

# **ETUDE DU SYSTEME HYDROLOGIQUE DOUBS - LOUE**

**(Pertes du Doubs - Sources de la Loue)**

Ont réalisé cette étude :

Etienne COLIN .....	Chef du Service de l'Eau et des Milieux Naturels
Jean-Pierre METTETAL .....	Hydrogéologie
Denys MARTIN .....	Hydrométrie - Hydrologie
Jean-Marie RUOTOLO .....	Hydrométrie - Hydrologie
Marthe POURCELOT - Alain MOUSTACHE .....	Secrétariat - Dessin - Conception du document

# SOMMAIRE

I - DESCRIPTION DES STATIONS DE MESURE .....	1
1-1 - STATIONS SUR LE DOUBS AMONT .....	3
1-1-1 - Stations en amont des pertes .....	3
1-1-2 - Stations en aval des pertes .....	5
1-2 - STATIONS SUR LA LOUE .....	5
1-2-1 - Source supérieure .....	7
1-2-2 - Source inférieures .....	9
1-2-3 - Fonctionnement global .....	11
1-3 - STATIONS PIEZOMETRIQUES .....	12
II - HYDROLOGIE DU DOUBS.....	13
2-1 - CAMPAGNE DE JAUGEAGES SUR LE DOUBS .....	15
2-1-1 - Méthode.....	15
2-1-2 - Analyse des résultats .....	16
2-1-3 - Conclusion.....	17
2-2 - ANALYSE QUANTITATIVE DES PERTES .....	17
2-2-1 - Méthodes et hypothèses.....	18
2-2-1-1 - Critique des hypothèses .....	18
2-2-1-2 - Critique des données hydrométriques.....	19
2-2-1-3 - Conclusion .....	21

2-2-2 - Analyse chronologique journalière .....	23
2-2-3 - Caractérisation des pertes selon les années.....	27
2-2-4 - Recherche sur les variations annuelles .....	32
2-3 - EXPERIMENTATION : AUGMENTATION ARTIFICIELLE DES PERTES .....	32
2-4 - PIEZOMETRIE .....	34
<b>III - HYDROLOGIE DE LA LOUE .....</b>	<b>35</b>
3-1 - DEBITS CHRONOLOGIQUES.....	37
3-1-1 - Débits mesurés aux sources.....	37
3-1-2 - Corrélation avec les débits du Doubs.....	39
3-2 - DEBITS CLASSES .....	41
3-3 - CORRELATION .....	44
3-4 - COURBES DE DECRUE ET TARISSEMENT.....	45
3-5 - ESSAI DE BILAN .....	53
3-6 - ESSAI DE BILAN GLOGAL.....	55
<b>IV - CONCLUSION GENERALE SUR L'HYDROLOGIE.....</b>	<b>59</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>63</b>

# INTRODUCTION

En 1901, un accident aux usines Pernod, désormais célèbre, permit d'établir de façon incontestée la liaison hydraulique entre le haut-Doubs et la Loue par l'intermédiaire des pertes dans le lit du Doubs.

Depuis lors, de nombreuses études géomorphologiques, hydrologéologiques et hydrologiques ont tenté d'améliorer la connaissance du système karstique dont les manifestations sont très variées.

Toutefois, lorsque cette étude a été lancée, de nombreuses zones d'ombre persistaient dans la connaissance. De plus, la gestion des eaux devient l'objet sur ce secteur d'un enjeu local important.

Cette étude représente le volet hydrologique du système karstique Doubs-Loue et se situe dans un ensemble d'investigations plus larges : méthodes géophysiques, recherches géologiques et spéléologiques, études sur le Drugeon. Elle s'appuie sur un ensemble d'appareils de mesures dont certains ont été installés spécifiquement : en particulier, la mesure des débits aux différentes sources de la Loue et prenant en compte les débits turbinés par E.D.F. a nécessité un système assez complexe ; la création de piézographes au voisinage du Doubs a permis également un éclairage important sur le fonctionnement du karst.

I.  
DESCRIPTION DES STATIONS DE MESURE

## 1-1 - STATIONS SUR LE DOUBS AMONT

De nombreuses stations d'enregistrement existent sur le bassin du Doubs installées entre les années 1950 et 1986.

La figure 1.1 indique la position des principales stations limnigraphiques situées en amont et en aval de la zone des pertes et qui permettent de mettre en évidence les apports quantitatifs du Doubs aux débits des sources de la Loue.

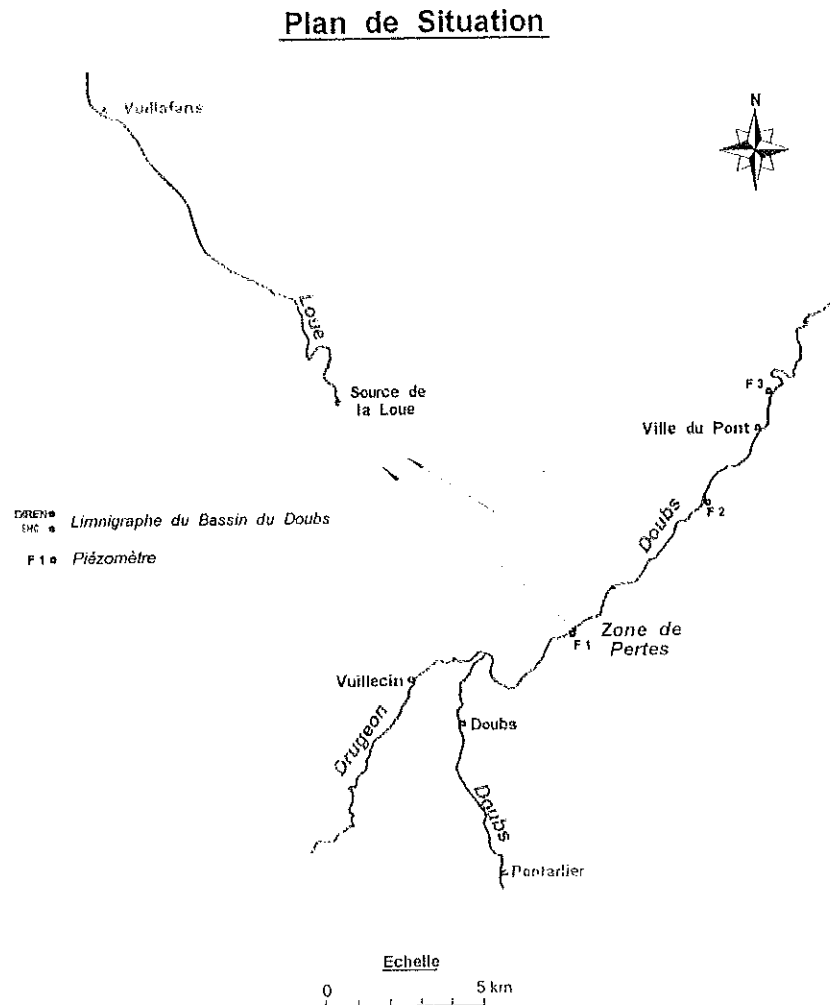


Figure 1.1

### 1-1-1 - Stations en amont des pertes

- Oye-et-Pallet : mise en place en novembre 1982, elle contrôle les débits à l'aval immédiat du Lac Saint-Point.
- Pontarlier : en service depuis 1954 et gérée par le DIREN Rhône-Alpes (cellule de Dijon).
- Doubs : cette station située sur le Doubs, fonctionne depuis le 17/06/86. Modernisée depuis un an, elle offre une bonne stabilité et les mesures sont faites sur le site.

- **Vuillecin** : cette station installée sur le Drugeon fonctionne depuis le 25/02/75. Equipée initialement d'un limnigraphe classique OTT XX à bande déroulante, elle est depuis fin 93 dotée d'une centrale d'acquisition Newlog avec codeur rotatif. Les mesures de débit sont faites au droit de la station. Peu éloignée de la confluence, elle est bien représentative de tout le bassin versant de la rivière.

### 1-1-2 - Stations en aval des pertes

- **Ville du Pont** : mise en place le 07/09/78, elle a été équipée en mars 93 d'un enregistreur Newlog avec codeur rotatif. Comme à Vuillecin, les mesures d'étiage sont délicates à réaliser car le chenal d'écoulement est fréquemment occupé par les algues.

### 1-2 - STATIONS SUR LA LOUE

La détermination du débit de la Source de la Loue a nécessité la mise en place de quatre stations limnigraphiques.

On note en effet la source principale qui sort de la vasque et dont une partie est régulièrement turbinée par E.D.F., et deux autres arrivées principales, le canal et le « pont ». L'ensemble du dispositif est indiqué sur la figure suivante.

