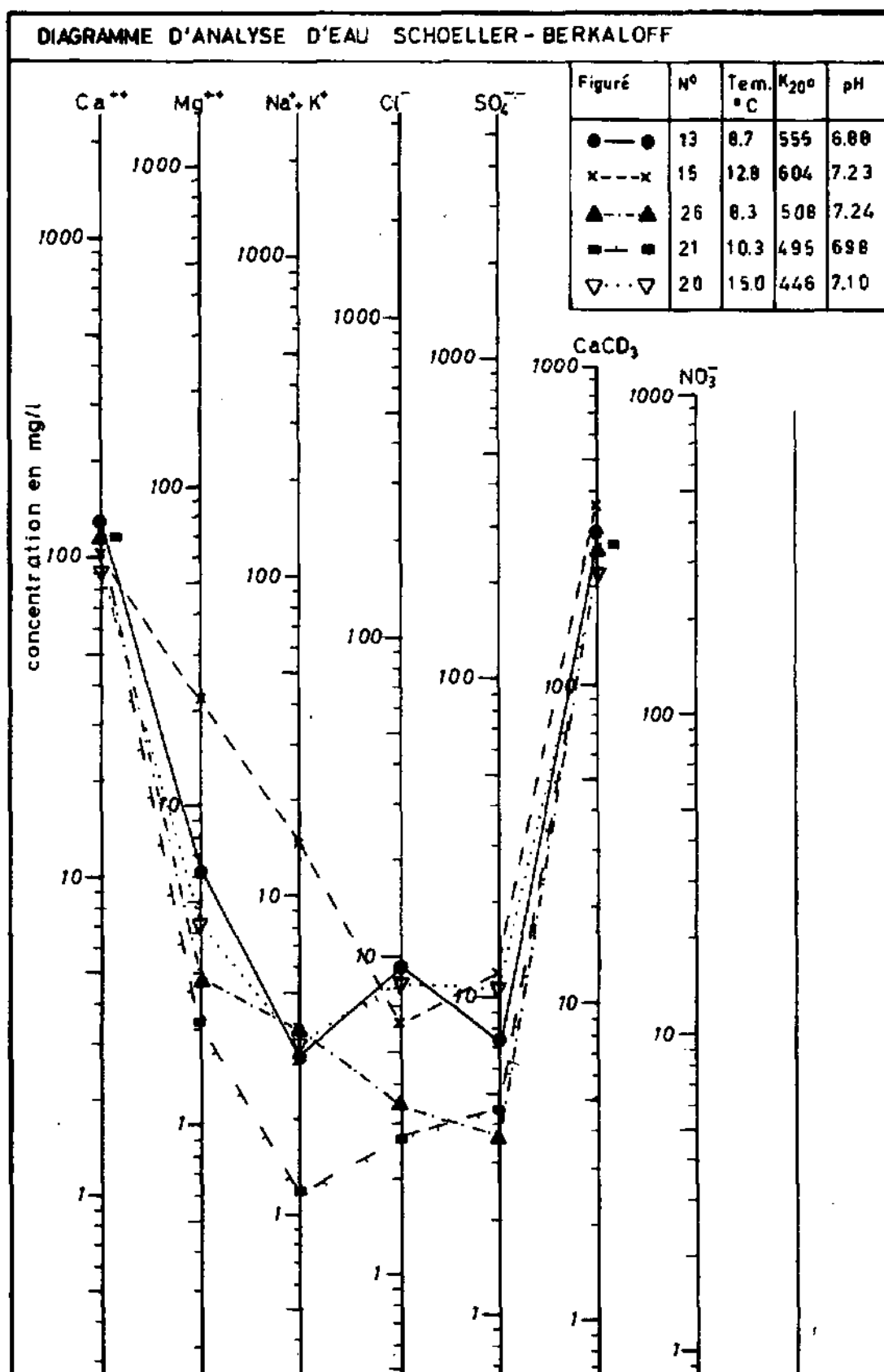


Figure X - 4

Contenu chimique de 5 sources et puits du bassin du Seyon (26.8.71). ■ Puits communal Fontaines. x Puits Fenin. ▲ Puits Pré Koenig, les Hauts Geneveys. ■ Source de l'Aigle, Le Pâquier. ▽ Collecteur de drainage souterrain, Dombresson.

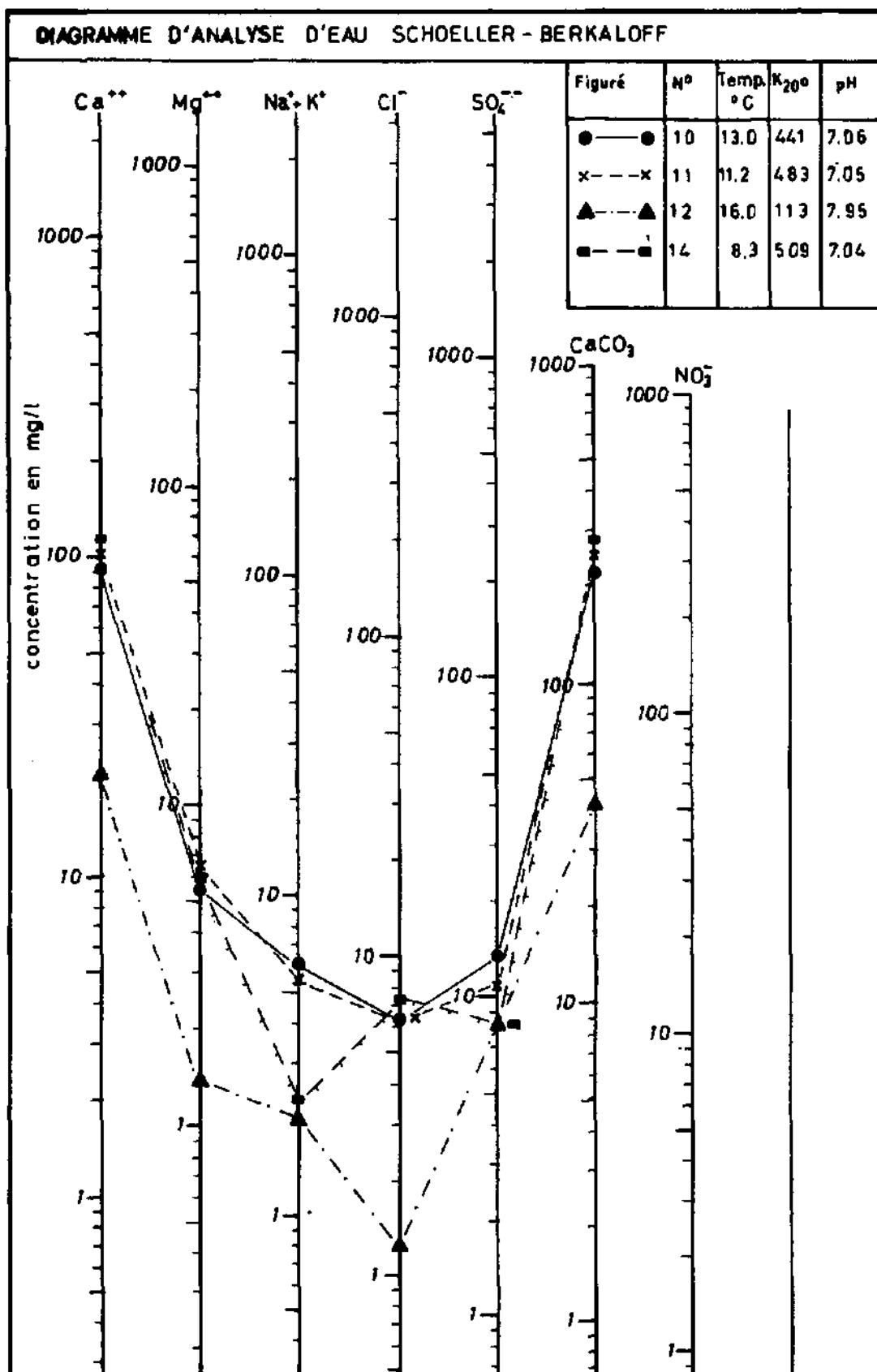


Figure X - 5 Contenu chimique de 4 sources quaternaires du bassin du Seyon. ● Puits de la nappe de Paulière. x Nappe de Paulière, source des Favargettes. ▲ Etang de la gravière de Rives/Serroue. ■ Puits des petites Vernes. (le 26.8.71).

Tableau X-IX

Le Pâquier. Hydrochimie des eaux de la moraine le 26 juin 1974.

Source Paramètre	Source du Crozat	Source Madorn	Source du Collège	Source de l'Affâtement	Source du Gd Vargier	Source de l'Aigle	Source de la fontaine aux Oiseaux
Coordonnées	565.285/ 216.670	565.650/ 216.450	565.730/ 216.530	565.730/ 216.530	565.780/ 216.360	565.780/ 216.360	566.930/ 217.360
Altitude m	910	895	895	895	890	890	978
Température °C	9,1	8,9	8,0	8,4	10,1	8,5	9,6
Débit l/min	-	11,3	-	10	7,0	30	0,2
pH	7,7	7,5	7,8	7,2	7,1	7,4	7,8
K _{20°C} µmhos/cm	371	387	390	696	674	500	274
Dur. totale mg CaCO ₃ /l	240	232	230	299	340	299	198
Dur. temp. mg CaCO ₃ /l	207	207	210	240	320	253	143
Oxydabilité mg KMnO ₄ /l	3,5	3,2	3,5	7,55	14,5	9,26	3,1
Nitrate mg NO ₃ ⁻ /l	4,4	10,4	9,6	32,0	12,4	16,4	0,8
Cl ⁻ mg/l	4,3	6,0	5,5	58,0	39,8	11,0	3,4
K ⁺ mg/l	-	-	-	23,4	15,7	1,12	-
Na ⁺ mg/l	-	-	-	25,4	38,7	0,23	-

Analyses : Laboratoire cantonal

Tableau X-X

Nappe de Bussy-Sorgereux. Débit des sources l/min

Source	Débit moyen			Coef type 1969-1970	Maximum 1969-1970	Minimum 1969-1970
	1969	XI 69 - IX 70	1969 - 1970			
Val 16	118	198	172	125	520	25
Val 17	97	115	109	31	181	61
Val 18	121	167	153	94	520	61
Total	336	480	434		1221	147

2. LA NAPPE DE BUSSY - SORGEREUX

2.1. Situation.

Le nappe de Bussy - Sorgereux est exploitée depuis 1963 par un puits filtrant profond de 9,5 m implanté dans le vallon de la Vaubelay* au pied du coteau du Sorgereux. Trois sources, deux sur la rive gauche du ruisseau (Val 16, Val 17) et une sur la rive droite (Val 18) qui est le trop plein de l'ancien ceptage de Bussy constituent la décharge naturelle de la nappe. A cela s'ajoute des venues diffuses dans le lit de la Vaubelay*, dont le débit est inconnu.

La zone source marque l'extrémité orientale de la nappe qui est déterminée par la terminaison des graviers aquifères moréniens. Ceux-ci reposent sur une moraine argileuse dont le toit s'élève vers le NE et qui affleure 150 mètres en aval des sources où elle détermine une bande marécageuse. L'amincissement de la couche graveleuse est confirmé par deux sondages de reconnaissance; situé à une profondeur de 20 mètres en S2, le toit de l'imperméable n'est plus qu'à -11 mètres en S1. (Figure X-7).

* ou Toiffière

La complexité du régime physico-chimique des exutoires souligne la difficulté de fixer les limites du bassin alimentaire de cette nappe. L'analyse des résultats géoélectriques permet de penser que les sources du vallon de Bussy représentent pro parte la décharge des eaux qui s'accumulent dans le sillon molassique décrit par POLDINI (1964). Le bassin versant de la nappe s'étendrait alors jusqu'au Sud de Coffrane.

Tableau X-XI

Nappe de Bussy - Sargeraux. Moyenne, écart type, maximum et minimum des paramètres physico-chimiques.
Période : 20.1.1969 - 10.10.1970

		Débit l/min	Température °C	K ₂₀₀	pH
VAL 15	x	-	8,26	453	7,17
	e	-	1,02	57,3	0,12
	max	-	9,70	515	7,48
	min	-	6,10	330	7,04
VAL 16	x	172	8,04	495	7,10
	e	125	0,44	18,4	0,04
	max	520	8,70	515,7	7,21
	min	25	6,90	418,4	6,98
VAL 17	x	109	8,15	497	7,11
	e	30	0,35	14,4	0,04
	max	181	8,65	516	7,18
	min	61	7,40	470	6,98
VAL 18	x	153	8,18	468	7,21
	e	94	0,16	8,9	0,04
	max	520	8,58	487	7,28
	min	61	7,80	452	7,11
VAL 29	x	11,4	8,77	531	7,03
	e	4,31	3,04	53,8	0,13
	max				
	min				

N = 78

2.2. Débit des sources.

La figure X-8 représente les fluctuations du niveau de la nappe dans le puits et les débits manuels moyens pompés de 1965 - 1972. On relève la crue importante du printemps 1970, ainsi que l'absence de recharge de la nappe les deux années suivantes, responsable du fort étiage de l'automne 1971, époque à laquelle le débit total des sources ne dépassait pas 15 litres par minute. L'allure "en dents de scie" de la courbe des prélèvements est due à la suppression périodique des fuites du réseau de distribution. On constate que celles-ci dépassent par moment la consommation des usagers. Durant cette période le débit annuel moyen prélevé dans le puits s'élève à 123 l/min.

Fuites et sources ont fait l'objet de contrôles hebdomadaires de janvier 1969 à septembre 1970 (tableau X-X). En 1969, année hydrologique moyenne, les débits des trois sources sont bien synchronisés entre eux (Figure X-9) et les courbes de tarissement sont peu perturbées par les périodes pluvieuses. La fonte de neige exceptionnelle au printemps 1970 révèle toutefois un décalage de près de 2 mois entre la crue de Val 18 et celles de Val 16, Val 17 et de Val 15 témoi-

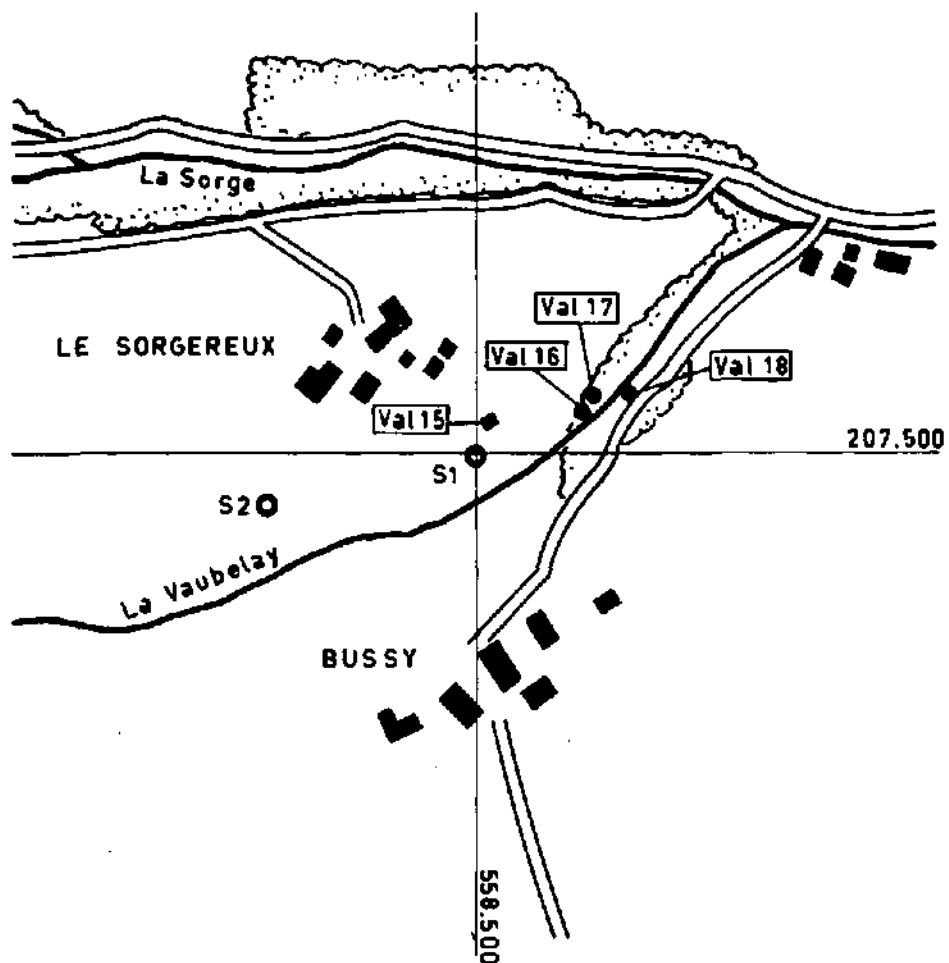


Figure X - 7 Nappe de Bussy - Sorgereux. Situation.

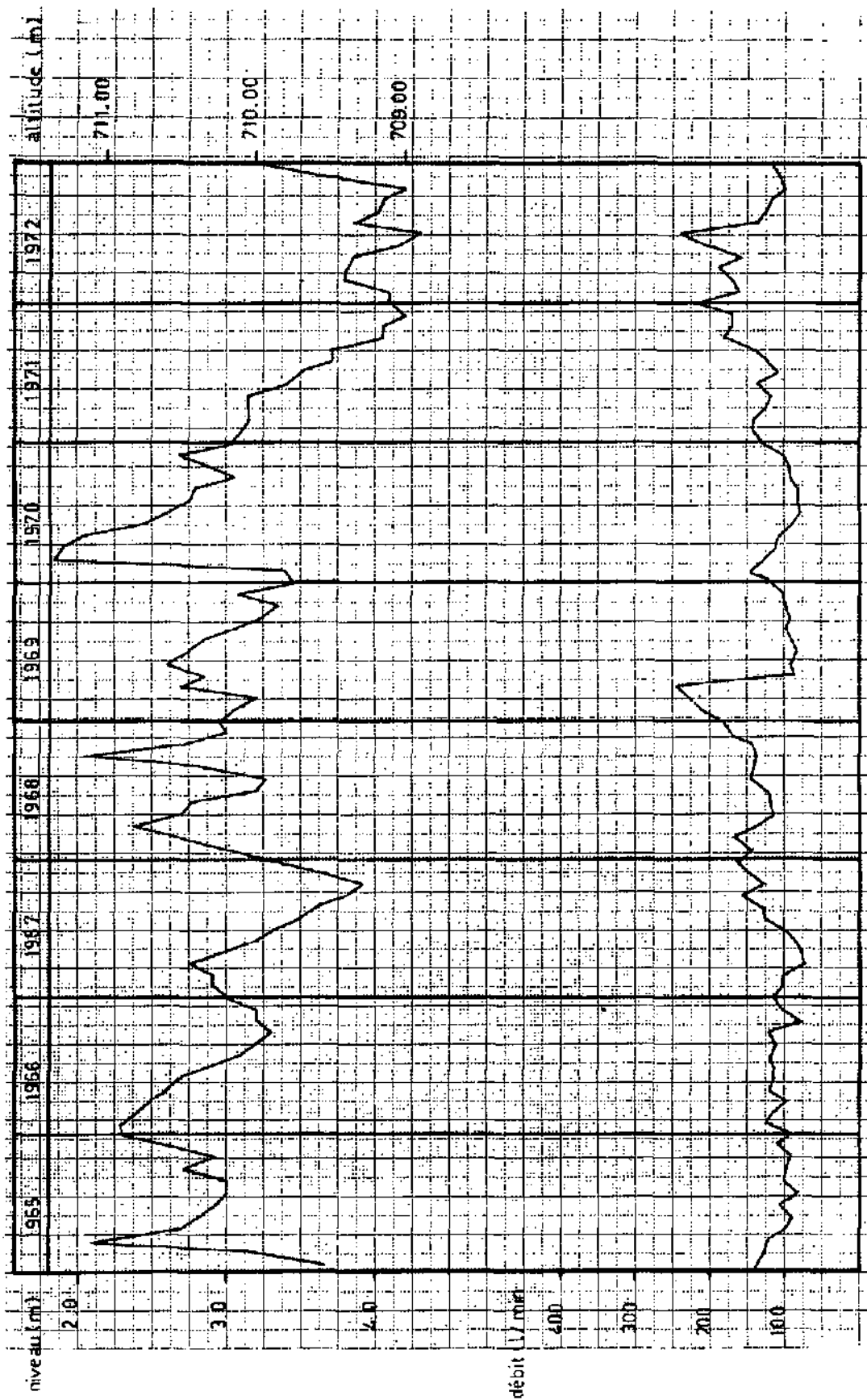


Figure X - 8 Nappe de Bussy - Sorgereux. Fluctuation de niveau de l'eau et débit du puits de la commune, 1965 - 1972.

NAPPE DE BUSSY - SORGEREUX 1969-1970

NIVEAU DE LA NAPPE DANS LE PUIS DE
LA COMMUNE DE VALANGIN

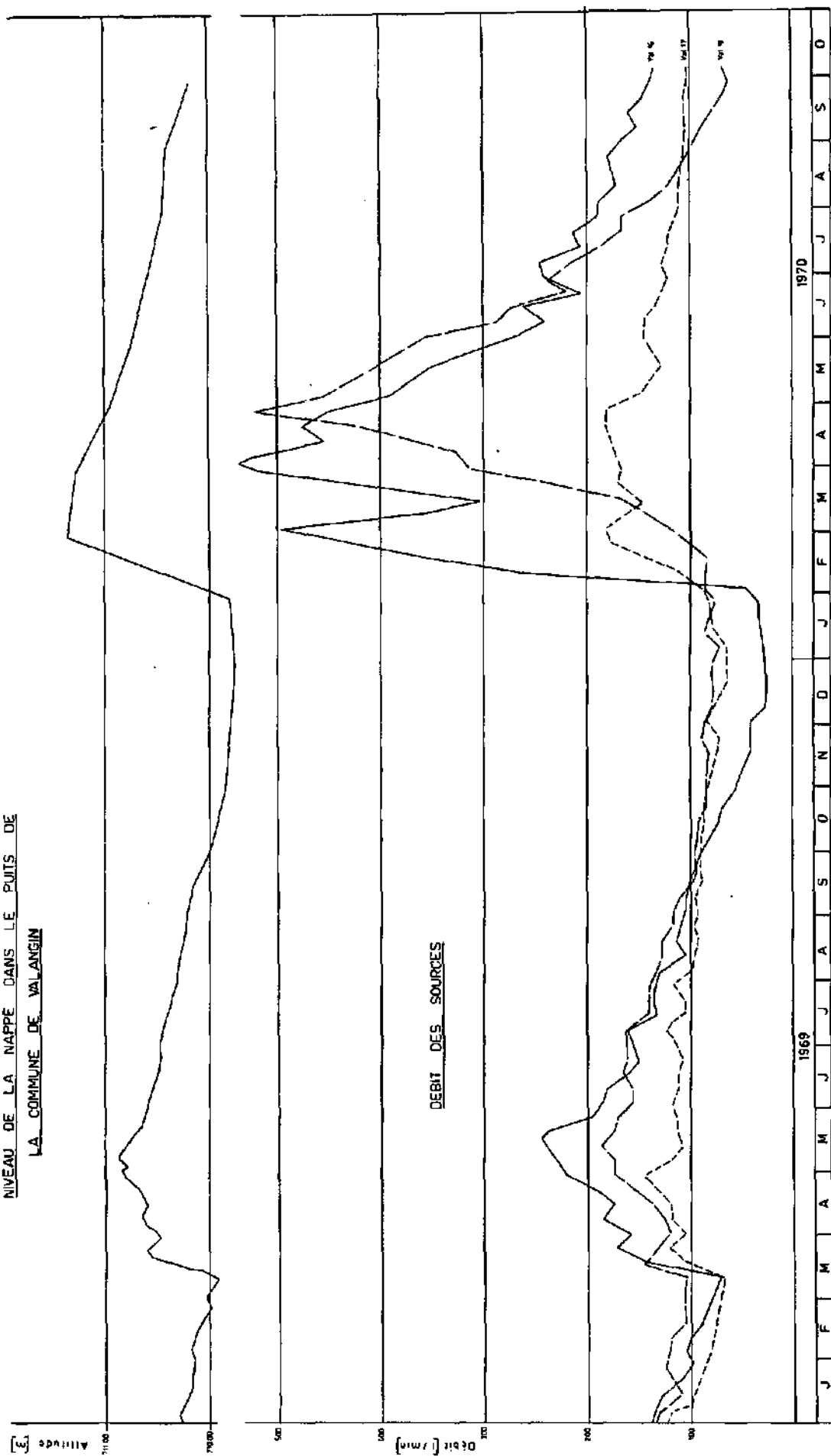


Figure X - 9 Nappe de Bussy - Sorgereux. Fluctuations de niveau de l'eau et débit des sources et du puits I-1969 - X 1970.

gnent de la complexité des liaisons hydrauliques de cette région.

2.3. Régime physico-chimique.

- La température. (Figure X-10) (tableau X-XI)

Si les moyennes sont comparables (altitude des bassins versants identiques) des différences entre les amplitudes des variations thermiques saisonnières (exprimées par les écarts types) amènent les remarques suivantes :

Le puits (Val 15) présente les variations les plus importantes, indice d'une alimentation moins profonde. (Relevons que les débits pompés dans le puits et le débit des sources sont du même ordre de grandeur).

Les sources Val 16 et Val 17 bien temponnées sont chimiquement et thermiquement apparentées. Des baisses brusques de la température ou de la minéralisation sont la conséquence d'apports temporaires d'eau de surface proches de la source en période de crue.

La source Val 18 possède le régime thermique le plus temponné. Alors que pour Val 15, Val 16 et Val 17 le déphasage entre les températures de l'air et de l'eau est de trois mois, il est de 8 à 10 mois pour Val 18. En effet, la température de cette source s'élève à partir de février et décroît dès juillet.

La source Val 29 (non représentée) captée à faible profondeur dans la moraine argileuse à Bottes alimente la fontaine du Sorgereux. Les variations de température y sont très importantes. Bien que n'étant pas liée à la nappe cette source a été utilisée à titre coopératif.

- Le pH (Figure X-11)

A l'exception de la crue du printemps 1970 qui se traduit par une nette augmentation de pH de Val 15, on ne décèle pas de tendance saisonnière comme c'est le cas pour les sources dont le bassin alimentaire est proche et peu étendu.

Val 29 a le pH moyen le plus bas, Val 18 le plus élevé. Ceux de Val 16 et Val 17 sont comparables. Val 29 et Val 15 ont les variations les plus fortes.

- La conductibilité électrique. (Figure X-10)

Durant l'été la minéralisation de Val 15, Val 16 et Val 17 est très semblable; mais alors qu'en crue elle baisse peu dans les sources, on constate une forte dilution des eaux du puits. La conductibilité est maximum pour Val 29 (les eaux de la moraine argileuse sont toujours très minéralisées) et systématiquement inférieure aux autres sources, mais très régulière, pour Val 18. La crue du printemps 1970 se traduit par un abaissement du contenu chimique de tous les exutoires qui n'étaient pas reconstitués en septembre.

- La dureté. (Figure X-11)

Dureté et conductibilité électrique évoluent de façon synchrone, confirmant que le contenu bicarbonaté est ici prépondérant pour fixer la conductibilité électrique de l'eau.

- Autres éléments.

Dans les résultats d'une analyse d'échantillons prélevés en étiage (Fig. X-12) (tableau X-III) on relève les teneurs les plus basses de Val 18 en alcalin et chlorures. Les teneurs en sulfates, entre les sources, sont comparables. Les eaux qui jaillissent de l'Hauterivien à Valengin se distinguent des eaux de Bussy - Sorgereux par une teneur plus forte en Mg^{++} et plus faible en alcalins.

2.4. Equilibres thermodynamiques.

Le contenu chimique des eaux à l'exutoire est la résultante d'un ensemble de phénomènes physico-chimiques successifs (dissolution, transport, diffusion et dispersion) liés à la thermodynamique de l'équifère. Que le temps de séjour dépasse plusieurs mois ou que les sources d'alimentation se diversifient, on aura à l'exutoire un mélange d'eau d'Aqs et de contenu chimique très divers

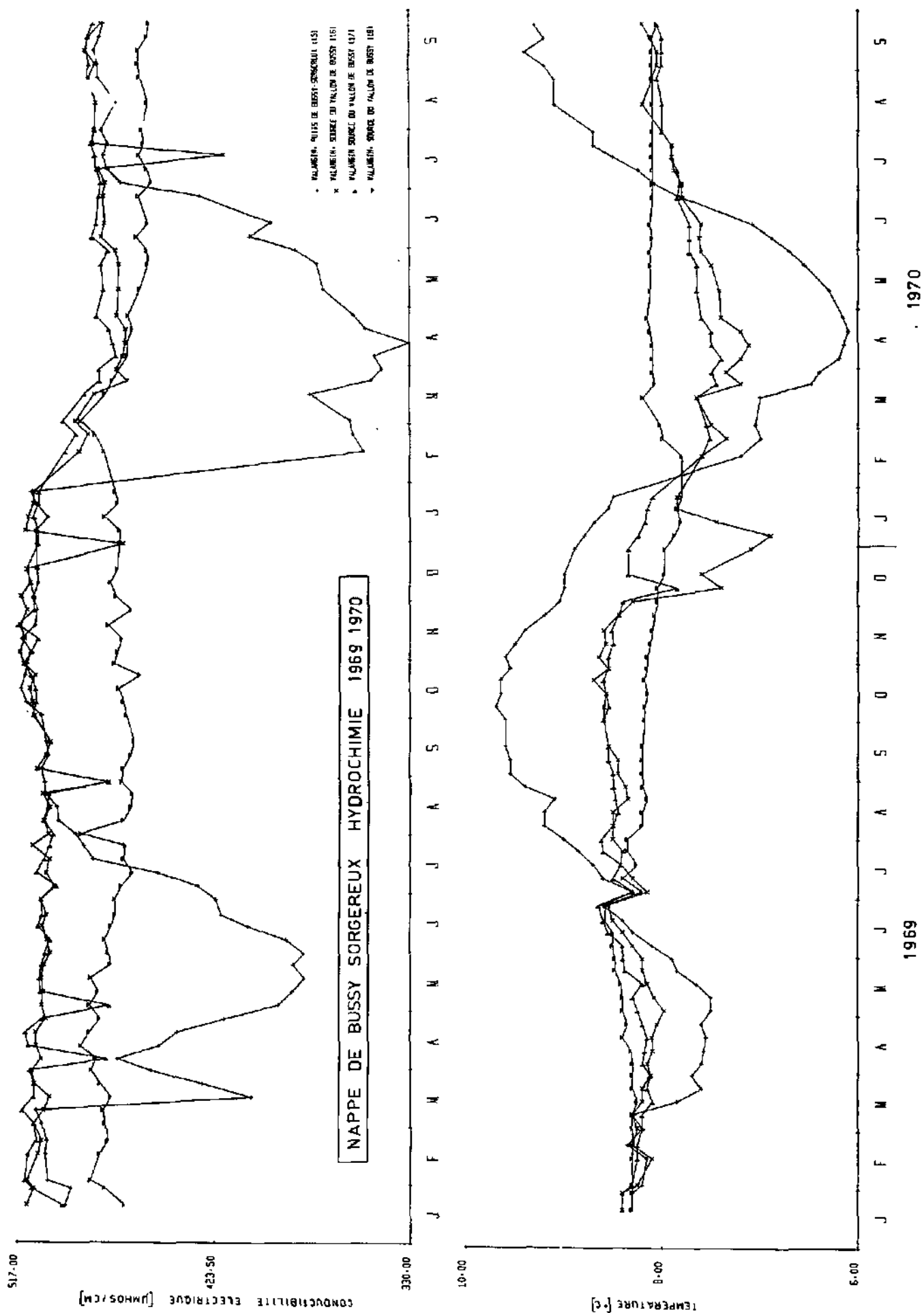


Figure X - 10 Nappe de Bussy - Sorgeroux. Température et conductibilité électrique des sources et du puits.

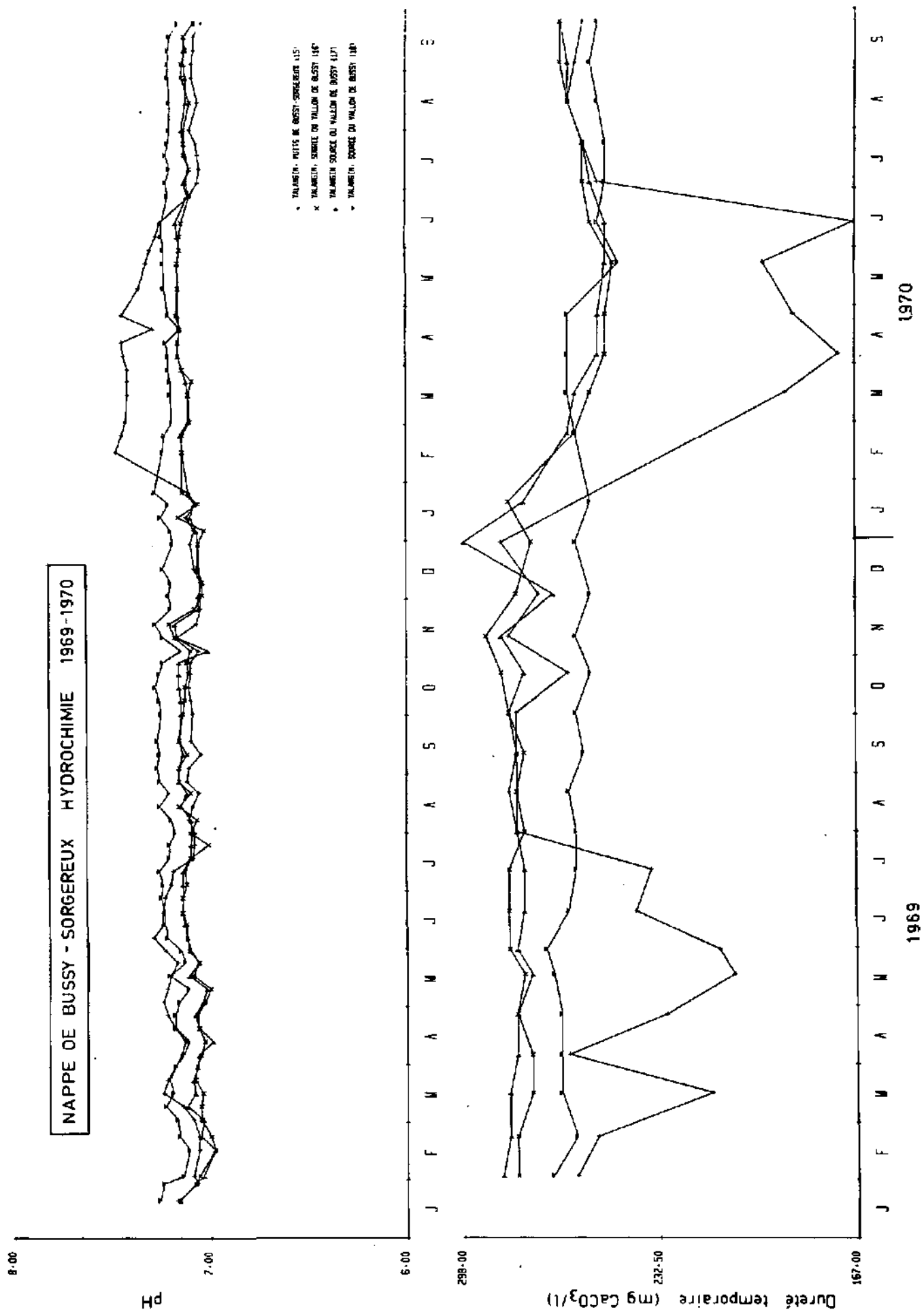


Figure X - 11 Nappe de Bussy - Sorgereux. pH et dureté totale des sources et du puits.

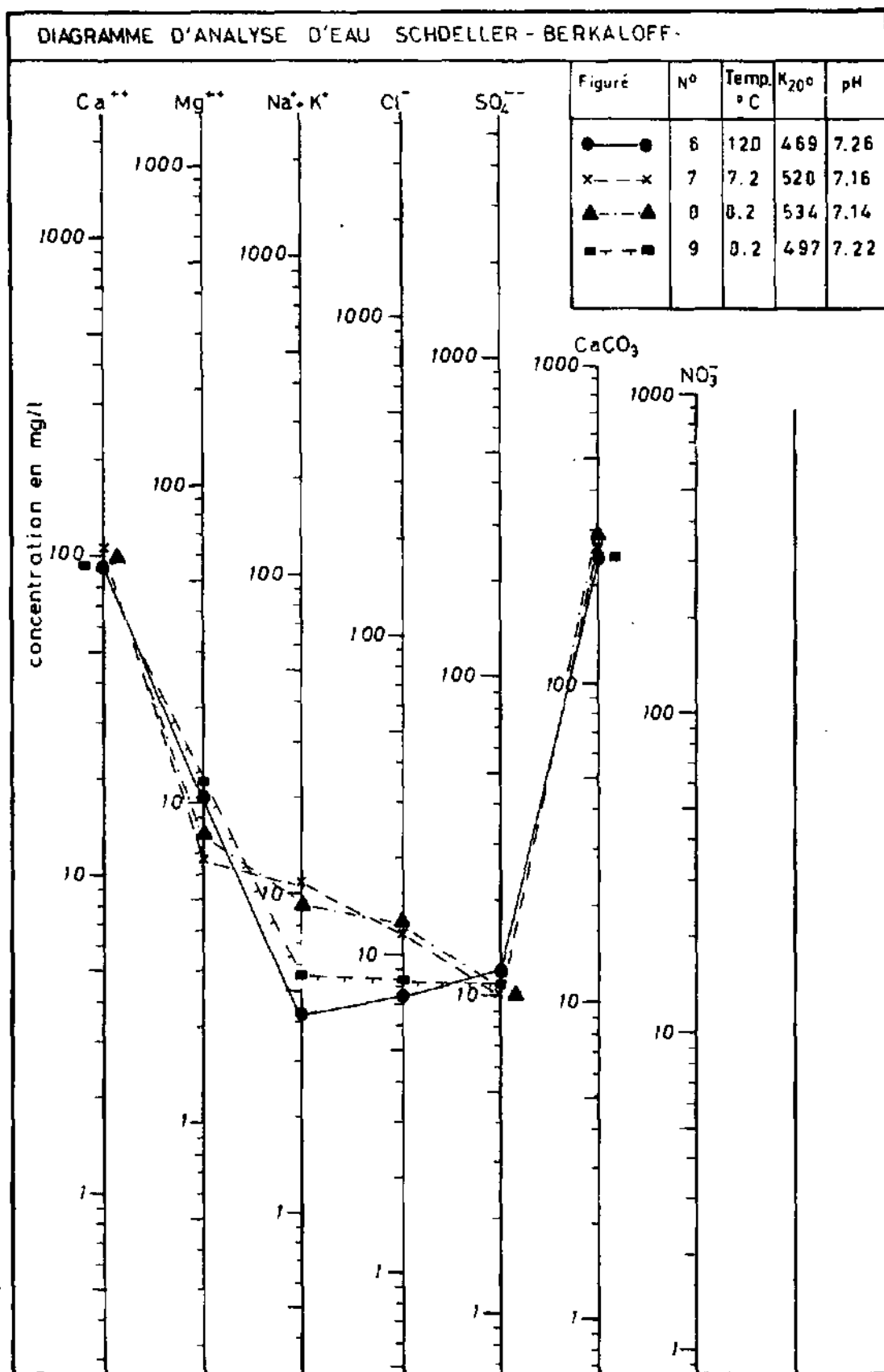


Figure X - 12 Sources d'Hauterive et de Bussy-Sorgereux. Hydrochimie le 26.8.1971. ● Source d'Hauterive (3a). x Puits de la commune (Val. 15). ▲ Source Val 17. ■ Source Val 18.

d'où une incohérence apparente des relations entre les paramètres.

Les résultats des régressions effectuées entre les valeurs de débit, température, conductibilité électrique et de pH de chacun des exutoires de la nappe de Bussy - Sorgereux (tableau X-XII) montre qu'on est parfois loin des équilibres rencontrés en laboratoire lors de la mise en solution des carbonates. Dans le cas des sources à l'exception de K₂₀₀ - T les coefficients de corrélation sont médiocres, le plus souvent inférieurs à la limite de signification. Pour le puits (Val 15) les coefficients de corrélation sont élevés et les lois d'équilibre bien respectées. Sachant que le temps de séjour dans le terrain des eaux de Val 29 est relativement court, on s'étonne de ne pas obtenir de meilleures corrélations pour cette source.

Les corrélations négatives $\text{pH} = f(T)$ et $\text{pH} = f(K_{200})$ sont en accord avec le schéma :

Augmentation de la température de l'air $\rightarrow$ augmentation de l'activité végétale $\rightarrow$ augmentation de la production de CO_2 $\rightarrow$ abaissement du pH et augmentation de la dissolution des carbonates.

L'étude des relations $\text{pH} = f(\text{Ca}^{++})$ et $\text{pH} = f(\log \text{Ca}^{++})$ envisagée pour tous les exutoires n'est significative que pour Val 15. On trouve en appliquant la relation établie par ROQUES (dans BURGER, 1972 b) :

$$\text{pH} = 9,73 - 1,32 \log \text{Ca}^{++}$$

ou exprimé en teneur de Ca CO_3

$$\text{pH} = 10,25 - 1,32 \log \text{Ca CO}_3$$

Comparée aux courbes expérimentales de ROQUES pour des eaux en équilibre, on constate que la sous saturation augmente avec le pH (Fig. X-13) soit en période de crue, alors que les eaux tendent vers l'équilibre en période d'étiage.

Tableau X-XII

Nappe de Bussy - Sorgereux
Valeurs des coefficients de corrélation entre les paramètres physico-chimiques de chaque source.

Variable dépendante	Variable indépendante	Val 15 (puits) r	Val 16 r	Val 17 r	Val 18 r	Val 29 r
pH	Q	-	0,25	0,28	-0,10	-0,08
pH	T	-0,82	-0,04	-0,16	-0,27	-0,33
pH	K ₂₀₀	-0,90	-0,36	-0,38	-0,36	-0,48
K ₂₀₀	Q	-	-0,62	-0,62	-0,17	-0,23
K ₂₀₀	T	0,87	0,37	0,70	0,35	0,54
pH	Q, T, K ₂₀₀	0,90	0,43	0,44	0,42	0,57
K ₂₀₀	Q, T, pH	0,93	0,71	0,75	0,50	0,63

N = 78

$r_{0,01} = 0,29$

$r_{0,001} = 0,37$

2.5. Corrélation des paramètres physico-chimiques entre les sources.

A l'exception des corrélations entre le puits et Val 18 qui sont inexistantes, les coefficients sont presque toujours significatifs (tableau X-XIII). Val 16 et Val 17 sont manifestement apparentées ($r \geq 0,82$) mais sont relativement indépendantes du régime du puits particulièrement pour les pH. Les coefficients de corrélation entre Val 16, Val 17 et Val 18 sont médiocres, ce qui était attendu compte tenu des décalages observés entre les temps de réaction des sources aux événements météorologiques.

NAPPE DE BUSSY-SORGEREUX

Droite d'équilibre $\text{pH} = f(\log \text{Ca}^{++})$

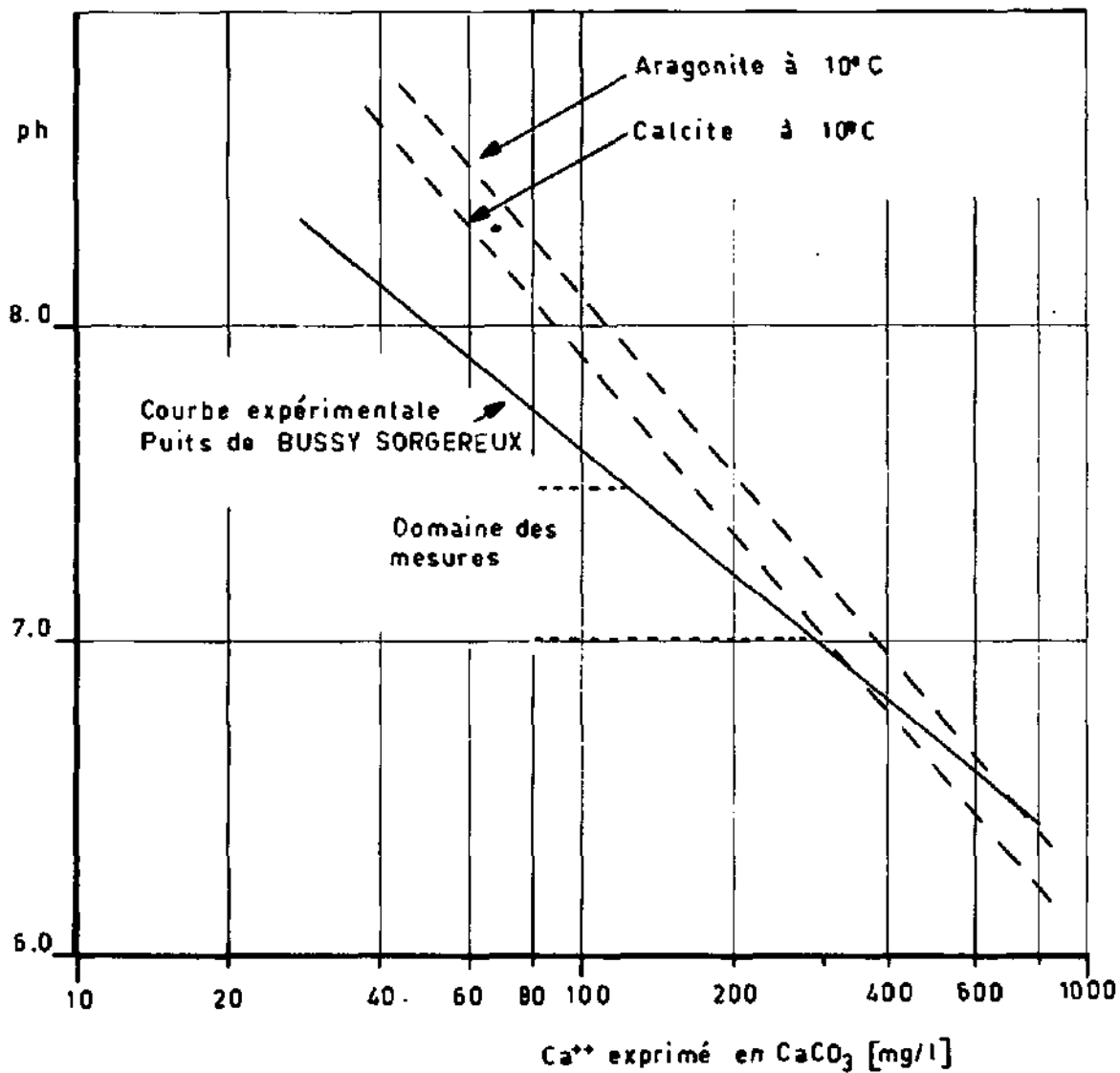


Figure X - 13 Droite de régression exprimant le pH en fonction du logarithme de la teneur au calcium : $\text{pH} = f(\log \text{Ca}^{++})$ dans les eaux de puits de la commune de Valangin. (Val 15.)

Les résultats du tableau X-XIII permettent donc de séparer les exutoires en trois groupes : 1) le puits (Val 15), 2) Val 16 et Val 17, 3) Val 18. Ces résultats montrent que l'exploitation de la nappe est pour l'instant incomplète puisqu'elle ne s'adresse que partiellement au système Val 16 - Val 17 et apparemment pas du tout au système dont Val 18 est l'exutoire.

Tableau X-XIII

Nappe de Busay - Sorgereux
Matrice des coefficients de corrélation des paramètres physico-chimiques entre les sources.

	Val 16				Val 17				Val 18			
	Q	T	K ₂₀	pH	Q	T	K ₂₀	pH	Q	T	K ₂₀	pH
Val 15	-	0,69	0,48	0,30	-	0,77	0,51	0,32	-	0,04	0,10	0,01
Val 16	1	1	1	1	0,95	0,82	0,82	0,86	0,77	0,52	0,51	0,68
Val 17					1	1	1	1	0,74	0,44	0,52	0,78
Val 18									1	1	1	1

Nombre d'échantillons N = 79

$r_{0,01} = 0,29$

$r_{0,001} = 0,37$

2.6 Perméabilité de la nappe.

Deux essais de pompage successifs ont été effectués dans le puits après sa construction, malheureusement perturbés vers la fin par d'abondantes chutes de pluie et sans pose de piézomètres.

En régime permanent (formule de Dupuits) on trouve :

$$K = 8,0 \cdot 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$$

$$\text{et } T = 5,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

Les méthodes classiques d'interprétation en régime de non équilibre donnant pour la transmissivité T

Méthode	Absaissement	Remontée
Courbe standard de Theis	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$5,1 \cdot 10^{-4}$ ($r/B = 1,5$)
Approximation logarithmique	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$

La réalimentation de la nappe par les précipitations durant la remontée du niveau oblige à faire intervenir un facteur de drainage, ici sans réalité physique.

Ce sont également les précipitations qui en provoquant la stabilisation précoce du niveau donnent une transmissivité 4 fois trop élevée par la méthode de DUPUITS.

L'absence de piézomètre empêche l'estimation correcte du coefficient d'emmagasinement S de l'aquifère. En effet, appliquées aux rebettants à la paroi du puits les méthodes de Theis et Jacob donnent respectivement $S = 35400\%$ et $S = 26400\%$. Les deux équations de Theis obtenues à partir de T et S mais valables uniquement pour le puits sont respectivement :

$$\Delta = 76,5 \cdot Q \cdot W(u) \quad \text{et } u = 0,75 \cdot 10^4 \frac{r^2}{t}$$

Les courbes caractéristiques déduites des équations du puits (Fig. X-15) s'accordent bien avec les données expérimentales. Compte tenu des fluctuations saisonnières possibles de la nappe on constate que le puits est à même de fournir un débit annuel moyen de l'ordre de 500 litres par

ESSAI DE POMPAGE DANS LE PUIT DE BUSSY-SORGEREUX

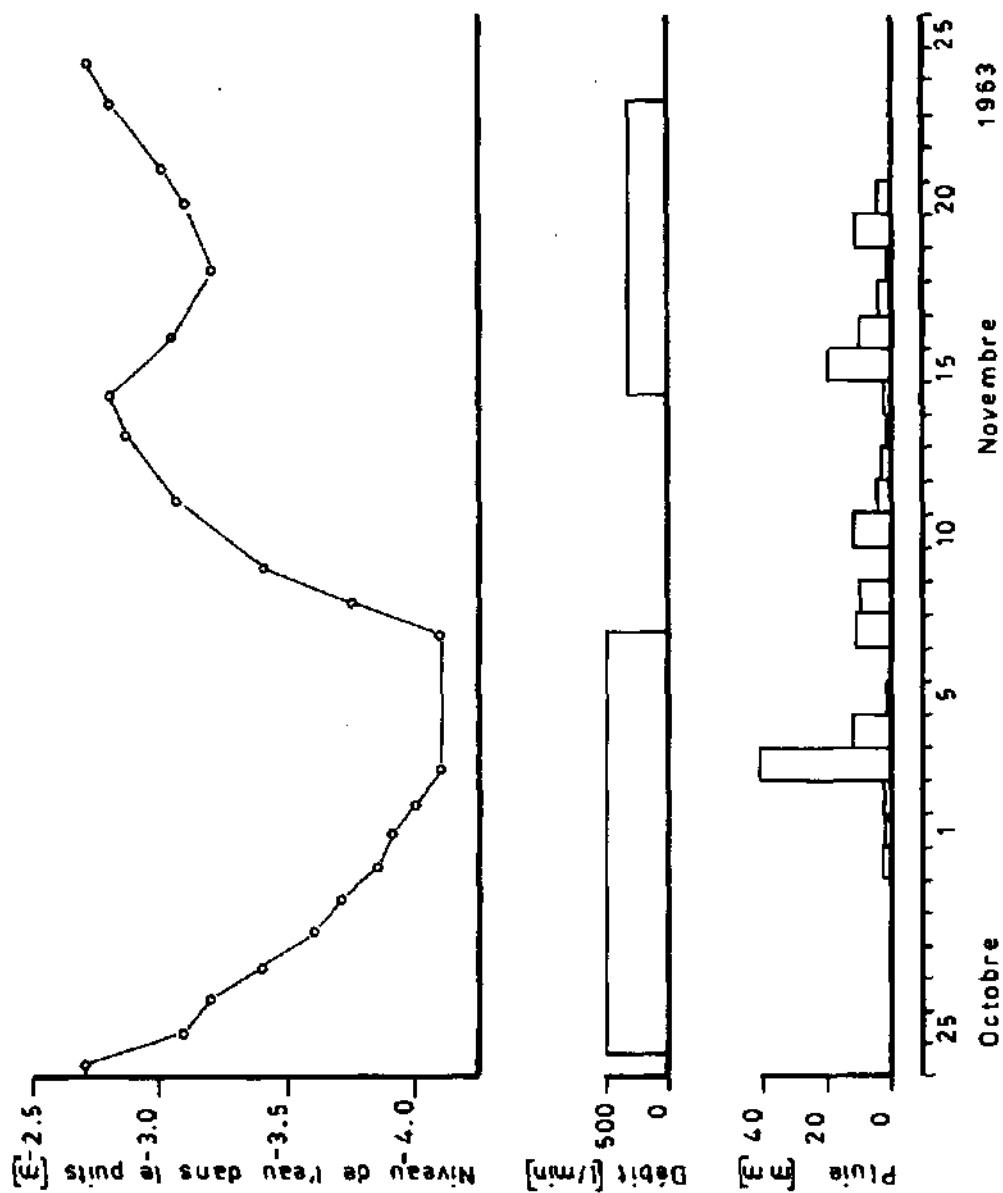


Figure X - 14 Nappe de Bussy-Sorgereux, Données techniques de l'essai de pompage dans le puits Val 15.

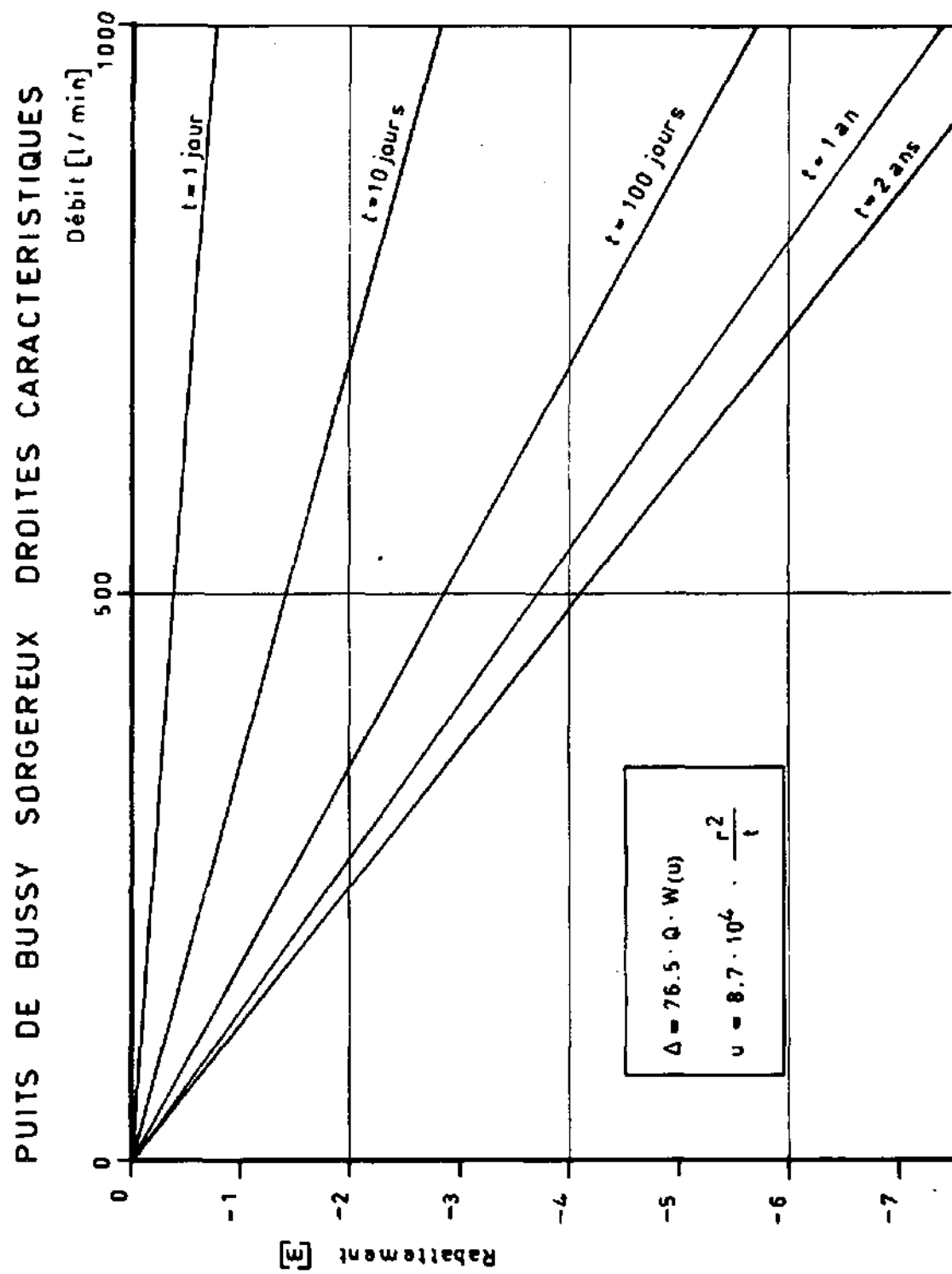


Figure X - 15 Nappe de Bussy-Sorgereux, droites caractéristiques du puits.

minutes. Les réserves régulatrices de la nappe sont certainement plus importantes, mais leur estimation nécessiterait un complément d'information géologique et hydrologique.

2.7. Essai de bilan hydrologique.

L'estimation de la surface de la nappe de Bussy - Sorgereux est théoriquement possible à partir des éléments du bilan hydrologique et du débit des exutoires.

Pour la période X 1969 - IX 1970 dont le résultat des bilans mensuels est donné au tableau X-XIV on trouve :

P	= 1133 mm	(Le Sorgereux)
ETR	= ETP = 440 mm	(Evapotranspiration réelle)
Q	= 9,7 l s ⁻¹	(Débit annuel moyen des exutoires : puits et sources)

La surface S du bassin est donnée par la formule :

$$S = \frac{31,5}{P - ETR} \cdot Q = 0,44 \text{ km}^2$$

où Q est exprimée en l s⁻¹, P et ETR en mm.

Le bilan hydrologique de la nappe ainsi calculé ne tient pas compte de certains prélèvements et recharges, à savoir :

- La lame d'eau interceptée par le réseau de drainage qui représente le terme ruissellement R de l'équation du bilan.
- Les échanges hydrauliques entre la nappe et les calcaires sous jacents. (ΔC)
- Des échanges entre le Vaubelay et la nappe : soit une recharge possible de la nappe en amont des exutoires et une décharge diffuse non mesurée dans la zone sourcière. (ΔNR)

L'équation du bilan de la nappe de Bussy - Sorgereux s'écrit alors :

$$P = ETR + Q + R \pm \Delta C \pm \Delta NR$$

C'est certainement R qui représente l'erreur la plus importante et qui conduit à envisager une augmentation certaine de la surface élémentaire. Des échanges entre la nappe et l'Hauterivien supérieur n'ont pu être mis en évidence même par la chimie, bien qu'ils existent, certains aux limites de la nappe. Au point 557.870/207.015 un forage à travers le moraine a rencontré les calcaires à 11,50 mètres de profondeur. En août 1964, le niveau saturé était à -5,70 m dans la moraine et l'approfondissement du forage a provoqué la disparition des eaux dans les calcaires. En période de crue, il est probable que les calcaires sont en charge sous la moraine.

Les échanges entre la nappe et le ruisseau sont probablement peu importants. Ils pourraient être à l'origine de la forte variabilité des paramètres physico-chimiques du puits.

3. LA NAPPE DE PAULIERE

3.1. Situation.

La colline du Crêt de Paulière est une moraine de retrait du glacier würmien qui repose sur une forte épaisseur de moraine argileuse imperméable cette dernière recouvrant la molasse oligocène (MATHEY, SIMEONI, 1973). Des recherches hydrogéologiques (FREL, 1943) et géoélectriques (POLDINI, 1964) ont permis de définir l'épaisseur et l'extension des graviers morainiques perméables formant la zone alimentaire de la nappe dont les limites sont bien représentées par la ligne d'équirésistivité 100 ohms de la carte AB = 40 mètres, (figure III-1). Celle-ci est jalonnée de sources (Les Favarettes) et de venues diffuses dans le lit de la Sorge (Bois du Clos - captages de Boudevilliers). Le réseau de drainage périphérique évacue également une partie des

Evapotranspiration réelle et potentielle
 NAPPE DE BUSSY SORGEREUX
 PERIODE 1969 - 1970

FORMULE DE TURC ETR = 444.6 MM
 FORMULE DE COUTAGNE ETR = 430.7 MM

BILAN HYDRIQUE D'APRES LA METHODE DE THORNTHWAITE

MOIS	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	ANNEE
TEMPERATURE	10.0	4.6	-3.6	-0.2	0.5	1.2	5.1	11.0	16.4	16.9	16.9	14.5	7.7
INDICES THERMIQUES	2.85	0.88	0.60	0.00	0.03	0.11	1.03	3.29	6.03	6.32	6.32	5.01	32.52
COEFFICIENTS DE CORRECTION	0.80	0.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75	
EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE	40.1	18.4	5.0	5.0	5.0	7.4	33.1	66.8	86.2	80.3	67.5	54.8	469.9
PRECIPITATIONS	4.2	107.3	50.4	67.0	281.0	94.0	124.0	75.0	119.0	70.6	96.9	43.9	1133.2
VARIATION DE L'EAU DANS LE SOL	-35.9	35.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-9.7	9.7	-10.9	
RESERVES UTILES A LA VEGETATION	64.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	90.2	100.0	89.0	
DEFICIT D'ALIMENTATION	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
EXCEDENT D'ALIMENTATION	0.0	52.9	45.4	62.0	276.0	86.5	90.8	8.1	32.7	0.0	19.6	0.0	674.2
EVAPOTRANSPIRATION REELLE	40.1	18.4	5.0	5.0	5.0	7.4	33.1	66.8	86.2	80.3	67.5	54.8	469.9

eaux de la nappe.

Deux puits filtrants profonds de 10 mètres et distants de 130 mètres (puits de la Paroisse), implantés en 1944 représentent les ouvrages de captage principaux (débit annuel moyen 1955 - 1970 : 76 litres par minute).

3.2. Perméabilité.

De fréquentes variations du débit et l'absence de piézomètres empêchent une interprétation précise de l'essai de pompage réalisé après sa construction (juillet 1944) dans l'un des puits de la paroisse.

Après 60 heures de pompage avec un débit moyen de 313 l/min dont les dernières 36 heures à 350 l/min, le rabattement dans le puits était de 0,8 m, l'abaissement du niveau se poursuivait à raison de 0,01 m par heure. Vingt quatre heures après l'arrêt des pompes, le rabattement résiduel était encore de 0,22 m. En admettant une stabilisation à -0,8 m on trouve (méthode de Dupuits) :

$$K = 9,1 \cdot 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$$

Si cette valeur représente bien la perméabilité de l'aquifère à proximité de l'ouvrage l'absence de stabilisation du niveau indique très probablement une diminution de celle-ci, lorsqu'on s'éloigne de l'ouvrage, le rayon d'action atteignant rapidement les limites de la nappe.

Relevons que les résultats de cet essai de pompage contrastent avec les débits et rabattements observés actuellement. Il est certain que dans un aquifère de faible dimension comme celui de Paulière, où l'exploitation s'adresse rapidement à la totalité des réserves, les résultats des essais de pompage sont représentatifs de l'aquifère pour une situation hydrologique donnée. L'allongement de la durée du pompage d'essai révélerait certainement un abaissement progressif de la transmissivité, conséquence de l'abaissement du niveau général de la nappe.

3.3. Hydrochimie.

L'étude du régime thermique et chimique saisonnier de la nappe de Paulière (MATHEY - SIMEONI, 1973 op. cit) a permis de mettre en évidence deux systèmes d'écoulement à l'intérieur de l'aquifère, l'un profond lié à la source des Favergettes, l'autre aux puits de la paroisse.

Minéralisation carbonatée et pH évoluent en opposition de phase ce qui est en accord avec les lois d'équilibre des eaux carbonatées calciques. Le pH des eaux de Paulière étant minimum en décembre on doit envisager un décalage de 4 à 5 mois entre le moment où les eaux chargées de CO_2 se sont infiltrées et la réapparition du CO_2 aux exutoires.

Relevons que le déphasage (lag-time) entre la température de l'air et celle des sources est plus court (2 - 3 mois).

La teneur en alcalin et en Cl^- de l'eau de la nappe (Fig. X-5) correspond à celle que l'on observe en terrain morainique, mais un peu inférieure à celle de la nappe de Buesy - Sogereux à la même époque.

3.4. Variation des débits spécifiques des puits.

Les prélèvements dans les puits de la paroisse sont maximum en mai et juin (Fig. X-16). Durant les mois qui suivent malgré une exploitation à la limite des possibilités des ouvrages les débits diminuent et les ressources complémentaires des communes sont fournies par un aqueduc depuis Neuchâtel.

Si les débits actuellement prélevés à Paulière sont près de 4 fois inférieurs à ceux observés au début de l'exploitation, une baisse brusque des débits spécifiques a pu être mise en évidence entre 1959 et 1960, par régression linéaire entre les débits manuels exploités et les précipitations. Les résultats étaient encore plus explicites en recourant à la méthode des doubles masses.

Nappe de Paulière

Débts mensuels moyens pompés à Paulière par les communes de la Paroisse. 1955 - 1970

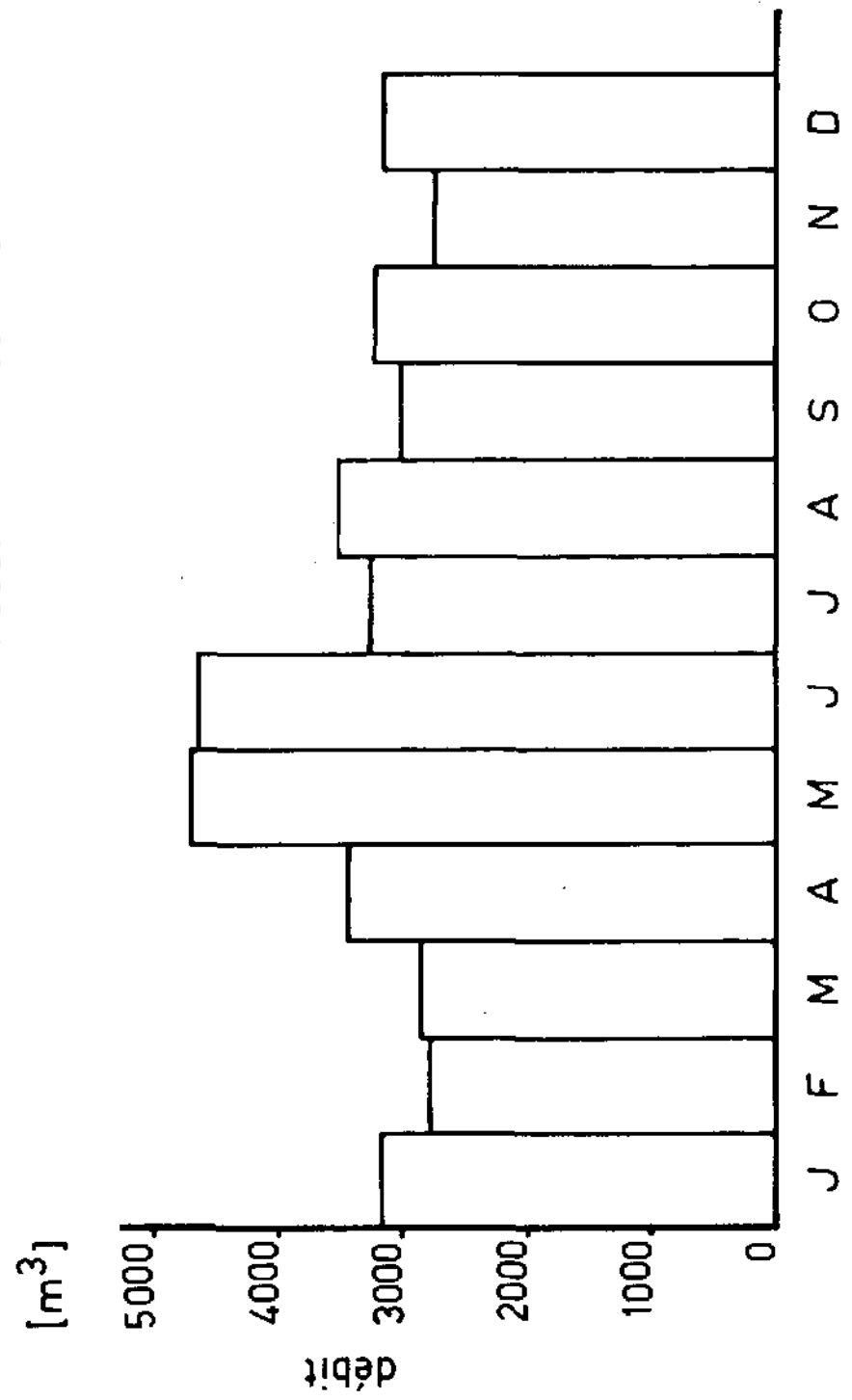


Figure X - 16 Débts mensuels moyens pompés à Paulière par les communes de la Paroisse 1955 - 1970.

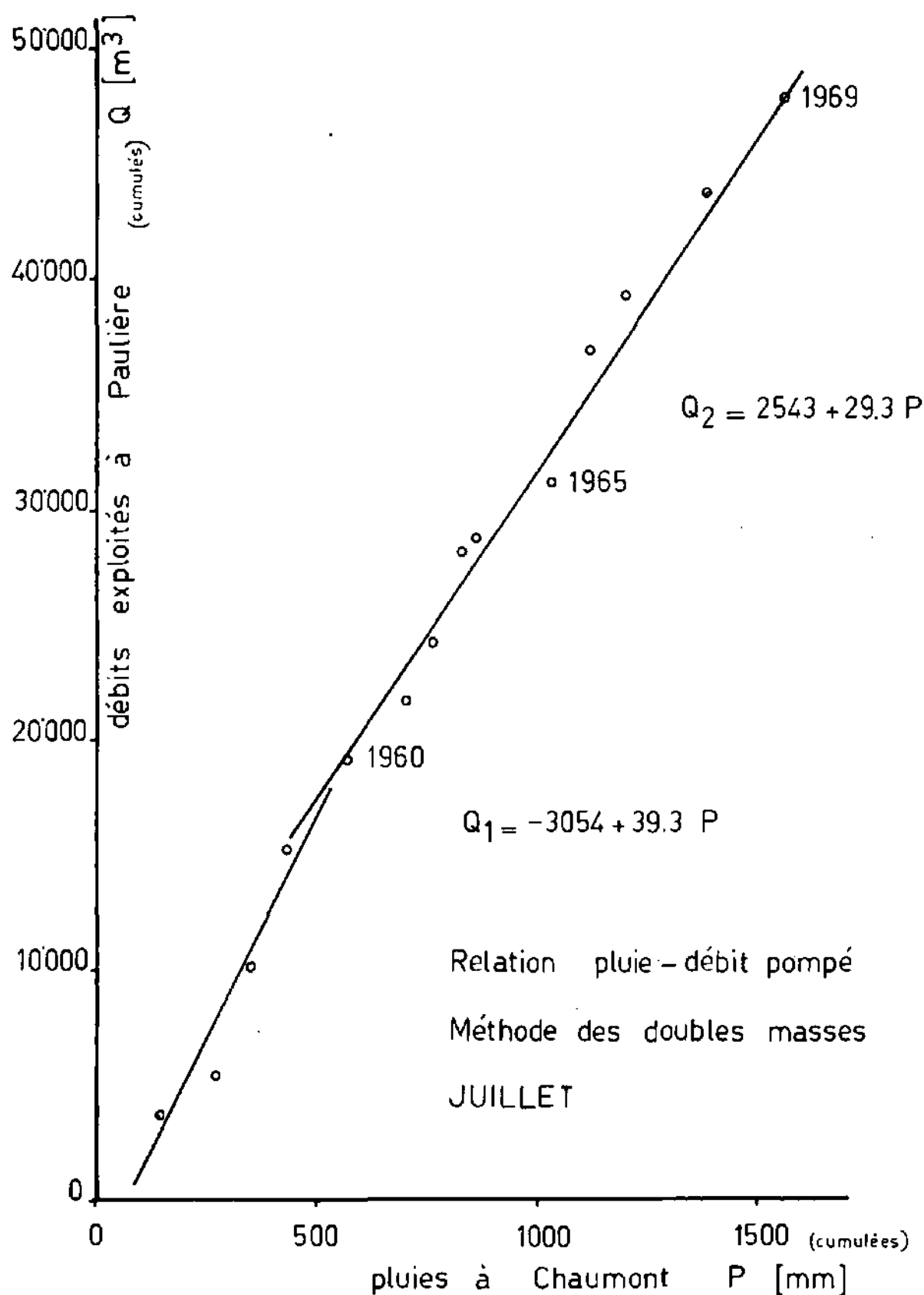


Figure X - 17 Nappe de Paulière. Relations pluie-débit pompé. Méthode des doubles masses. Juillet

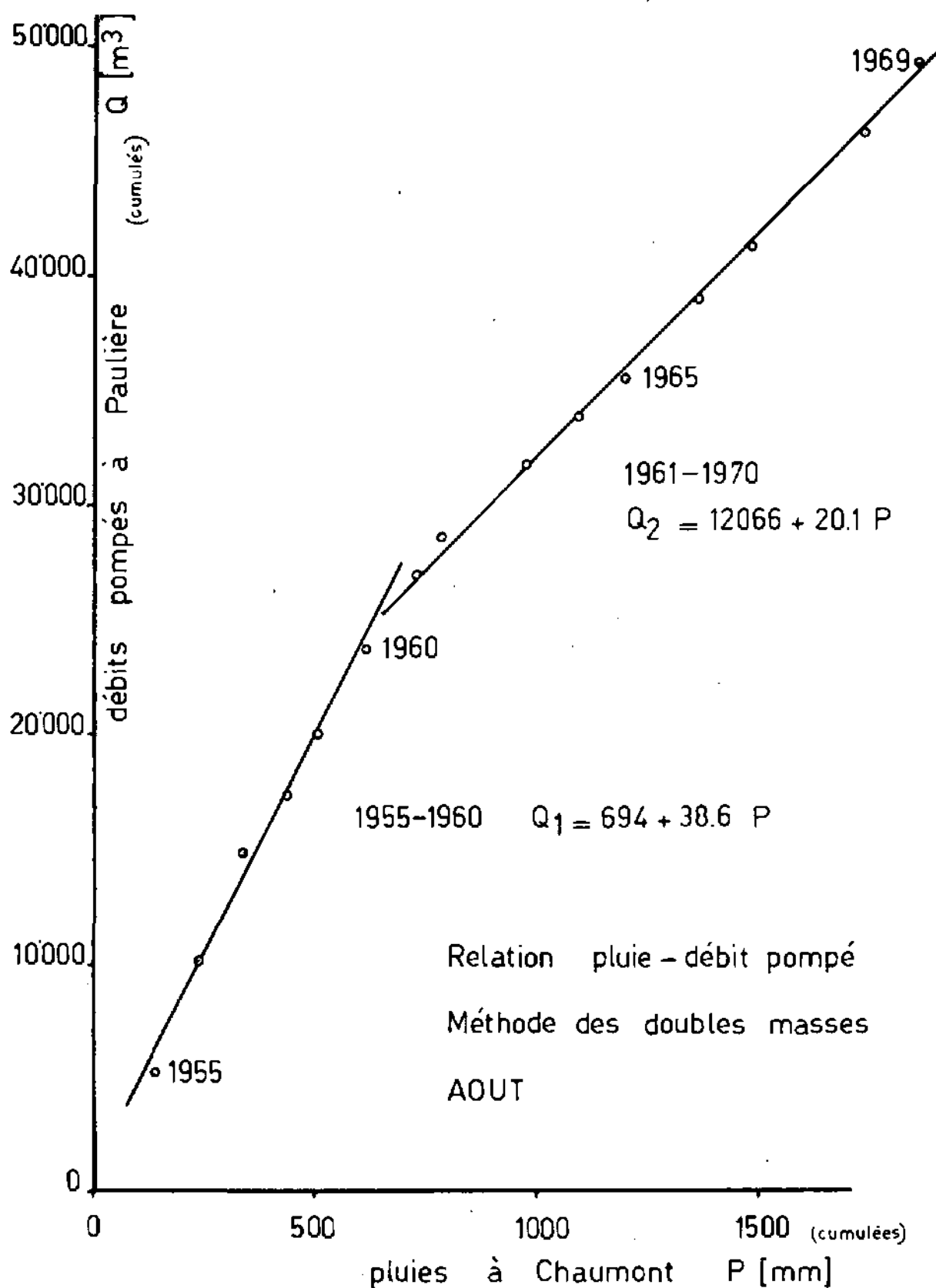


Figure X - 18 Nappe de Paulière. Relations pluie-débit pompé.
Méthode des doubles masses. Août.

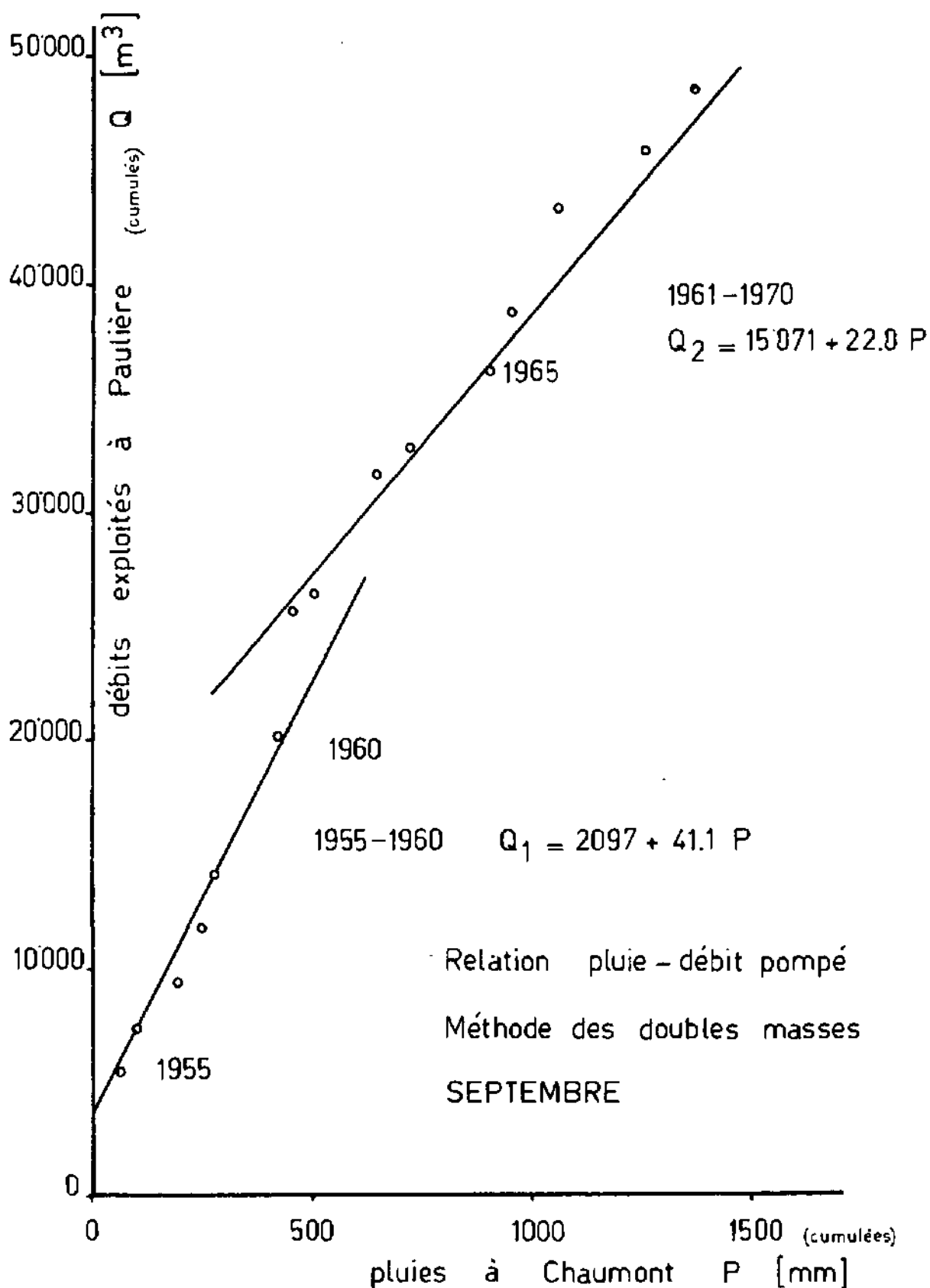


Figure X - 19 Nappe de Paulière. Relations pluie-débit pompé. Méthode des doubles masses. Septembre.