### EQUIPEMENT HYDROMETRIQUE DE LA SOURCE DE LA LOUE

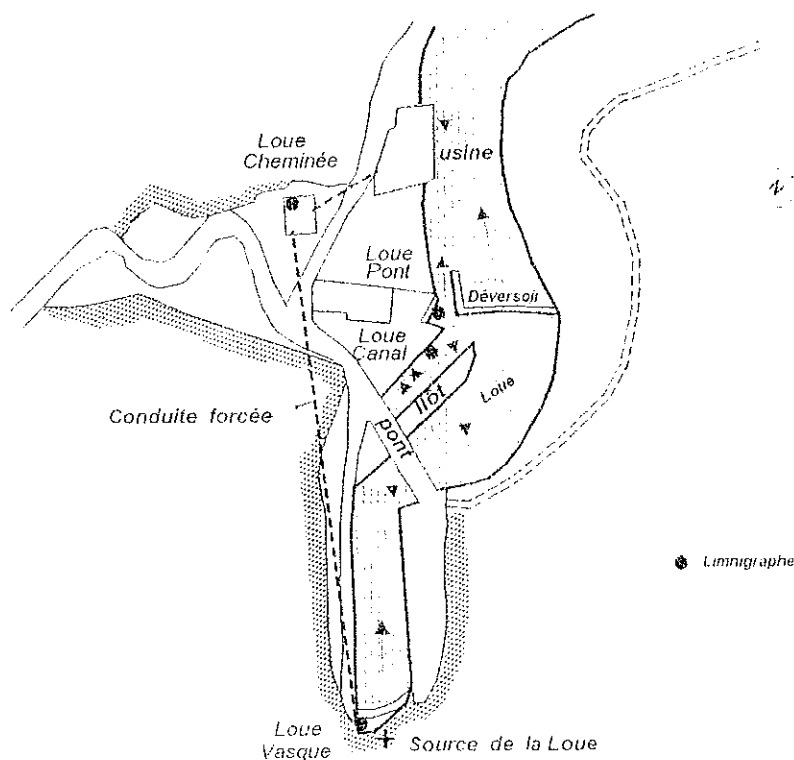
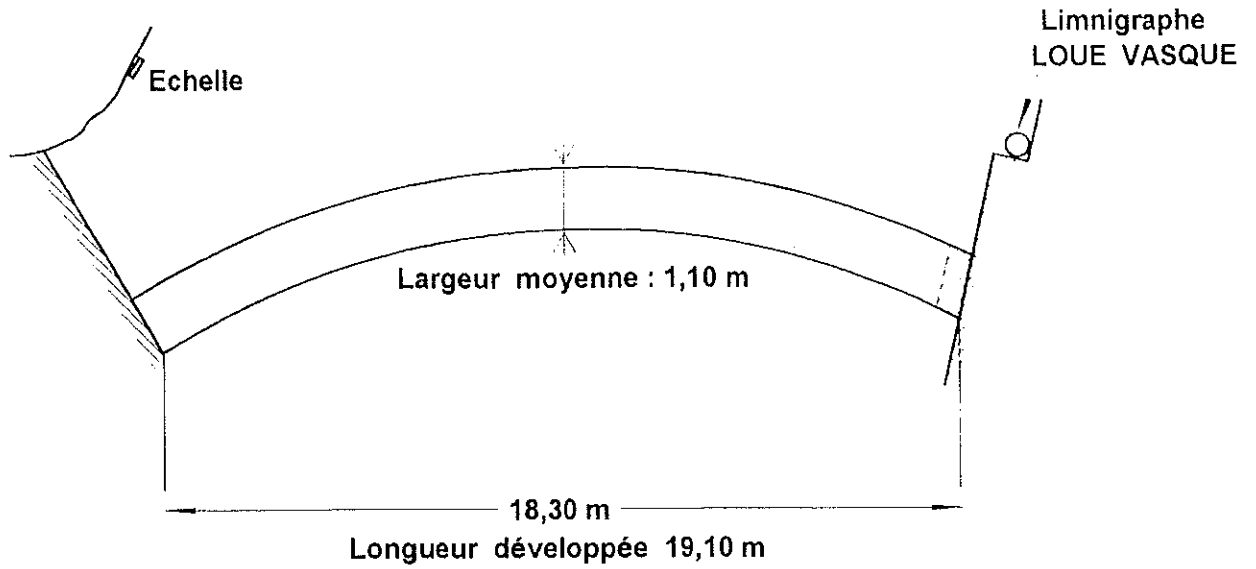


Figure 1.2



# Source de la Loue

## Vue en plan



## Coupe

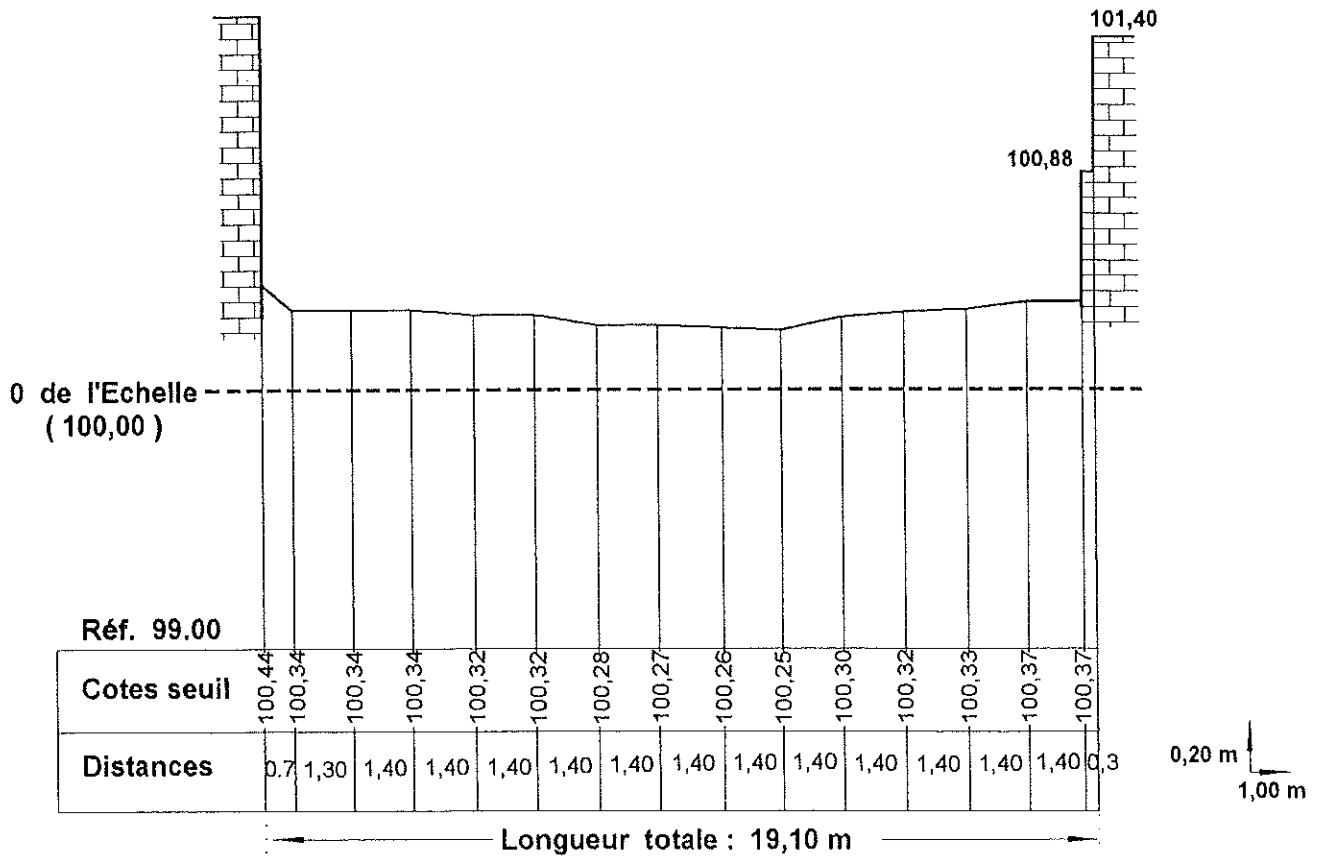


Figure 1.3

### 1-2-1 - Source supérieure

#### → Vasque :

La station a été implantée le 10 Septembre 1993 contre le muret de la prise d'eau E.D.F. à l'intérieur même de la vasque. Le contrôle est un seuil à crête épaisse d'altitude 534,45 mètres. La cote usine 0 correspond à la cote station 28 cm (début du déversement). L'appareillage est une centrale Newlog avec codeur rotatif et flotteur.

L'élaboration de la courbe de tarage est faite par application d'une formule hydraulique qui a nécessité un relevé précis du seuil (figure 1.3). Le calage a été réalisé grâce aux mesures de débit effectuées, soit à la perche, soit grâce à un téléphérique avec saumon de 25 kg. Les mesures de très hautes eaux sont très délicates à réaliser.

Les jaugeages (voir annexe 1) permettent d'appliquer sensiblement la formule suivante en hautes eaux :

$$Q = \mu L h \sqrt{2gh}$$

avec  $L = 18,8$  (largeur du seuil)  
 $h$  : hauteur d'eau à l'amont du seuil  
 $\mu$  : coefficient = 0,33

Cette formule est valable lorsque la prise ne fonctionne pas. Lorsque la prise d'eau dérive une partie du débit, la lame d'eau est déformée et le déficit par rapport à cette formule peut atteindre 10 à 20 % pour les forts débits et davantage pour les faibles débits sur ce déversoir.

#### → Cheminée :

Implantée le 10 septembre 1993 dans la cheminée d'équilibre de la conduite E.D.F., la station est équipée d'une centrale Newlog avec codeur rotatif et flotteur. Elle est soumise à de fréquentes et violentes variations de niveaux et a connu plusieurs difficultés.

La crépine de fond ayant cédé et le codeur étant complètement déréglé une sonde piézo a été installée suivi d'une deuxième centrale Newlog avec codeur et flotteur.

En décembre 1994, un des points d'attache ayant cassé, la station a été détériorée. Remise en état quelques jours plus tard, elle fonctionne actuellement avec une sonde piézométrique.

Les débits transitant dans la conduite sont calculés grâce à la détermination des pertes de charge entre les niveaux de l'eau dans la vasque et ceux enregistrés dans la cheminée d'équilibre quand E.D.F. fait fonctionner ses turbines.