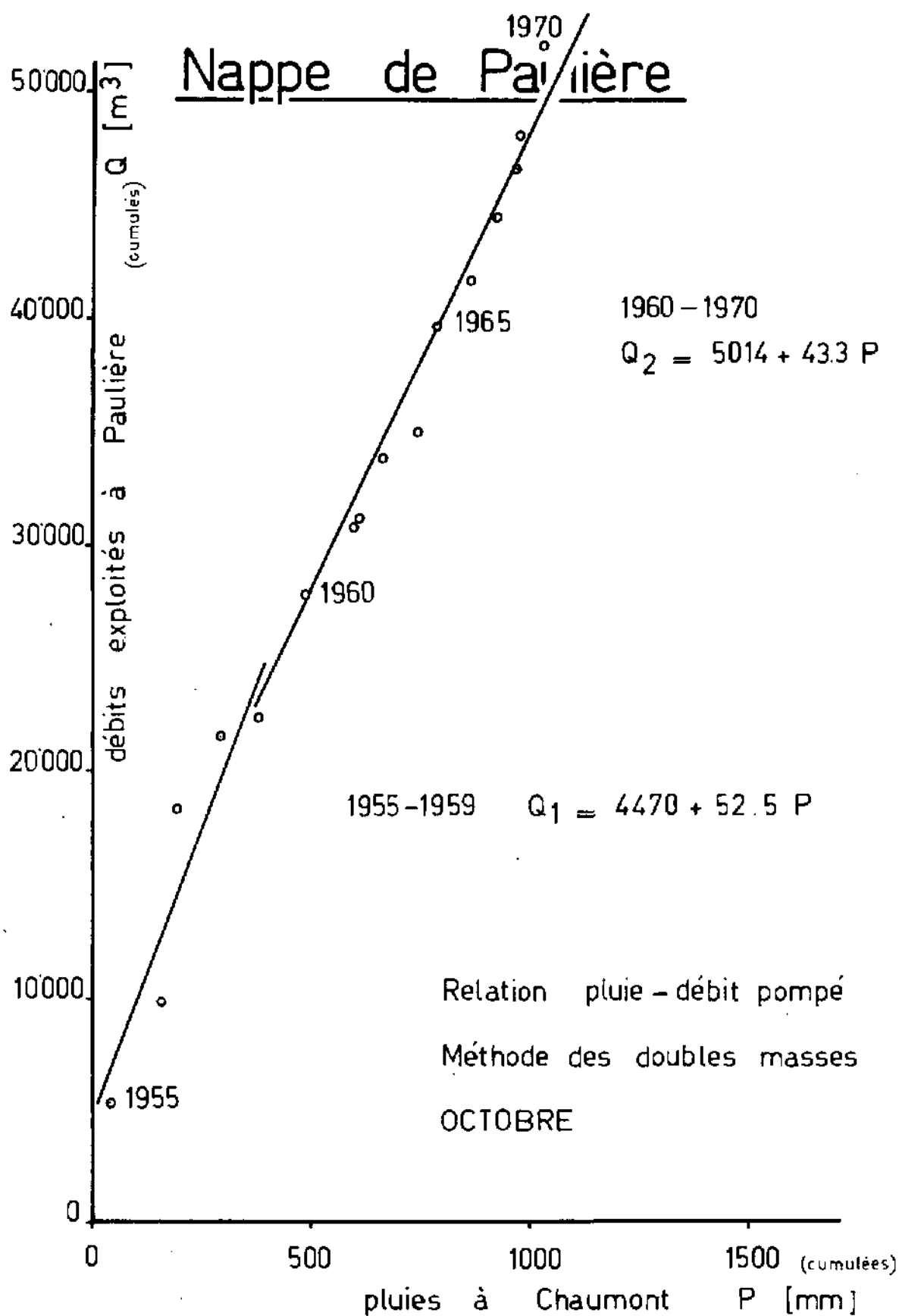


Figure X - 20 Nappe de Paulière. Relations pluie-débit pompé. Méthode des doubles masses. Octobre

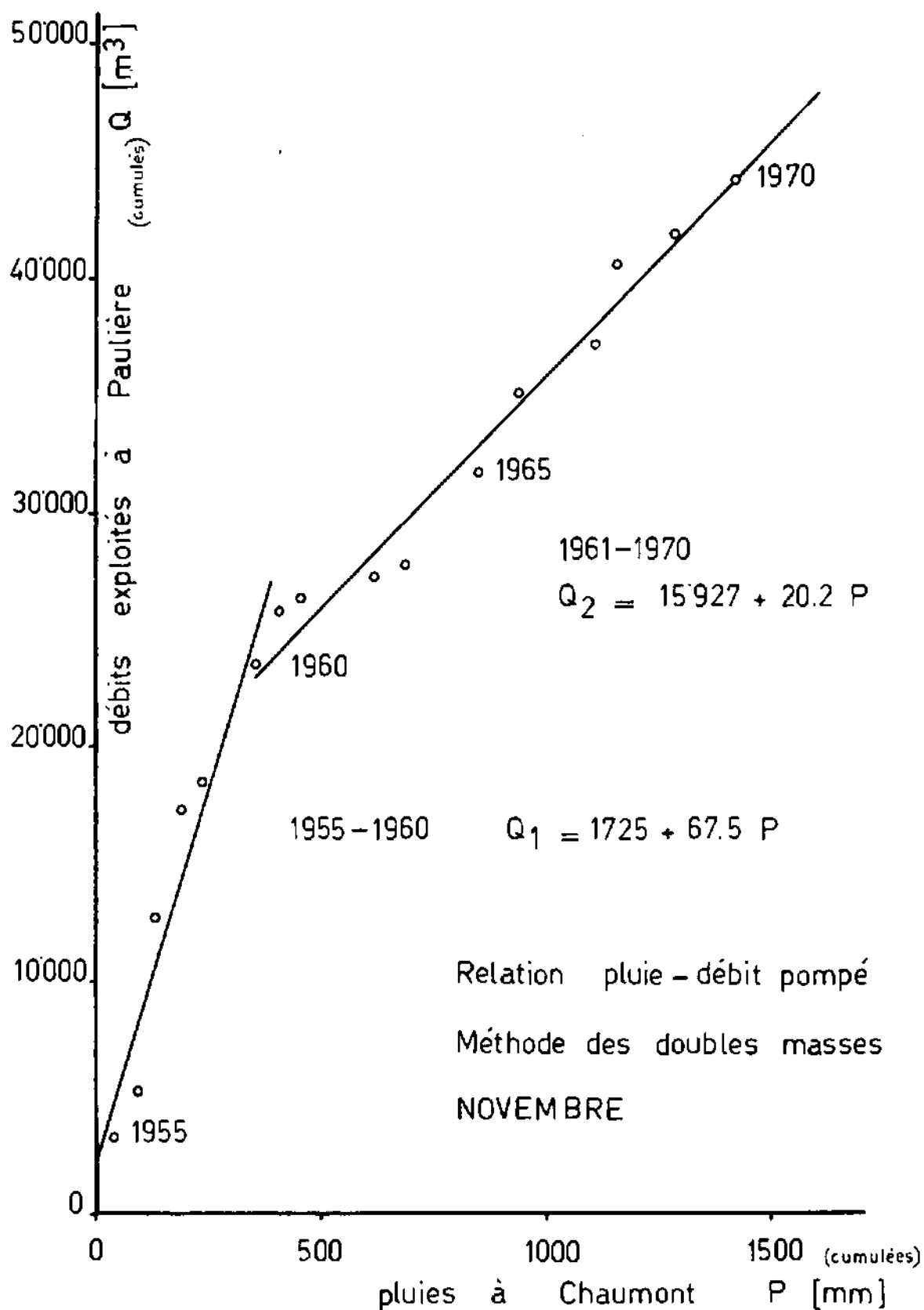


Figure X - 21 Nappe de Paulière. Relations pluie-débit pompé. Méthode des doubles masses. Novembre.

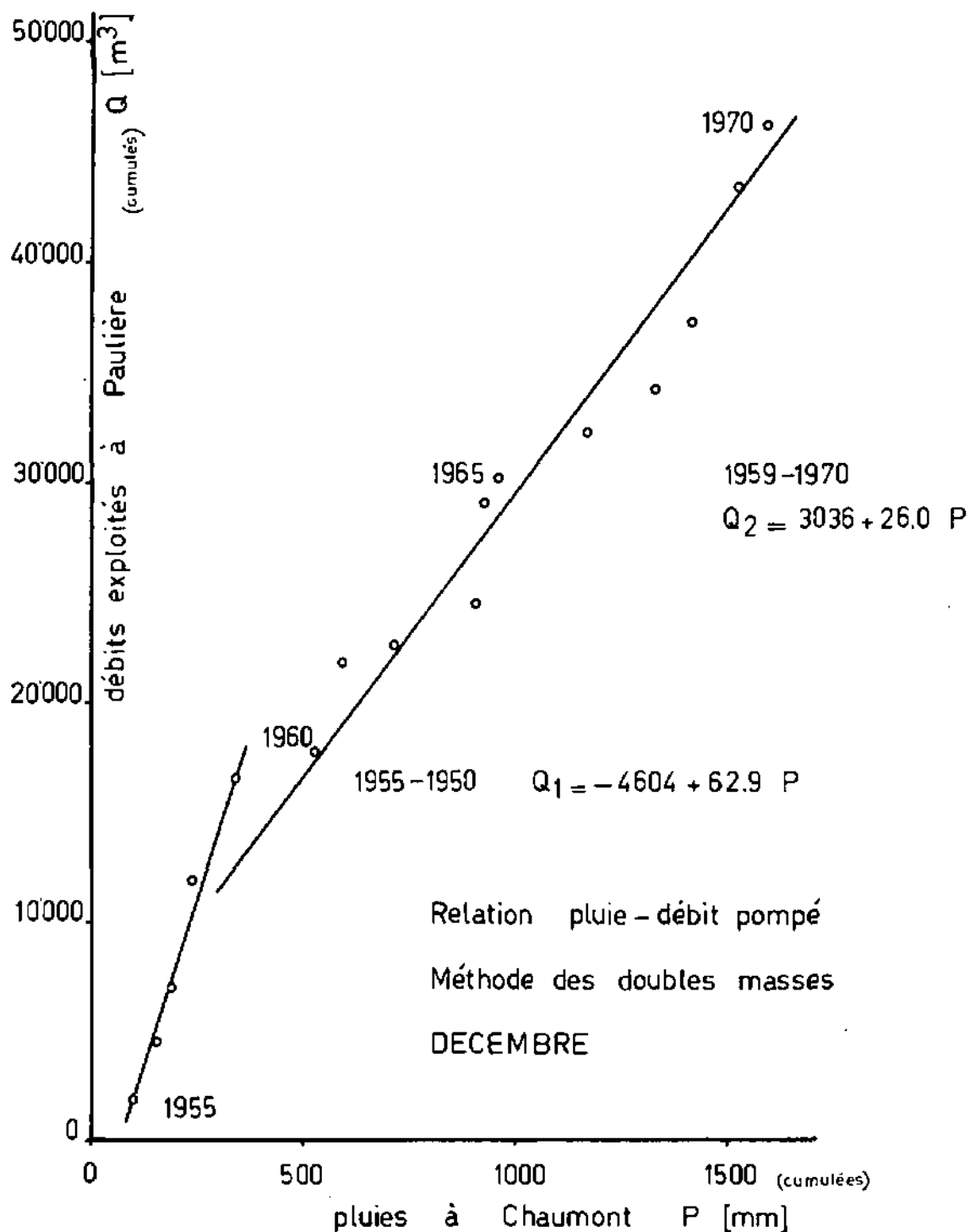


Figure X - 22 Nappe de Paulière. Relations pluie-débit pompé. Méthode des doubles masses. Décembre.

Les figures X-17 à X-22 représentent en abscisse les précipitations cumulées à la station de Chaumont et en ordonnée les volumes d'eau mensuels à la station de pompage de la paroisse. Les mois où le retard à l'infiltration par accumulation de neige peut être important n'ont pas été pris en considération.

Les coefficients de corrélation des droites ajustées sur l'ensemble des points sont en général inférieurs à 0,75. En revanche, en séparant les groupes de points en deux périodes distinctes, 1955 - 1960 et 1960 - 1970, les coefficients de corrélation sont toujours supérieurs à 0,90. Les valeurs des pentes des droites de régression étant systématiquement plus faibles pour les périodes récentes, on est amené à constater une baisse du débit spécifique des ouvrages de captage à partir de 1959 - 1960. Celle-ci est à mettre en relation avec l'exploitation de la gravière, dont les résidus de lavage riches en éléments fins ont été déposés à proximité des ouvrages de captage par endroit jusque dans la zone saturée. Il en est résulté un colmatage de l'aquifère accompagné d'une baisse des coefficients d'emménagement et une diminution de l'infiltration.

3.5. Ressources en eau et essai de bilan.

La surface alimentaire de la nappe de Paulière est d'environ $0,7 \text{ km}^2$. L'évapotranspiration réelle pour la période 1955 - 1970 (Turc) représente le 45% des précipitations. Le débit exploité par les communes de la paroisse constitue le 5% de la lame d'eau annuelle moyenne et les captages du Bois du Clos 1 à 2%. Le débit encore disponible évacué aux limites de l'aquifère est alors de 700 litres par minute.

Si la fraction qui s'en échappe durant les crues est sans intérêt économique, il est certain que la construction de nouveaux ouvrages de captage et une exploitation de la gravière compatible avec les données hydrogéologiques devraient permettre d'en récupérer une partie.

4. LA NAPPE DE SOUS LE MONT

4.1. Situation, sources et captages.

Entre Clêmesin et le Grand Savagnier au pied du versant Nord Ouest de la chaîne de Chaumont, les formations jurassiques et crétacées sont recouvertes par le moraine argileuse et des éboulis. Ces derniers ainsi que la fraction supérieure graveleuse de la moraine constituent un aquifère large de 100 à 150 mètres qui longe la zone déprimée du pied de Chaumont. Le soulèvement de l'aquifère est constitué pro parte par le moraine argileuse, le Pürbeckien (source des Chevreuils) et probablement la molasse oligocène vers le NE (Fig. X-23).

Un groupe de sources D_1 , D_2 , D_3 , (les deux premières sont temporaires) constituant la décharge principale de cette nappe et sont captées par la commune de Dombresson. Un puits filtrant utilisé en étiage seulement complète le dispositif de captage, mais provoque le tarissement de D_3 .

A la hauteur des cibles de Dombresson (alt. 835 m) deux venues ascendantes. Les sources des Chevreuils, représentent une décharge temporaire de la nappe de Sous le Mont. Elles constituent la source du Rosay, ruisseau qui 1200 mètres en aval reçoit le trop plein des deux captages de Savagnier, (alt. 820 m, coord. 564.600/211.880) derniers exutoires de cette nappe de piedmont. En période de crue d'autres venues temporaires jaillissent le long du Rosay, en particulier au point 564.920/212.420.

De nombreuses recherches, le plus souvent artisanales, en particulier sur le territoire de Savagnier, ont révélé l'hétérogénéité des formations quaternaires. Un essai de pompage dans le puits filtrant, profond de 5 mètres, établi à proximité des sources des Chevreuils, a révélé une liaison hydraulique de celle-ci avec les sources de Dombresson. (BURGER, comm. orale). Plus récemment, une campagne de recherches géoélectriques sur le territoire de Savagnier a confirmé la faible épaisseur des terrains graveleux saturés entre les cibles et le Grand Savagnier.

NAPPE DE SOUS-LE-MONT: SITUATION DES SOURCES

- | | | |
|-----------------------|-----------------|-----------------|
| ○ SOURCE TEMPORAIRE | Mo MORAINÉ | Po PORTLANDIEN |
| ● SOURCE PERENNE | Eb EBOULIS | ↗ CHEVAUCHEMENT |
| □ STATION DE JAUGEAGE | A AQUITANIN | — FAUILLE |
| | Vai VALANGINIEN | |

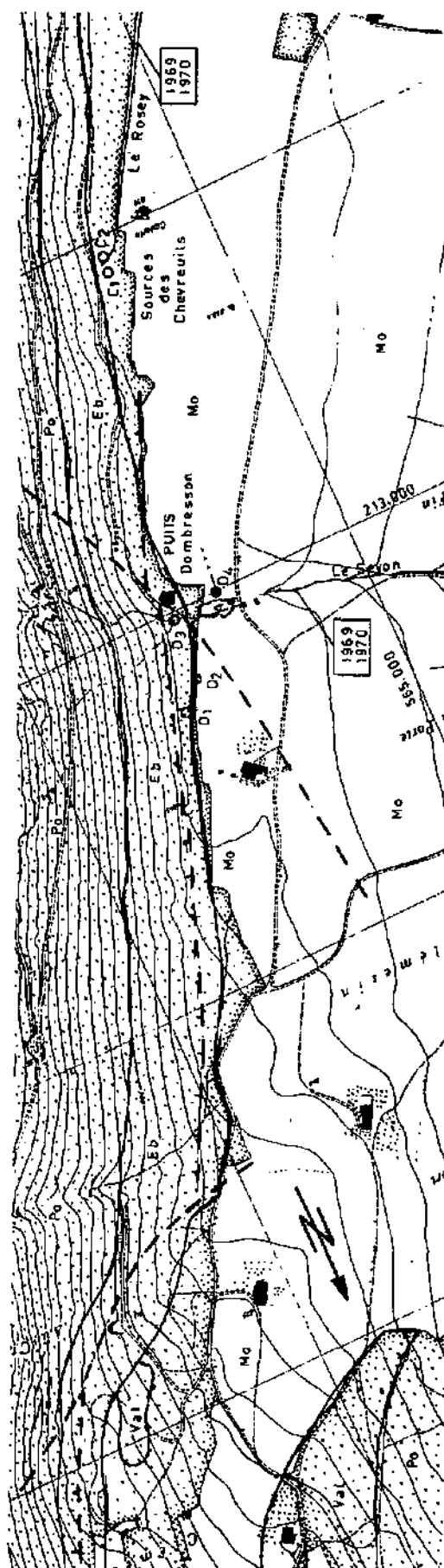
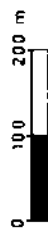


Figure X - 23 Nappe de Sous le Mont. Situation des sources et captages.

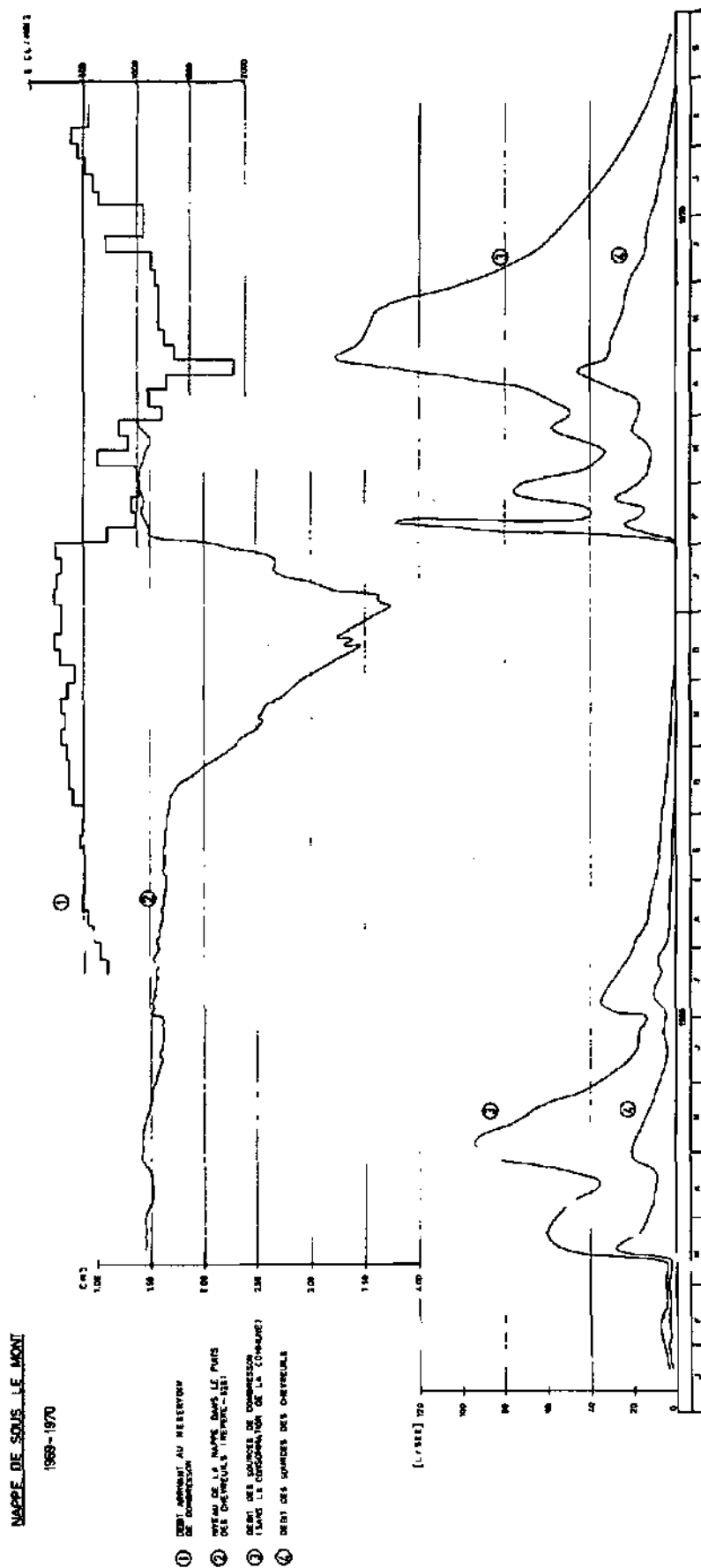


Figure X - 24 Débit des sources de Sous le Mont et niveau de la nappe dans le puits des Chevreuils.

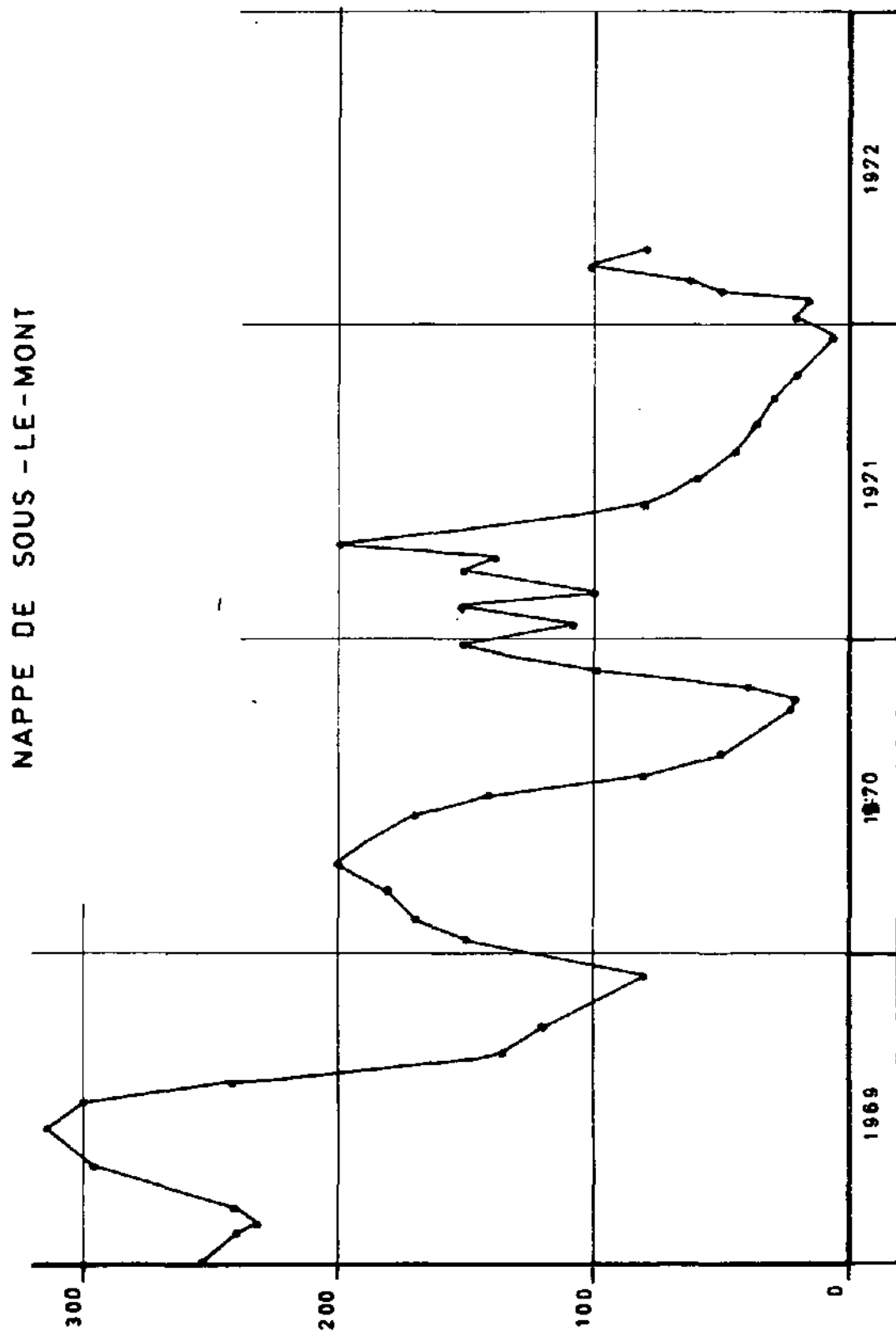


Figure X - 25 Nappe de Sous le Mont. Débits des sources de Savagnier à l'arrivée au réservoir de la commune (1969 - 1972). Mesures: R. Girard.

4.2. Observations hydrologiques.

Dans le but de préciser le bilan hydrologique de la nappe de Sous la Mont on a procédé à l'installation d'un réseau d'observations qui comprenait :

- Mesure hebdomadaire du débit des sources de Dombresson et des Chevreuils sur seuil rectangulaire.
- Enregistrement limnigraphique du niveau de la nappe dans le puits des Chevreuils.
- Relevé mensuel du débit des sources de Savagnier au réservoir communal.
- Prélèvement et analyses chimiques hebdomadaires aux sources de Dombresson ou des Chevreuils et mensuels aux captages de Savagnier.

Les courbes de tarages des seuils rectangulaires sont été obtenues à partir de la relation

$$Q = 1,83 (1 - 0,2 h) h^{3/2} \quad (\text{LENCATRE 1966})$$

où Q est le débit m^3/s

l la largeur du déversoir m

et h la charge au-dessus de la lame déversante mesurée en amont du seuil.

Un étalonnage périodique de la courbe de tarage était réalisé à l'aide d'une plaque d'aluminium de section hyperbolique telle que la relation hauteur - débit soit linéaire. (KESSLER 1959).

4.3. Débit des sources et niveau de la nappe.

La variabilité des débits est remarquable: de 2 à 160 litres par seconde pour l'ensemble des sources de Dombresson, de 0 à 50 l/s pour les Chevreuils et de quelques litres par minute à plus de 40 l/s pour celles de Savagnier, dont une partie seulement a été jaugée au réservoir. Crues et décrues sont bien synchronisées (fig. X-24) particulièrement entre les sources de Dombresson (Q_D) et des Chevreuils (Q_{ch}) où la corrélation est excellente. Linéaire pour $Q_D < 50$ l/s la régression est de type quadratique pour les valeurs élevées, l'accroissement de Q_{ch} étant relativement plus lent que Q_D . On trouve :

$$\text{1er degré} \quad Q_{ch} = 0,69 + 0,183 Q_D$$

$$\text{2me degré} \quad Q_{ch} = -1,01 + 0,261 Q_D - 0,503 Q_D^2$$

Les coefficients de corrélation valent respectivement 0,96 et 0,97 pour $r_{0,001} = 0,50$

Les débits annuels moyens des sources des Chevreuils représentent le 1/5 de ceux des sources de Dombresson (tableau XV).

L'abaissement du niveau de la nappe au puits des Chevreuils présente deux régimes bien distincts selon que la commune de Dombresson exploite le débit naturel des sources ou prélève l'eau de la nappe par pompage.

En période de tarissement, l'analyse des débits par la formule de Maillat (fig. X-26) confirme la parenté étroite entre les sources des Chevreuils et de Dombresson.

Les coefficients de tarissement α , si l'on excepte quelques interruptions dues à une recharge de la nappe par les précipitations, sont identiques pour les 2 groupes de sources ($\alpha = 0,030$). Contrairement à ce qu'on observe dans la plupart des sources karstiques, il n'y a pas de modification de α avec le temps ou le débit.

La cassure qui apparaît à la fin de la phase de tarissement des sources des Chevreuils coïncide avec la mise en marche des pompes dans le puits de Dombresson, d'où l'assèchement des sources. L'inverse, à savoir une accélération du tarissement des captages de Dombresson durant un pompage dans le puits des Chevreuils, avait été observé par BURGER (comm. orale). Des débits plus faibles, une décrue plus lente pour les captages de Savagnier annoncent une perméabilité plus faible de l'aquifère.

Nappe de Sous le Mont. Débits moyens des sources (1969 - 1971)

	Sources de Dombresson ¹⁾ l/s	Sources des Chevreuils l/s	Sources de Savagnier ²⁾ l/s	Total l/s
1969 (I-XII)	26,0	5,4	3,5	34,9
1970 (I-IX)	58,3	11,6	2,0	72,0
X 1969 - IX 1970	45,6	9,0	2,1	56,7
1971 (I - XII)	-	-	1,3	-

1) Total des sources, y compris consommation de Dombresson.

2) Uniquement débit arrivant au réservoir de la commune.

4.4. Estimation de la transmissivité et du coefficient d'emmagasinement.

Dès le début des pompages dans le puits de Dombresson, l'abaissement du niveau de la nappe dans le puits des Chevreuils s'accélère. Celui-ci peut être utilisé comme piézomètre pour l'estimation de T et S à partir des équations de Theis. Le débit n'étant pas constant, on aura :

$$\frac{A}{Q} = \frac{1}{4 \pi T} \cdot W(u) \quad \text{et} \quad u = \frac{r^2 S}{4 T t}$$

La courbe expérimentale (Fig. X-27) ne s'infléchissant pas, on doit faire l'hypothèse que T et S varient au cours du temps. En ajustant plusieurs segments de la courbe expérimentale à la courbe théorique on définit alors plusieurs valeurs de T et S décroissant avec la durée du pompage. La transmissivité T passe en 23 jours de $6,1 \cdot 10^{-3}$ à $9,3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ et S de 1,6% à 0,4%. L'abaissement simultané de T et S indique nettement que l'exploitation de la nappe s'adresse à des terrains de plus en plus fins, donc moins perméables. La nappe étant peu épaisse l'abaissement du niveau saturé contribue naturellement aussi à une baisse de la transmissivité.

En reportant les logarithmes de T et S en fonction du temps, on constate que les valeurs s'alignent sensiblement selon des droites (Fig. X-28). Lorsque les sources des Chevreuils ont un débit supérieur à 10 litres par minute T et S sont constants et valent :

$$\begin{aligned} T &= 8,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s} \\ S &= 1,6 \cdot 10^{-2} \\ \text{et} \quad K &\approx 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s} \end{aligned}$$

Les équations de Theis pour la nappe de Sous le Mont sont dans ce cas

$$A = 9,9 \cdot W(u) \quad \text{et} \quad u = \frac{r^2}{2t}$$

Ces valeurs sont toutefois entachées d'une certaine erreur (sous estimation) puisque la symétrie de l'aquifère n'est pas circulaire et que les conditions expérimentales n'étaient pas excellentes.

4.5. Régime physico-chimique.

- La température. (Figure X-29)

La couverture forestière qui empêche le réchauffement du sol par rayonnement et l'exposition Nord du bassin versant expliquent les températures exceptionnellement basses des sources de Sous le Mont. La température moyenne de la source D₃ est de 0,5°C supérieure à la température moyenne de l'air à l'altitude de l'exutoire. A titre comparatif la température moyenne de la Serrière est de 3°C supérieure à celle de l'air à l'altitude moyenne de son bassin versant.

NAPPE DE SOUS-LE-MONT

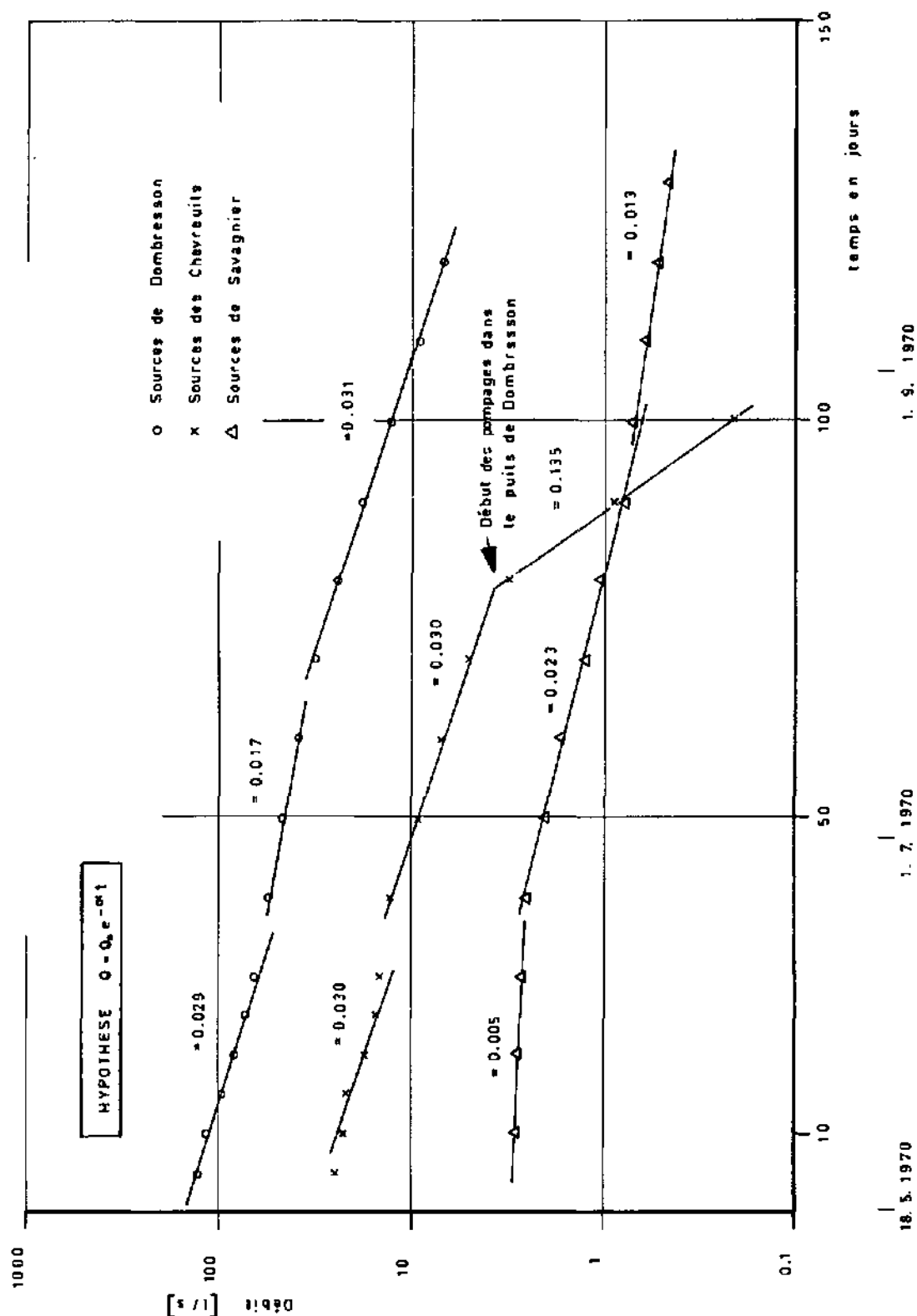


Figure X - 26 Nappe de Sous le Mont. Courbes de tarissement

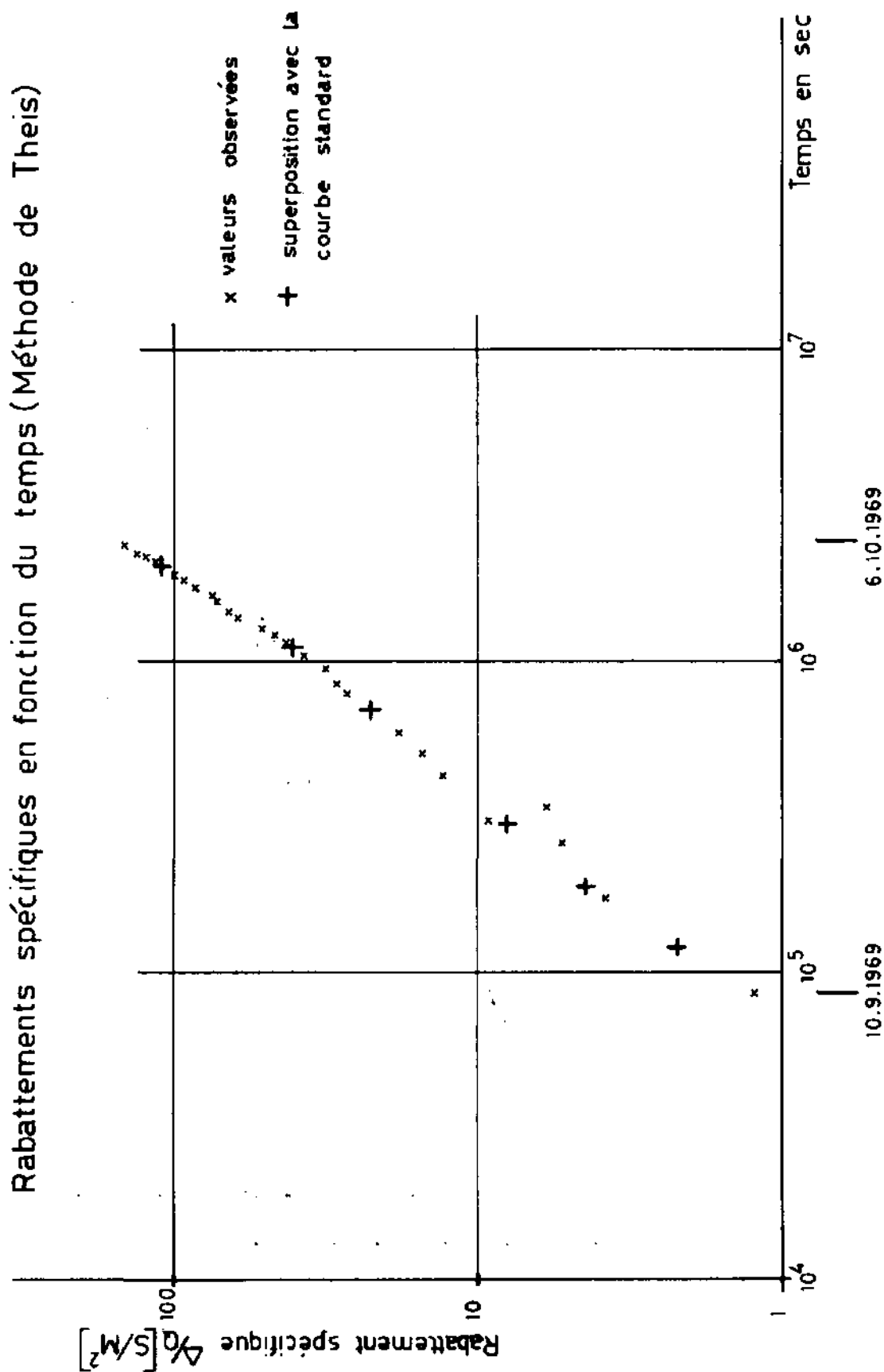


Figure X - 27 Nappe de Sous le Mont. Rabattements spécifiques en fonction du temps (Méthode de Theis).

Variation de T et S en fonction du temps durant un essai de pompage

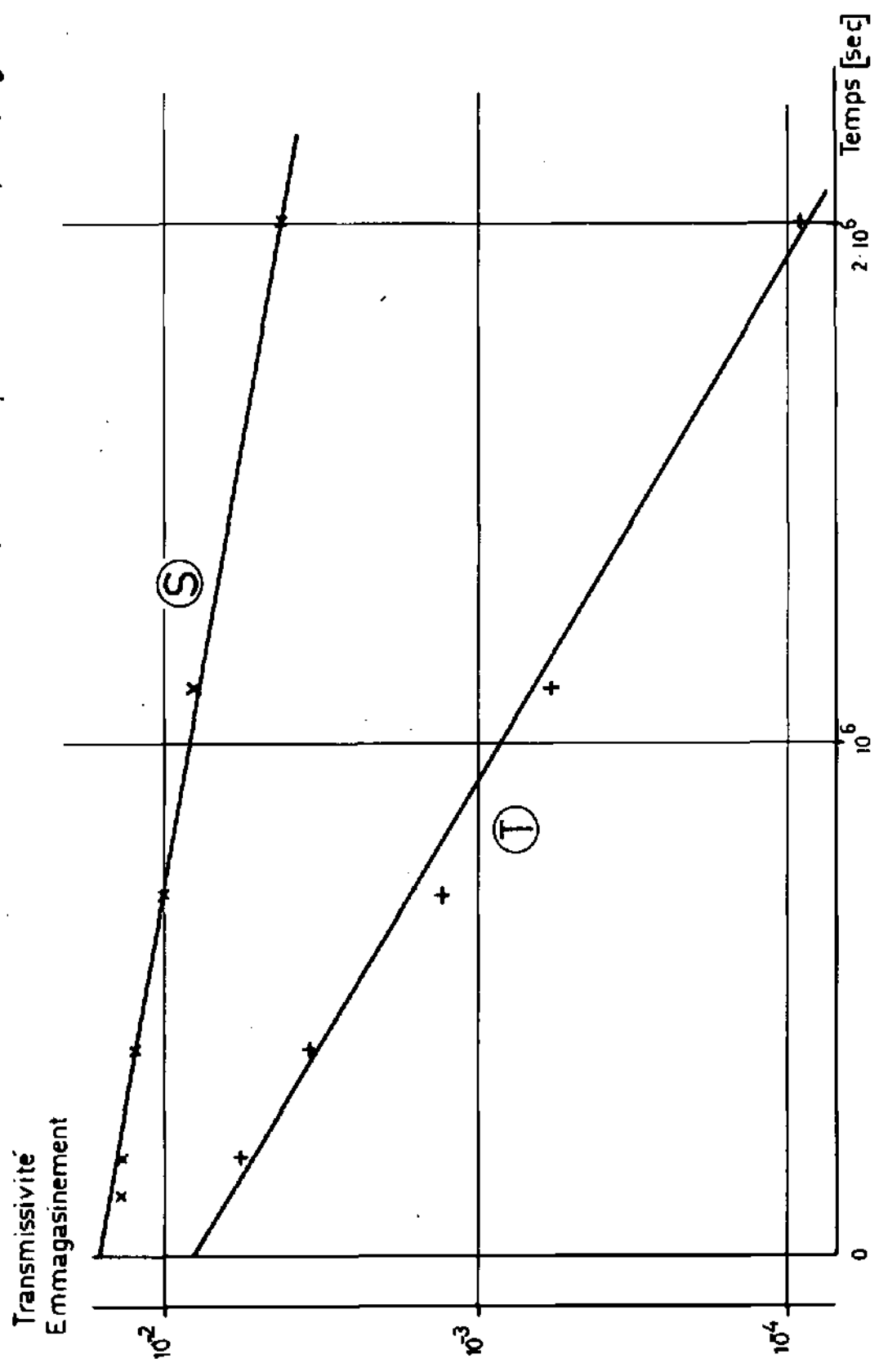


Figure X - 28 Nappe de Sous le Mont. Variation de T et S en fonction du temps durant un essai de pompage.

Ecarts types et températures s'accroissent du NE au SW. Les variations saisonnières sont faibles pour la source pérenne D₃. D₁, temporaire, est légèrement plus chaude que D₃. La température des sources des Chevreuils s'élève constamment jusqu'au moment du tarissement, les deux venues évoluent de façon synchrone. Relevons enfin une baisse de 0,4°C après une crue en juin 1969.

- Conductivité électrique. (Figure X-30)

Elle est exceptionnellement basse pour toutes les sources et particulièrement pour D₃ mais tend à augmenter du NE au SW. Très stable d'avril à septembre, la conductivité de D₃ augmente par oscillations en période de pompage, indice d'un apport plus profond. La conductivité de D₁ est corrélée négativement avec les débits et la crue de juillet 1969 très marquée, mais on s'étonne de voir cette source temporaire plus minéralisée que celle des Chevreuils ou que D₃. Si l'assèchement des sources des Chevreuils n'est pas masqué par un accroissement de la minéralisation la crue de février 1970 se traduit par une baisse de la minéralisation de type exponentiel. Les sources de Savagnier toujours plus minéralisées confirment qu'elles sont alimentées par des terrains moins perméables.

- Duretés. (Figure X-30)

Le contenu chimique étant essentiellement carbonaté, dureté totale et dureté temporaire évoluent dans le même sens que la conductivité électrique. Des pH élevés (7,5) rendent ces sources proches de la saturation en carbonates, malgré une minéralisation très faible.

- Alcalins.

Les teneurs en Na⁺, K⁺ et Cl⁻ sont très basses (tableau X-XVI) comparées à d'autres sources, tant karstiques que quaternaires. La stabilité dans le temps de ces éléments est également plus grande que pour d'autres sources karstiques.

4.6. Hydrochimie et circulation souterraine.

Pour MISEREZ (1973 p. 88 op. cit) qui donne un tableau comparatif du contenu chimique de quatre sources du Jura neuchâtelois, le contenu chimique de la nappe de Sous le Mont ("Seyon"), correspond à celui d'un aquifère limité, constitué d'éboulis calcaires. Les faibles teneurs en alcalin dénotent une infiltration rapide au travers d'un sol peu épais. On verra que ces conclusions sont en partie infirmées par l'étude du bilan hydrologique.

Des centaines d'analyses s'étendant sur une année n'ont donc pas permis de mettre en évidence une sous alimentation temporaire de la nappe par les calcaires encaissants comme l'exige l'arithmétique du bilan.

4.7. Essai de bilan hydrologique de la nappe de Sous le Mont.

Soient P les précipitations, ETR l'évapotranspiration réelle et Q_G, Q_M, Q_C, S_G, S_M et S_C respectivement les débits et les surfaces alimentaires des éboulis, de la moraine argileuse et des terrains non quaternaires. L'équation du bilan de la nappe peut s'écrire :

$$P = ETR + Q_G + Q_M + Q_C$$

avec $Q_T = Q_G + Q_M + Q_C$

et $S_T = S_G + S_M + S_C$

Soit P	= 1300 mm	(X 1969 - IX 1970)	
ETR	= 430 mm	"	
Q _T	= 54,6 l/s	"	(sans les sources de Savagnier)

On obtient S_T, ici 2,0 km², à partir de la formule :

$$S_T = \frac{31,5 \cdot Q_T}{P - ETR}$$

S_G et S_M étant obtenus par planimétrage des formations quaternaires sur la carte géologique, on en déduit Q_G et Q_M . Pour la période X 1969 IX 1970 on obtient

$Q_G = 8,2 \text{ l/s}$	$Q_M = 13,7 \text{ l/s}$	$Q_C = 32,7 \text{ l/s}$	$Q_T = 54,6 \text{ l/s}$
$S_G = 0,3 \text{ km}^2$	$S_M = 0,5 \text{ km}^2$	$S_C = 1,2 \text{ km}^2$	$S_T = 2,0 \text{ km}^2$

L'importance des débits des sources de Sous le Mont (Dombresson et Chevreuil) conduit donc à envisager l'extension de la zone alimentaire au delà de la bande graveleuse, soit d'abord vers la moraine argileuse dont la topographie permet d'en fixer le bassin versant (SM) puis vers les calcaires crétacés jurassiques qui fournissent plus de la moitié des débits.

Schardt (1906 op. cit) admettait déjà que les sources de Sous le Mont étaient de type vauclusien, sans en apporter la preuve. Si le bilan hydrologique ne laisse pas de doute à ce sujet, l'origine du bassin alimentaire karstique, que le crétacé de la région de Clémessin est trop peu étendu pour justifier seul, est mal connu. Les sources de Dombresson sont situées à proximité de l'intersection d'un décrochement sénestre recoupant l'anticlinal et le plan de chevauchement qui longe le pied de Chaumont. C'est suffisant pour justifier une bonne perméabilité des calcaires. Pareille altitude (835 m) pour un exutoire karstique dans le synclinal du Val de Ruz ne peut s'expliquer que par une complication tectonique (barrage imperméable profond de la molasse) qui favorise la remontée de l'eau karstique. En effet aux Prés Royer le niveau saturé dans les calcaires ne dépasse qu'exceptionnellement la cote 750 m (source du Torrent).

Si le régime physico-chimique est compatible avec ces conclusions, il ne les confirme pas. En revanche le régime hydraulique où les recharges très rapides de la nappe par sous-alimentation temporaire sont suivies de longues périodes de tarissement s'intègre bien dans cette explication génétique.

Des essais de coloration, des analyses isotopiques (O-16/O-18, H-3), un bilan sur une plus longue période et un forage profond apporteraient d'utiles précisions.

Tableau X-XVI

Nappe de Sous le Mont. Hydrochimie de la source D₃.

	12.5.1969	1.9.1969	23.11.1969	9.2.1970
Débit l/s	83,60	13,40	5,30	135,00
T °C	7,20	6,90	6,85	6,65
pH	7,47	7,46	7,61	-
K ₂ O µmhos/cm	272	274	299	260
Ca ⁺⁺ mg/l	53,00	66,00	61,40	61,30
Mg ⁺⁺ "	5,60	5,30	4,09	4,15
Na ⁺ "	0,63	0,69	0,65	0,67
K ⁺ "	0,23	0,22	0,22	0,26
Cl ⁻ "	1,42	1,45	-	-
SO ₄ ⁼⁼ "	3,90	3,00	-	4,30
HCO ₃ ⁻ "	195	210	198	198

Analyses : Centre d'Hydrogéologie/Laboratoire de minéralogie.

NAPPE DE SOUS-LE-MONT HYDROCHIMIE

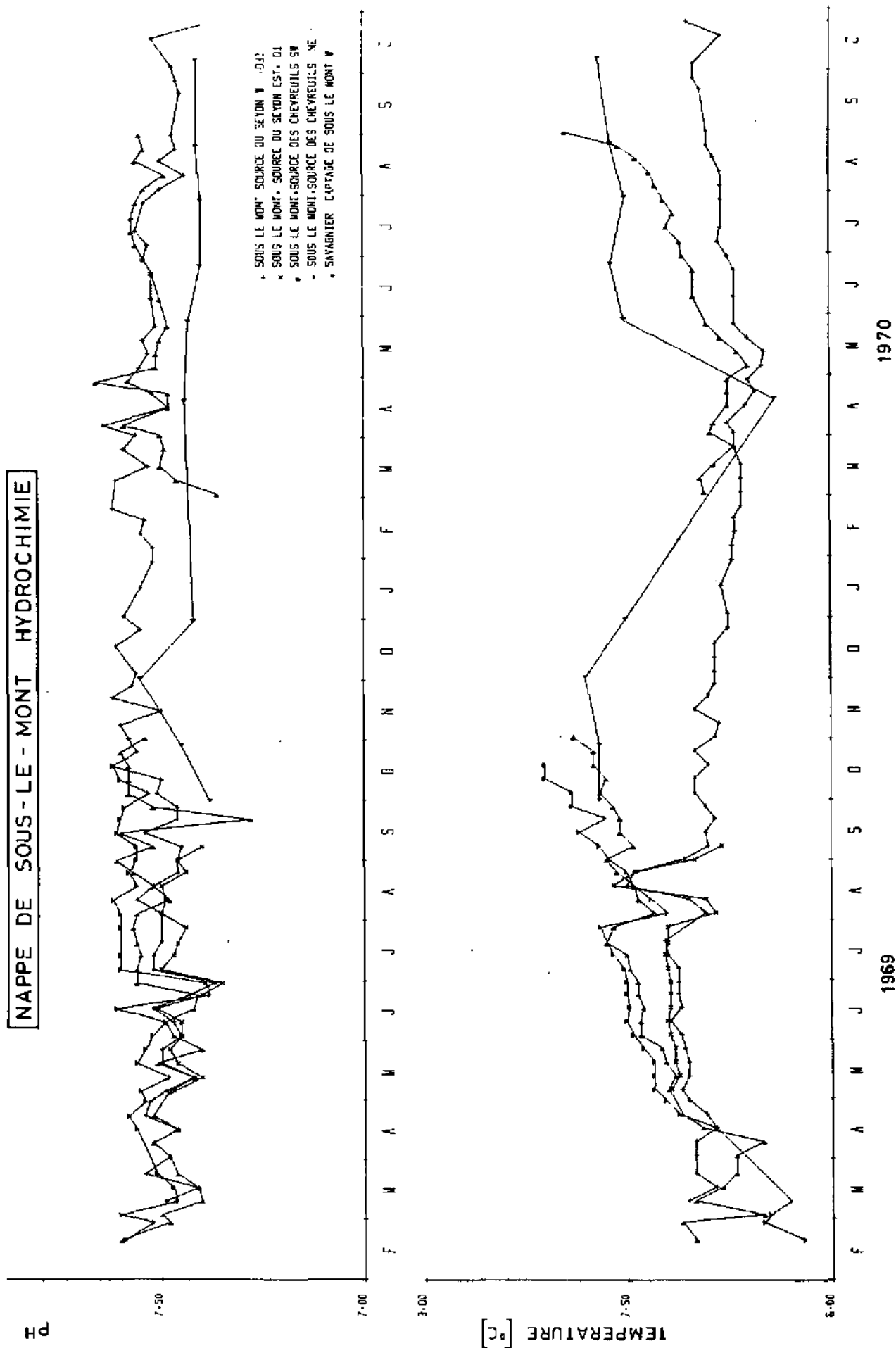


Figure X - 29 Nappe de Sous le Mont. Température et pH des sources (1969 - 1970)

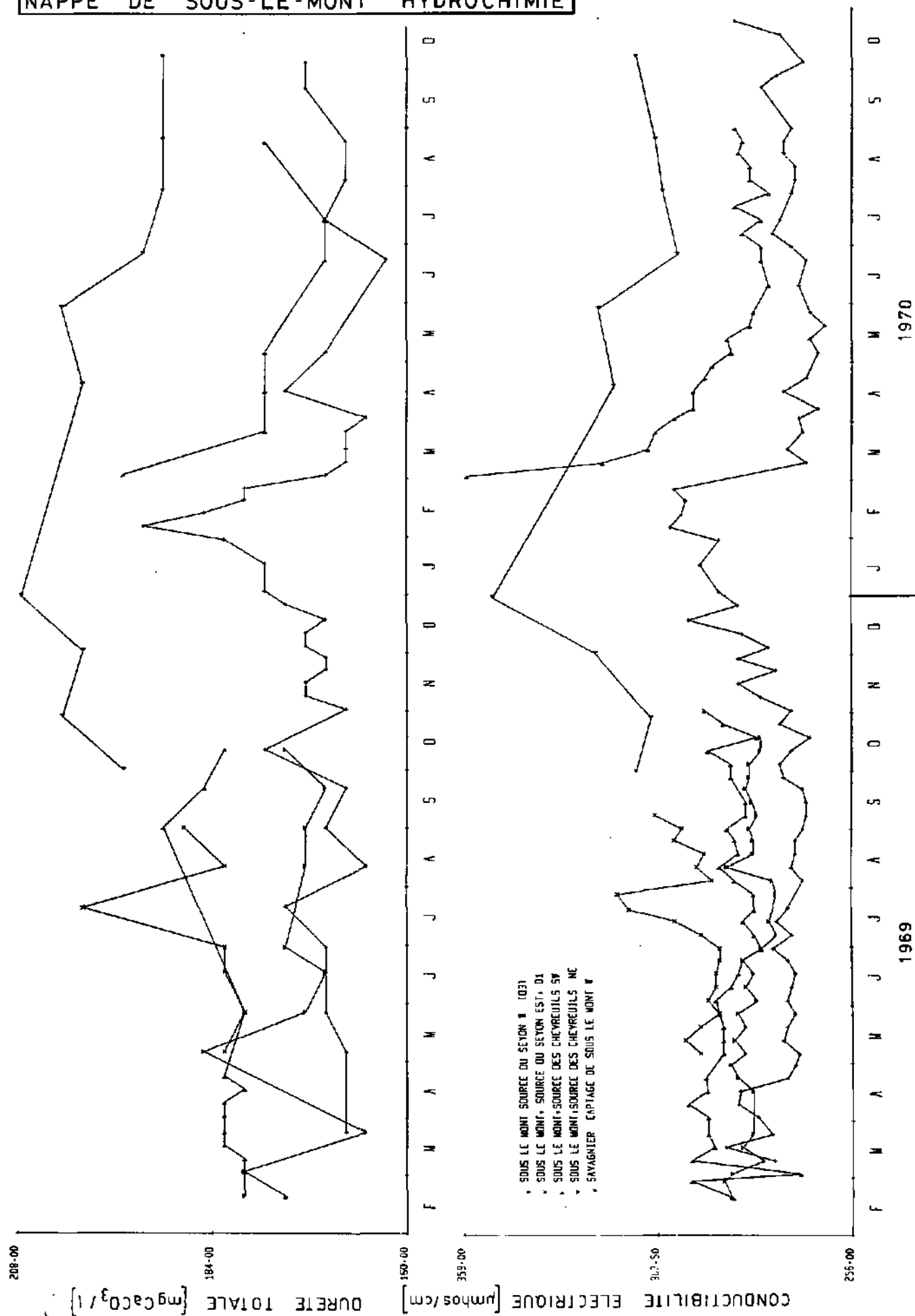


Figure X - 30 Nappe de Sous le Mont. Conductibilité électrique et dureté totale des sources (1969 - 1970).

CHAPITRE XI

HYDROGÉOLOGIE DE LA RÉGION DES PRÉS ROYER

Peu importe au savant d'avoir la vérité absolue pourvu qu'il ait la certitude des relations des phénomènes entre eux.

Claude Bernard : Introduction
à l'étude de la médecine expérimentale.

1. SITUATION

L'importance du secteur des Prés Royer dans l'alimentation en eau du Val de Rur et les nombreuses recherches qui y ont été effectuées conduit à rassembler celles-ci dans un chapitre particulier.

L'étude des documents géologiques et hydrogéologiques existants le plus souvent inédits (TPIPET 1967, MORNOD 1970, MATHEY 1971) permet d'envisager l'existence de 4 aquifères superposés, à savoir :

- Une nappe phréatique dans les graviers et sables fluvioglacisaires et alluviaux des cônes de déjection du Seyon et du Torrent de 3 à 13 mètres d'épaisseur.
- Une nappe artésienne dans les graviers intercalés entre 21 et 33 mètres de profondeur en 2 ou 3 niveaux dans le moraine argileuse.
- Un aquifère dans les calcaires hauteriviens lié hydrauliquement aux aquifères quaternaires.
- Un aquifère profond (Malm et Valanginien) appartenant au réseau de la Serrière, relativement indépendant.

Les niveaux imperméables qui les séparent sont de haut en bas : la moraine de fond argileuse, la molasse oligocène, les marnes hauteriviennes.

Jusqu'en 1971 date à laquelle fut foncé un puits dans la nappe artésienne, seule la nappe phréatique était exploitée par les puits de Carnier (1899, 1942 C₁, 1959 C₂) Dombreason (1946 D₁, 1963 D₂), Chézard (1930 Ch₁, 1964 Ch₂) et Savagnier (1946 S₁, S₂, 1964 S₃). Une étude hydrogéologique approfondie des réservoirs quaternaires crétacés et jurassiques (MORNOD 1970) comprenant 900 mètres de forage a permis la découverte et la mise en exploitation de la nappe artésienne par un puits filtrant profond de 24 mètres (MORNOD 1970). L'étude des aquifères du Malm et du Crétacé est envisagée au chapitre IX.

2. LA NAPPE PHRÉATIQUE

2.1. Bassin alimentaire, réseau hydrographique, sources.

Les formations alluviales et fluvioglacisaires comprises entre Villiers, la Sciazie Debrot et la source du Torrent s'étendent sur 1,8 km², mais la zone alimentaire de la nappe phréatique comprend également une partie des formations morainiques peu perméables qui les bordent, sans compter les apports de la nappe artésienne et du Crétacé.

Les canaux en pierre sèche du Seyon et du Torrent assurent la décharge naturelle de la nappe mais contribuent également à sa recharge en période de crue. Tous deux s'assèchant en étiage

À la suite de l'abaissement du niveau de la nappe par l'exploitation des communes. Durant une partie de l'année l'affleurement de la nappe dans la zone déprimée qui sépare les puits de Chézard (Ch₁) et de Cernier (C₂) donne naissance à un ruisseau de quelques dizaines de litres par minute qui rejoint le Torrent. Il constitue le dernier exutoire naturel de la nappe. (Fig. XI-1)

Tableau XI-I

Débits annuels moyens exploités dans la nappe
des Prés Royer en litres par minute.

Année	Savagnier S ₀₁ , S ₀₂	Chézard Ch ₁	Dombresson D ₁ , D ₂	Cernier C ₁ , C ₂	Fontaines-sous-Mts Geneveys C ₁ , C ₂
1946	0	-	-	-	-
1947	40,0	-	-	-	-
1948	0	-	-	-	-
1949	24,0	-	-	-	-
1950	16,6	-	-	-	-
1951	4,8	-	-	-	-
1952	20,1	-	-	-	-
1953	22,4	-	-	-	-
1954	20,8	-	-	-	-
1955	8,7	-	-	-	-
1956	0	-	-	-	-
1957	8,7	-	-	-	-
1958	13,3	-	-	-	-
1959	32,7	-	-	-	-
1960	14,6	-	-	-	-
1961	14,5	-	-	-	-
1962	46,1	-	-	-	-
1963	25,5	-	-	-	-
1964	85,7	-	69,2	-	-
1965	40,0	-	54,3	-	-
1966	33,9	-	17,1	167	-
1967	47,3	-	14,2	406	397
1968	0	-	1,6	355	494
1969	11,0	196	28,1	344	482
1970	22,6	247	56,2	386	534
Moyenne	22,7	211	34,4	371	477

2.2. Exploitation.

Actuellement le régime de la nappe est essentiellement tributaire du régime d'exploitation des communes. Les quantités d'eau prélevées par pompe varient selon l'hydraulicité de l'année, certaines communes (Chézard, Dombresson, Savagnier) utilisent l'eau des Prés Royer en étiage seulement. Le débit annuel moyen exploité en 1970 valait 1250 l/minute (tableau XI-I).

Les ouvrages de captage sont caractérisés par une forte variabilité des débits conséquence des variations de la transmissivité de l'aquifère au cours de l'année hydrologique :

S₀₁ 50 à 300 l/min, D₁ 50 à 1'000 l/min, Ch₁ 200 à 500 l/min, C₁ + C₂ 800 à 2'000 l/min.

Les Prés Royer

Réseau hydrographique ancien et actuel.

Délimitation des zones drainées.

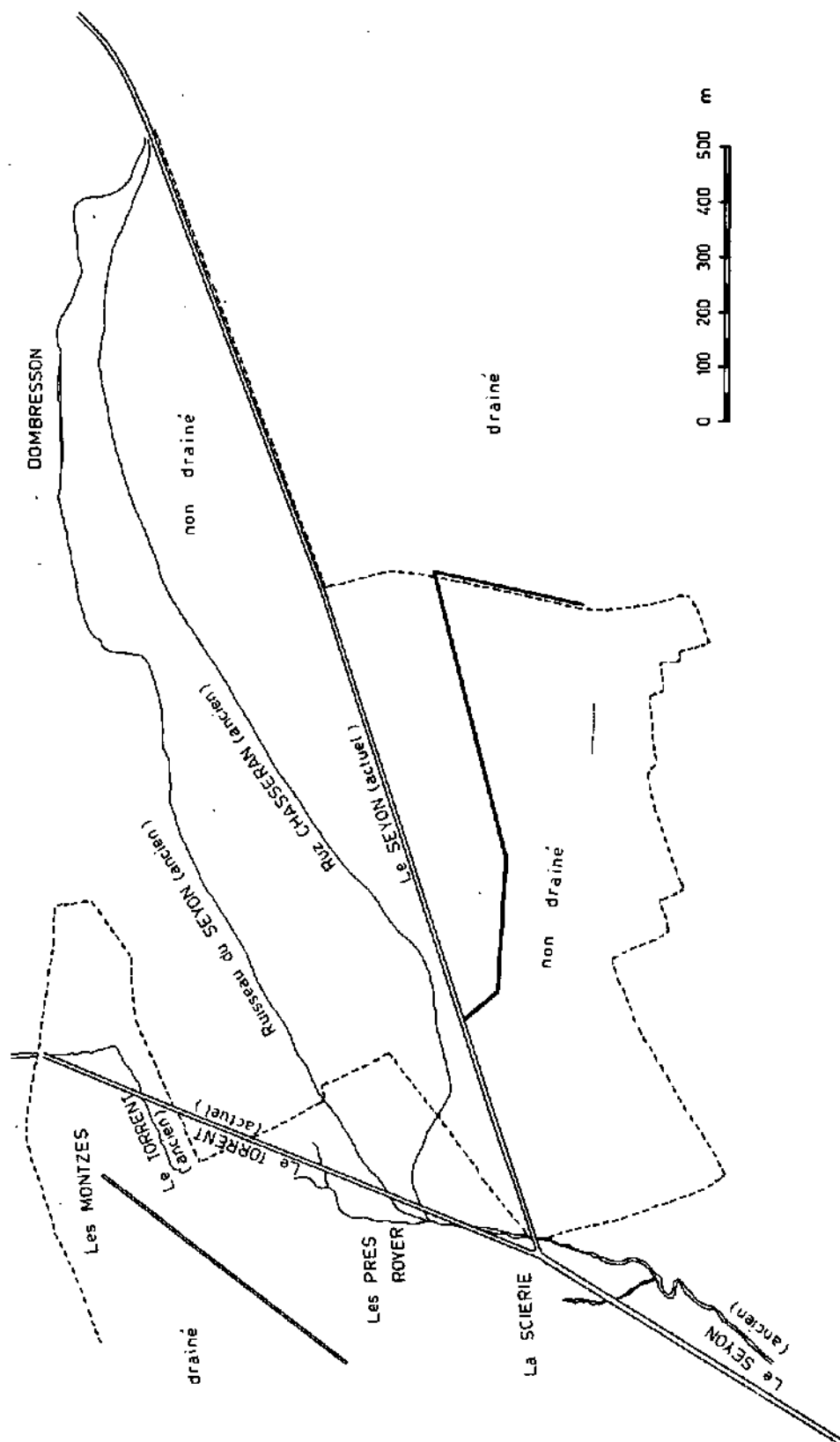


Figure XI - 1 Les Prés Royer, réseau hydrographique ancien et actuel

2.3. Surface piézométrique.

Les cartes de la surface de la nappe (Fig. XI-2, XI-3, XI-4) établies à partir des relevés de M. SOGUEL, gardien de la station de pompage, dans des piézomètres implantés par le Service cantonal des eaux en 1959, montrent clairement les zones alimentaires de la nappe.

La carte en basses eaux montre de fortes pentes (1,5%) au Nord de la zone de captage et très faibles (0,1 à 0,2%) entre P6 et P10, indice probable d'un apport souterrain depuis la nappe artésienne. Vers l'aval les gradients augmentent à nouveau. Entre P1 et P3 les gradients orientées E-W révèlent un apport important dans la zone perméable où coulaient autrefois Seyon et Rur Chasseran. En hautes eaux les gradients sont plus réguliers et l'apport depuis l'Est accentué en raison probablement d'infiltrations depuis le lit du Seyon.

Une estimation du débit s'écoulant vers la zone d'exutoire (MORNOU 1970) donne 1'200 l/min. pour un front de 800 mètres de large, une perméabilité de $5 \cdot 10^{-3}$ m/s et une pente moyenne de 5%.

2.4. Epaisseur et transmissivité de l'aquifère phréatique.

L'épaisseur des graviers a été estimée ponctuellement par TRIPET (1967) à partir des sondages géoélectriques du Service cantonal des Eaux (Fig. III-4). A proximité des exes électriquement résistants elle est comprise entre 6 et 10 mètres, et atteindrait 13 mètres à l'Est du canal du Torrent. En dehors des chenaux graveleux l'épaisseur moyenne est d'environ 4 mètres.

La perméabilité des graviers superficiels est comprise entre $5 \cdot 10^{-3}$ et $5 \cdot 10^{-4}$ m/s (Tableau II-II). Dans la zone d'exploitation, compte tenu de l'importance des rabattements et de l'épaisseur relativement faible des graviers les transmissivités varient d'un facteur 5 à 10 selon les puits.

La carte des résistivités électriques (Fig. III-4) donne une bonne image de la répartition des transmissivités. Cette carte devrait cependant être complétée par une campagne d'essais de pompage et de relevés piézométriques.

2.5. Influence réciproque des puits.

Dans la zone d'exutoire les fluctuations de la nappe phréatique sont essentiellement déterminées par son régime d'exploitation. Vu la proximité des ouvrages, les rayons d'action des puits se recoupent. Par exemple un pompage dans le puits de Cernier (C₂) provoque l'abaissement du niveau dans le puits de Chézard (Ch₁), alors que le rayon d'action de ce dernier s'étend rapidement jusqu'à D₂. Grâce au varrou peu perméable séparant D₂ de D₁ ce dernier est relativement autonome. La diminution de la transmissivité de l'aquifère vers le Sud rend le puits de Savagnier plus indépendant mais des observations récentes ont montré qu'il pouvait réagir à des pompages dans le puits de Chézard.

3. LA NAPPE ARTESIENNE

3.1. Bassin alimentaire.

L'aquifère est formé de plusieurs niveaux graveleux dont seul le premier présente un intérêt économique, les niveaux inférieurs étant peu productifs et enrichis en sulfates en raison de la proximité de la molasse. Il n'existe probablement pas de région alimentaire directe de la nappe, mais son extension latérale reste mal connue. En absence d'exploitation le niveau productif est alimenté par les calcaires hauteriviens et se décharge dans la nappe phréatique par drainance au travers de la moraine peu perméable.

3.2. Fluctuations de la surface piézométrique.

L'évolution des niveaux piézométriques en absence d'exploitation est donnée à la figure XI-5. Un étiage avancé (automne 1969) et une crue exceptionnelle (avril-mai 1970) sont des valeurs extrêmes bien représentatives.

Piézomètre	Niveau		
	minimum	maximum	différence
A ₁	725 m	731,5 m	6,5
A ₂	726 m	733,0 m	7,0

Le manque de précision des manomètres rend délicate l'interprétation de la surface piézométrique. La pression semble toutefois être systématiquement supérieure en A₂.

L'évolution non correspondante des niveaux des piézomètres A₁, A₂, A₃ au printemps 1971 (Fig. XI-6) durant un pompage prolongé de 600 litres par minute sous la station d'épuration amène les remarques suivantes :

De décembre 1970 à février 1971 le niveau de A₃ est perturbé par la construction d'un puits filtrant (puits MORNOU) à 5 mètres de distance. Après une période d'essais de pompage les niveaux de A₂ et A₃ remontent légèrement alors que A₁ s'abaisse constamment jusqu'au 17 mai. A₁ est situé à proximité de C₁ où durant cette période un pompage intensif (Fig. XI-7) abaisse le niveau de la nappe phréatique. L'accroissement des gradients entre les 2 nappes augmente les débits transitant à travers le semi-perméable, ici épais de 12 mètres seulement, avec comme conséquence une baisse de pression dans l'artésien.

3.3. Estimation de la perméabilité de la nappe artésienne.

3.3.1. Remarques préliminaires.

La perforation imprévue du toit de la nappe artésienne lors de la construction de la station d'épuration (STEP) à la Scierie Debrot en obligeant le maître de l'ouvrage à procéder à une ponction de 3200 litres par minute a fourni les données nécessaires à l'estimation des paramètres hydrauliques de l'aquifère captif (Fig. XI-8) (RECORDON 1968). La complexité des relations hydrauliques entre les nappes en présence révélées en cours d'interprétation a nécessité le recours à des lois de plus en plus complexes. La validité des paramètres T, S et K est comprise entre les piézomètres A₁, A₂ et la STEP. Relevons enfin que si le terme de drainance s'applique en principe aux échanges entre 2 nappes superposées, il pourra prendre ici un sens plus large et englober l'alimentation latérale depuis les calcaires, ou exceptionnellement depuis la nappe phréatique.

3.3.2. Approximation logarithmique sans drainance.

La méthode appliquée pour 2 segments de droite (Fig. XI-9) donne des résultats comparables. On relève une diminution de la perméabilité à proximité de A₂.

3.3.3. Méthode de la courbe standard de Theis avec drainance.

La comparaison des courbes standard et expérimentales nécessite l'introduction d'un facteur de drainance B et d'une perméabilité K' non nulle pour le semi-perméable (Fig. XI-10). Les transmissivités de l'aquifère captif sont alors 10 fois plus faibles. L'aquifère est également moins perméable aux environs du piézomètre A₂.