Il a été nécessaire de procéder plusieurs fois à l'arrêt du fonctionnement de l'usine E.D.F. pour pouvoir caler les deux appareils (vasque + cheminée) avec la même cote de départ.

#### Mesure de vitesse dans la conduite :

Des mesures de vitesses ont été effectuées par injection de fluorescéine au droit de la prise d'eau. E.D.F., faisant fonctionner ses turbines à différents régimes.

- Longueur de la conduite forcée : 138,70 m
- Conduite en béton de diamètre : 2,30 m

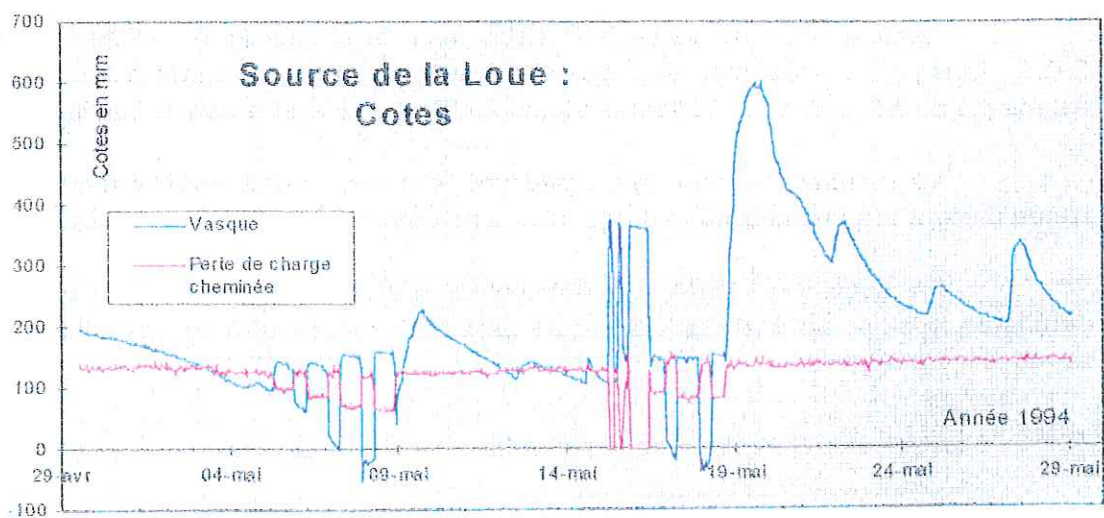
Le débit mesuré est conforme aux formules de l'hydraulique, il s'écrit :

$$Q = 0,48 \sqrt{h}$$

h étant la différence exprimée en mm des cotes mesurées dans la vasque et la cheminée. Cette méthode ne peut toutefois donner de résultats fiables pour les débits inférieurs à 1 m<sup>3</sup>/s. Ce cas est cependant très rare.

#### Enregistrements :

Le graphique ci-dessous (figure 1.4) montre un enregistrement de données à la vasque et à la cheminée pour l'année 1994. On observe nettement le fonctionnement intermittent de la prise d'eau E.D.F. :



- Par exemple, du 30 avril au 4 mai, le niveau d'eau à la vasque baisse régulièrement ; la prise d'eau fonctionne toutefois avec un régime constant puisque la perte de charge de la cheminée est à peu près stable.
- A partir du 5 mai et jusqu'au 8 mai, et du fait de la diminution du débit amont, il y a modulation des débits à la prise d'eau au cours de la journée : dérivation maximale compatible avec le débit amont au cours de la nuit et respect d'un niveau sur la vasque (110 à 150 mm de lame d'eau) au cours de la journée, c'est-à-dire entre 6 h 30 et 21 h.
- A partir du 9 mai, une petite crue permet à E.D.F. de turbiner à nouveau à plein régime.
- Un cycle similaire se reproduit du 10 mai à la fin du mois avec quelques perturbations. Des autres graphiques sont présentés en annexe 1.

## 1-22 - Sources inférieures

Deux stations ont été installées :

### → Canal

Implantée le 5 novembre 1993 au droit du mur du canal légèrement en amont d'un seuil qui assure un bon contrôle, la station est équipée d'une centrale Newlog avec codeur rotatif et flotteur.

Les jaugeages s'effectuent, soit à la perche, soit au téléphérique avec saumon de 25 kg.

Il faut noter que l'alimentation de ce canal se fait grâce à plusieurs arrivées d'eau.

### → Pont

Installée le 25 novembre 1993 à la sortie du souterrain, la station est équipée d'une centrale Newlog avec sonde piézométrique.

Les jaugeages s'effectuent à la perche. A noter de grosses difficultés à mesurer les hautes eaux du fait d'une vitesse très importante.

→ Total des deux Sources inférieures

La première année de mesure a permis de montrer que les débits entre ces deux dernières stations étaient parfaitement corrélés (Figure 1.5).

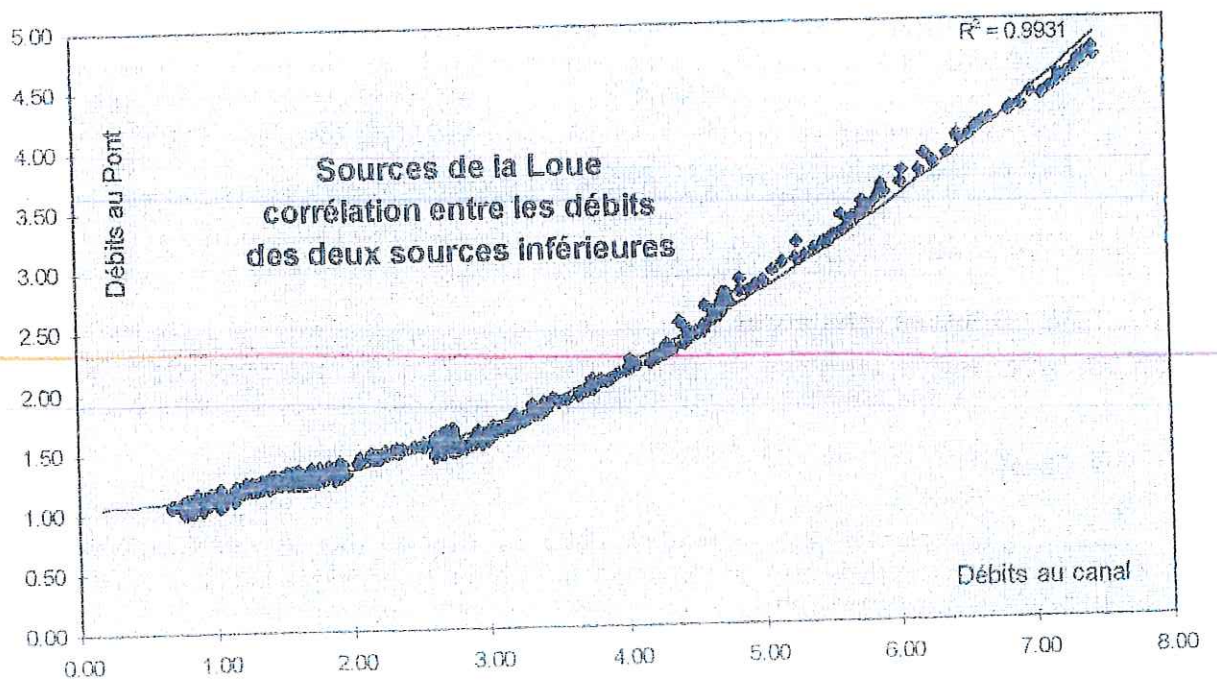


figure 1.5

On remarque toutefois que la liaison n'est pas linéaire. Des mesures physico-chimiques ont confirmé que l'eau des deux sources était identique. En conséquence, seul le débit total est désormais calculé avec la cote du canal comme référence ; les fortes turbulences sur la deuxième source entraînent en effet une légère incertitude sur la cote et l'appareil correspondant a été démonté.



### 1-23 - Fonctionnement global

La figure 1.6 montre le fonctionnement simultané des niveaux aux deux stations de la vasque et du canal : ce graphique permet de faire les constatations suivantes :