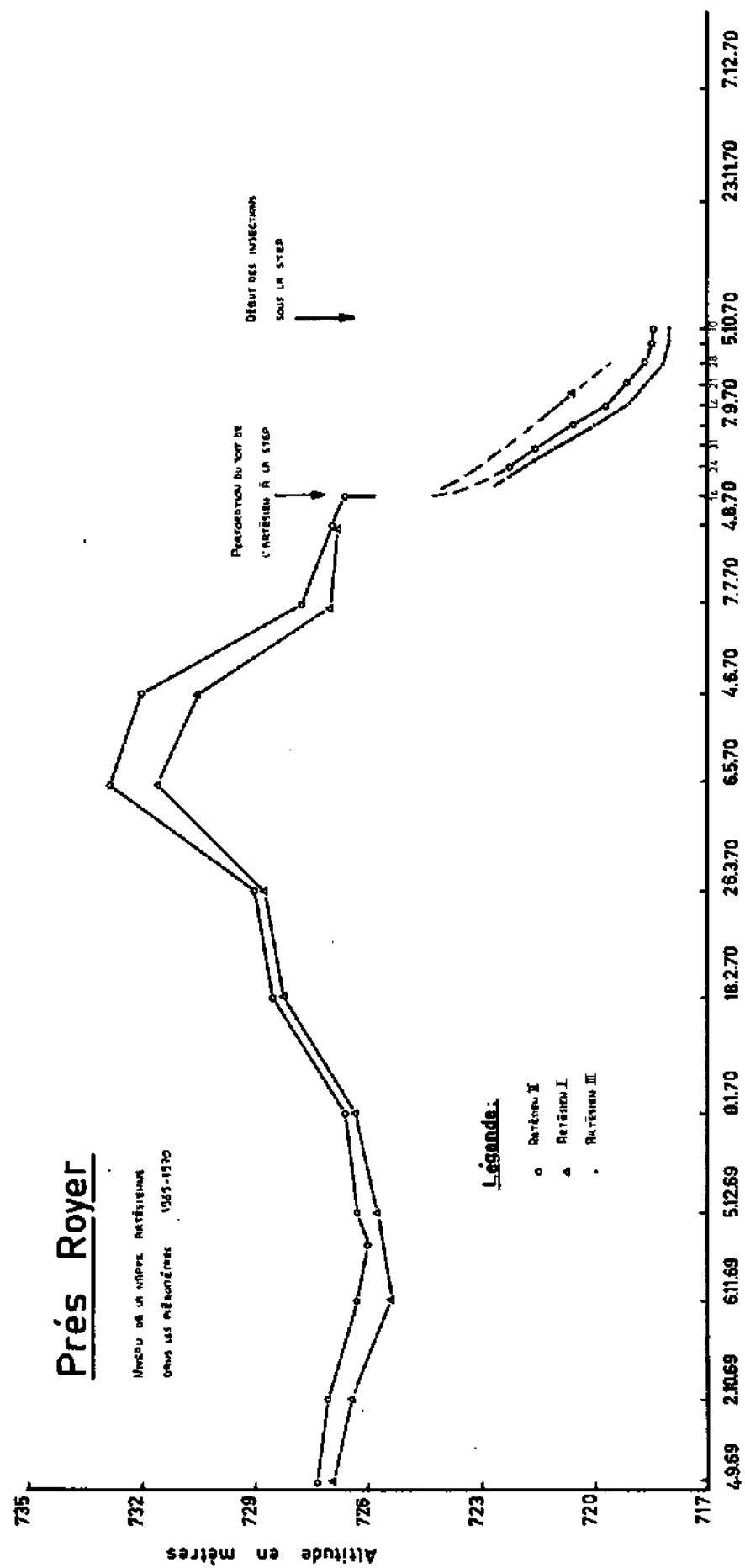


Figure XI - 5 Les Prés Royer, niveau de la nappe artésienne 1969 - 1970

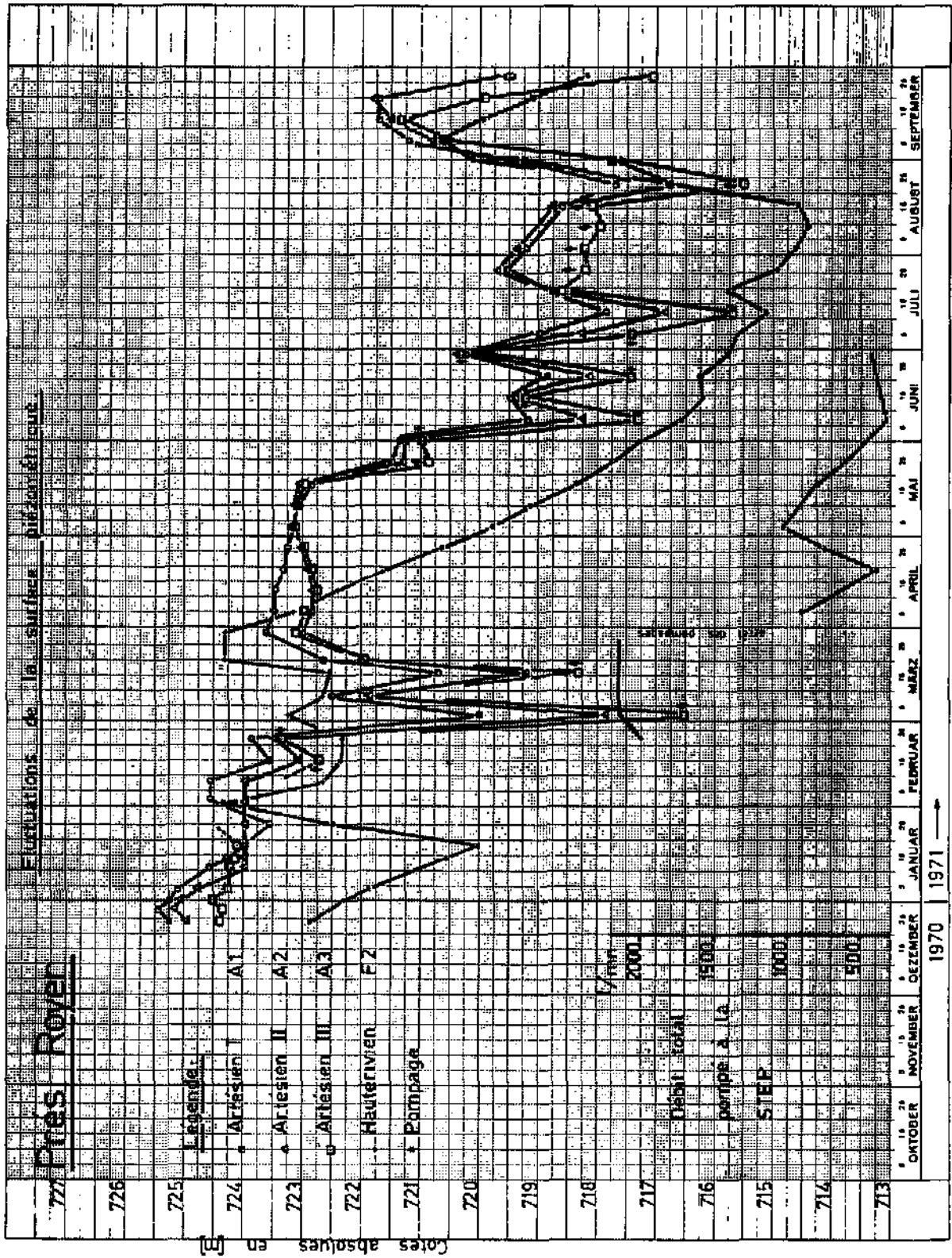


Figure XI - 6 Les Prés Royer, niveau de la nappe artésienne et de la nappe de l'hauterivien supérieur 1970 - 1971

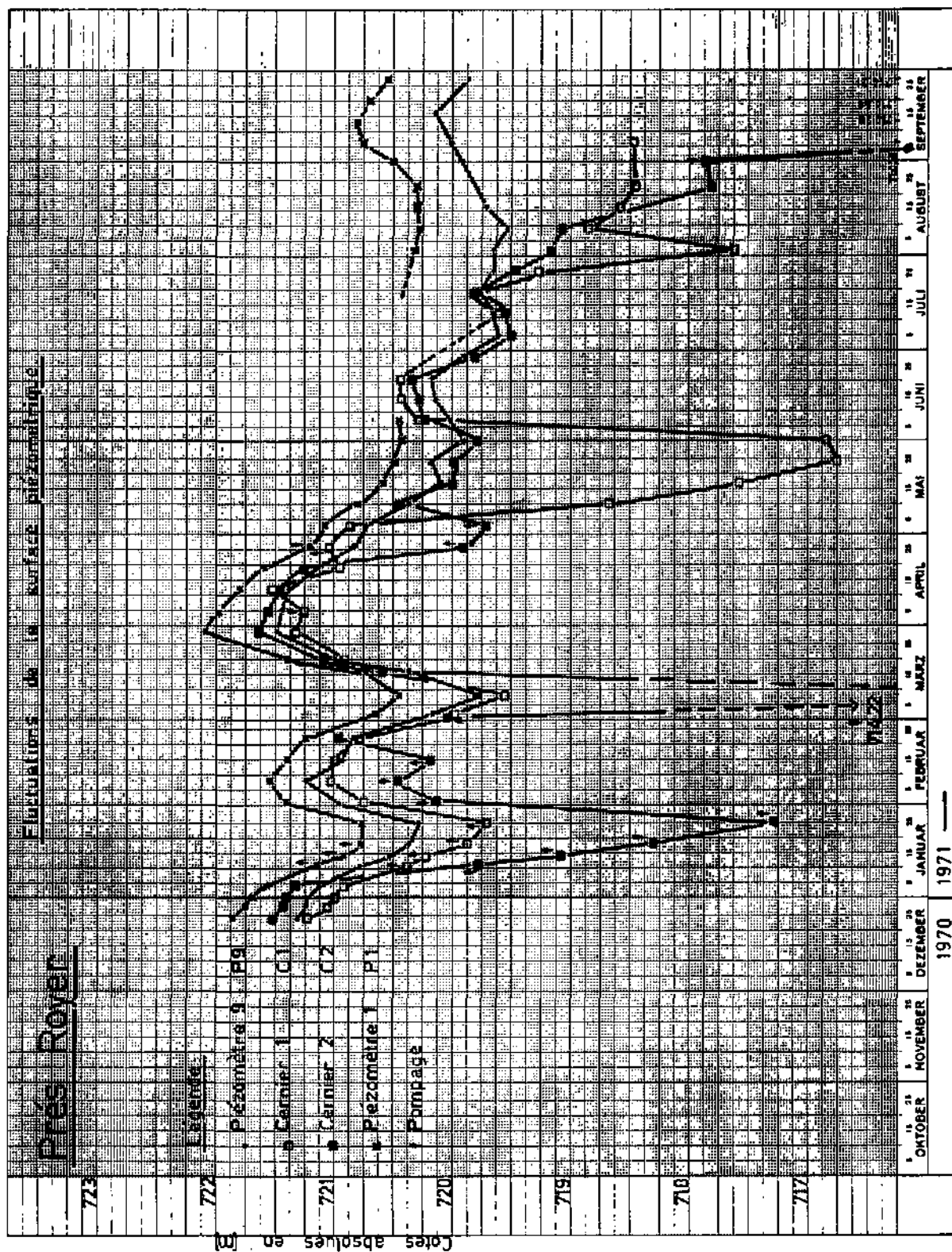


Figure XI - 7 Les Prés Royer, niveau de la nappe phréatique 1970 - 1971

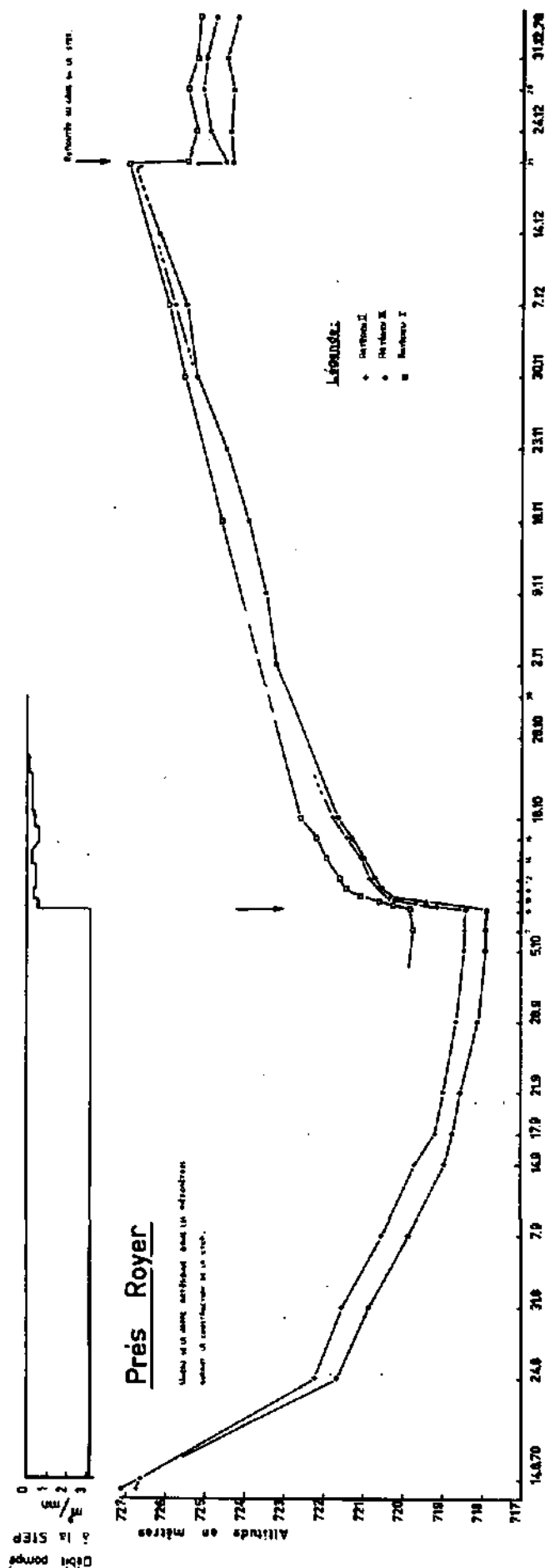


Figure XI - 8 Les Prés Royer, essai de pompage dans la nappe artésienne. Niveau de la nappe.

Prés Royer

Calcul de T et S
par la méthode

d'approximation

logarithmique durant

le pompage à la

STEP

$Q = 3200 \text{ l/mn} = 53 \cdot 10^{-3} \text{ l/s}$

Hypothèse :

Pas de drainance.

Piézomètre A 2 :

$$\begin{aligned} \textcircled{1} \quad & \begin{cases} T = \frac{0.103 \cdot Q}{4.55} = 2.13 \cdot 10^{-3} \\ S = \frac{2.25 \cdot T}{r^2} \cdot t_0 = \frac{2.25 \cdot T}{r^2} \cdot 1.3 \cdot 10^{-5} = 2.46 \cdot 10^{-3} \end{cases} \quad r = 500 \text{ m} \\ \textcircled{2} \quad & \begin{cases} T = \frac{0.103 \cdot Q}{5.65} = 1.72 \cdot 10^{-3} \\ S = \frac{2.25 \cdot T}{r^2} \cdot t_0 = \frac{2.25 \cdot T}{r^2} \cdot 1.7 \cdot 10^{-5} = 2.63 \cdot 10^{-3} \end{cases} \end{aligned}$$

Piézomètre A 3 :

$$\begin{aligned} \textcircled{1} \quad & \begin{cases} T = \frac{0.103 \cdot Q}{3.95} = 2.45 \cdot 10^{-3} \\ S = \frac{2.25 \cdot T}{r^2} \cdot t_0 = 3.28 \cdot 10^{-3} \end{cases} \quad r = 410 \text{ m} \\ \textcircled{2} \quad & \begin{cases} T = \frac{0.103 \cdot Q}{5.05} = 1.92 \cdot 10^{-3} \\ S = \frac{2.25 \cdot T}{r^2} \cdot t_0 = 2.36 \cdot 10^{-3} \end{cases} \end{aligned}$$

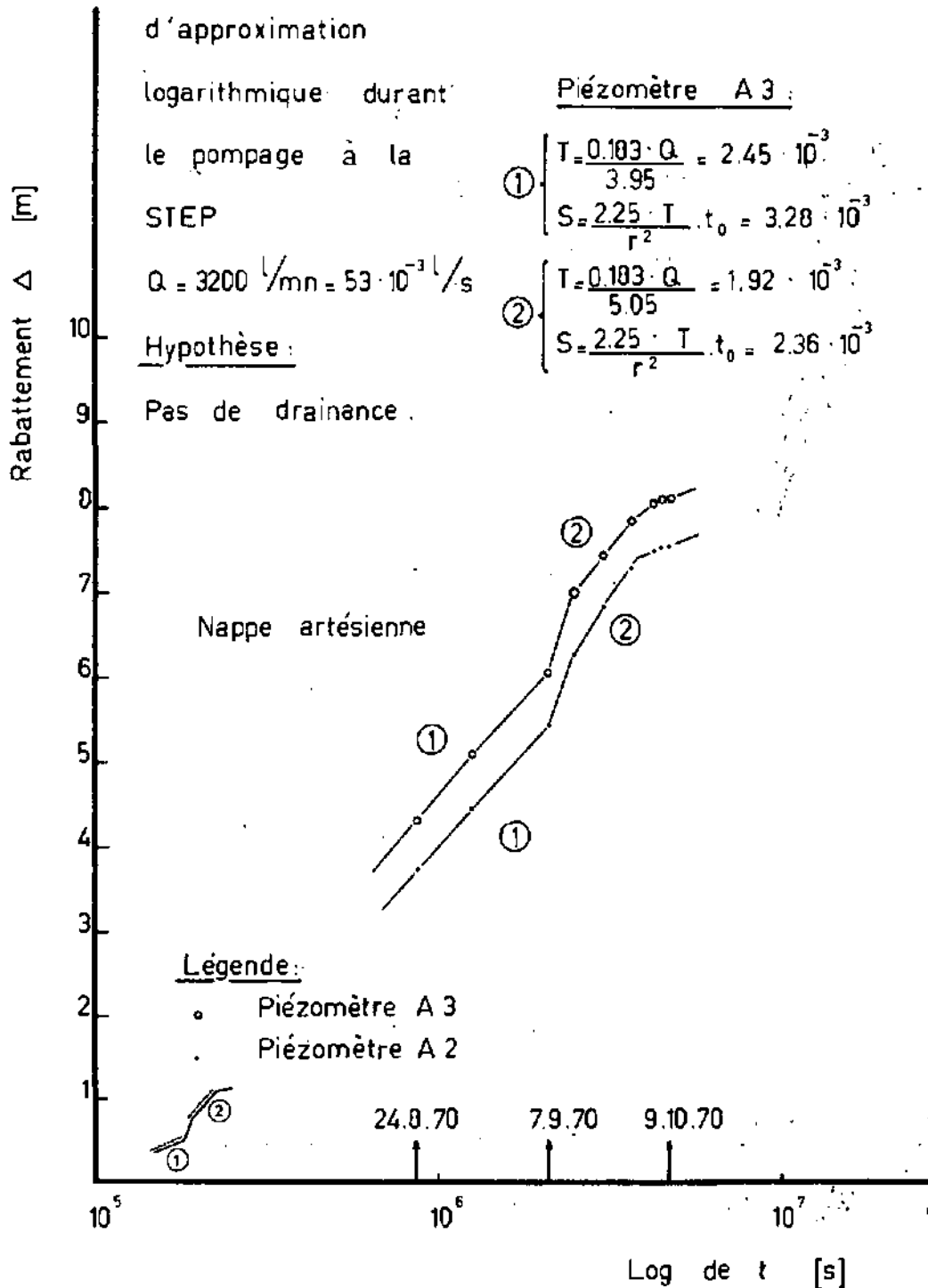


Figure XI - 9 Les Prés Royer, nappe artésienne. Calcul de T et S par la méthode d'approximation logarithmique.

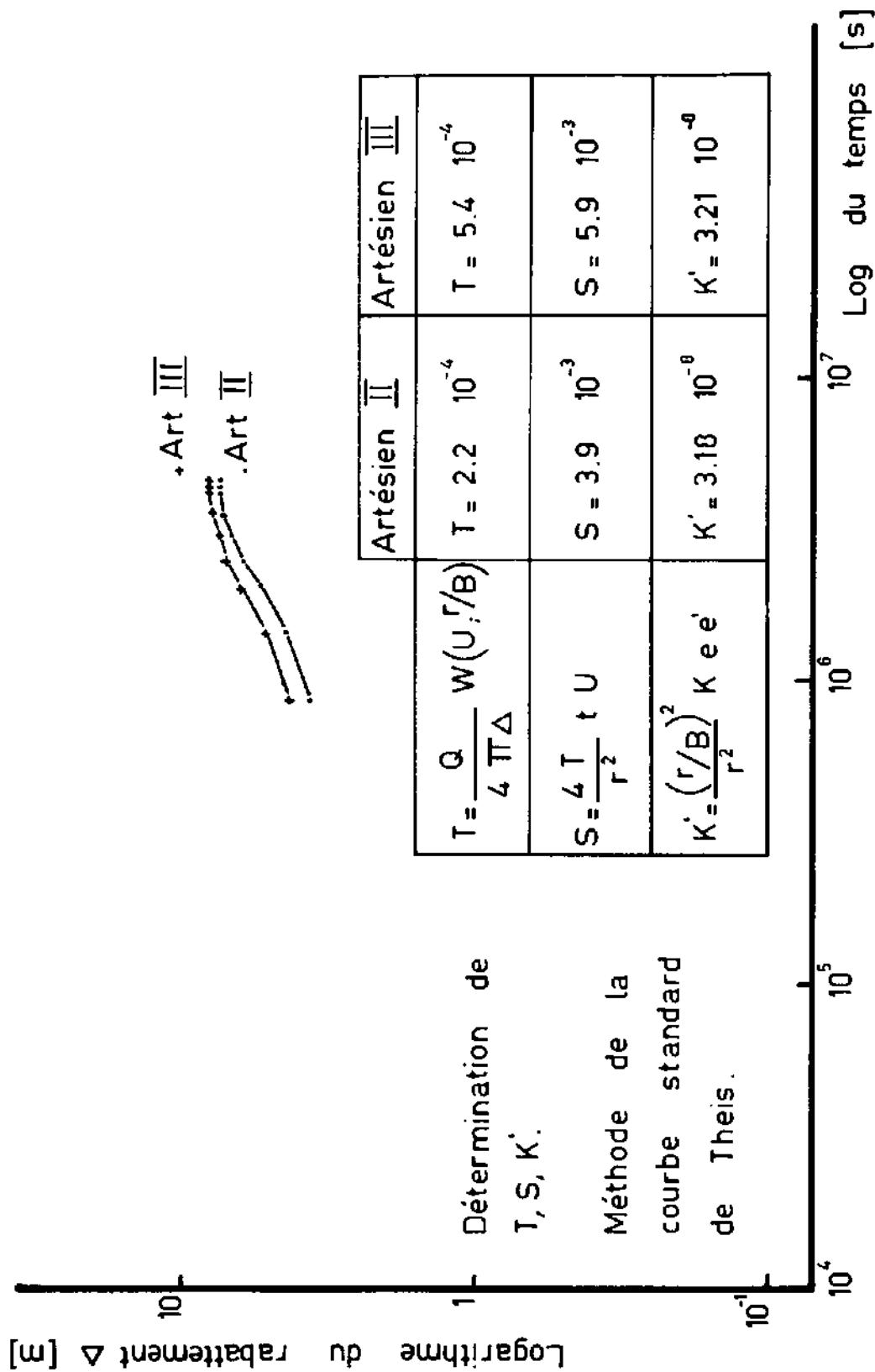


Figure XI - 10 Les Prés Royer, calcul de T, S et K' . Méthode de la courbe standard.

3.3.4. Méthode du point d'inflexion avec drainance et emmagasinement dans le semi-perméable.

La non linéarité des courbes de remontées en échelle semi-logarithmique met en cause la validité des résultats précédents. La méthode du point d'inflexion (HANTUSH 1964) permet d'introduire un coefficient d'emmagasinement pour le semi-perméable. La comparaison des courbes théoriques et expérimentales confirme la validité de la méthode pour la nappe des Prés Royer. La figure XI-11 fournit le détail des calculs de T, S, K et K' pour les piézomètres A₂ et A₃. Les équations ci-dessous donnent le développement des calculs pour S'

$$S' = \frac{Q}{4 \pi T} \cdot H(u, \beta')$$

$$u = \frac{r^2 S}{4 T t}$$

$$\beta' = 1/4 \cdot r/B \cdot \sqrt{\frac{S}{S'}}$$

H(u, β') est une intégrale infinie (tabulée) qui permet de calculer β' puis S'. On trouve :

A ₂	A ₃
u = 2,22 · 10 ⁻¹	u = 9,7 · 10 ⁻²
H(u, β') = 1,020	H(u, β') = 1,053
β' = 6 · 10 ⁻²	β' = 3 · 10 ⁻¹
S' ₂ = 3,8 · 10 ⁻³	S' ₃ = 5,8 · 10 ⁻²

Les valeurs de S' sont donc comparables aux valeurs du coefficient d'emmagasinement S de l'aquifère artésien ce qui conduit à s'interroger sur les conditions d'alimentation de la nappe aux limites (influence des calcaires crétacés et de la nappe phréatique).

3.3.5. Estimation du débit de drainance.

La méthode du point d'inflexion a permis de calculer T, S, K, T', S', K'. La similitude des courbes théoriques et expérimentales permet d'appliquer la relation liant le rabattement, le débit et le temps où l'on distinguera les débits provenant de l'artésien et du semi-perméable. Le tableau XI-11 fournit le détail des calculs pour les piézomètres A₂ et A₃.

Bien que partiellement contradictoires, ces résultats confirment l'importance d'un apport externe dans l'alimentation de la nappe captive. (calcaires crétacés et nappe phréatique).

3.3.6. Courbes caractéristiques théoriques.

La connaissance des valeurs numériques T, S, K, T', S' et K' permet de calculer la fonction donnant le rabattement en fonction du débit, du temps et de la distance au puits (HANTUSH 1964). Les équations et les courbes théoriques sont données aux figures XI-12 et XI-13 pour les piézomètres A₂ et A₃. Si leur allure générale correspond bien aux courbes expérimentales elles sont nettement plus pessimistes. On constate en particulier qu'une exploitation de 5'000 litres par minute est impossible puisqu'elle abaisserait le niveau de la nappe au-dessous de celui de l'aquifère.

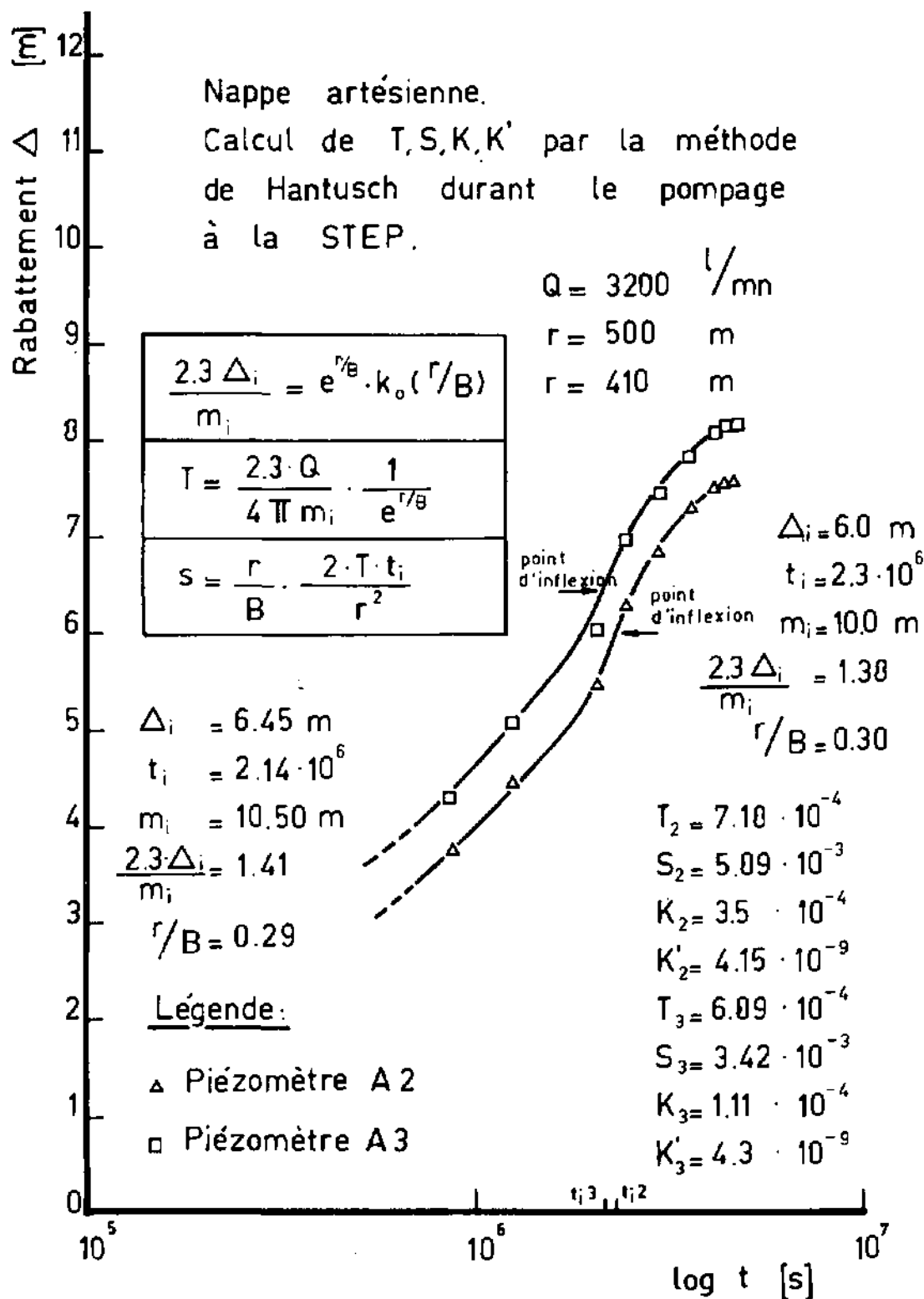


Figure XI - 11 Les Prés Royer, calcul de T, S, K, K' par la méthode de Hantush.

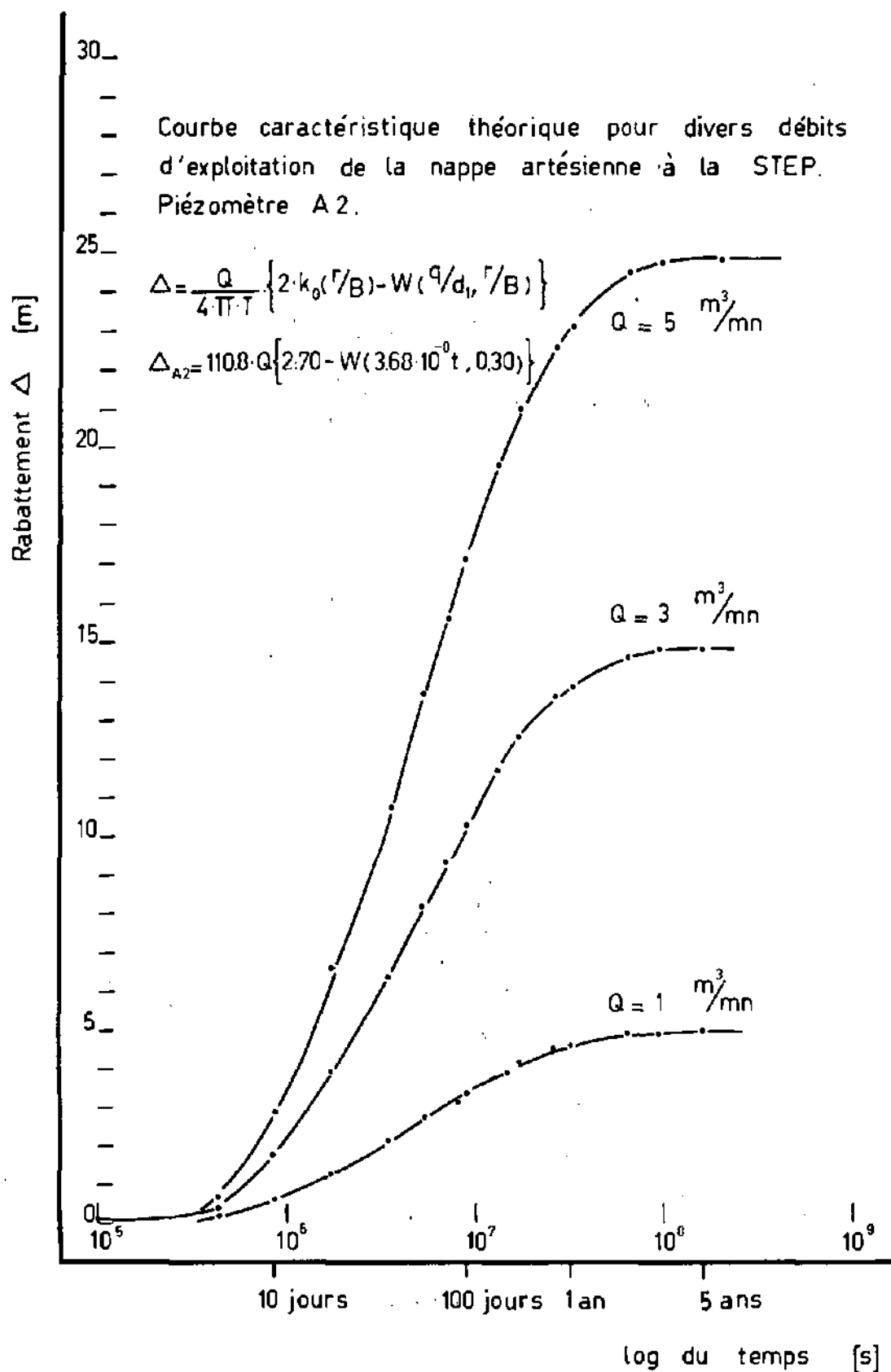


Figure X1 - 12. Les Prés Royer, courbes caractéristiques théoriques de la nappe artésienne

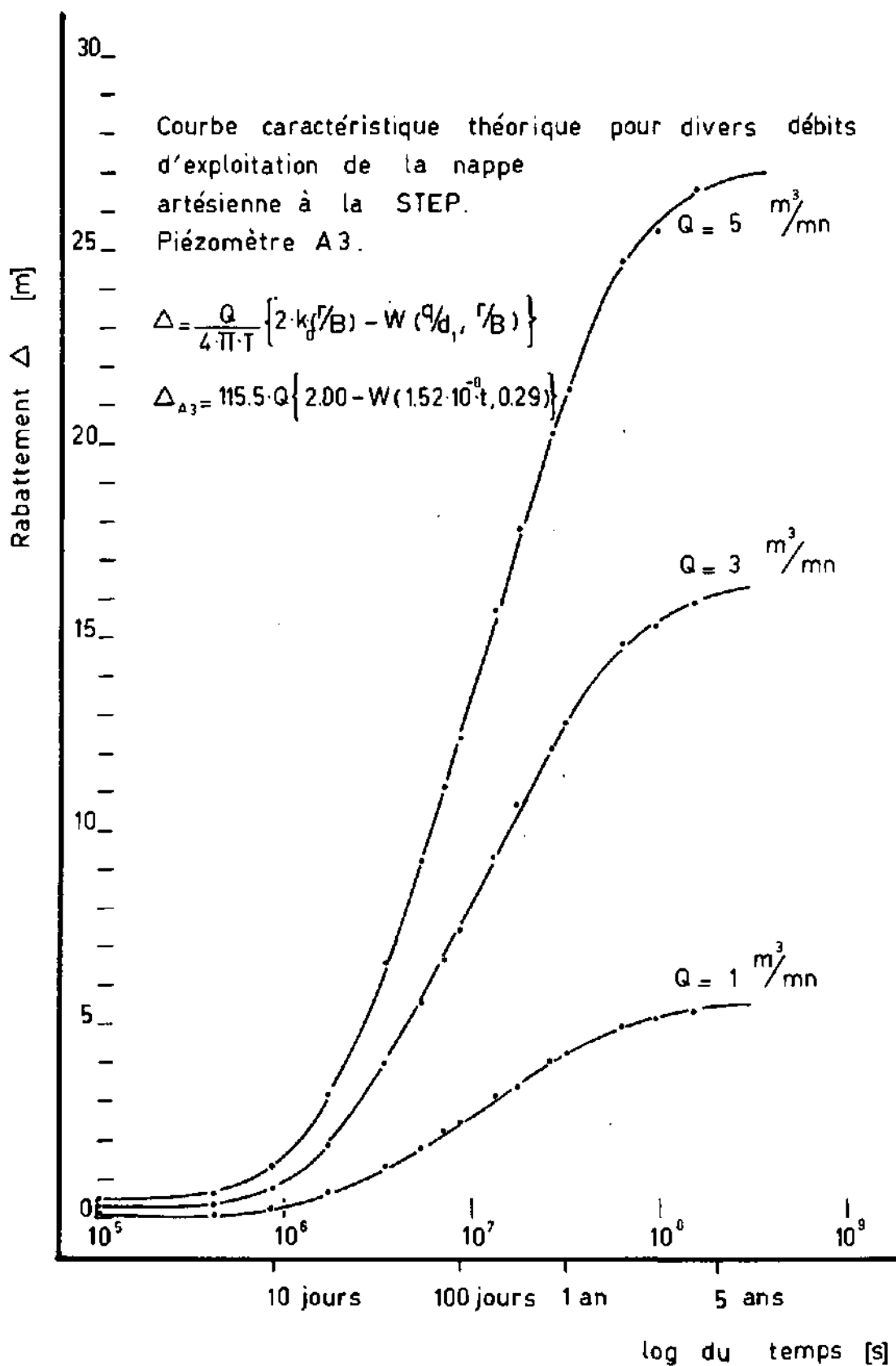


Figure XI - 13 Les Prés Royer, courbes caractéristiques théoriques de la nappe artésienne

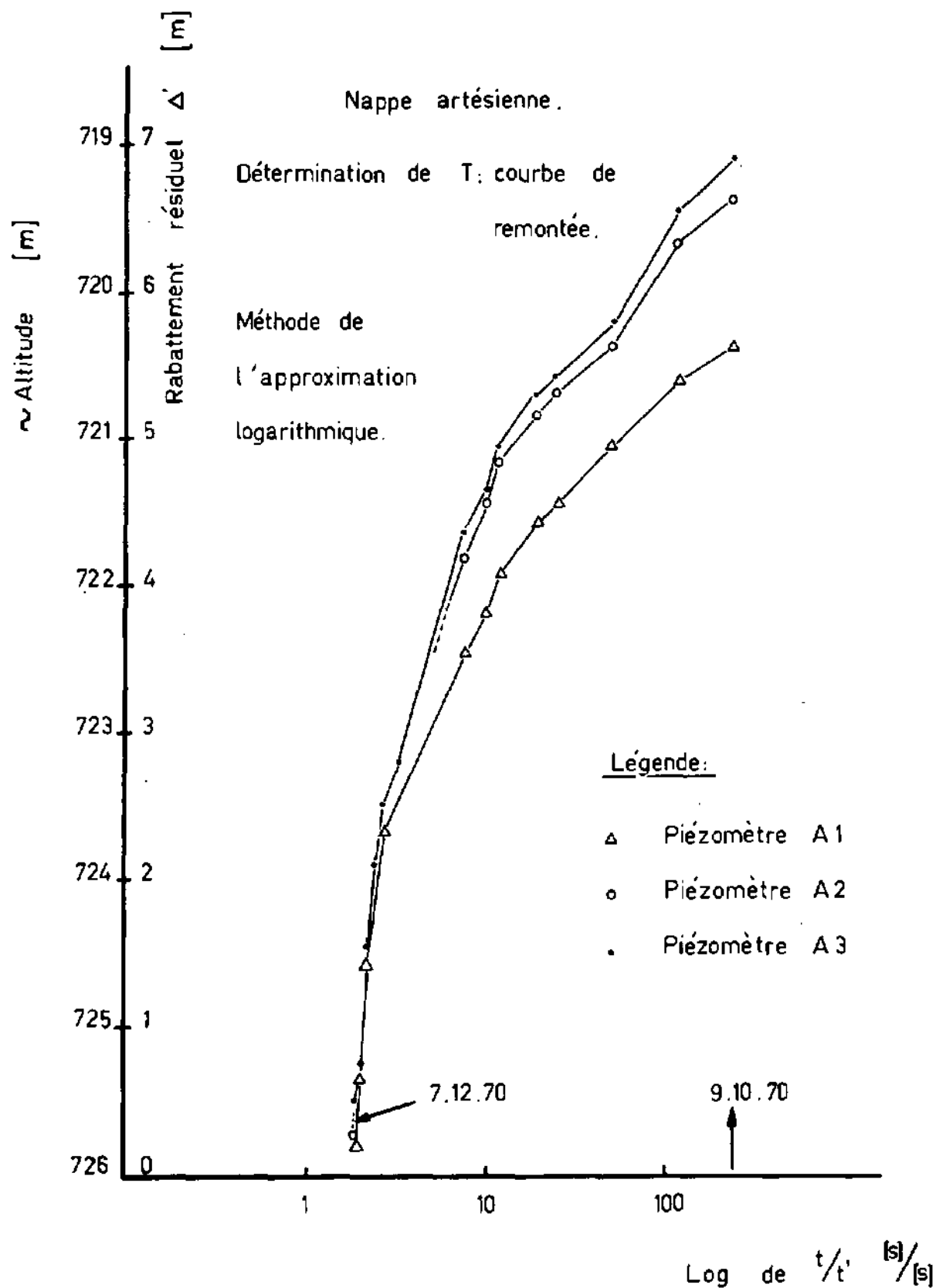


Figure XI - 14 Les Prés Royer, courbe de remontée de la nappe artésienne.

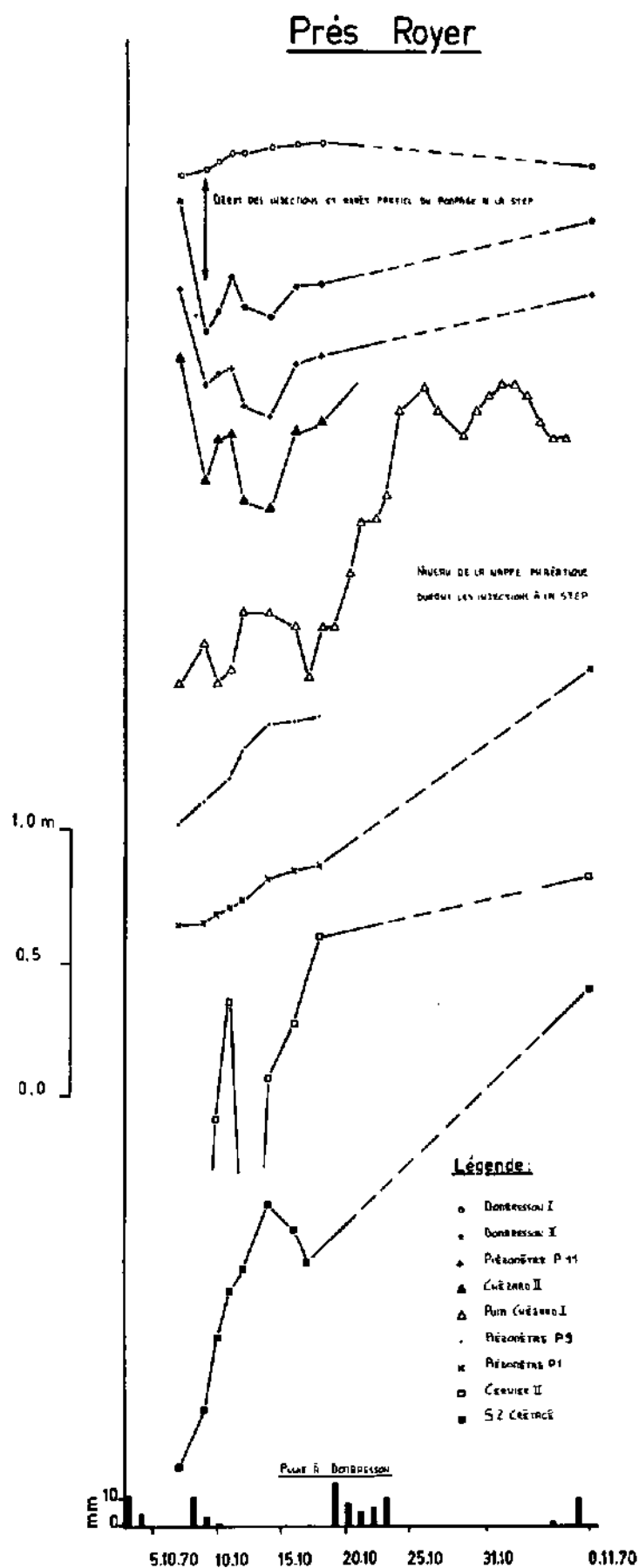


Figure XI - 15 Les Prés Royer, niveau de la nappe phréatique durant la remontée de la nappe artésienne.

Tableau XI-11

Estimation des débits parvenant par drainance dans la
nappe artésienne aux Prés Royer

Soit : q_s = débit provenant de l'aquifère artésien q_L = débit provenant indirectement de l'aquifère artésien par une couche drainante Q = débit total = $q_L + q_s$ $q_s = (Q / \delta_1) \exp(-\nu t / \delta_1 B^2)$		
On obtient pour la nappe artésienne :		
	A_2	A_3
$Q = q_s + q_L$	$53 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	$53 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
$\delta_1 = 1 + S' / 3 S$	1,21	6,70
$\nu = T / S$	0,12	0,21
$t = t_1$ (inflexion)	$2,3 \cdot 10^6 \text{ s}$	$2,14 \cdot 10^6 \text{ s}$
$B =$	$1,62 \cdot 10^3$	$1,41 \cdot 10^3$
pour A_2	$q_s = 0,825 Q \cdot \exp\left(\frac{-0,12 t}{6,10 \cdot 10^{-6}}\right)$	
pour A_3	$q_s = 0,149 Q \cdot \exp\left(\frac{-0,21 t}{0,45 \cdot 10^{-6}}\right)$	
au temps t_1	si $Q = 3,2 \text{ m}^3/\text{min}$	
pour A_2	$q_s = 2409 \text{ l/min (75\%)}$	$q_L = 791 \text{ l/min (25\%)}$
pour A_3	$q_s = 458 \text{ l/min (15\%)}$	$q_L = 2742 \text{ l/min (85\%)}$

3.3.7. Courbes de remontée.

Les figures XI-8 et XI-14 représentent la remontée du niveau dans la nappe captive et le rebatement résiduel en fonction du temps après l'arrêt des pompes. Le ralentissement progressif de la remontée du niveau provoqué par la recharge des formations géologiques limitant l'aquifère (semi-perméable, nappe phréatique, hétéroclive) confirme l'existence de liaisons hydrauliques complexes. Ces constatations sont validées par la remontée du niveau de la plupart des puits de la nappe phréatique et du forage des Montres (Fig. XI-15) au moment de l'arrêt du pompage dans l'artésien.

La non linéarité des courbes (Fig. XI-14) empêche de recourir aux lois classiques d'interprétation (approximation logarithmique). L'absence de lois plus élaborées qui restent à trouver ne permet pas de calculer T et S valablement.

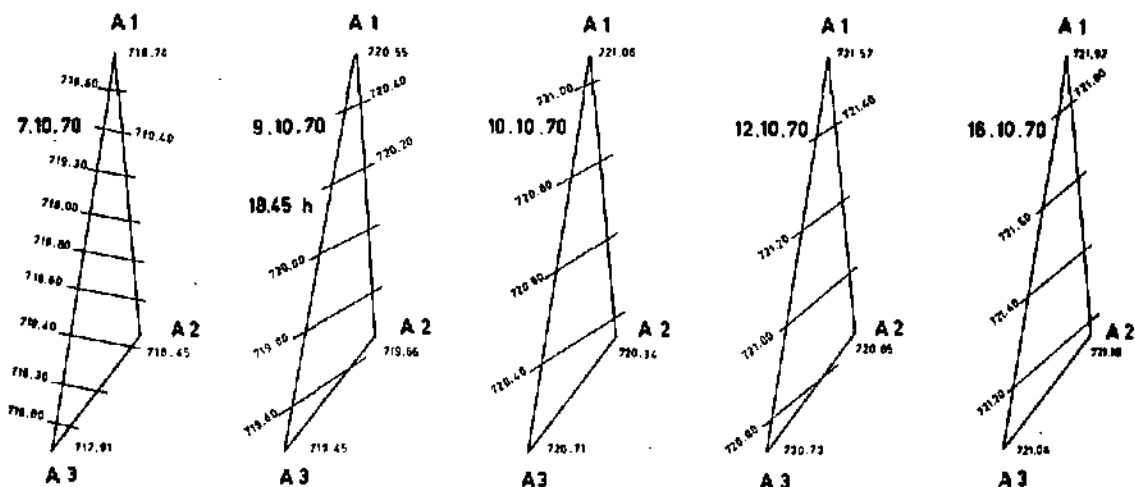
3.4. Surface piézométrique de la nappe artésienne en exploitation.

La figure XI-16 représente l'évolution des isopièzes entre les piézomètres A_1 , A_2 , A_3 à la fin du pompage sous le STEP, durant la remontée de la nappe et durant un pompage dans le puits artésien (puits MORNOD). Dans un aquifère homogène et isotrope les hydroisohypses

Prés Royer

Hydroisohypses de la nappe artésienne

Pompage de 3200 $\frac{l}{mn}$ Début des injections
à la STEP sous la STEP



Remontée du cône
de la STEP

Pompage de 2150 $\frac{l}{mn}$
dans le puits artésien

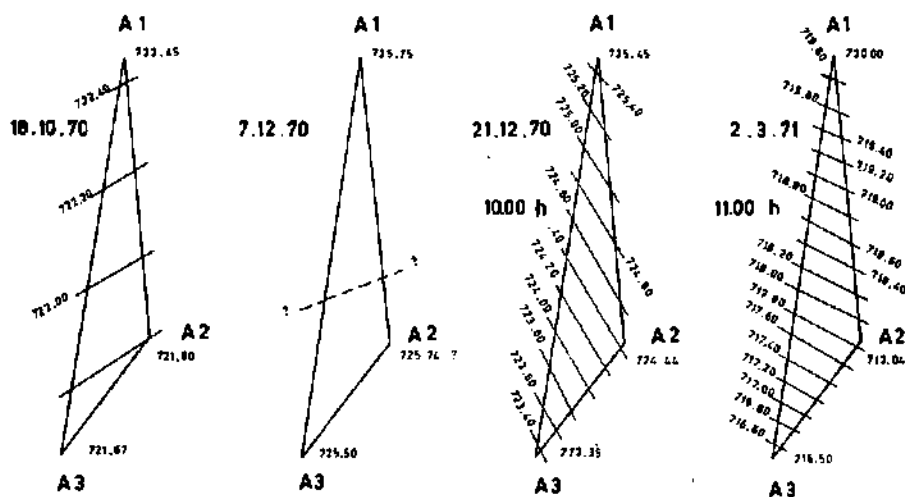
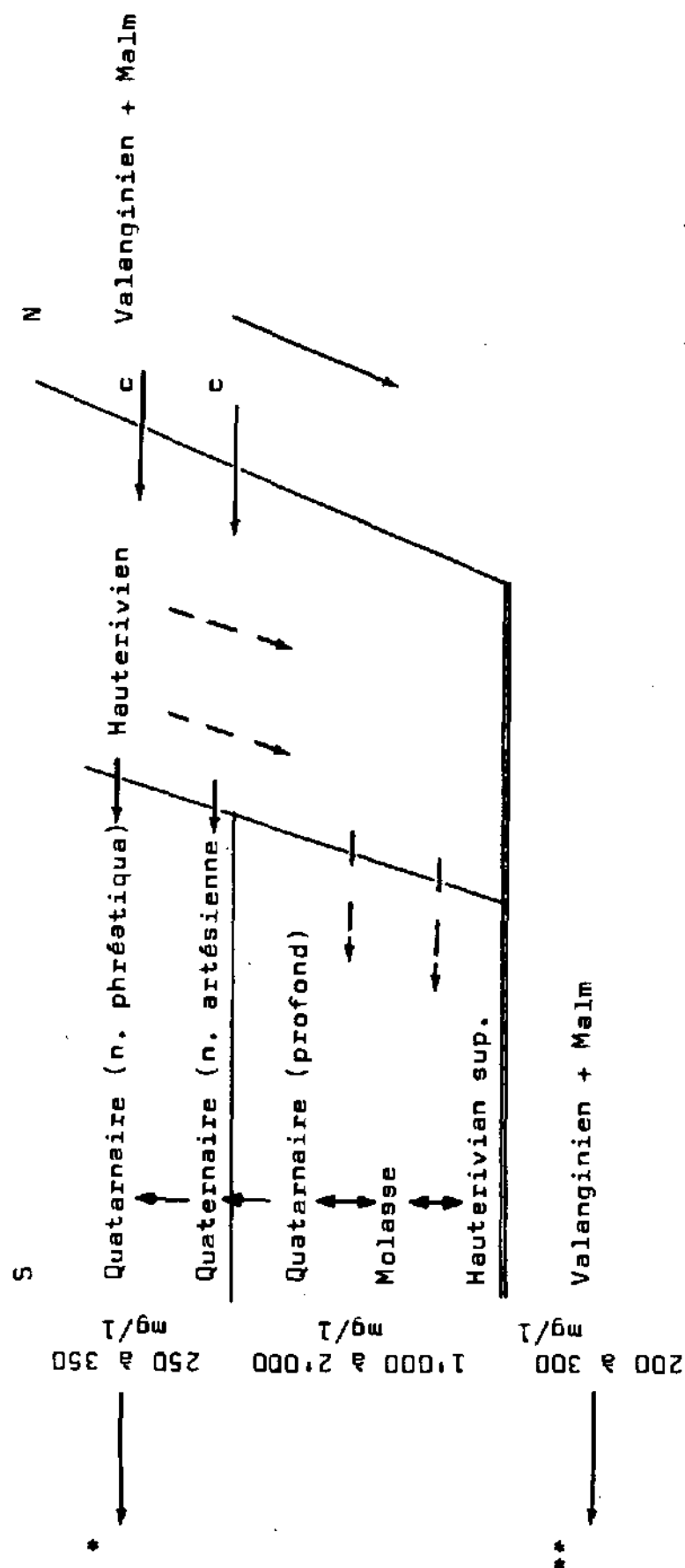


Figure XI - 16 Les Prés Royer, surface piézométrique de la nappe artésienne

Circulation souterraine et hydrochimie dans la région des Prés Royer.



* Vers le bassin du Sayon

** Vers le bassin de la Serrière

c en période de crue seulement

au cours d'un pompage sont des cercles concentriques autour du puits et les gradients hydrauliques sont disposés radialement au puits.

Après 2 mois de pompage sous la STEP les gradients hydrauliques forment un angle non négligeable avec le gradient théorique pour un milieu homogène qui s'accroît encore après l'arrêt du pompage. Dans l'état actuel de nos connaissances de la géométrie de cet aquifère, diverses interprétations restent toutefois possibles.

4. HYDROCHIMIE DES AQUIFERES DES PRÉS ROYER

4.1. Unités hydrochimiques.

Les nombreuses analyses effectuées aux Prés Royer (MORNOU 1970, Laboratoire cantonal) permettent de distinguer par leur contenu chimique 2 types d'aquifères : (tableau XI-III).

- Les eaux des formations en contact avec la molasse, très minéralisées (1000 - 2000 mg/l) principalement en sulfates à circulation lente. Ce sont :

- Les niveaux inférieurs de la nappe artésienne
- Les eaux de la molasse
- Les eaux des calcaires hauteriviens sous la molasse

- Des eaux à circulation rapide normalement minéralisées, de type bicarbonaté calcique :

- Les eaux de la nappe phréatique
- Les eaux de la nappe artésienne (niveaux supérieurs)
- Les eaux de l'Hauterivien supérieur en bordure du synclinal
- Les eaux du Malm et du Valanginien

Un schéma (Fig. XI-17) situe la position de chacun des aquifères.

4.2. Evolution saisonnière des paramètres physico-chimiques.

- La température

Les fluctuations sont saisonnières et la variance diminue avec l'approfondissement de la zone de circulation (Fig. XI-19). Dans la nappe captive proche de la zone d'homothermie les variations sont inférieures à $\pm 1^{\circ}\text{C}$ (Fig. XI-18).

Dans le puits de Chévard implanté un peu à l'aval de la zone d'affleurement de la nappe le décalage entre la température de l'eau et de l'air est d'un mois inférieur à celui des autres sources.

- Conductibilité électrique, dureté temporaire et dureté totale.

La régularité du contenu chimique de la nappe artésienne est remarquable. Celui-ci présente un décalage de 4 à 5 mois par rapport à la nappe phréatique. Les eaux de A₁ sont nettement plus sulfatées que celles de A₂ (Dureté permanente plus élevée et conductibilité électrique élevée : fig. XI-18).

Dans la nappe phréatique les maxima (novembre, décembre) et les minima (mars, avril) concordent avec les températures. Les puits de Savagnier et de Cernier ont une variance élevée. Les eaux du premier sont probablement contaminées par le Seyon, celles du second influencées par la nappe artésienne, hypothèse renforcée par le faible étalement des températures.

- pH

L'évolution saisonnière des pH paraît délicate à interpréter. On relève que dans la nappe phréatique les pH sont généralement inférieurs à 7,0 et ne dépassent pas 7,40.

Limites de fluctuation de la température
et de la conductivité électrique durant l'année hydrologique 1969~1970

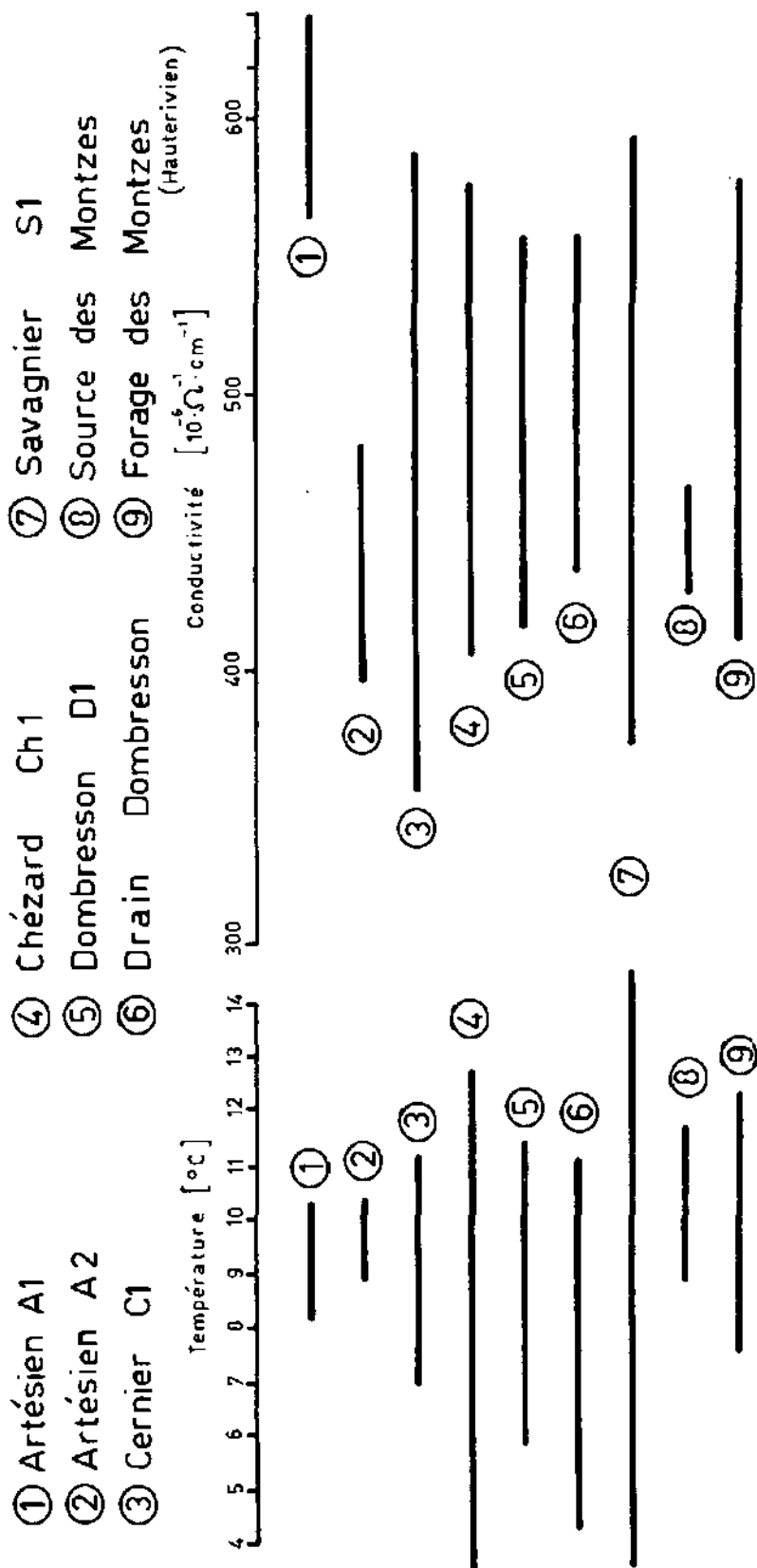


Figure XI - 18 Limites de fluctuation des paramètres physico-chimiques des nappes phréatiques, artésiennes et hauteriviennes.

- Autres éléments

Le tableau XI-III et la figure XI-21 permettent de comparer le contenu chimique de tous les aquifères. On note une teneur anormalement élevée en sulfate pour le puits de Cernier C₁, indice d'une sous alimentation par la nappe artésienne et en nitrates probablement d'origine agricole.

Tableau XI-III

Hydrochimie des eaux des nappes artésienne et phréatique aux Prés Royer

	Cernier C ₁ 11.1.1967	Dombreson D ₁ 7.2.1946	Savagnier Sa ₁ 28.1.1971	Artésien A ₂ 11.11.1969	Artésien A ₁ 11.11.1971
Température [°C]	7,8	7,5	8,35	9,4	9,0
Conductibilité électrique [µmhos]	450 · 10 ⁻⁶	-	311 · 10 ⁻⁶	533 · 10 ⁻⁶	671 · 10 ⁻⁶
pH	7,8	7,4	6,9	7,1	7,25
Dureté totale [mg/l]	310	300	360	294	395
" temporaire "	270	212	327	262	255
" permanente "	40	88	43	32	140
Oxygène dissout "	13,09	12,7	2,75	9,7	6,31
Déficit en oxygène %	-	-	25,3	-	-
Nitrites [mg NO ₂ /l]	0,0075	0,0	0,008	0,003	0,0075
Nitrates [mg NO ₃ /l]	20,0	0,0	0,04	9,4	8,5
Chlorures [mg Cl ⁻ /l]	9,5	11,0	14,2	3,4	2,1
Nombre de germes au cc	23	1040	-	29	45
Coliformes	0	0	0	0	0
Autres germes	0	0	0	0	0

Sources : Laboratoire cantonal
MORNOU (1970)

5. BACTERIOLOGIE

Des analyses effectuées par le Laboratoire cantonal on retiendra que la nappe phréatique est très vulnérable aux pollutions bactériennes d'origine agricole, en particulier le puits de secours de Chérard (Ch₂) et les puits de la commune de Savagnier (Sa₁, Sa₂, Sa₃) probablement contaminés par des infiltrations depuis le lit du Seyon.

La nappe artésienne, bien protégée grâce à un séjour prolongé des eaux est d'excellente qualité bactériologique.

6. ESSAI DE BILAN HYDROLOGIQUE

6.1. Bilan annuel moyen.

Les éléments du bilan des aquifères des Prés Royer estimés à partir des connaissances actuelles sont donnés au tableau XI-IV. Les formations molassiques n'affleurant pas elles n'ont pas été prises en considération. Les prélèvements ont été estimés sur la base de l'exploitation de

LES PRÉS ROYER HYDROCHIMIE

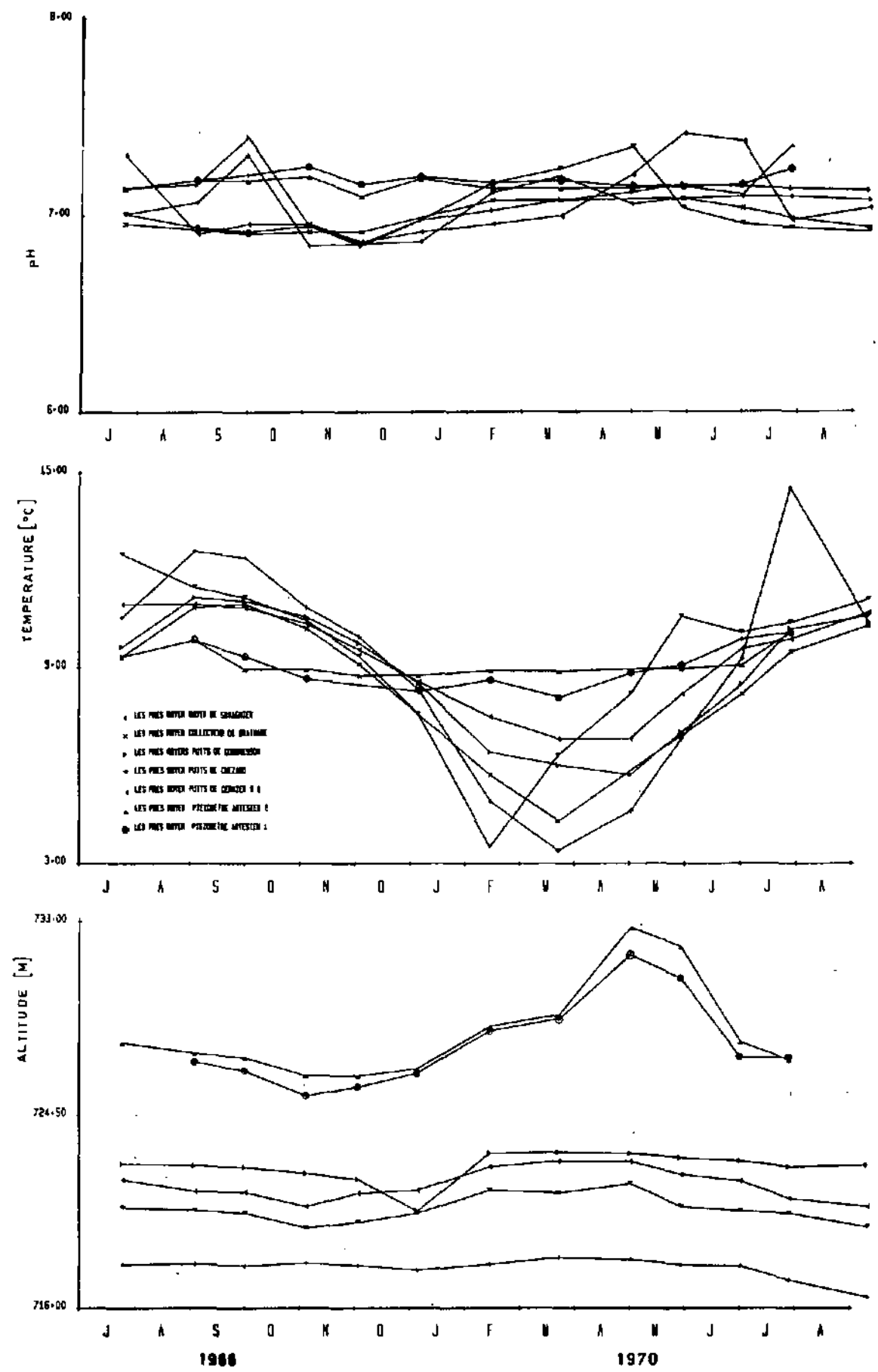


Figure XI - 19 Les Prés Royer, température, pH, conductibilité électrique

LES PRÉS ROYER HYDRCHIMIE

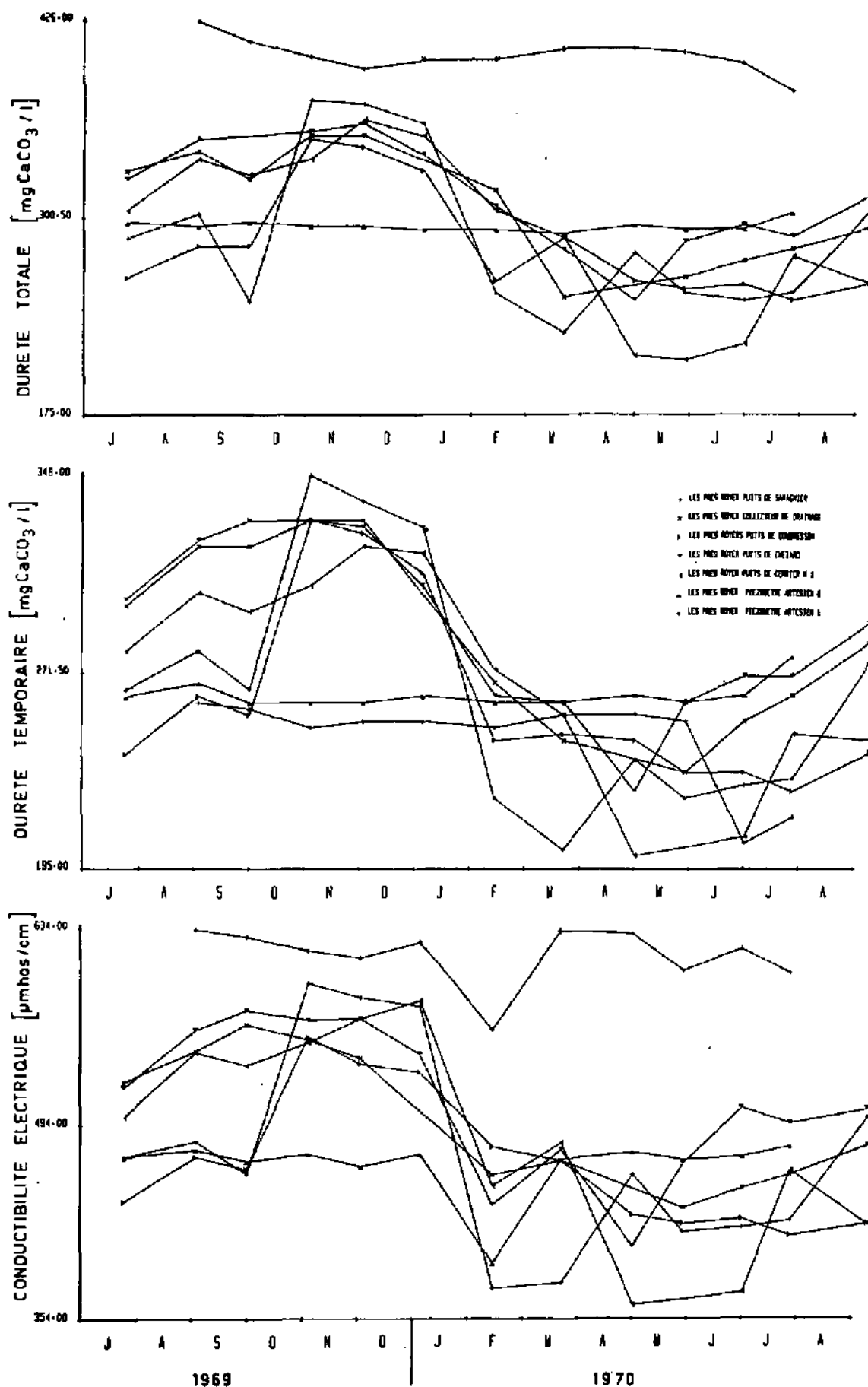


Figure XI - 20 Les Prés Royer, dureté temporaire et dureté totale

Prés Royer

Hydrochimie

Représentation graphique d'analyses

Source de

Montzes

18.3.69

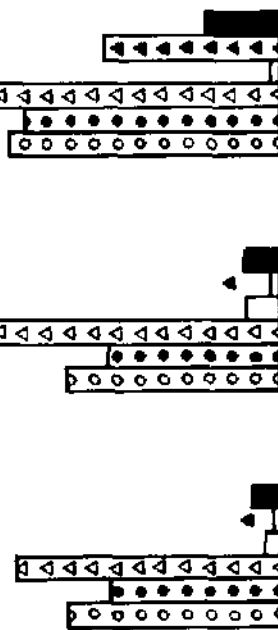
F₂ Malm

21.5.70

Source du

Torrent

21.5.70



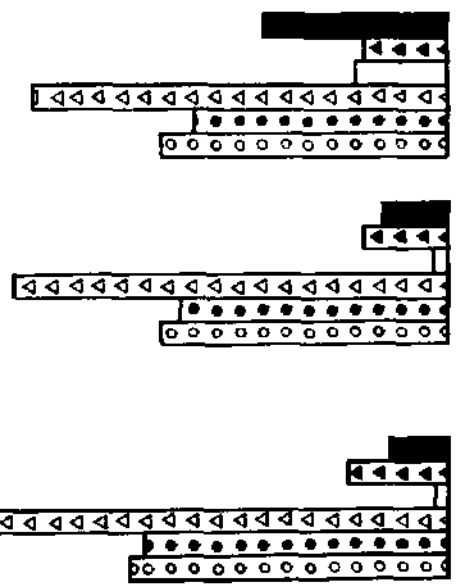
S₂ Hauterivien

18.3.69

Source du

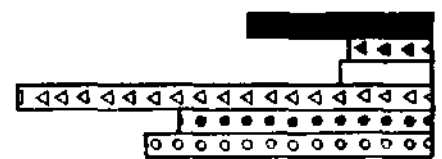
Canal

20.5.69



Puits Cernier 1

1.11.67

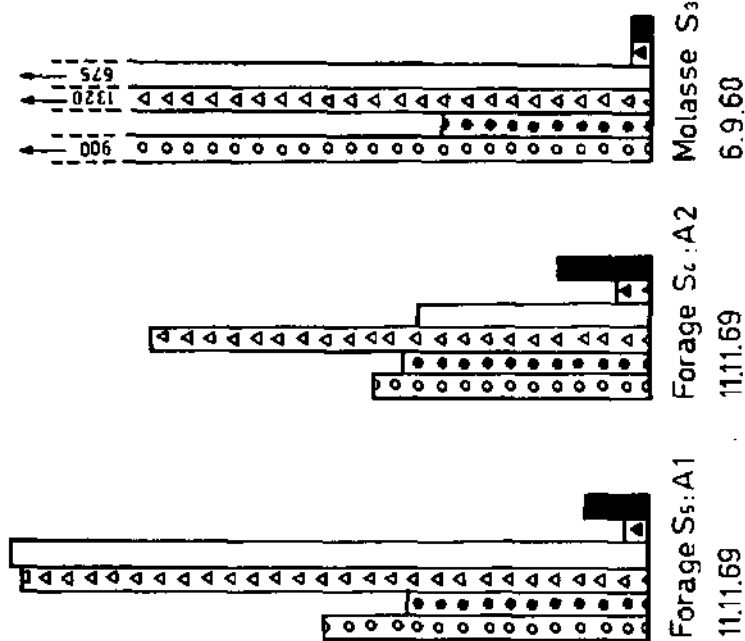


D'après :

Lab. cantonal

L. Mornod

B. Mathey



Dureté totale 5.0° F

Dureté temporaire 5.0° F

Conductibilité électrique 50.10⁻⁶ Ω⁻¹·cm⁻¹

Sulfates 5 mg/l de SO₄²⁻

Chlorures 5 mg/l de Cl⁻

Nitrates 5 mg/l de NO₃⁻

legende :

Figure XI -21 Les Prés Royer. Contenu chimique comparé de quelques sources et puits.

l'année civile 1970. Une carte (Fig. XI-22) donne les limites des bassins versants.

L'évapotranspiration réelle calculée par la méthode de TURC représente la ponction la plus importante (40 à 50 % de la pluviométrie), les pompages 35% de la pluviométrie des nappes quaternaires. La plus grande partie des eaux qui circulent dans la moraine argileuse sont constituées par des écoulements de subsurface évacués dans le réseau de drainage. Ces valeurs demandent toutefois à être précisées par des mesures détaillées, en particulier des jaugeages du Torrent et du Seyon à l'amont et à l'aval de la nappe.

Tableau XI-IV

Essai de bilan hydrologique
des aquifères des Prés Royer en $10^3 m^3$

Elément		Nappes phréatique et artésienne	Moraine argileuse	Calcaires hauteriviens
APPORTS	Précipitations	1900	3200	1200
	Infiltration depuis le lit du Seyon	100	-	-
	Infiltration depuis le lit du Torrent	50	-	-
	Apports souterrains	350	-	350
	Total	2400	3200	1250
PRELEVEMENTS	Evapotranspiration	900	1500	450
	Ruissellement	-	150	-
	Écoulement hypodermique et réseau de drainage	300	1300	-
	Décharge dans le lit du Torrent	50	-	-
	Décharge dans le lit du Seyon	300	50	-
	Sources	150	-	200
	Décharges vers d'autres nappes	-?	50 ¹⁾ + 50 ³⁾ + 100 ⁴⁾	300 ¹⁾ + 150 ²⁾
	Exploitation	700	-	150
	Total	2400	3200	1250

- 1) Vers la nappe artésienne
- 2) Vers le bassin de la Serrière
- 3) Vers les calcaires hauteriviens
- 4) Vers la nappe phréatique

6.2. Réserves régulatrices et ressources.

Une tentative d'estimation des réserves régulatrices à partir de la géométrie des aquifères révèle que plus de 80% de celles-ci sont contenues dans la nappe phréatique (tableau XI-V). Cette proportion ne change pas dans le cas d'une exploitation intensive de la nappe artésienne car on augmente les rabattements et par conséquent les réserves régulatrices de la nappe phréatique qui doublent et sont alors un peu supérieures aux débits annuels exploités en 1970. Les ressources représentent le volume d'eau annuellement exploitable. Le taux de renouvellement de la nappe au cours de l'année étant élevé grâce à une répartition régulière des précipitations, les ressources des aquifères des Prés Royer sont supérieures aux réserves régulatrices.

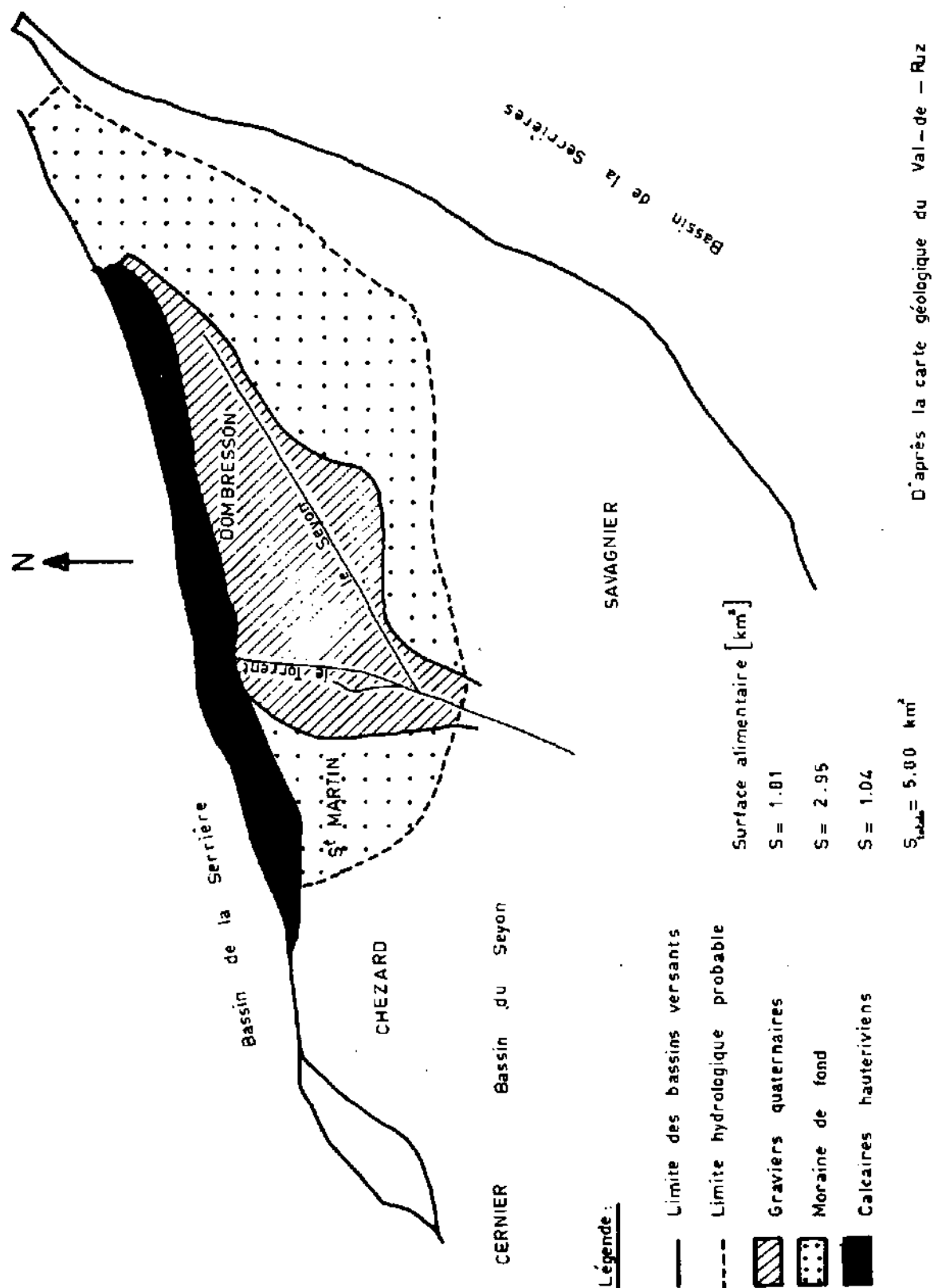


Figure XI - 22 Extension des aquifères des Prés Royer.

Dans le cas où la recharge de la nappe n'aurait lieu qu'une fois par an les ressources représenteraient moins de la moitié des réserves régulatrices puisque celles-ci alimentent les exutoires naturels et l'évapotranspiration quand l'ETP dépasse l'ETR.

On retiendra de cette approche du bilan hydrologique que l'ensemble des équifères des Prés Royer présentent des caractéristiques dans l'ensemble peu favorables à une exploitation. C'est la répartition de la pluviométrie au cours de l'année qui compense l'absence de capacité régulatrice pluri-annuelle.

Tableau XI-V

Estimation des réserves régulatrices avec et sans exploitation de la nappe artésienne

	Nappe phréatique des graviers		Nappe artésienne		Zone saturée dans le moraine argileuse		Nappe des calcaires hauteriviens	
Coefficient d'essorage moyen	10%		40/60		50/60		30/60	
Hauteur de fluctuation de la surface piézométrique m	2,20 ¹⁾	4,0 ²⁾	5,0 ¹⁾	12,0 ²⁾	1,0 ¹⁾	1,0 ²⁾	10,0 ¹⁾	18,0 ²⁾
Surface de la nappe km ²	1,8		1,0		3,0		0,9	
Réserves régulatrices 10 ³ m ³	396	720	20	48	15	15	50	81
Réserves régulatrices totales 10 ³ m ³	476 ¹⁾	864 ²⁾						

1) Sans exploitation de la nappe artésienne

2) Avec " " " " "

7. CONCLUSIONS

Bien que de nombreuses inconnues subsistent, en particulier en ce qui concerne la géométrie et l'extension de la nappe artésienne, l'interprétation des essais de pompage a confirmé les liaisons hydrauliques entre les nappes en présence. Un premier bilan donne 3000 litres par minute comme un débit d'exploitation annuel moyen à condition que les prélèvements soient conduits rationnellement.

L'implantation d'un puits supplémentaire dans la nappe artésienne, voire de quelques puits dans la nappe phréatique au centre des noyaux graveleux révélés par la carte géoélectrique pourrait améliorer encore les ressources à disposition.

Certains éléments du bilan ont dû être estimés, en particulier les échanges nappe-rivière qui mériteraient d'être précisés par des mesures de débit.

BILAN HYDROLOGIQUE ET CONCLUSIONS

...Ποντίων Κυνάτων

ἀνήριθμον γέλασμα...