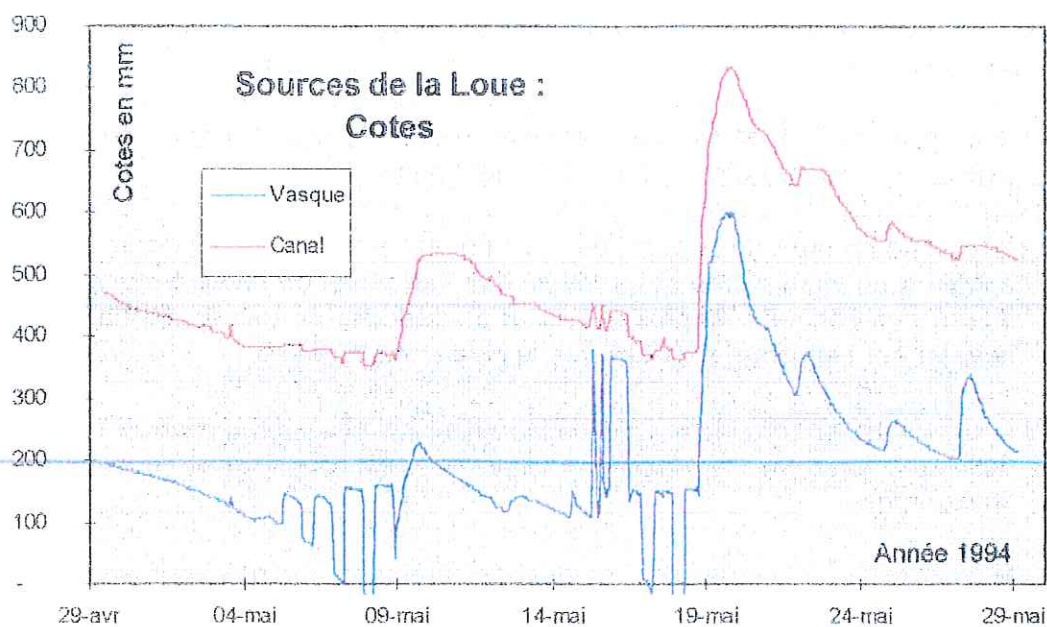


figure 1.6

- Les variations des cotes aux deux appareils sont simultanées, montrant que les systèmes aquifères correspondants réagissent de la même manière aux événements pluviométriques.
- Les variations brutales de niveau dans la vasque dues au turbinage se répercutent sur la station du canal, signalant de façon claire une communication au moins partielle entre la vasque et les deux autres sources. Des calculs hydrauliques permettent de préciser que les débits en cause avoisinent les 200 à 300 l/s. Une coloration a permis de vérifier que ces fuites n'étaient pas situées à l'aval du déversoir. Des mesures de température ont confirmé que le système des sources inférieures alimente plus ou moins le système vasque ; cette alimentation dépend du niveau de la vasque, ce qui signifie que les deux systèmes sont très proches.

### 1-3 - STATIONS PIEZOMETRIQUES

Parallèlement aux mesures de débit, des mesures de niveau d'eau ont été effectuées dans le karst. Pour ce faire, quatre forages ont été réalisés entre l'automne 93 et le printemps 94 :

- le premier de 27 mètres, à proximité du terrain de foot d'Arçon, n'a rencontré que des marnes et très peu d'eau ; il n'a pas été équipé ;
- le second au droit de la perte du Gros Foyard a traversé 25 mètres de calcaires, il est équipé d'un limnigraphe qui a révélé des variations de niveaux considérables (plus de 11 m) ; on constate de plus que, sauf en périodes de très fortes eaux, le niveau dans le karst est beaucoup plus bas que le niveau de la rivière ;
- le troisième au pont métallique d'Hauterive, en rive droite, montre un niveau dans les calcaires fracturés sensiblement égal à celui du Doubs, il a été équipé d'un limnigraphe.
- le quatrième à l'entrée des gorges de Remonot n'a pas rencontré d'eau dans les calcaires jusqu'à 30 mètres de profondeur ;

## II. HYDROLOGIE DU DOUBS



## 2-1 - CAMPAGNE DE JAUGEAGES SUR LE DOUBS

La réalisation de campagnes de jaugeages permet de préciser la zone de pertes situées entre la confluence Doubs/Drueon et Ville du Pont ; compte-tenu du nombre maximum de jaugeages qui peuvent être effectués en une journée et de leur précision, les secteurs ainsi individualisés sont de l'ordre de plusieurs centaines de mètres.

### 2-1-1 - Méthode

Pendant une même journée, le débit du Doubs est mesuré en un nombre important de points (une quinzaine). La différence de débit entre deux points de mesure correspond au volume des pertes.

Ces valeurs ne sont à prendre qu'à titre indicatif car de nombreux paramètres influencent le phénomène :

- le décalage dans le temps des différentes mesures (temps d'écoulement de l'eau, arrivée d'eau de l'amont),
- arrivée d'eau intermédiaire,
- présence d'algues qui rendent les mesures plus difficiles,
- mouvement de vannes à Oye-et-Pallet.

Les campagnes déjà effectuées sur le Doubs ont été reprises dans cette analyse, elles ont été complétées par deux nouvelles campagnes, les 5 et 26 août 1994.

On obtient ainsi une bonne représentativité des pertes en fonction du régime de la rivière :

- 3 décembre 1979 en moyennes eaux
- 2 novembre 1979 en hautes eaux
- 19 octobre 1989 en très basses eaux
- 5 et 26 août 1994 en basses eaux.

Pour chacune des campagnes, une carte schématique donne la position et la valeur des différents jaugeages (voir annexe 2.1). Elle est complétée par un diagramme représentant le débit du Doubs en fonction du kilométrage.

## 2-1-2 - Analyse des résultats

Le graphique de synthèse ci-dessous (figure 2.1) représente l'ensemble des campagnes de jaugeages.

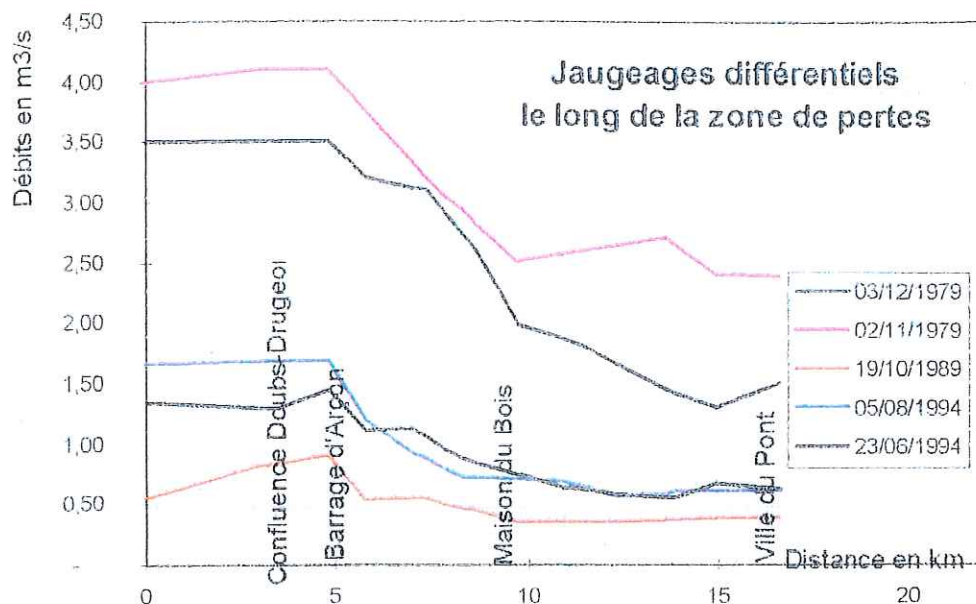


Figure 2.1

La zone de pertes peut se découper en trois parties distinctes :

- de Doubs (et Vuillecin) au barrage d'Arçon
- du barrage d'Arçon à Maison-du-Bois
- de Maison-du-Bois au défilé d'Entre-Roche.

### Entre Doubs et le barrage d'Arçon :

Aucune perte n'a été décelée sur ce tronçon, le débit est stable ou en croissance. Cette croissance peut être en particulier due à la station d'épuration de Pontarlier.

### Entre le barrage d'Arçon et Maison-du-Bois :

C'est dans cette zone qu'a lieu la majeure partie des pertes (de 75 à 95 %). Le débit perdu varie entre 1,6 m<sup>3</sup>/s (décembre 79) et 500 l/s (octobre 89).

Cette zone peut être scindée en trois tronçons :

- du barrage au pont d'Arçon : pertes très importantes
- du pont d'Arçon à 150 m à l'amont du Grand Foyard : peu de pertes
- du Gros Foyard à Maison-du-Bois : pertes importantes.

La zone de pertes très actives est donc réduite à moins de 4 kilomètres.

### Entre Maison-du-Bois et le défilé d'Entre-Roche :

Le comportement de cette zone est difficile à cerner. Il semblerait que le fonctionnement du système de pertes varie dans le temps.

Le contraste entre les deux secteurs ainsi définis est confirmé par le comportement des piézomètres installés à l'occasion de cette étude.

- le forage du « Gros Foyard » montre un niveau très bas, environ 10 mètres sous le lit du Doubs, avec des remontées brutales et très brève jusqu'au niveau de la rivière lors des fortes crues,
- à l'inverse, celui du pont métallique d'Hauterive, entre Maison-du-Bois et Montbenoît, présente un niveau parfaitement concordant avec celui de la rivière.

Des observations prolongées permettront de conforter ces premiers résultats qui confirmeraient la relation pertes-niveau piézométrique du karst.

### 2-1-3 - Conclusion

Ces campagnes de jaugeages apportent beaucoup d'informations. Elles ont permis de mettre en évidence :

- une zone de pertes principales peu étendues, de quatre kilomètres environ. Le traitement possible du phénomène sera donc facilité par ce faible linéaire ;
- la présence de ce qui apparaît comme deux systèmes de pertes distincts, avant et après Maison-du-Bois. L'étude de ce deuxième système doit être approfondie. Elle le sera par la réalisation de colorations.

### 2-2 - ANALYSE QUANTITATIVE DES PERTES

Cette étude s'appuie sur les données hydrométriques relevées sur la zone de pertes entre Pontarlier et Ville du Pont. Elle a pour objectif de chiffrer le débit des pertes, d'améliorer la compréhension du phénomène et de déceler une possible évolution sur les quinze années étudiées.