Eachyle, Prométhée, 89-90

1. FACTEURS METEOROLOGIQUES ET ECOULEMENT

1.1. Relations entre les débits du Seyon et de la Serrière.

Le débit du Seyon représente le 30,8 % du débit de la Serrière (période 1901 - 1925, tableau VII-III), alors que le rapport des surfaces effectives des 2 bassins est de 45,4 %, la différence étant due à la variation des précipitations et de l'ETR avec l'altitude. Le rapport des débits des deux cours d'eau varie toutefois au cours de l'année. Il atteint ($Q_{SEYON}/Q_{SERRIERE}$) 56 % en décembre, mois où la fonte de la neige s'effectue rapidement dans les régions basses, alors que la couverture neigeuse subsiste partiellement jusqu'à la fin de l'hiver sur les hauteurs. En avril et en mai, le rapport est naturellement inférieur à la moyenne en raison de la fonte de la neige sur le bassin de la Serrière. Juillet et août sont des mois à forte évapotranspiration, laquelle est plus élevée dans le bassin du Seyon d'où un rapport des débits compris entre 25 % (juillet) et 19 % (août).

Les corrélations entre les débits mensuels des deux cours d'eau sont médiocres et souvent à la limite de la signification, excepté pour août et octobre. (tableau XII-1). Mais, avril et juin ont des coefficients nettement inférieurs aux limites de signification habituellement admises. Si cela s'explique pour les mois avec fonte de neige, l'anomalie de juin est difficile à interpréter (irrégularité dans la répartition des précipitations ?, forte évapotranspiration ?). Les pertes dans les gorges du Seyon, indépendantes des facteurs météorologiques jouent probablement aussi un rôle dans la médiocre qualité des corrélations.

1.2. Bilans mensuels par régression multiple.

L'utilisation des régressions multiples dans le cas où la distribution des variables ne s'écarte pas trop de la normalité reste un excellent moyen pour estimer l'influence relative des facteurs agissant sur le bilan dans des situations où la complexité des phénomènes ne permet pas l'établissement de lois déterministes. (MATHEY, B., MOREL, G. 1974).

A partir des précipitations et des températures mensuelles moyennes entre 1901 et 1925, on a recherché l'influence de ces deux facteurs sur l'écoulement pour chaque mois.

- Le bassin du Seyon.

On constate que les variations de la température autour de la moyenne annuelle ont généralement peu d'importance sur l'écoulement; le coefficient de corrélation est le plus souvent inférieur à 0,50 et la pente de la droite de régression (tableau XII-II) est généralement non significative. De novembre à février la pente est positive ce qui indique l'effet de la température sur la fonte de la neige.

La corrélation entre les débits et les précipitations mensuelles est meilleure sans être excellente en raison de la forte dispersion des valeurs. L'hypothèse d'un accroissement du débit du Seyon avec les précipitations est toujours vérifiée, même pour les mois d'hiver (Fig. XII-1). De mai à octobre l'accroissement de l'écoulement avec les précipitations est relativement faible; il est élevé de décembre à avril avec un maximum en mars, mois où les précipitations s'accompagnent de la disparition de la couverture neigeuse. Novembre est un mois de transition et la faible pente de la droite de régression de janvier est provoquée par le retard à l'écoulement des précipitations retenues sous forme de neige.

La régression multiple (débit - précipitations - température) modifie peu les coefficients de corrélation, confirmant l'effet négligeable de la température sur les bilans mensuels. On constate donc que si l'ETR est bien une fonction du cycle thermique annuel, l'écart des températures par rapport à la moyenne d'un mois donné jouera un rôle négligeable sur le bilan, à l'exception peut-être des mois de juillet et août. Les variations de température autour de la moyenne annuelle joueront toutefois un rôle plus important et seront nettement significatives si on ne considère que les mois de juin à décembre.

Température et précipitations sont donc insuffisantes pour expliquer totalement l'ETR, et c'est avec profit que l'on introduirait un indice d'antécédence des précipitations (API) pour améliorer la variation expliquée, ce qui n'est pas fait dans les formules de calcul de l'ETR.

- Le bassin de la Serrière.

Les corrélations entre les températures et les débits mensuels sont également médiocres, ce qui caractérise bien une région où l'ETR est égale à l'ETP. Le signe des coefficients de régression révèle à nouveau l'influence de la température sur la fonte de la neige (la relation est positive de novembre à avril) (tableau XII-III).

En mai, mois où la fonte de la réserve nivale n'est pas toujours réalisée, la corrélation est nulle.

Les corrélations entre les débits et les précipitations mensuelles est significative de juin à décembre, particulièrement pour les 3 derniers mois de l'année où la neige ne s'accumule que partiellement d'un mois à l'autre.

Les régressions multiples (débits - température - précipitation) améliorent les corrélations mais n'expliquent pas complètement le déficit d'écoulement. Les conclusions seront du même type que celles données pour le bassin du Seyon.

Tableau XII-I

Corrélation des débits mensuels du Seyon et de la Serrière.
Période 1901 - 1925

MOIS	A_0 m^3/m	A_1	r
Janvier	0,223	0,288	0,60
Février	0,152	0,456	0,53
Mars	-0,138	0,452	0,43
Avril	-0,150	0,227	0,44
Mai	-0,287	0,251	0,56
Juin	0,127	0,183	0,31
Juillet	-0,124	0,330	0,67
Août	-0,172	0,301	0,80
Septembre	-0,124	0,343	0,60
Octobre	-0,089	0,332	0,81
Novembre	-0,170	0,506	0,59
Décembre	-0,189	0,631	0,63
Année	0,070	0,284	0,60

$$Q_{SEYON} = A_0 + A_1 \cdot Q_{SERRIERE}$$

$$N = 25 \quad r_{0,01} = 0,51 \quad r_{0,001} = 0,62$$

Tableau XII-II

Corrélations des débits mensuels du Seyon avec les températures et les précipitations. (Période 1901 - 1925).

MOIS	$Q_s = A_0 + A_1 T_C$			$Q_s = A_0 + A_1 P_D$			$Q_s = A_0 + A_1 T_C + A_2 P_D$			
	A_0	A_1	r	A_0	A_1	r	A_0	A_1	A_2	r
Janvier	1,098	0,0591	0,17	0,439	0,0072	0,50	0,472	0,0138	0,0070	0,50
Février	1,069	0,0887	0,25	0,019	0,0134	0,74	0,082	0,0955	0,0135	0,79
Mars	1,640	-0,0729	0,08	-0,243	0,0218	0,73	0,151	-0,1906	0,0227	0,76
Avril	1,075	-0,0237	0,04	-0,641	0,0184	0,80	-0,885	0,0373	0,0186	0,81
Mai	0,753	-0,0137	0,04	0,146	0,0052	0,36	0,026	0,098	0,0053	0,37
Juin	1,011	-0,0369	0,11	-0,046	0,0053	0,57	0,069	-0,0079	0,0052	0,57
Juillet	2,254	-0,1183	0,47	-0,183	0,0061	0,65	-0,204	0,0010	0,0060	0,65
Août	2,414	-0,1388	0,54	-0,118	0,0039	0,44	1,753	-0,1127	0,0025	0,60
Septembre	1,496	-0,0883	0,26	-0,308	0,0083	0,60	0,380	-0,0545	0,0079	0,62
Octobre	0,730	-0,0289	0,11	0,076	0,0053	0,62	0,277	-0,0265	0,0053	0,63
Novembre	0,624	0,1339	0,25	0,038	0,0090	0,63	-0,162	0,1138	0,0089	0,66
Décembre	1,548	0,2644	0,40	-0,319	0,0148	0,74	-0,243	0,0349	0,0143	0,74
Année	2,577	-0,2573	0,49	-0,494	0,0012	0,75	0,380	-0,1043	0,0010	0,78

T_C : température mensuelle à Cernier °C

Q_s : Débit du Seyon $m^3 s^{-1}$

P_D : précipitations mensuelles à Dombresson mm

$N = 25$

$r_{0,01} = 0,51$

$r_{0,001} = 0,62$

Tableau XII-III

Corrélation des débits mensuels de la Serrière avec les températures et les précipitations mensuelles. (Période 1901 - 1925).

MOIS	$Q_s = A_0 + A_1 T_C$			$Q_s = A_0 + A_1 P_D$			$Q_s = A_0 + A_1 T_C + A_2 P_D$			
	A_0	A_1	r	A_0	A_1	r	A_0	A_1	A_2	r
Janvier	3,266	0,2415	0,36	1,521	0,0152	0,51	2,030	0,1644	0,0134	0,56
Février	2,205	0,2153	0,52	1,084	0,0106	0,50	1,431	0,2140	0,0105	0,72
Mars	3,138	0,3221	0,37	2,043	0,0192	0,66	1,909	0,1995	0,0177	0,71
Avril	2,169	-0,5595	0,47	3,269	0,0174	0,40	0,548	0,5758	0,0181	0,63
Mai	3,661	-0,0139	0,01	2,337	0,0137	0,43	2,281	0,0053	0,0137	0,43
Juin	3,937	-0,1528	0,27	1,013	0,0096	0,61	2,836	-0,1418	0,0094	0,66
Juillet	5,185	-0,246	0,45	0,165	0,0146	0,77	-0,878	0,0613	0,0160	0,77
Août	6,045	-0,3175	0,42	-0,1079	0,0159	0,66	2,785	-0,1928	0,0142	0,70
Septembre	3,376	-0,1606	0,29	0,432	0,0134	0,55	1,859	-0,1260	0,0128	0,59
Octobre	2,639	-0,1244	0,21	0,562	0,0153	0,73	1,289	-0,1078	0,0152	0,75
Novembre	1,959	0,0787	0,14	0,978	0,0118	0,71	0,811	0,1039	0,0120	0,73
Décembre	2,774	0,2652	0,42	0,623	0,0165	0,82	0,836	0,1076	0,0154	0,83
Année	4,920	-0,4064	0,34	-0,141	0,0024	0,74	0,259	-0,0556	0,0024	0,74

Q_s : débit mensuel de la Serrière

P_D : précipitation mensuelle à Dombresson

T_C : température mensuelle à la Chaux-de-Fonds

$N = 25$

$r_{0,01} = 0,51$

$r_{0,001} = 0,62$

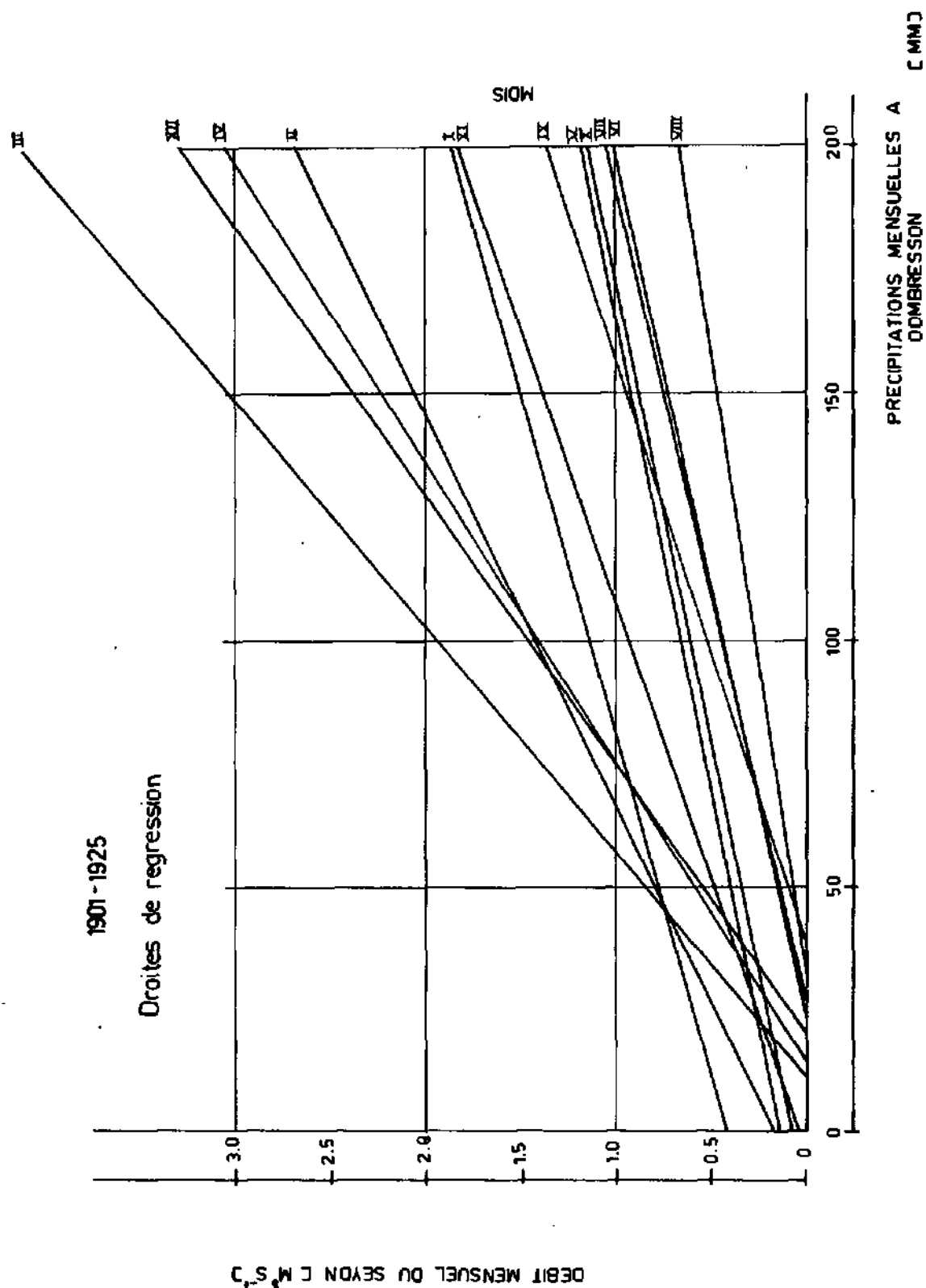


Figure XII - 1 Débit mensuels du Seyon et précipitations 1901 - 1925
Droites de régressions.

2. BILAN HYDROLOGIQUE

2.1. L'évapotranspiration potentielle (ETP).

L'évapotranspiration réelle (ETR) calculée par la méthode des bilans hydriques mensuels en recourant à la méthode de Thornthwaite (cf. chap. VI-4.3) est toujours égale à l'évapotranspiration potentielle, pour le bassin du Seyon comme pour le bassin de la Serrière (période 1901 - 1925: tableaux XII-IV, XII-V, XII-VI et XI 1970 - X 1971 : non représentés). L'ETP calculée par la méthode de Thornthwaite donne des valeurs de 19 % supérieures au déficit d'écoulement pour le bassin du Seyon et de 21 % supérieures pour le bassin de la Serrière, période 1901 - 1925. Maximum de juin à août l'ETP (=ETR) est minimum en décembre.

Si durant les mois d'été secs on mesure une désaturation temporaire du sol, rapidement compensée par les précipitations estivales (chap. IX-1.2), la réserve en eau du sol calculée n'est jamais entamée durant l'année moyenne dans le bassin de la Serrière. Si, dans le bassin du Seyon, juillet est légèrement déficitaire en précipitations, il n'y a pour l'année moyenne jamais déficit d'alimentation. L'accord entre les mesures d'humidité du sol et le calcul des bilans mensuels mérite donc d'être relevé.

2.2. Evapotranspiration réelle (ETR) et déficit d'écoulement.

La comparaison du déficit d'écoulement D avec l'ETR calculée par la formule de TURC (chap. VI-4.1) pour les diverses surfaces possibles envisagées pour les bassins de la Serrière et du Seyon et pour la période 1901 - 1925 permet de constater que les limites des deux bassins versants sont bien comprises entre les limites maximum et minimum définies au chapitre V. Pour la période XI 1970 - X 1971, l'ETR est toujours trop élevée ce qui conduirait théoriquement à envisager une extension des limites maximum possibles des deux bassins. (Tableau XII-VII).

A titre comparatif on a considéré les éléments du bilan (tableau XII-VII) de deux bassins karstiques: la source de l'Arèuse à St Sulpice (TRIPET 1972) et de l'Orbe aux Granges (PETCH 1970), d'un bassin partiellement karstique, l'Arèuse à Champ-du-Moulin (BURGER, 1959) et d'un bassin à couverture molassique et quaternaire, le Talent à Chevornay (PETCH, op. cit). Il apparaît que si la formule de TURC s'adapte relativement bien au domaine jurassien pour des bassins karstiques dont l'altitude moyenne est comprise entre 1000 et 1100 mètres, celle-ci donne des valeurs nettement trop faibles entre 600 et 800 mètres. Ce point sera discuté plus loin.

Les valeurs de l'ETR selon TURC ont été estimées à partir de l'ETR à l'altitude moyenne du bassin versant (Figures VI-20 et VI-24) et les précipitations par planimétrie des cartes isohyètes. L'ETR selon TURC représente alors sensiblement le 42 % de la pluviométrie annuelle moyenne du bassin du Seyon et le 33 % de celle du bassin de la Serrière soit environ 470 et 440 mm (période 1901 - 1925). Pour la période XI 1970 - X 1971 on a respectivement 60 %, 51 %, 500 et 470 mm, mais il s'agit d'une période relativement sèche.

2.3. Ajustement des limites des bassins versants à partir de l'ETR.

Connaissant les éléments du bilan hydrologique de chacune des parties du bassin, et le sens des échanges hydrauliques, il est possible d'estimer à partir de l'équation du bilan les surfaces (S_2 , S_2') comprises entre les limites minimum et maximum possibles qui doivent être rattachées au bassin.

Si on néglige la variation du volume des réserves souterraines entre le début et la fin de la période considérée, l'équation du bilan peut s'écrire pour la Serrière :

$$CQ = Pn_1 S_1 + Pn_2 S_2 + R_3 Pn_3 S_3 - Pn_4 S_4 - Pn_5 S_5 - Pn_6 S_6 + \Delta S_e C$$

et pour le Seyon à Neuchâtel

$$CQ' = Pn'_1 S'_1 + Pn'_2 S'_2 + (1 - R_3) Pn_3 S_3 + Pn_4 S_4 + Pn_5 S_5 + Pn_6 S_6 - \Delta S_e C$$

où Q (Q') est le débit annuel moyen écoulé à Serrière (dans le Seyon)

$Pn = P - ETR$ ($Pn' = P' - ETR'$) est la pluie nette calculée

P la lame d'eau annuelle moyenne sur la fraction de bassin considérée

ETR l'évapotranspiration réelle estimée par la formule de TURC sur la fraction de bassin considérée

S la surface alimentaire de chacun des bassins versants

ΔS_e le débit annuel moyen des infiltrations dans les gorges du Seyon

R_3 la fraction de S_3 rattachée au bassin de la Serrière

C une constante valant 31536 auquel ces tous les termes sont exprimés en 10^3 mètres cubes.

Les indices représentent respectivement :

- 1 les terrains compris à l'intérieur des limites minimum du bassin de la Serrière et du Seyon.
- 2 les terrains comprise entre les limites maximum et minimum.
- 3 les terrains alimentant le bassin du Seyon en crue (combes argoviennes).
- 4 le bassin alimentaire de la source du Torrent.
- 5 le bassin alimentaire des sources du tunnel des Loges.
- 6 le bassin karatique des sources de Sous le Mont.

Exprimons S_2 et S'_2 on a pour la Serrière :

$$S_2 = \frac{CQ - Pn_1 S_1 - R_3 Pn_3 S_3 + Pn_4 S_4 + Pn_5 S_5 + Pn_6 S_6 - \Delta S_e C}{Pn_2}$$

et pour le Seyon

$$S'_2 = \frac{CQ' - Pn'_1 S'_1 - (1 - R_3) Pn_3 S_3 - Pn_4 S_4 - Pn_5 S_5 - Pn_6 S_6 + \Delta S_e C}{Pn'_2}$$

en remplaçant chacun des termes de l'expression par sa valeur numérique pour la période 1901 - 1925 on trouve :

$$S_2 = \frac{78840 - 72730 - 0,8 (2420) + 350 + 170 + 940 - 1260}{1108} = 3,9 \text{ km}^2$$

$$S'_2 = \frac{24280 - 22640 - 0,2 (2420) - 350 - 170 - 940 + 1260}{743} = 1,3 \text{ km}^2$$

La surface totale de chacun des bassins versants vaut alors dans l'hypothèse où l'ETR selon Turc est égale au déficit d'écoulement :

$$S_T = S_1 + S_2 + R_3 S_3 - S_4 - S_5 - S_6 + S_{\Delta S_e} = 87,7 \text{ km}^2$$

$$S'_T = S'_1 + S'_2 + (1 - R_3) S_3 + S_4 + S_5 + S_6 - S_{\Delta S_e} = 37,1 \quad (\text{à Neuchâtel})$$

$$S'_T = S'_1 + S'_2 + (1 - R_3) S_3 + S_4 + S_5 + S_6 = 38,6 \quad (\text{à Valangin})$$

$$S_T + S'_T = 126,3 \text{ km}^2$$

On notera que les échanges hydrauliques au niveau du Torrent, des sources du tunnel des Loges, des sources de Sous le Mont et des pertes dans les gorges du Seyon s'équilibrent parfaitement.

Tableau XII-VII

Bilans hydrologiques comparés de 4 bassins de Suisse romande avec ceux des bassins de la Serrière et du Seyon.

Bassin	Période	Surface km ²	Altitude m	Débit annuel moyen			Précipitation mm	Déficit d'écoulement mm	ETR mm	D ETR
				m ³ /s	mm	l m ⁻² km ⁻²				
L'Arenne à Champ-du-Moulin	1930 - 1954	374,0	1094	12,4	1043	33,1	1480	437	437	1,0
Source de l'Arenne à St Sulpice	1959 - 1969	129,0	1115	4,68	1144	36,2	1531	387	390	0,99
Orbe/Les Granges	1936 - 1966	299,0	1004	11,97	1250	39,6	1660	410	426	0,96
Le Talant/ Chavornay	1965 - 1967	63,8	689	1,06	524	16,6	1110	590	462	1,22
Seyon + Serrière	1901 - 1925	123,4	954	3,27	836	26,4	1263	427	451	0,94
Seyon + Serrière	1901 - 1925	133,8	977	3,27	771	24,4	1384	613	448	1,37
Seyon + Serrière	XI 1970 - X 1971	123,4	954	1,88	479	15,2	987	408	480	0,85
Seyon + Serrière	XI 1970 - X 1971	133,8	977	1,88	442	14,0	890	448	478	0,94
Le Seyon ¹⁾	1901 - 1925	35,0	760	0,77	693	22,0	1119	426	472	0,90
Le Seyon ¹⁾	1901 - 1925	39,1	765	0,77	621	19,6	1128	507	471	1,07
La Serrière	1901 - 1925	82,0	1040	2,50	961	30,4	1328	367	441	0,83
La Serrière	1901 - 1925	92,6	1064	2,50	851	27,0	1349	498	438	1,14
Le Seyon ²⁾	XI 1970 - X 1971	35,0	760	0,5	450	14,2	824	374	499	0,75
Le Seyon ²⁾	XI 1970 - X 1971	39,1	765	0,5	403	12,8	827	424	497	0,85
La Serrière	XI 1970 - X 1971	82,0	1040	1,38	526	16,8	907	381	472	0,81
La Serrière	XI 1970 - X 1971	92,6	1064	1,38	466	14,9	916	450	468	0,95

1) à Neuchâtel

2) à Velangin

En répétant cette suite d'opération pour la période XI 1970 - X 1971 et en déduisant les apports (~5 l/s) depuis le réseau de Neuchâtel (Vilsers, Les Geneveys s/ Coffrane, Coffrane) dans le bassin du Seyon, on trouve :

$S_2 = 12,0 \text{ km}^2$	et $S'_2 = 12,8 \text{ km}^2$	
et $S_T = 96,5 \text{ km}^2$	$S'_T = 46,6 \text{ km}^2$ (à Velangin)	$S_T + S'_T = 144,2$

Si la valeur obtenue pour la surface du bassin de la Serrière est physiquement possible, celle du bassin du Seyon est manifestement trop élevée et on doit envisager soit une surestimation des débits, soit une sous-estimation des précipitations pour cette période.

En utilisant comme valeur de l'ETR celle donnée par la méthode des bilans hydrologiques calculée à partir de la formule de Thornthwaite et pour la période 1901 - 1925, on aurait :

$S_2 = 10,9 \text{ km}^2$	$S_2' = 7,2 \text{ km}^2$	
$S_T = 94,7 \text{ km}^2$	$S_T' = 43,0 \text{ km}^2$	$S_T' + S_T = 137,7 \text{ km}^2$

Là encore on doit constater que pour le bassin du Seyon surtout la surface obtenue est nettement surestimée alors qu'elle pourrait être compatible avec les limites définies pour le bassin de la Serrière. Il est certain que la formule de Thornthwaite donne des valeurs nettement trop fortes pour l'ETR.

Dans l'état actuel de nos connaissances, et compte tenu des incertitudes subsistant sur les paramètres hydrométéorologiques, on peut donc admettre que l'ETR calculée par la méthode de TURC donne une bonne approximation du déficit d'écoulement pour le bassin de la Serrière dont la surface du bassin versant peut alors être estimée à :

surface du bassin de la Serrière : $S = 88 \text{ km}^2$

Dans le cas du bassin du Seyon, l'ETR donnée par la formule de TURC est probablement un peu inférieure au déficit d'écoulement et on pourra admettre une aire alimentaire de :

surface du bassin du Seyon à Valangin : $S = 40 \text{ km}^2$

Ceci implique qu'une grande partie de la surface définie par les limites maximum possibles du bassin du Seyon, qui comprenant l'Hauterivien du Val de Ruz appartiennent effectivement à ce bassin.

surface totale des bassins de la Serrière
et du Seyon réunis : $S = 128 \text{ km}^2$

Tableau XII-VIII

Bilan hydrologique 1901 - 1925 et XI 1970 - X 1971
des bassins du Seyon et de la Serrière.

Partie du bassin	Surface (km^2)	Iden- tifi- cation	Altitude m	1901 - 1925				XI 1970 - X 1971			
				P mm	ETR		Pluie 3) nette mm	P mm	ETR		Pluie 3) nette mm
					Turc mm	Thorn. mm			Turc mm	Thorn. mm	
Le Seyon à Neuchâtel	35,0	S_1'	760	1119	472	572	647	824	498	534	326
Le Seyon, ext. possible	(4,1)	S_2'	807	1210	467	564	743	861	493	531	368
La Serrière	82,0	S_1	1040	1328	441	526	887	907	472	504	435
La Serrière, ext. possible	(10,6)	S_2	1260	1525	417	490	1108	983	450	461	533
Part karstique des sources de Sous la Mont	1,2	S_6	900	1240	457	550	783	670	461	522	389
Combes argoviennes	2,3	S_3	1112	1486	433	514	1053	900	465	492	435
Sources du Torrent	0,48	S_4	~1000	1310	446	533	864	-	-	-	- 4)
Tunnel des Loges	0,16	S_5	~1250	1500	418	492	1082	975	452	459	523
Pertes du Seyon	1,4 1) 1,82	S_5 S_8	-	-	-	-	-	-	-	-	-

1) Reportée au bassin du Seyon

3) $P_{\text{nette}} = P - \text{ETR (TURC)}$

2) " " " de la Serrière

4) La résurgence n'a pas fonctionné durant cette période.

BILAN HYDROLOGIQUE 1901-1925 ET SURFACE DES BASSINS

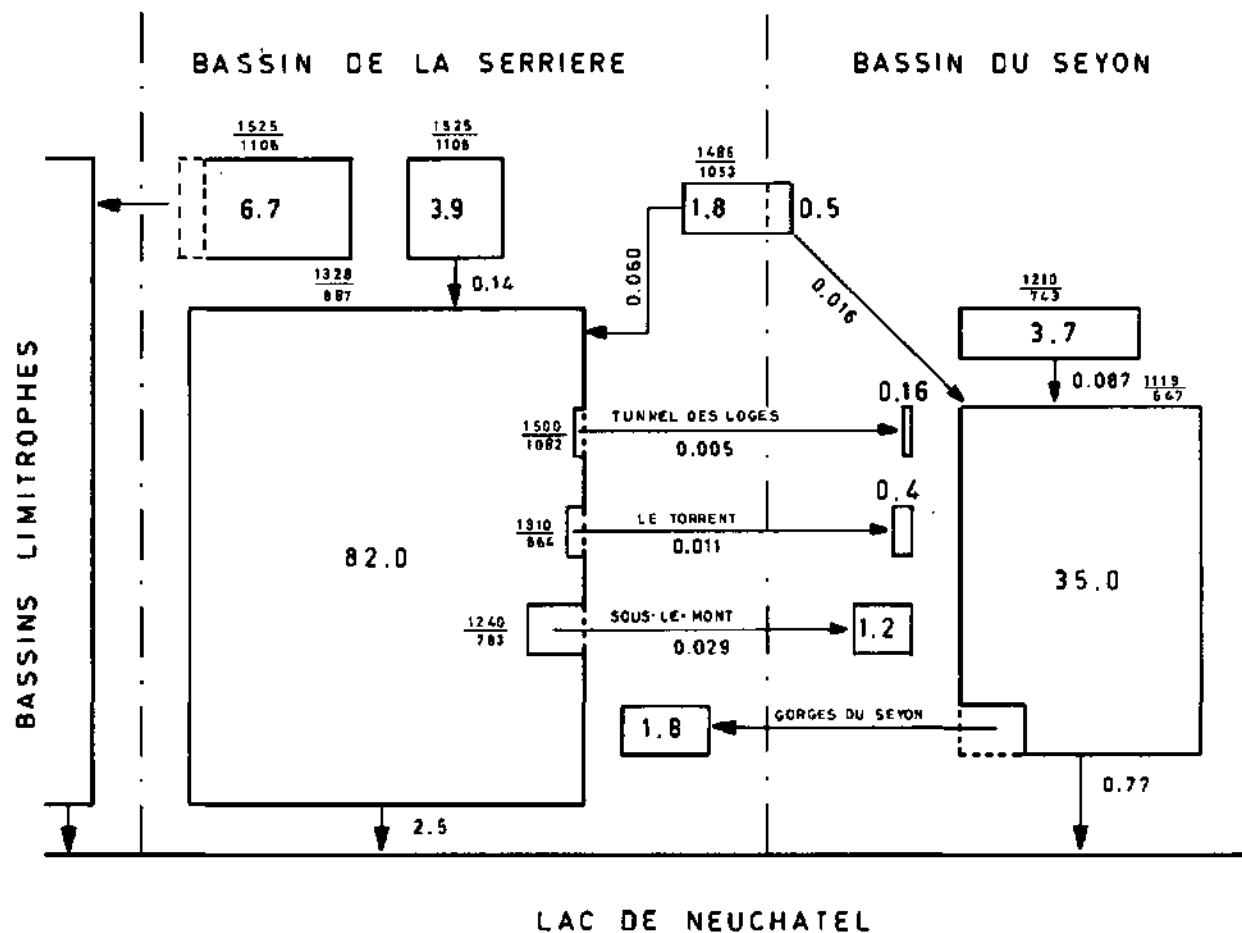


Figure XII - 2 Bilan hydrologique 1901 - 1925 et surfaces des bassins versants.

Tableau XII-IV

EVAPOTRANSPIRATION REELLE ET POTENTIELLE

BASSIN DE LA SERRIERE ($S = 88 \text{ km}^2$)

PERIODE 1901- 1925

FORMULE DE TURC $E = 439.8$ FORMULE DE COUAGNE $E = 305.2$

BILAN HYDRIQUE D APRES LA METHODE DE THORNTONHAITE

MOIS	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	ANNEE
TEMPERATURE	9.7	12.2	14.2	13.6	10.9	6.4	1.1	-0.8	-2.1	-1.7	0.9	4.2	9.6
INDICES THERMIQUES	1.72	3.85	4.85	4.54	3.07	1.45	0.30	0.06	0.26	0.19	0.07	0.76	21.99
COEFFICIENTS DE CORRECTION	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75	0.80	0.81	1.02	1.13	
EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE	72.9	89.9	103.5	92.1	63.4	37.9	6.9	5.0	12.3	10.3	7.5	31.4	531.0
PRECIPITATIONS	109.0	109.0	106.0	120.0	109.0	107.0	117.0	153.0	105.0	96.0	106.0	113.0	1346.0
VARIATION DE L EAU DANS LE SOL	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	
RESERVES UTILES A LA VEGETATION	50.	50.	50.	50.	50.	50.	50.	50.	50.	50.	50.	50.	
DEFICIT D ALIMENTATION	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
EXCEDENT D ALIMENTATION	32.	19.	2.	27.	45.	69.	110.	147.	92.	85.	98.	81.	812.
EVAPOTRANSPIRATION REELLE	72.	89.	103.	92.	63.	37.	6.	5.	12.	10.	7.	31.	533.

Tableau XII-V

EVAPOTRANSPIRATION REELLE ET POTENTIELLE

BASSIN DU SEYON $S = 40 \text{ km}^2$

PERIODE 1901- 1925

FORMULE DE TURC $E = 470.5$ FORMULE DE COUAGNE $E = 467.1$

BILAN HYDRIQUE D APRES LA METHODE DE THORNTONHAITE

MOIS	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	ANNEE
TEMPERATURE	11.7	14.4	16.3	15.7	12.3	7.7	2.4	0.2	-1.1	-0.4	2.8	6.3	7.3
INDICES THERMIQUES	3.62	4.96	5.98	5.65	3.90	1.92	0.32	0.00	0.10	0.02	0.41	1.41	26.34
COEFFICIENTS DE CORRECTION	1.26	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75	0.80	0.81	1.02	1.11	
EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE	79.1	97.2	111.1	99.0	67.4	39.0	10.7	0.9	5.1	2.0	16.1	36.7	566.9
PRECIPITATIONS	89.0	105.0	97.0	109.0	92.0	65.0	96.0	122.0	81.0	75.0	81.0	67.0	1119.0
VARIATION DE L EAU DANS LE SOL	0.	0.	-14.	9.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	
RESERVES UTILES A LA VEGETATION	100.	100.	85.	95.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	
DEFICIT D ALIMENTATION	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
EXCEDENT D ALIMENTATION	9.	7.	0.	0.	20.	45.	85.	121.	75.	72.	64.	46.	592.
EVAPOTRANSPIRATION REELLE	70.	97.	111.	99.	67.	39.	10.	0.	5.	2.	16.	36.	566.

BASSIN DE LA SERRIERE DOGGER

PERIODE 1901- 1925

FORMULE DE TURC E = 394.7

FORMULE DE COUTAGNE E = 345.1

BILAN HYDRIQUE D APRES LA METHODE DE THORNTHWAITZ

MOIS	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	ANNEE
TEMPERATURE	7.9	10.3	12.4	11.9	9.0	5.2	0.1	-1.8	-2.8	-2.9	-0.6	2.3	4.2
INDICES THERMIQUES	1.99	2.98	3.95	3.71	2.43	1.06	0.00	0.21	0.41	0.43	0.04	0.30	17.57
COEFFICIENTS DE CORRECTION	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75	0.80	0.81	1.02	1.13	
EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE	66.8	83.0	97.5	87.2	60.1	35.3	1.3	12.2	18.4	19.2	7.0	22.3	510.8
PRECIPITATIONS	119.0	123.0	120.0	136.0	123.0	121.0	133.0	174.0	119.0	109.0	120.0	128.0	1525.0
VARIATION DE L EAU DANS LE SOL	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	
RESERVES UTILES A LA VEGETATION	50.	50.	50.	50.	50.	50.	50.	50.	50.	50.	50.	50.	
DEFICIT D ALIMENTATION	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
EXCEDENT D ALIMENTATION	52.	39.	22.	48.	62.	85.	131.	161.	100.	89.	112.	105.	1014.
EVAPOTRANSPIRATION REELLE	66.	83.	97.	87.	60.	35.	1.	12.	18.	19.	7.	22.	510.

2.4. Discussion des limites des bassins versants.

SCHARDT (1906, op. cit) admettait pour les surfaces des bassins versants du Seyon et de la Serrière des valeurs respectivement de 30 et 90 km². On voit donc qu'il sous-estimait nettement celle du Seyon, alors que la précision de son estimation des limites et de la surface du bassin de la Serrière mérite d'être relevée.

Une incertitude qui peut être estimée à 5 % de la surface totale du bassin de la Serrière subsiste néanmoins sur les limites exactes, qu'il serait toutefois prématuré de lever sans travaux complémentaires, à commencer par des essais de coloration dans les régions critiques (chap. IV-2.13). Une meilleure connaissance du champ des pressions dans la zone littorale assurerait également une plus grande précision des limites dans cette partie du bassin.

Relevons que l'installation de cases lysimétriques dans le karst jurassien apparaît comme une nécessité pour le contrôle in situ des éléments du bilan et pour s'assurer que la formule de TURC s'adapte bien à cette région. Pour BURGER (comm. orale, 1976) celle-ci donnerait tout de même une ETR inférieure au déficit d'écoulement dans les régions karstiques, ce qui dans ce cas conduirait à envisager une extension supplémentaire du bassin de la Serrière.

2.5. Débits spécifiques.

Ils sont donnés au tableau XII-VII et XII-IX. Nettement inférieures à ceux de l'Orbe (39,6 l/s km²) et de l'Arve à Champ de Moulin (33,1 l/s km²) ils traduisent bien la diminution de la pluviométrie du SW au NE de la chaîne jurassienne. On détient ainsi tous les éléments de la réponse à la question posée par M. BAKALOWICZ au Congrès d'hydrologie des terrains karstiques à Besançon (1971) (BURGER et cons., 1971 op. cit).

Si le débit spécifique de la Serrière est aussi bas en comparaison de celui des autres résurgences jurassiennes, c'est avant tout en raison d'un déficit pluviométrique associé à une altitude moyenne un peu plus basse, et non à une erreur sur les limites du bassin comme le suggérerait M. BAKALOWICZ.

Tableau XII-IX

Débits spécifiques de la Serrière et du Seyon.

	Débit spécifique l s ⁻¹ km ⁻²	
	1901 - 1925	XI 1970 - X 1971
Bassin de la Serrière	28,4	19,7
Bassin du Seyon	19,2	12,5

3. CONCLUSIONS

3.1. Quelques résultats.

Ce travail constitue la première étude hydrogéologique des bassins de la Serrière et du Seyon et représente donc d'abord un recueil de données et d'observations qui devraient pouvoir servir de base de travail à toute étude de détail dans cette région.

Le premier objectif, à savoir la détermination des limites des bassins versants est en grande partie atteint. Les incertitudes qui subsistent, particulièrement au niveau du Dogger de Tête de Ran - Mt Racine, de la terminaison du décrochement de la Ferrière et du synclinal de l'Échelette pourront être levées par des essais de traçage. Les différences de vitesses de

parcours souterrains du traceur ont confirmé la forte hétérogénéité du karst. Les résultats des essais dans le Dogger ont révélé la possibilité d'une non imperméabilité des marno-calcaires argoviens, compliquant ainsi les difficultés de détermination des limites des bassins versants.

Les échanges hydrauliques entre les bassins de la Serrière et du Sayon, qui en constituent une des particularités, bien que parfois spectaculaires comme au Torrent, ne représentent que quelques pour cent des débits annuels moyens et se compensent partiellement. A ce propos, une étude plus précise des pertes du Sayon entre Valangin et Neuchâtel est souhaitable et la liaison de celles-ci avec la Serrière devrait maintenant pouvoir être démontrée.

L'analyse du régime du Sayon a révélé des différences significatives entre le régime de la rivière en phase de tarissement pour les deux périodes considérées (1901 - 1925 et 1970 - 1972). L'exploitation des nappes quaternaires par les communes provoque une quasi stabilisation des débits d'étiage de la rivière.