Leur position respective est donnée par la carte schématique suivante:

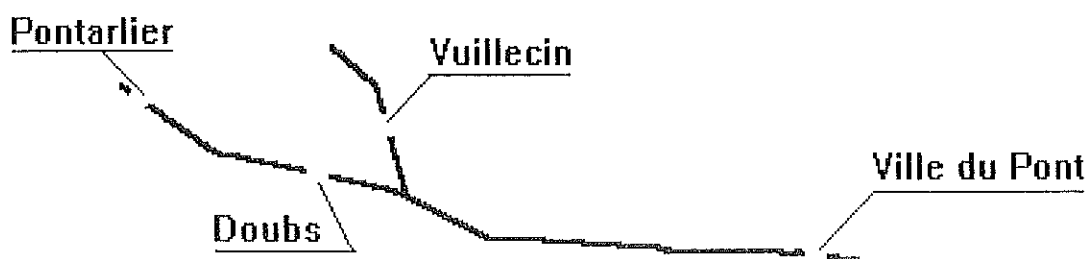


Figure 2.2

### 2-2-1 - Méthodes et hypothèses

Le débit des pertes est donc, d'après ce schéma, déterminé à l'aide des relations :

- *Entre Pontarlier et Doubs :*

$$Q_{\text{Doubs}} = Q_{\text{Pontarlier}} - Q_{\text{pertes}} + Q_{\text{apport}}$$

$$\text{d'où } Q_{\text{pertes}} = Q_{\text{Pontarlier}} + Q_{\text{apport}} - Q_{\text{Doubs}}$$

- *Entre Pontarlier et Ville-du-Pont :*

$$Q_{\text{Ville-du-Pont}} = (Q_{\text{Pontarlier}} + Q_{\text{Vuillecin}}) - Q_{\text{pertes}} + Q_{\text{apport}}$$

$$\text{d'où } Q_{\text{pertes}} = (Q_{\text{Pontarlier}} + Q_{\text{Vuillecin}}) + Q_{\text{apport}} - Q_{\text{Ville-du-Pont}}$$

$Q_{\text{apport}}$  correspondant à l'apport du bassin versant du Doubs (et du Drugeon) compris entre les stations limnigraphiques amont et aval. Cette formule a été utilisée au niveau des débits journaliers.

#### 2-2-1-1 - Critique des hypothèses

Deux remarques sont à faire à propos des formules précédentes :

➤ **Problème du débit intermédiaire :**

Le débit de pertes ne peut être déterminé avec les seules données hydrométriques, il est en effet nécessaire de connaître le débit d'apport  $Q_{\text{apport}}$ .

Sa détermination passe par l'écriture d'un bilan hydrométrique. Pour cela, il faut évaluer la surface de bassin versant correspondant, et s'appuyer sur les données pluviométriques. Ce calcul est difficilement réalisable de manière précise.

Cependant, ce débit d'apport peut être considéré comme faible. Le bassin versant intermédiaire étant situé sur une zone karstique, l'infiltration est importante, et les apports directs à la rivière faible. Seules les périodes très pluvieuses peuvent amener un débit d'apport non négligeable.

En raison de la difficulté d'obtenir le débit d'apport de manière précise, et du fait que celui-ci est pour la plupart du temps faible, on le négligera dans le raisonnement. Ceci revient à majorer le débit de pertes, principalement en hautes eaux. C'est pourquoi, cette méthode n'est applicable qu'aux débits d'étiages (environ jusqu'à 8 à 10 m<sup>3</sup>/s à l'amont).

### ➤ Temps de propagation :

Pour assurer une meilleure cohérence au niveau de la formule, il faudrait prendre en compte le temps de propagation de l'eau entre l'amont et l'aval; par exemple, un décalage de 12 heures environ entre Pontarlier et Ville du Pont . Ceci n'est pas possible avec des données de débits journaliers.

Ne pas prendre en compte ce décalage revient principalement à majorer artificiellement la valeur des pertes au début des périodes de crues. En effet, le calcul se fait alors avec un niveau haut des eaux à Pontarlier (ou à Vuillecin), pendant que celui de Ville du Pont ne reflète pas encore l'épisode pluvieux.

### 2-2-1-2 - Critique des données hydrométriques

La justesse des résultats repose naturellement sur la précision des mesures de débits. Celle-ci dépend de plusieurs facteurs qu'il est important de prendre en compte, car ils pourront peut-être expliquer certains résultats.

La détermination du débit dans une section du bief s'effectue à partir de la mesure de la hauteur d'eau en un point cette section. A partir de cette mesure, on déduit le débit en s'appuyant sur la courbe de tarage. Cette courbe a été établie à partir de jaugeages.

#### ➤ Fiabilité de la courbe de tarage :

On mesure la fiabilité de la courbe de tarage en comparant les débits obtenus avec celle-ci et ceux mesurés au cours des jaugeages.

Cette fiabilité est affectée par de nombreux paramètres relatifs, d'une part, à la stabilité du bief où s'effectue la mesure et, d'autre part, au nombre et à la précision des jaugeages.

En basses eaux, il est courant de voir des développements végétaux qui affectent la qualité de la courbe de tarage. De plus, des changements fréquents dus aux crues peuvent affecter les courbes, par déplacement des bancs de galets ; ces changements ne peuvent être répertoriés et pris en compte que si le nombre de jaugeages est suffisant.

#### ➤ Sensibilité de la courbe de tarage :

On définit la sensibilité de la courbe de tarage comme étant la variation relative de débits pour une variation unitaire du niveau d'eau (variation de 1 cm).

Compte tenu de la technique utilisée jusqu'en 93, la précision de dépouillement de limnigrammes était de l'ordre de plus ou moins 1 cm sur la cote réelle de l'eau. A partir de l'installation des nouveaux appareils, la précision de mesure s'améliore sensiblement (3 à 5 mm). La sensibilité de la courbe de tarage joue donc un grand rôle, notamment pour les petits débits.

➤ Etude des stations de Ville du Pont et de Vuillecin :

La dispersion et la sensibilité des courbes de tarages ont été étudiées de manière détaillée pour ces deux stations. La station de Pontarlier ne dépendant pas de la DIREN de Franche-Comté, nous n'avons pas à notre disposition les éléments la concernant.

• Ville du Pont :

Cette station est à l'aval des pertes, et sert de base d'étude pour les étiages très sévères. L'étude de la fiabilité de la courbe pour les faibles débits est donc essentiel.

Six courbes de tarage ont été utilisées pour déterminer les débits sur la période étudié :

- du 01/01/78 au 31/12/79

Dispersion faible: uniquement deux jaugeages ont plus de 10% d'erreur (-12% et +12%), pour des débits de 0,027 et 7,52 m<sup>3</sup>/s.

Sensibilité de la courbe relativement importante pour les petits débits : de 20 à 50% pour des débits inférieur à 0,357 m<sup>3</sup>/s.

- du 01/01/80 au 23/01/85

Dispersion assez forte: deux des jaugeages avec -50% d'erreur, pour des débit de 0,064 et 0,535 m<sup>3</sup>/s et deux autres jaugeages avec -20% d'erreur.

Sensibilité de courbes légèrement plus faible que précédemment.

- du 24/01/85 au 08/01/86

Dispersion difficile à juger: seulement 3 jaugeages pour la période d'utilisation de la courbe.

Sensibilité relativement moyenne : faible: de 30 à 10 % pour un débit inférieur à 0,3 m<sup>3</sup>/s.

- du 09/01/86 au 22/10/86

La courbe de tarage est apparemment relativement instable avec des dispersions très importante de -50% à +50%.

Même sensibilité que pour la courbe précédente : pour les petit débits (inférieur à 5 m<sup>3</sup>/s) cette courbe est identique à la précédente.

- du 01/01/87 au 31/12/88

Dispersion moyenne :           -50% pour 0,387 m<sup>3</sup>/s  
   -15% pour 0,920 m<sup>3</sup>/s  
   + 20% pour 1,38 m<sup>3</sup>/s

Sensibilité très forte: de 50 à 70% pour des débits inférieurs à 0,5 m<sup>3</sup>/s

- du 01/01/89 à aujourd'hui

Dispersion moyenne: -50% pour des débits très faible (0,011 m<sup>3</sup>/s  
   et 0,071m<sup>3</sup>/s)  
   -25,7% pour 0,223 m<sup>3</sup>/s

Même sensibilité que la courbe précédente, les modifications ayant eu lieu pour des débits élevé.

Pour la presque totalité de la période étudiée, la sensibilité des courbes est donc assez moyenne pour les petits débits. La dispersion de jaugeages autour de certaines courbes traduit la difficulté des conditions d'implantation de la station.

- Vuillecin:

Onze courbes de tarage ont été utilisées pendant les quinze années étudiées. Pour cette station, Il est donc difficile de trouver une courbe de tarage stable.

La plupart des jaugeages montrent une dispersion par rapport à la courbe de 20 à 30% pour des débits variables.

Pour l'ensemble des courbes la sensibilité est relativement bonne, elle est inférieure à 25% pour les petits débits.

### 2-2-1-3 - Conclusion

La qualité actuelle de données permet de déterminer des pertes avec un certain degré de précision de l'ordre de 10 à 15 % ; on peut remarquer cependant que c'est la précision des débits à Ville-du-Pont qui conditionne la connaissance des pertes totales.

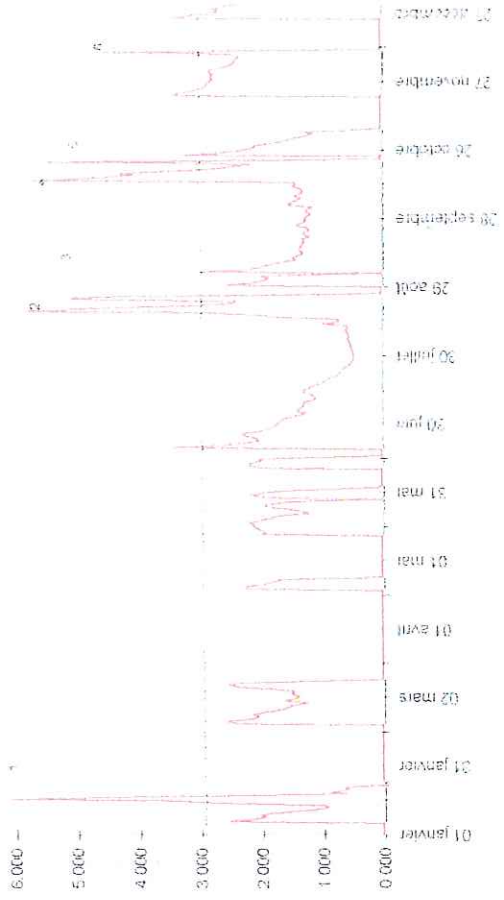
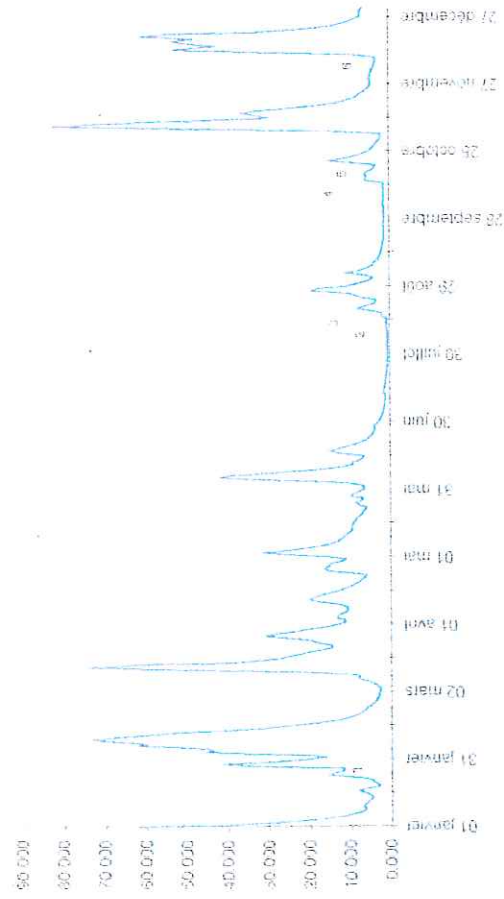
Année 1979

Débit Amont

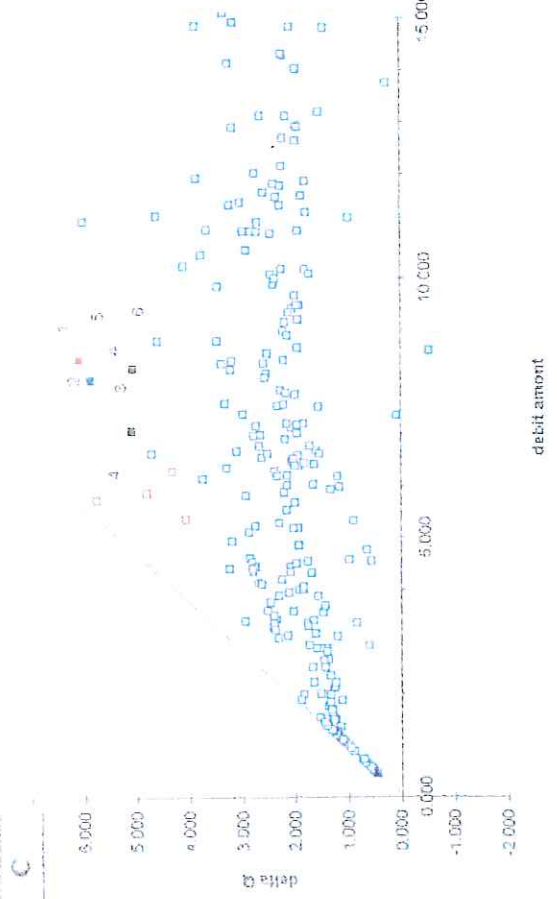
Delta Q pour un débit amont < 10 m<sup>3</sup>/s

B

A



C



D

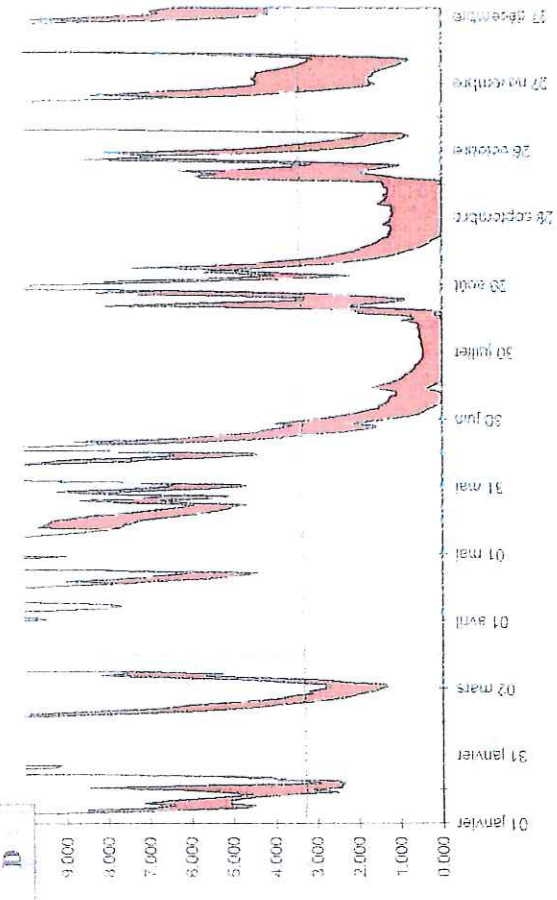


figure 2.3



## 2-2-2 - Analyse chronologique journalière

L'ensemble des données disponibles permet l'étude des débits de pertes entre Pontarlier et Ville du Pont de 1979 à 1995 et entre Pontarlier et Doubs de 1986 à 1995.

La figure 2.3 représente pour l'année 1979 et pour le secteur Pontarlier Ville-du-Pont au niveau journalier :

- le débit amont (graphique A),
- le débit de pertes (graphique B),
- la corrélation entre le débit amont et le débit de perte (graphique C),
- les débits amont et aval, pour un débit inférieur à 10 m<sup>3</sup>/s (graphique D).

Pour chacune des années étudiées les mêmes graphiques figurent en annexe 2.3.

Pour ces graphiques, les débits de pertes ont été pris en compte uniquement pour des débits amont de basses et moyennes eaux.

En effet, on constate que pendant les périodes de hautes eaux le débit  $\Delta Q$  calculé devient négatif. Deux hypothèses peuvent être soulevées pour expliquer ce fait:

- les pertes diminuent en période de hautes eaux à cause de vitesses d'écoulement élevées, des matières en suspension,
- les pertes ne sont plus décelées par la méthode utilisée: incertitudes sur les données, courbe de tarage, apports intermédiaires,
- les apports intermédiaires sont plus importants que les pertes.

Cette hypothèse est la plus probable car l'apport entre l'amont et l'aval n'est plus négligeable au cours des périodes pluvieuses.

On note que cette restriction de l'étude n'est pas très gênante, car elle ne concerne pas les étiages, périodes les plus critiques sur le Doubs.

- Entre Pontarlier et Ville du Pont :

Pour l'ensemble des années, la plupart du temps, les valeurs de pertes sont inférieures à 3 m<sup>3</sup>/s (graphique B de la figure 2.3).

Il existe toutefois des pics à valeur de pertes plus élevée (jusqu'à 7 m<sup>3</sup>/s en 1985). L'analyse détaillée de ces valeurs a été réalisée pour l'année 1979 (figure 2.3) : tous ces pics correspondent à une augmentation relativement brutale du débit amont. Pour les autres années le phénomène est similaire.

Le temps de propagation de l'eau entre l'amont et l'aval explique la majoration apparente des pertes (cf. § 2-2-1-1).

En ne prenant pas en compte ces valeurs particulières, le débit de pertes est compris essentiellement entre 1,5 et 3 m<sup>3</sup>/s.