Malgré les difficultés inhérentes à l'imprécision des données à disposition, le développement du modèle conceptuel CHYN1 constitue une base de travail sûre pour la résolution des problèmes de prévision de débit. La méthode des régressions multiples pour le calcul du bilan en eau de surface peut être considérée comme fiable si les données sont de bonne qualité. Le développement d'une variante de CHYN1 applicable aux sources karstiques est souhaitable puisque'elle permettrait une bonne prévision des débits.

Le champ des pressions dans l'aquifère du Malm sous le Val de Ruz reste mal connu. Plusieurs indices (apports karstiques dans la nappe de Sous le Mont, niveau élevé de la nappe hauterivienne à Fontaines, ainsi que des nappes du Malm et de l'Hauterivien aux Prés Royer) permettent de penser qu'il existe une complication tectonique (pli faille) au pied de l'anticlinal de Chaumont qui se poursuit jusqu'à Valangin au moins et qui grâce à un bourrage molassique jouerait le rôle d'écran peu perméable.

Les travaux de MORNOU (1970, op. cit) ainsi que les nombreuses observations et mesures faites dans le cadre de cette étude ont mis en évidence l'existence d'un aquifère karstique dans l'Hauterivien supérieur du flanc Nord du Val de Ruz, dont l'investigation devra être poursuivie. Sa liaison avec les nappes artésiennes et phréatiques des Prés Royer est maintenant démontrée.

Le champ des pressions et la sens des écoulements dans l'Hauterivien et le Quaternaire entre Valangin et Coffrane reste mal connu, d'où les incertitudes qui subsistent sur le périmètre alimentaire des sources d'Hauterive à Valangin et de Buasy-Sorgereux.

L'analyse des essais de pompage réalisés dans des aquifères quaternaires de petite dimension a confirmé la mauvaise adaptabilité des méthodes d'interprétation des essais de pompage en régime permanent ou transitoire pour des nappes dont les limites sont rapidement atteintes ou dont la géométrie est loin d'être circulaire. Le jugement hydrogéologique s'avère alors très important.

L'analyse du régime de tarissement de la source de la Serrière a conduit à développer une méthode originale dont la reproductibilité des résultats paraît assurée. Celle-ci permet de détruire certaines hypothèses sur la représentativité des formules utilisées jusqu'à ce jour.

L'étude du bilan hydrologique semble confirmer la fiabilité de la formule de TURC pour le calcul de l'ETR. La faible valeur des débits spécifiques de la Serrière relativement aux autres bassins karstiques jurassiens est à mettre sur le compte d'un fort déficit pluviométrique.

3.2. Ressources hydrogéologiques potentielles.

Les ressources en eau des formations quaternaires de Val de Ruz sont actuellement presque totalement exploitées ou au moins connues. Une gestion efficace de celles-ci, l'amélioration des captages existants, la protection des terrains aquifères, voire dans certains cas

une recherche artificielle devraient permettre une certaine augmentation des ressources. La région comprise entre Serrone et le Sorgereux mérite un intérêt suffisant pour qu'on y effectue des recherches hydrogéologiques. C'est toutefois le réservoir constitué par les calcaires du Malm qui pourrait être en mesure d'assurer un fort accroissement des ressources en eau de cette région. Les résultats non concluants du forage du Torrent n'interdisent pas de penser que cette région est à même de fournir des ressources supplémentaires importantes. Des forages profonds de reconnaissance dans le synclinal du Côté, à Dombresson, à Valengin, devraient permettre de retrouver des calcaires que les essais de coloration ont révélé comme étant par endroit très perméables. Enfin les réserves du Dogger sont certainement importantes et on peut espérer qu'un jour un forage profond ramènera au jour des eaux probablement captives, voire artésiennes.

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

- AMHET, A. (1693): Description de la principauté de Neuchâtel et Valangin. Réimpression in Etrennes Neuchâteloises 1863.-
- AUBERT, O. (1969): Phénomènes et formes du karst jurassien. Eclogae geol. Helv.: 62, 2, p. 325 - 399.
- (1975): L'évolution du relief jurassien. Eclogae geol. Helv.: 68, 1, p. 1 - 64.
- BAER, A. (1956): Contribution à la stratigraphie de Cheumont. Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat., 79, p. 71 - 88; avec une carte géol.-
- (1959): L'extrémité méridionale du décrochement de la Ferrière. Eclogae geol. Helv. 52, 2, p. 875 - 879; avec une carte géol. au 1:25'000.
- BAKALOWICZ, M., AMINOT, A. (1974): Géochimie des eaux des aquifères karstiques. III Premiers résultats obtenus sur le système karstique du Baget durant le cycle hydrologique 1973. Annales de Spéléologie 29, 4, p. 484 - 493.
- BALLMER, R.A., STOCCO, M. (1974): Gouffre de Pertuis ou Beume à Noé. Carverne, 18, No 3 p. 65 - 94.
- BAUMBERGER, E. (1905): Fauna der unter Kreide im Westschweizerischen Jura, II Teil. Die Ammonitiden der unter Kreide im Westschweizerischen Jura mit einer kurzen Übersicht über die Stratigraphie des Mesozoischen Sedimente in diesem Gebiet. Abh. Schweiz. paleontolog. Ges. XXXII, p. 79.
- BAUMBERGER, E., MOULIN, M. (1898): La série Néocomienne à Valangin. Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat., 26 p. 211; avec 1 profil stratigraphique et 4 coupes dans la région de Valangin.-
- BERTRAND, J., MATHEY, B., MORNOD, L. (1973): Inversion temporaire du gradient hydraulique dans un karst et hétérogénéité de la perméabilité. Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat., 96, p. 97 - 103.
- BUCH, L. Von. (1803): Sur le Jura. Leopold von Buch's Gesammelte Schriften, I, 1867 p. 688 - 695, pl. XII - XIII, Berlin.-
- BURGER, A. (1956): Interprétation mathématique de la courbe de décroissance de débit de l'Areuse. Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat., 79, p. 49 - 54.
- (1972a): Cours d'Hydrogéologie générale. Neuchâtel, non publié.
- (1972b): Chimie de la dissolution des roches carbonatées. Cours d'Hydrogéologie karstique. Centre d'Hydrogéologie, Neuchâtel, non publié, 118 p.-
- BURGER, A., MARCE, A., MATHEY, B., OLIVE, Ph. (1971): Tritium et Oxygène -18 dans les bassins de l'Areuse et de la Serrière (Jura neuchâtelois / Suisse). Actes du colloque d'Hydrologie en pays calcaire. Besençon 8 et 9 oct. 1971, p. 79 - 87.
- CASTANY, G. (1968): Prospection et exploitation des eaux souterraines. Paris, Dunod, 718 p.
- CHAMBRIER, S. de (1795): Description topographique de la mairie de Valangin. Mémoire de la Société d'Emulation patriotique de Neuchâtel, 149 p.-
- CUCCHINI, R. (1969): Sur la détermination de la pente moyenne des surfaces topographiques d'un bassin. Institut d'hydraulique de l'Université de Padoue.-
- DRDGUE, C. (1972): Analyse statistique des hydrogrammes de décrue des sources karstiques. Journ. of Hydrology, 15, 1, p. 49 - 68.
- (1971): De l'eau dans le calcaire. Sciences Progrès Découvertes 3433 p. 39 - 46.
- FREI, E. (1925): Zur Geologie des Südöstlichen Neuenburger Jura. Mat. carte géol. de la Suisse, nouv. sér. 55, 3, 99 p.
- (1943): Expertise géologique et hydrologique concernant le captage d'eau potable pour les communes des Geneveys s/ Coffrane, de Coffrane et de Montmollin. Rapport inédit. Zürich.-
- GIGON, R. (1964): Détournement des crues d'un ruisseau dans un gouffre. Stalactite No. 1, 14ème année, p. 31 - 35, avec 1 carte topo. et 1 plan du gouffre.-
- (1967): Région de Pertuis. Caverne 11ème année, No. 1, mars 1967.-
- (1976): Inventaire spéléologique de la Suisse, canton de Neuchâtel. Chap. VII, 5ème partie, district du Val de Ruz. Comm. spéléo. S.H.S.N. (à paraître).

- GRESSLY, A. (1874): Stratigraphie des gorges du Sayon. *Revue de Sapin*. 8ème année, p. 28.
- GUILLAUME, G. (1861): Sur l'origine des eaux de la Sarrière. *Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat.*, 6, p. 16.
- (1868): Sur la nappe d'eau souterraine à Neuchâtel. *Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat.*, 8, p. 75 - 76: abstract.-
- HABICHT, W. (1922): Les industries de Sarrières à travers les âges. *Bull. Soc. Neuch. de géographie*, 81, p. 1-127. 8 fig.
- HAEFELI, Ch., MAYNC, W., DERTLI, H.J., RUTSCH, R.F. (1965): Die Typus Profile des Valanginien und Hauterivien. *Bull. Ver. Schweiz. Petrol.- Geol.* 4.- Ing., 31, 81, p. 41 - 75.
- HANTUSH, M.S. (1964): Hydraulics of wells. *Advances in Hydroscience* 1, p. 281 - 432. Academic Press, New York and London.
- I.B.M. (1970): Scientific Subroutine Package Programmers Manual. E. GH 20 - 0252 - 4, p. 23 - 29; p. 151 - 156.
- JACCARD, A. (1883): Note sur le changement de régime des sources du Jura Neuchâtelois. *Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat.*, 13, p. 170 - 187.
- (1883): Observation sur une source du tunnel des Loges. *Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat.*, 13, p. 423.
- (1876): Essai historique sur la question de l'eau d'alimentation à la Chaux-de-Fonds. *Musée Neuchâtelois*, 13ème année, p. 111 - 119; p. 123 - 132; p. 152 - 163.
- JAUN, R. (1924): L'alimentation de Neuchâtel en eau locale. *Bull. Soc. Neuch. de géographie*, 33, p. 5 - 20; avec 1 carte de la ville avec sources.-
- KESSLER, H. (1959): Lineare Massabweichungen für Quallachüttungen. *Steirische Beiträge Hydrogeologie*, p. 81 - 86. Neue Folge Heft 1/2 Graz.
- KIRALY, L. (1969): Bref commentaire à la carte structurale de la surface Argovien - Séquanien, dans le canton de Neuchâtel. *Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat.*, 22, p. 71 - 73; avec une carte structurale.-
- (1973): Notice explicative de la carte hydrogéologique du canton de Neuchâtel. Echelle 1:50'000. *Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat.*, 26, supplément.-
- (1964): Etude de la stratification entrecroisée dans la pierre jaune (Hauterivien supérieur) aux environs de Neuchâtel, Suisse. *Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat.*, 87, p. 181 - 207.
- KIRALY, L., MEIA, J. (1967): Observations tectoniques dans une carrière de Cheumont. (Jura Neuchâtelois, Suisse). *Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat.*, 20, p. 277 - 282, 4 fig, 1 pl.-
- KNAB, Ch. (1864): Jaugeage de quelques rivières du canton de Neuchâtel. *Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat.*, 7, p. 464.
- KRUSEMAN, G.P., DE RIDDER, N.A. (1970): Analysis and evaluation of pumping test data. *Bull. of the International Institute for Land Reclamation and Improvement*, Wageningen. The Netherlands, 191 p., + fig.-
- LENCASTRE, A. (1966): *Manuel d'Hydraulique Générale*. Paris, Eyrolles, 412 p.-
- LINSLEY, R.K., KOHLER, M.A., PAULHUS, J.L.H. (1949): *Applied Hydrology*. New York, Mc. Graw-Hill, 689 p.-
- DE LORIOU, P., JACCARD, A. (1866): Etude géologique et paléontologique de la formation d'eau douce infracrétacée du Jura et en particulier de Villers-le-Lac. *Mém. Soc. Phys. Genève*, 18, p. 63 - 128.
- LUTHI, E. (1954): *Geologische Untersuchungen im Gebiete zwischen Ysaanberg und St Immertal*. Promotionarbeit, E.T.H., Zürich, 47 p.
- MAILLARD, G. (1884): Invertébrés du Pürbeckien du Jura. *Mém. Soc. Pal. Suisse*, 11, 156 p.
- MATHEY, B. (1971): Les Prés Royer (Val de Ruz, canton de Neuchâtel) Etude hydrogéologique. Rapport inédit. Centre d'Hydrogéologie, Neuchâtel, 86 p.
- (1971): La méthode au charbon actif dans les essais de coloration à la fluorescéine. *Actes du 4ème Congrès suisse de Spéléologie*. Neuchâtel sept. 1970, p. 53 - 61.
- MATHEY, B., MOREL, G. (1974): Analyse des composants du bilan hydrologique par régression multiple. *Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat.*, 22, p. 315 - 326.

- MATHEY, B., SIMEONI, G. (1972): Etude de la vitesse de circulation de l'eau dans un aquifère calcaire par essais de traçages (Bassin de la Sarrière, cartes de Neuchâtel). Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat., 95, p. 173 - 180.
- (1973): Systèmes d'écoulements et hydrochimie dans un aquifère morainique. Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat., 96, p. 164 - 171.
- MEIA, J., PERSOZ, F., SCHAEER, J.P. (1971): Dépôts quaternaires et évolution récente de la région de Colombier. (Rive NW du Lac de Neuchâtel). Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat., 94, p. 78 - 81.
- MISEREZ, J.J. (1973): Géochimie des eaux du karst jurassien. Thèse, Sci. Neuchâtel. 313 p.-
- MONBARON, H. (1973): Etude xénostratigraphique d'une moraine de fond (Valengin, canton de Neuchâtel). Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat., 96, p. 123 - 134.
- (1973b): Incidence morphologique d'une trombe d'eau dans le Val de Travers (canton de Neuchâtel, Suisse). Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat., 96, p. 109 - 121.
- MORNOU, L. (1970): Rapport hydrogéologique sur une campagne de recherches par forages au Val de Ruz dans le secteur des Prés Royer. Rapport non publié. Centre d'Hydrologie souterraine, Bulle, 97 p.
- MOULIN, H. (1919): Note à propos de l'Aquiténien supérieur dans le lit du Seyon. Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat., 44, p. 293.
- (1896): Discussion sur la structure du flanc sud du Val de Ruz et communication des eaux du Seyon avec celles de la Sarrière. Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat., 24, p. 256 - 257.
- MUSY, A. (1973): Répartition spatiale et prévision en temps de retour de facteurs climatologiques en vue d'un dimensionnement des ouvrages d'aménagement des eaux. Bull. techn. de la Suisse Romande, 15, juillet 1973, 23 p.
- (1974): Contribution à l'étude par simulation des écoulements souterrains en milieu poreux. Thèse, EPFL, Lausanne. (à paraître).
- NASIN, J.E. (1960): A Unit Hydrograph Study with particular reference to British Catchments. Proc. of American Soc. Civ. Eng., 17, 6433, p. 249 - 282.
- NEMEC, J. (1974): Aperçu des nouvelles méthodes de prévisions hydrologiques. Mitt. der Versuchsanstalt für Wasserbau Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich, 12, p. 113 - 135.
- PALOC, H. (1969): Connaissances actuelles sur la Fontaine de Vaucluse. Méditerranée, Revue géographique des pays Méditerranéens, 7, p. 75 - 82.
- PEARSON, K. (1957): Tables of the incomplete gamma function. Cambridge, University Press, 164 p.
- DE PERROT, S. (1896): Note explicative concernant les jaugeages de la Sarrière. Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat., 24, p. 200, 25, p. 232.
- PERSOZ, F. (1973): Note sur la distribution des dolomites du Jura méridional neuchâtelais. Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat., 96, p. 149 - 162.
- PERSOZ, F., KUBLER, S. (1968): Etude pétrographique des roches carbonatées : la limite Jurassique - Crétacé dans quelques sondages et affleurements du Jura neuchâtelais. Eclogae geol. Helv., 61, 2, p. 504 - 507.
- PERSOZ, F., REMANE, J. (1973): Evolution des milieux de dépôt au Dogger supérieur et au Malm dans le Jura neuchâtelais méridional. Eclogae geol. Helv., 66, 1, p. 41 - 70.
- PETCH, M. (1970): Contribution à l'étude hydrogéologique de la plaine de l'Orbe. Matériaux pour la Géologie de la Suisse, Géophysique 11, 95 p.
- POCHON, M. (1973): Apport allochtone dans les sols jurassiens. (Jura vaudois et Jura neuchâtelais). Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat., 96, p. 136 - 147.
- (1974): Origine et évolution des sols du Haut Jura Suisse. Phénomènes d'altération des roches calcaires sous climat tempéré humide. Thèse, Sci., Neuchâtel.
- POLDINI, E. (1960): Rapport sur les mesures géoélectriques exécutées dans la région du Pâquier. Rapport du laboratoire de géophysique de l'Université de Genève pour le Service des Eaux du canton de Neuchâtel. Genève, septembre - octobre 1960, 12 p., 1 carte.
- (1964): Région de Valengin. Etude géoélectrique, juin 1964. Rapport du laboratoire de géophysique de l'Université de Lausanne; 9 p., 4 planches.
 - (1965): Rapport sur l'étude géoélectrique réalisée à St Blaise (canton de Neuchâtel) en printemps 1965. Laboratoire de géophysique de l'Université de Genève. Rapport non publié. Genève. 15 juin 1965. 4 p.

- PRIMAULT, B. (1972): Etude méso-climatique du canton de Vaud. Cahier de l'aménagement régional, No. 14. Office cantonal vaudois de l'urbanisme, 186 p., pl. + tabl.
- RECORDON, E. (1968): Méthodes modernes de calcul des débits et des réserves des nappes d'eau souterraine. Bull. Tech. de la Suisse Romande. No. 5 et 6, 13 p.
- RICHARD, J.L. (1964): Carte phytosociologique des forêts du canton de Neuchâtel. Ech. 1:10'000, avec notice explicative, p. 13; p. 39. Institut de Botanique, Neuchâtel, non publié.
- RITTER, G. (1899): Sur la force motrice du Seyon. Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat., 25, p. 146 - 166.
- RITTER, G., HOLTZ, A., SCHARDT, H. (1901): Rapport concernant les sources jaillissant aux Huitains près de Valengin. Document inédit. Casier des Eaux, commune d'Hauterive.
- ROZSINGER, G. (1940): Le Lias de la Hauteleine et sa signification. Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat., 65, p. 75.
- ROLLIER, L. (1893): Deuxième supplément à la description géologique de la partie jurassienne de la feuille VII de la carte géologique de la Suisse au 1:100'000. Jura bernois et régions adjacentes du Jura neuchâtelois, soleurois, bâlois et du département du Doubs. Matériaux pour la carte géologique de la Suisse. 8ème livraison, 206 p.
- ROUCH, R. (1974): Le système karatique du Salet. III. Etude des sorties d'herpéticides de Les Mouttes lors de plusieurs crues des cycles hydrologiques 1971 - 1972 et 1972 - 1973. Annales de spéléologie. 1974, 29, 3, p. 351 - 372.
- SITTNER, W.T., SCHAUSS, C.E., MONRO, J.C. (1969): Continuous Hydrograph Synthesis with an API-Type Hydrologic Model. Water Resources Research, 5, 5, p. 1007 - 1022.
- SPIEGEL, M.R. (1961): Theory and problems of statistics. New York, Schaum Publ. Co., 359 p.
- STAUBLE, A.J. (1959): Zur Stratigraphie des Callovien im Centralen Schweizer Jura. Eclogae geol. Helv. 52, 1, p. 57 - 176.
- SUTER, H. (1920): Geologische Untersuchungen in der Umgegend von Les Convers - Vue des Alpes. Inaugurale Dissertation, Sci., Zürich, 45 p.
- (1937): Zur Geologie der Westlichen Tête de Ren Kette. Eclogae geol. Helv., 30, p. 25 - 34, avec 1 carte tectonique au 1:50'000.
- SUTER, H., LUTHI, E. (1969): Notice explicative de l'atlas géologique de la Suisse au 1:25'000, feuille 1144, Val de Ruz. Com. Géol. S.H.S.N. 32 p.
- SCHAEER, J.P. (1956): Etude tectonique de l'anticlinal de Chaumont. Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat., 79, p. 55 - 70.
- SCHARDT, H. (1901a): Nouveau gisement d'elbien à la Coudre près Neuchâtel. Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat., 29, p. 119.
- (1901b): Un pli faille à la Vue des Alpes. Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat., 30, p. 431 - 435.
- (1903a): Sur la découverte d'un pli faille important et d'un effleurement de Lias dans la Combe des Quignets (La Segne). Mém. géol. 4ème fasc., Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat., XXXL p. 287 - 312, 1 pl., 3 tabl.-
- (1903b): Découverte d'un chevauchement près de Montezillon. Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat., 32, p. 113 - 117.
- (1906a): Sur le résultat de sondages dans le Néocomien à Vauseyon et le profil géologique d'une nouvelle percée pour le détournement du Seyon. Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat., 34, p. 186 - 206.
- (1906b): SERRIERE (LA), SEYON (LE). Dictionnaire géographique de la Suisse, p. 638 et 646.
- SCHARDT, H. (1907): Crevassees sidérolithiques avec nodules phosphatées et fossiles remaniés dans la pierre jaune d'Hauterive. Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat., 34, p. 206 - 228.
- (1908): Excursion dans le Jura neuchâtelois. Livret guide des excursions scientifiques du 9ème Congrès international de géographie. Genève 1908, 151 p.
- (1910a): Valengin. Dictionnaire géographique de la Suisse 6, p. 214.
- (1910b): Le Val de Ruz. Dictionnaire géographique de la Suisse, 6, p. 151 - 153.
- SCHARDT, H., DUBDIS, A. (1905): Nouvelles observations sur le Crétacique moyen et le Tertiaire du Balisat près de Rochefort. Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat., 33, p. 200 - 208.
- SCHWAAR, D. (1961): Etude géologique de la zone de décrochement de la Tourne. Bull. Soc. Neuch. Sc. Nat., 84, p. 143 - 163.

- TRIPET, J.P. (1967): Etude géoélectrique aux Prés Royer (commune de Dombresson et de Chézard/St Martin) Neuchâtel, Service des Ponts et Chaussées. Rapport inédit.
- (1969): Une méthode d'approche de l'analyse du tarissement d'une source karstique. Etude préliminaire. Mem. B.R.G.M., 76, p. 701 - 719.
 - (1972): Etude hydrogéologique du bassin de l'Areuse. (Jura neuchâtelois). Thèse, Sci. Neuchâtel, 183 p.-
- UTTINGER, H. (1949): Les précipitations en Suisse 1901 - 1940. Extr. Guide de l'Economie hydraulique de l'Electricité de la Suisse, Ass. suisse p. aménagement des eaux, 2, 27 p., avec 1 carte pluviométrique éch. 1:500'000.
- ZIEGLER, P.A. (1956): Geologische Beschreibung des Blettes Courtelary (Bernser Jura) und zur Stratigraphie des Sequanien im zentralen Schweizer Jura. Beitr. zur geol Karte Schweiz, N.F. 102, 101 p.
- BURGER, A. (1959): Hydrogéologie des bassins de l'Areuse. Thèse Sci., Neuchâtel
- JAMIER, O. (1975): Etude de la fissuration, de l'hydrogéologie et de la géochimie des eaux profondes des massifs de l'Arpille et du Mont-Blanc. Thèse, Sci., Neuchâtel, 153 p.

TABLE DES MATIERES

RESUME

ZUSAMMENFASSUNG

ABSTRACT

CHAPITRE PREMIER

1

INTRODUCTION

1. BUT ET CADRE DE L'ETUDE
2. DONNEES A DISPOSITION
3. SITUATION 2
 - 3.1. Le bassin de la Serrière
 - 3.2. Le bassin du Seyon
4. HISTORIQUE DES RECHERCHES HYDROLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES DANS LES BASSINS DE LA SERRIERE ET DU SEYON
5. STATISTIQUE ET ANALYSE NUMERIQUE 4
6. REMERCIEMENTS 5

CHAPITRE II

9

APERCU GEOLOGIQUE

1. LEVRS GEOLOGIQUES
2. ETUDES GEOLOGIQUES
3. LITHOLOGIE ET STRATIGRAPHIE DES TERRAINS SECONDAIRES ET TERTIAIRES 11
 - 3.1. Résumé lithostratigraphique
 - 3.2. Le Lias
 - 3.3. Le Jurassique moyen : le Dogger
 - 3.4. Le Jurassique supérieur : le Malm
 - 3.5. Le Crétacé
 - 3.6. Le Tertiaire
4. MILIEU DE DEPOT ET PALEOGEOGRAPHIE
5. COMPOSITION MINERALOGIQUE DES ROCHES
6. GEOLOGIE STRUCTURALE 15
 - 6.1. Esquisse tectonique
 - 6.2. L'anticlinal de Chaumont
 - 6.3. Le synclinal du Val de Ruz
 - 6.4. Anticlinal des Planches - Synclinal du Côté
 - 6.5. Anticlinal de Mont Racine - Tête de Ran - Mont d'Amin

CHAPITRE III

25

GEOLOGIE DES TERRAINS QUATERNAIRES

1. LE RISS
2. LE WURM 26
 - 2.1. Facies et lithologie du Val de Ruz
 - 2.2. Littoral neuchâtelois
3. EXTENSION ET DISTRIBUTION DES FORMATIONS GLACIAIRES DU VAL DE RUZ 27
 - 3.1. Dépôts glaciaires au SW de la Sorge
 - 3.2. Dépôts glaciaires à l'Est de la Sorge
 - 3.3. Formations quaternaires dans la région des Prés Royer 31
 - 3.4. Le synclinal du Côté 32
4. FORMATIONS TARDI ET POSTGLACIAIRES 32
 - 4.1. Formations de piedmont
 - 4.2. Le delta du Seyon

4.2.1. Situation	
4.2.2. Lithologie	
5. COMPOSITION ET ALTERATION DES SOLS	35

CHAPITRE IV 39

DELIMITATION DES BASSINS VERSANTS

1. INTRODUCTION	
2. DESCRIPTION ET RESULTATS DES ESSAIS DE COLORATION	
2.1. Les pertes du Seyon en aval du Pont-Noir	
2.2. La perte de l'ancien étang de Montmollin	41
2.3. La perte du ruisseau de la Petite Segneule	
2.4. Pertes du Mordasson entre Rochefort et Chambrelieu	42
2.5. Forêt de Dame Dthenette	
2.6. Perte du ruisseau de la Combe des Aulx	
2.7. Forage de la Combe des Aulx	44
2.8. Galerie de dérivation dans le gouffre de Pertuis	
2.9. Galerie de dérivation dans le gouffre de Pertuis en période de crue	46
2.10. Perte du Ruisseau des Bugnetais	47
2.11. Perte du ruisseau de la Combe Biosse	
2.12. Les Savagnières - Dessous	
2.13. Autres essais	49
2.14. Les vitesses de circulation dans le karst	
3. DETERMINATION DES LIMITES DU BASSIN DE LA SERRIERE	
3.1. Nature des limites	
3.2. Limites NW : Mont Racine, Tête de Ren	50
3.3. Limite N : Vue des Alpes, Mont d'Amin, Pertuis, Joux du Plâne	
3.4. Limite NE : Les Bugnetais, Combe Biosse	
3.5. Limite SE : La Combe Biosse, Cheumont	
3.6. Le Littoral	
3.6.1. Limites hydrauliques	
3.6.2. Bassin élémentaire sur le littoral	52
3.7. Limite Ouest : Bôle, Rochefort, La Tourne	
4. LIMITES DU BASSIN DU SEYON	
4.1. Nature des limites - Zones drainées	
4.2. Limite NW : Les Geneveys sur Coffrane, Malvilliers, Cernier	
4.3. Limite N-NW : Cernier, Villiers	54
4.4. Limite SE : Clemesin, Savagnier, Valengin	
4.5. Limite Sud : Valengin, Coffrane	

CHAPITRE V 59

CARACTERES PHYSIQUES DES BASSINS VERSANTS

1. QUELQUES DONNEES GEOGRAPHIQUES	
2. SUPERFICIE	
3. RESEAU HYDROGRAPHIQUE	61
3.1. La Serrière	
3.2. Le Seyon	
4. HYPOMETRIE	63
4.1. Le bassin de la Serrière	
4.2. Le bassin du Seyon	64
4.3. Pente moyenne des bassins de la Sorge et du Seyon	65
4.4. Pente moyenne des thalweg	66
5. MORPHOLOGIE ET RELIEF	68
5.1. Le bassin du Seyon	
5.2. Le bassin de la Serrière	
5.2.1. Ablation karstique	
5.2.2. Combes et dolines	
6. COUVERTURE VEGETALE	69
7. SPELEOLOGIE	
7.1. Fréquence des cavités	
7.2. Le gouffre de Pertuis	70

LES FACTEURS METEOROLOGIQUES

1. LES PRECIPITATIONS

1.1. Réseau d'observation	
1.2. Répartition régionale des précipitations	
1.3. Distribution et fréquence des précipitations	73
1.3.1. Précipitations journalières	
1.3.2. Précipitations mensuelles	74
1.3.3. Précipitations annuelles	
1.4. Modules pluviométriques mensuels et annuels	77
1.4.1. Période 1901 - 1925	
1.4.2. Période 1969 - 1972	78
1.5. Précipitations et altitude	
1.6. Les cartes pluviométriques	84
1.6.1. Isohyètes 1901 - 1925	
1.6.2. Isohyètes 1969 - 1972	
1.7. Lame d'eau annuelle moyenne	85

2. ETUDE DE LA COUVERTURE NIVALE

2.1. Le réseau d'observation	86
2.2. Equivalent en eau de la neige et altitude	
2.3. Etude de la densité de la neige en fonction de l'altitude	93
2.4. Estimation de la lame d'eau retenue sous forme de neige	94
2.5. Stations représentatives de l'enneigement des bassins	

3. INSOLATION, HUMIDITE RELATIVE, VENT, TEMPERATURE

3.1. Réseau d'observation	96
3.2. Humidité relative	
3.3. L'insolation	
3.4. Les vents	98
3.5. La température	100
3.5.1. Mesures	
3.5.2. Température et altitude	
3.5.3. Inversion de la température	101
3.5.4. Température moyenne du bassin	

4. L'EVAPOTRANSPIRATION

4.1. Méthodes de calcul	
4.2. Evapotranspiration et altitude	103
4.3. Bilans mensuels	106
4.3.1. Méthode	
4.3.2. Année moyenne (1901 - 1940)	
4.3.3. Année humide (1914)	107
4.3.4. Année sèche (1921)	

CHAPITRE VII

LE SEYON

1. REGIME HYDROLOGIQUE

1.1. Historique et provenance des mesures	
1.2. Utilisation des données de débit	
1.3. Caractéristique du régime hydrologique	116
1.4. Débits annuels et mensuels moyens	118
1.5. Estimation des pertes du Seyon entre Valengin et Neuchâtel	121
1.5.1. Période 1918 - 1925	
1.5.2. Jaugeages	122

2. PREVISION DES DEBITS DE CRUE DU SEYON

2.1. Choix de la méthode	123
2.2. Fréquence des crues annuelles	
2.2.1. Débits maxima classés	
2.2.2. Recherche d'une loi de distribution	
2.2.3. Débits centenaires et millénaires	125
2.2.4. Débits décennaux	127
2.3. Fréquence des crues mensuelles	
2.3. Prévisions des crues du Seyon à partir des précipitations	128
2.3.1. Abaques de prévision	
2.3.2. Réseau d'observation et d'alerte aux crues	
2.3.3. Validité des abaques	

3. LE MODELE CHYNI : ESSAI DE SIMULATION CONTINUE DU DEBIT DU SEYDN	131
3.1. Introduction	
3.2. Bilan des eaux de surface	
3.2.1. Choix et limite de la méthode	
3.2.2. Le régression multiple	132
3.2.3. Recherche et optimisation des équations de régression	
3.3. Hydrogramme du flot de base	135
3.3.1. Ruissellement et infiltration	
3.3.2. Détermination du coefficient d'infiltration	137
3.3.3. Détermination du coefficient de tarissement	
3.4. L'hydrogramme unitaire	
3.4.1. Limites de la méthode	
3.4.2. Estimation des moments de l'hydrogramme unitaire	138
3.4.3. Equation de l'hydrogramme unitaire	139
3.4.4. Détermination de l'hydrogramme unitaire	140
3.5. Organigramme	142
3.6. Test du modèle	
3.7. Conclusions au paragraphe 3	

CHAPITRE VIII

LA SOURCE DE LA SERRIERE

1. LE DEBIT	
1.1. Mesure du débit	
1.2. Régime hydrologique	
1.3. Débits annuels et mensuels moyens	148
2. LE REGIME DE LA SERRIERE EN PERIODE DE TARISSEMENT	151
2.1. Choix d'une méthode d'analyse	
2.2. Analyse des courbes de tarissement	157
2.3. Simulation du débit de la Serrière en phase de tarissement	
2.4. Interprétation des résultats	161
2.5. Estimation des réserves souterraines	166
2.6. Conclusions au paragraphe 2	167
3. TEMPERATURE DE LA SOURCE DE LA SERRIERE	168
4. HYDROCHIMIE DES EAUX DE LA SERRIERE	
4.1. Contenu chimique	
4.2. Relation entre les paramètres chimiques	172
4.3. Variations saisonnières du contenu chimique	174
5. BACTERIOLOGIE DES EAUX DE LA SERRIERE	
6. TRITIUM ET OXYGENE 18 DANS LE BASSIN DE LA SERRIERE	177
7. ESTIMATION DES TEMPS DE TRANSIT DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DANS LE BASSIN	179
7.1. Le gaz carbonique	180
7.2. La méthode des cross-covariances	180
7.3. Analyse des résultats	
7.4. Interprétation des résultats	185

CHAPITRE IX

189

HYDROGEOLOGIE DES TERRAINS CALCAIRES

1. ECOULEMENT SUPERFICIEL ET DE SUB-SURFACE	
1.1. Terrains d'altération des calcaires	
1.2. Température et humidité du sol	
2. ECOULEMENT DANS LES TERRAINS D'ALTERATION DES NIVEAUX MARNO-CALCAIRES	190
2.1. Marno-calcaires du Dogger	
2.2. Les marno-calcaires argoviens	191
2.2.1. Ruissellement et crue	
2.2.2. Les sources argoviennes	
3. ECOULEMENT DANS LA ZONE NON SATURÉE DU KARST	
3.1. Trois sources karstiques de faible débit	
3.2. Les sources du tunnel des Loges	195

3.2.1.	Situation	
3.2.2.	Température, conductibilité électrique, bactériologie	
3.2.3.	Régime des sources	
4.	HYDROGEOLOGIE DES CALCAIRES DU DOGGER	202
4.1.	Lithologie et perméabilité	
4.2.	La Combe des Aulx	
4.3.	Circulation karstique et décharge des eaux du Dogger	203
5.	HYDROGEOLOGIE DES CALCAIRES DU MALM	
5.1.	Bassin versant et sources	
5.2.	Perméabilité de l'aquifère du Malm	205
5.3.	Variations du niveau piézométrique	
5.4.	La nappe en phase de tarissement (Malm + Valanginien)	207
5.5.	Composition chimique des eaux du Malm	209
6.	HYDROGEOLOGIE DES TERRAINS ERETACES	210
6.1.	Aquifères et aquicludes	
6.2.	Région de Fontaines	
6.2.1.	Situation	210
6.2.2.	Essai de pompage	
6.3.	Région des Prés Royer	212
6.3.1.	Bassin versant et sources	
6.3.2.	Fluctuations de la surface piézométrique	213
6.3.3.	Perméabilité de l'aquifère hauterivien	
6.4.	Le synclinal du Côté	215
6.5.	Hydrochimie et bactériologie	
7.	LES SOURCES DE LA COMMUNE D'HAUTERIVE A VALANGIN	
7.1.	Captages et sources	
7.2.	Régime des sources	216
7.3.	Hydrochimie	220
7.4.	Bassin alimentaire et bilan hydrologique	

CHAPITRE X 225

HYDROGEOLOGIE DES TERRAINS QUATERNAIRES

1.	ECOULEMENTS DANS LES FORMATIONS MORAINIQUES PEU PERMEABLES	
1.1.	Le réseau de drainage	
1.2.	Région de Coffrane - Les Geneveys-sur-Coffrane	
1.3.	Région de Boudevilliers - Malvilliers - Le Jonchère	229
1.3.1.	Sources et captages	
1.3.2.	Hydrochimie	231
1.3.3.	La nappe des petites Vernes : caractéristiques hydrodynamiques	
1.4.	Région de la Côtère (Fenin - Vilars - Saules - Savagnier)	235
1.4.1.	Sources et captages	
1.4.2.	Hydrochimie	
1.5.	Région de Valengin	
1.6.	Région des Haute-Geneveys - Fontainemelon - Cernier	236
1.7.	Région de Chézard - St Martin	
1.8.	Région de Dombreason - Villiers - Clémessin	237
1.9.	Région du Côté - Le Péquier	238
1.9.1.	Captages et sources	
1.9.2.	Hydrochimie	
2.	LA NAPPE DE BUSSY - SURGEREUX	242
2.1.	Situation	
2.2.	Débit des sources	243
2.3.	Régime physico-chimique	247
2.4.	Equilibres thermodynamiques	
2.5.	Corrélation des paramètres physico-chimiques entre les sources	251
2.6.	Perméabilité de la nappe	253
2.7.	Essai de bilan hydrologique	256
3.	LA NAPPE DE PAULIERE	
3.1.	Situation	
3.2.	Perméabilité	258
3.3.	Hydrochimie	
3.4.	Variation des débits spécifiques des puits	
3.5.	Ressources en eau et essai de bilan	266

4. LA NAPPE DE SOUS LE MONT	
4.1. Situation, sources et captages	
4.2. Observations hydrologiques	270
4.3. Débit des sources et niveau de la nappe	
4.4. Estimation de la transmissivité et du coefficient d'emmagasinement	271
4.5. Régime physico-chimique	
4.6. Hydrochimie et circulation souterraine	275
4.7. Essai de bilan hydrologique de la nappe de Sous le Mont	

CHAPITRE XI

HYDROGEOLOGIE DE LA REGION DES PRES ROYER	279
1. SITUATION	
2. LA NAPPE PHREATIQUE	
2.1. Bassin alimentaire, réseau hydrographique, sources	
2.2. Exploitation	280
2.3. Surface piézométrique	282
2.4. Epaisseur et transmissivité de l'aquifère phréatique	
2.5. Influence réciproque des puits	
3. LA NAPPE ARTESIENNE	
3.1. Bassin alimentaire	
3.2. Fluctuation de la surface piézométrique	286
3.3. Estimation de la perméabilité de la nappe artésienne	
3.3.1. Remarques préliminaires	
3.3.2. Approximation logarithmique sans drainance	
3.3.3. Méthode de la courbe standard de Theis avec drainance	
3.3.4. Méthode du point d'inflexion avec drainance et emmagasinement dans le semi-perméable	293
3.3.5. Estimation du débit de drainance	
3.3.6. Courbes caractéristiques théoriques	
3.3.7. Courbes de remontées	
3.4. Surface piézométrique de la nappe artésienne en exploitation	299
4. HYDROCHIMIE DES AQUIFERES DES PRES ROYER	
4.1. Unités hydrochimiques	302
4.2. Evolution saisonnière des paramètres physico-chimiques	
5. BACTERIOLOGIE	304
6. ESSAI DE BILAN HYDROLOGIQUE	
6.1. Bilan annuel moyen	
6.2. Réserves régulatrices et ressources	308
7. CONCLUSIONS	310

CHAPITRE XII

BILAN HYDROLOGIQUE ET CONCLUSIONS	311
1. FACTEURS METEOROLOGIQUES ET CONCLUSIONS	
1.1. Relations entre les débits du Seyon et de la Serrière	
1.2. Bilans mensuels par régression multiple	
2. BILAN HYDROLOGIQUE	315
2.1. L'évapotranspiration potentielle (ETP)	
2.2. Evapotranspiration réelle (ETR) et déficit d'écoulement	
2.3. Ajustement des limites des bassins versants à partir de l'ETR	
2.4. Discussion des limites des bassins versants	322
2.5. Débits spécifiques	
3. CONCLUSIONS	
3.1. Quelques résultats	
3.2. Ressources hydrogéologiques potentielles	323

BIBLIOGRAPHIE