# Pertes du Doubs entre Pontarlier (+Vuillecin) et Ville du Pont

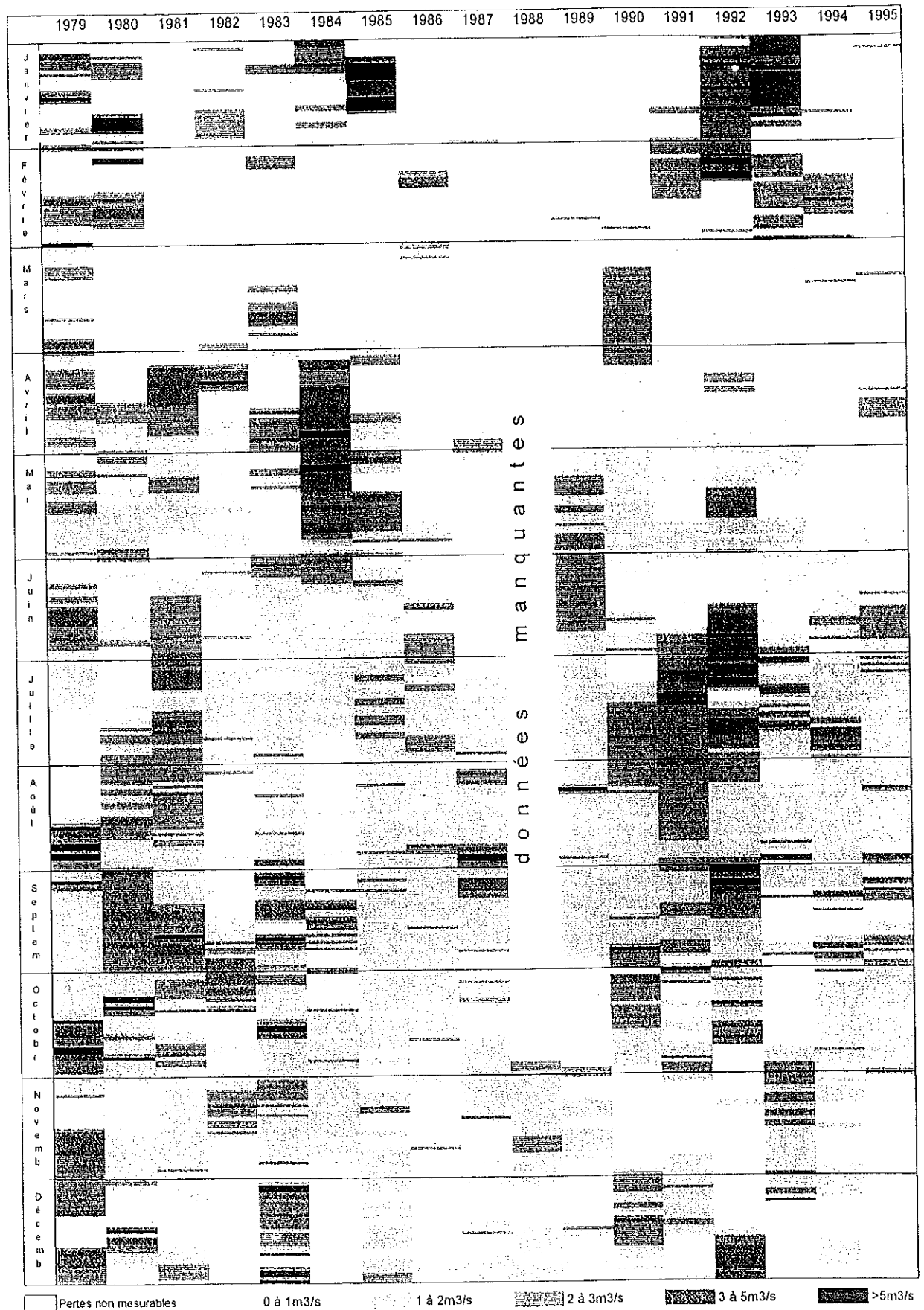


figure 2.5

Au niveau saisonnier, on constate la même homogénéité, à l'exception des périodes de hautes eaux (débit amont  $> 10 \text{ m}^3/\text{s}$ ) pour lesquelles le phénomène n'est plus mesurable ; ainsi le graphique B montre cette constance en dehors des épisodes de crue.

Le diagramme de la corrélation entre le débit amont (Pontarlier et Vuillecin) et le débit de pertes (graphique C de la figure 2.3) permet de préciser le phénomène.

Dans le diagramme de corrélation, l'ensemble des points se situe sur ou en dessous de la droite  $X=Y$ . Cette droite correspond à la droite des pertes totales, le Doubs est alors à sec à Ville du Pont, et le débit de pertes égal au débit amont.

En fait, la majorité des points se situent dans la surface limitée par les droites  $X=Y$ , et  $Y=3 \text{ m}^3/\text{s}$  comme le montre le schéma suivant (figure 2.4) :

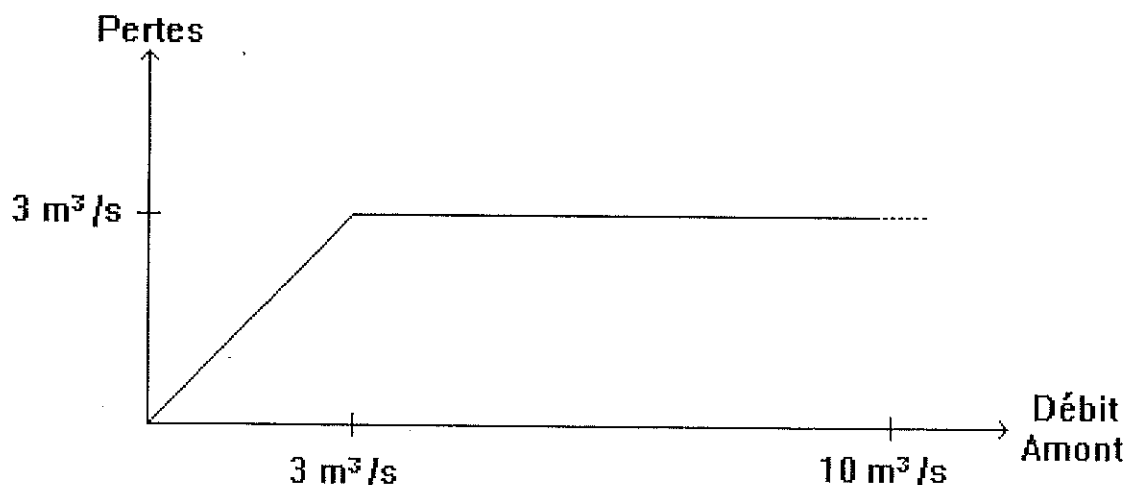


Figure 2.4

Les quelques points, qui se situent au-dessus de  $3 \text{ m}^3/\text{s}$ , correspondent pour la plupart aux pics relevés auparavant.

La dispersion des points à l'intérieur de cette surface est très grande et il n'y a apparemment aucune corrélation; l'écart autour de la droite moyenne semble toutefois se rétrécir pour certaines années (79, 80, 85, 86, 87).

Les pertes totales (points sur la droite  $X=Y$ ) n'apparaissent pas chaque année.

Le diagramme 2.5 synthétise l'intensité des pertes journalières au cours des années connues ; l'intensité du grisé correspond au niveau des pertes. On constate une homogénéité assez bonne entre les années.

# Pertes du Doubs entre Pontarlier et Doubs

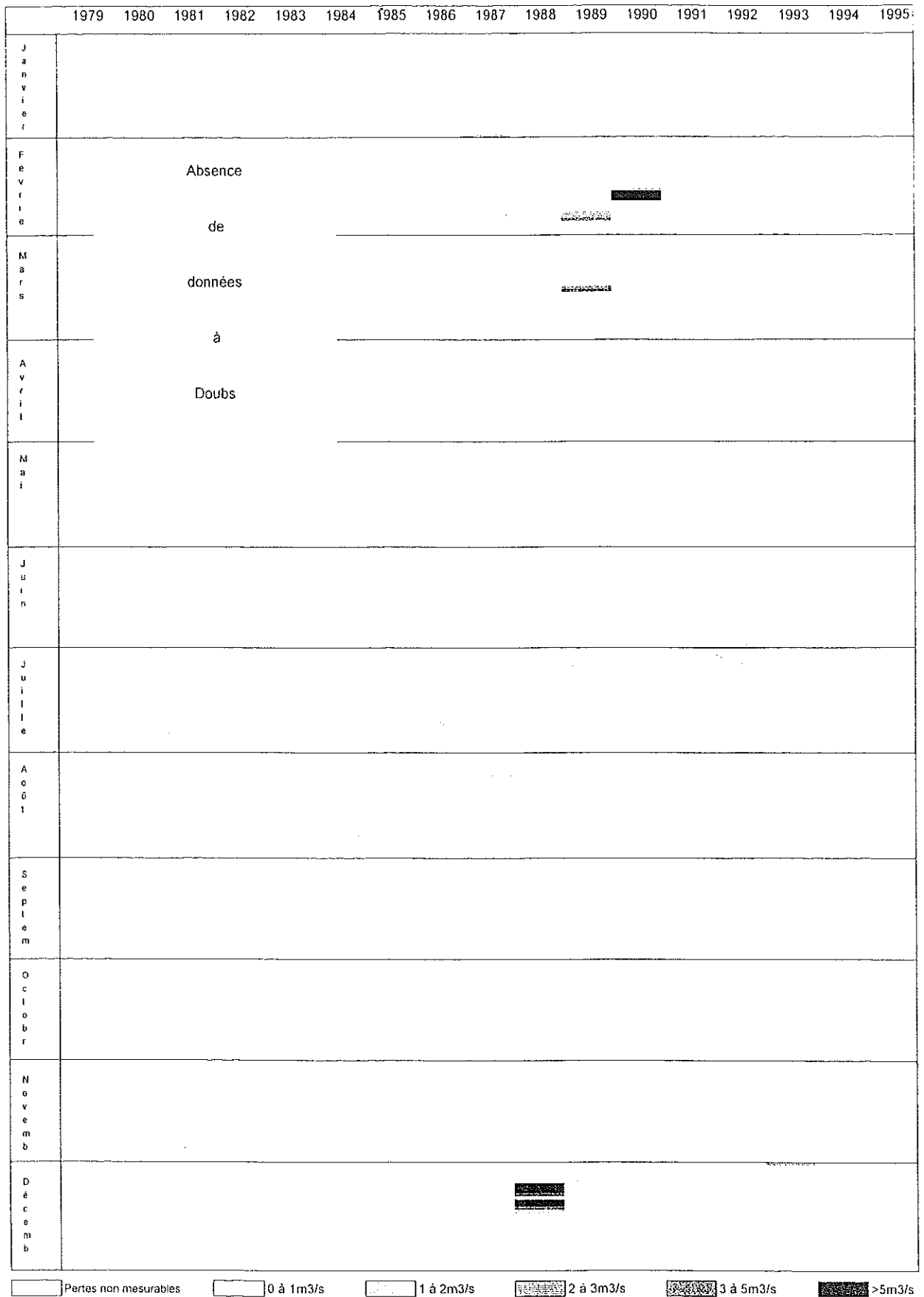


figure 2.6

- Entre Pontarlier et Doubs :

On observe un phénomène identique à celui entre Pontarlier et Ville du Pont. Le débit de pertes est le plus souvent inférieur à  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ , avec quelques valeurs apparemment plus élevées, qui correspondent en fait à une augmentation brutale de débit amont (figure 2.6).

- A l'amont de Pontarlier :

Une investigation a été faite entre la sortie du Lac Saint-Point et la station de Pontarlier. Cette analyse fait également apparaître l'existence de pertes amont qui atteignent en moyenne plus de  $300 \text{ l/s}$ . Les pertes sur ce secteur ne sont donc pas négligeables car le calcul néglige les débits du ruisseau de la Fontaine Ronde.

- Conclusion :

Ainsi, le débit de pertes est limité à un certain seuil, estimé à  $3 \text{ m}^3/\text{s}$  pour l'ensemble de la zone de pertes, et à  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  pour la zone entre Pontarlier et Doubs.

### 2-2-3 - Caractérisation des pertes selon les années

Le niveau moyen des pertes étant établi, une analyse a été faite pour déterminer si le niveau moyen varie en fonction de l'année. Le secteur Pontarlier, Vuillecin - Ville-du-Pont est pris en compte et on considère qu'il y a pertes totales dès que le débit aval à Ville du Pont est inférieur à  $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ .

L'analyse porte sur deux critères, d'une part selon le phénomène des pertes totales à Ville-du-Pont, d'autre part selon la sévérité de l'étiage amont.

#### Selon la densité des pertes totales à Ville-du-Pont :

On a vu ci dessus, que le débit de pertes reste toujours inférieur à  $3 \text{ m}^3/\text{s}$ . Cependant, la densité des périodes avec pertes totales est très variable selon les années.

En repérant les périodes d'assèchement et de très basses eaux à Ville du Pont, il est possible de classer les années suivant les débits aval (données incomplètes en 1988) :

- années avec forte densité des pertes totales: (débits aval inférieurs à  $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$  pendant plus de 30 jours)

1979,1990,1991,1992

	Amont	Ville-du-Pont	Ville-du-Pont
	Nombre de jours d'étiage sévère (Débit <2.5m3/s)	Nombre de jours avec pertes totales (Débit <.1m3/s)	Débit moyen annuel des pertes
1979			
1980			
1981			
1982			
1983			
1984			
1985			
1986			
1987			
1988	Données manquantes		
1989			
1990			
1991			
1992			
1993			
1994			
1995			
<b>Légende</b>			
	> 80 jours	>30 jours	>2m3/s
	de 41 à 80 jours	de 2 à 30 jours	de 1.6 à 2 m3/s
	de 0 à 40 jours	de 0 à 1 jour	<1.6 m3/s

Figure 2.7

- années avec faible nombre de jours de pertes totales (débits aval inférieurs à  $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$  pendant moins de 2 jours)  
1982, 1983, 1984, 1987, 1985, 1986, 1993, 1994, 1995
- Les années moyennes:  
1980, 1981, 1989

#### Selon la sévérité de l'étiage amont :

En prenant en compte le nombre de jours à débit amont inférieur à  $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ , on peut classer les années en trois groupes (pour ce classement, seule la période juin - décembre a été utilisée) :

- années sèches (plus de 80 jours avec un débit inférieur à  $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ) :  
1979, 1985, 1986, 1989
- années humides (moins de 40 jours avec un débit inférieur à  $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ):  
1981, 1982, 1987, 1988, 1993, 1995
- années normales: (de 20 à 40 jours avec un débit inférieur à  $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ )  
1980, 1983, 1984, 1990, 1991, 1992, 1994

#### Relation entre débit amont et débit aval :

Le tableau (figure 2.7) montre la correspondance entre le nombre de jours avec pertes totales à Ville-du-Pont et la sévérité de l'étiage amont. Il apparaît que la relation entre le nombre de jours avec un débit amont faible et le nombre de jours avec assèchement du Doubs à Ville du Pont n'est pas très forte, ce qui est confirmé par un calcul de corrélation. Ceci confirme que le phénomène de pertes n'est pas constant pour la période étudiée. Ainsi par exemple :

- de 1983 à 1986, il n'y a pas eu de pertes totales, alors que le nombre de jours avec un débit inférieur à  $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$  est parfois important. (85 et 86)
- en 89, pendant plus de la moitié de l'année le débit amont était inférieur à  $3 \text{ m}^3/\text{s}$ , et cependant il y a eu peu de jours avec des pertes totales.

Sur ce même tableau figure également le débit moyen annuel des pertes qui apparaît également liée aux deux variables précédentes.





Le diagramme 2.8 représentant les deux critères de débit amont et aval est tout à fait significatif. Il montre bien que la correspondance entre les deux critères est très nette certaines années (80, 81, 90, 91, 92) mais beaucoup plus floue pour d'autres années (79, 89), voire complètement inexistante.

### Conclusion :

En ne considérant que les années à étiage sévère, on aurait pu penser qu'il y avait pertes totales dès que le débit amont était inférieur à  $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Mais cette conclusion s'avère infirmée par les autres données.

En traçant le diagramme des moyennes des débits de pertes (figure 2.9), pour la période la plus préjudiciable (du 1er juillet au 30 septembre), on constate des variations interannuelles de l'ordre de plus ou moins  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$  autour d'un médian de  $1,9 \text{ m}^3/\text{s}$ .

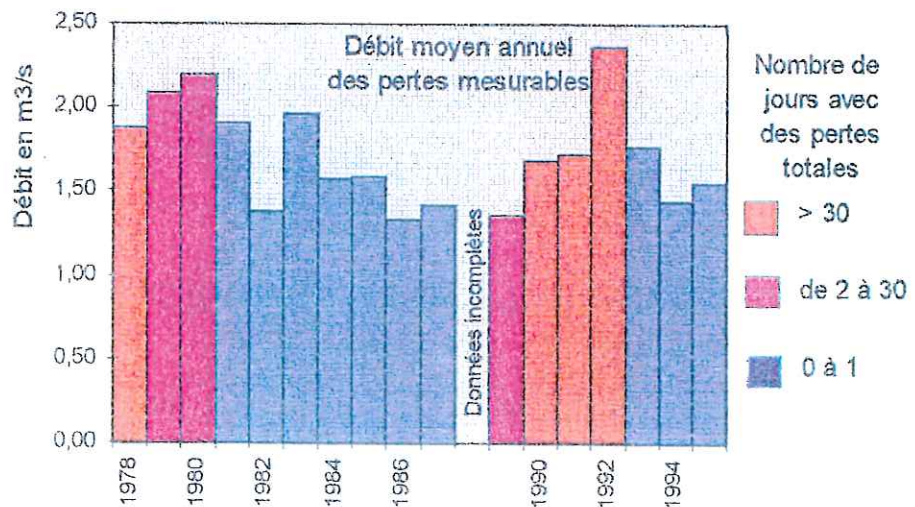


Figure 2.9

Il semblerait qu'il y ait une modification du phénomène de pertes au cours des années.

#### 2-2-4 - Recherche sur les variations annuelles

La variation des pertes selon les années ne semble pas trouver d'explication claire avec les seules informations de débit.

Une première recherche a été effectuée à partir des données pluviométriques annuelles saisonnières. Aussi bien les pluviométries annuelles que celles d'hiver, de printemps ou d'été n'apportent de réponse satisfaisante à la variabilité du phénomène.

Une autre recherche a porté sur la hauteur et la durée d'enneigement de l'hiver précédent. Cette recherche ne semble pas davantage fournir d'explication.

Il semble donc que la variabilité des pertes d'une année à l'autre soit due à d'autres facteurs. Parmi les plus plausibles, on peut citer :

- ouverture ou fermeture de failles à l'occasion de très légers mouvements tectoniques ;
- bouchage de failles naturellement (sédiments, algues,...) ou artificiellement (perte du Gros Foyard) et réouverture naturelle d'autres failles.

En tout état de cause, aucune certitude ne peut être avancée en l'état actuel des connaissances.

#### 2-3 - EXPERIMENTATION : AUGMENTATION ARTIFICIELLE DES PERTES

Toutes les expérimentations de traçage antérieures montrent le lien entre les pertes du Doubs et la Source de la Loue. L'existence d'un volume disponible au niveau du lac Saint-Point devrait permettre de mettre en évidence une augmentation des débits aux Sources de la Loue suite à une augmentation artificielle des débits du Doubs à partir du lac Saint-Point.

Compte tenu des contraintes de gestion de niveau du lac, l'expérience a été programmée pour fin août 1995 (lundi 28). Malheureusement, les conditions météorologiques furent extrêmement défavorables. Toujours pour des contraintes de gestion, l'expérience ne put être repoussée que de quelques jours. Le 31 août à 10 h un lâcher supplémentaire de 5 m<sup>3</sup>/s eu lieu à la sortie du lac pour une durée de 48 heures. Le débit à Oye-et-Pallet était encore très soutenu (9 m<sup>3</sup>/s avant lâcher).





L'examen attentif des débits horaires aux Sources de la Loue (figure 2.10) ne montre aucune variation sensible des débits sur les 72 heures qui suivent le lâcher. Au-delà survient un nouvel épisode pluvieux.

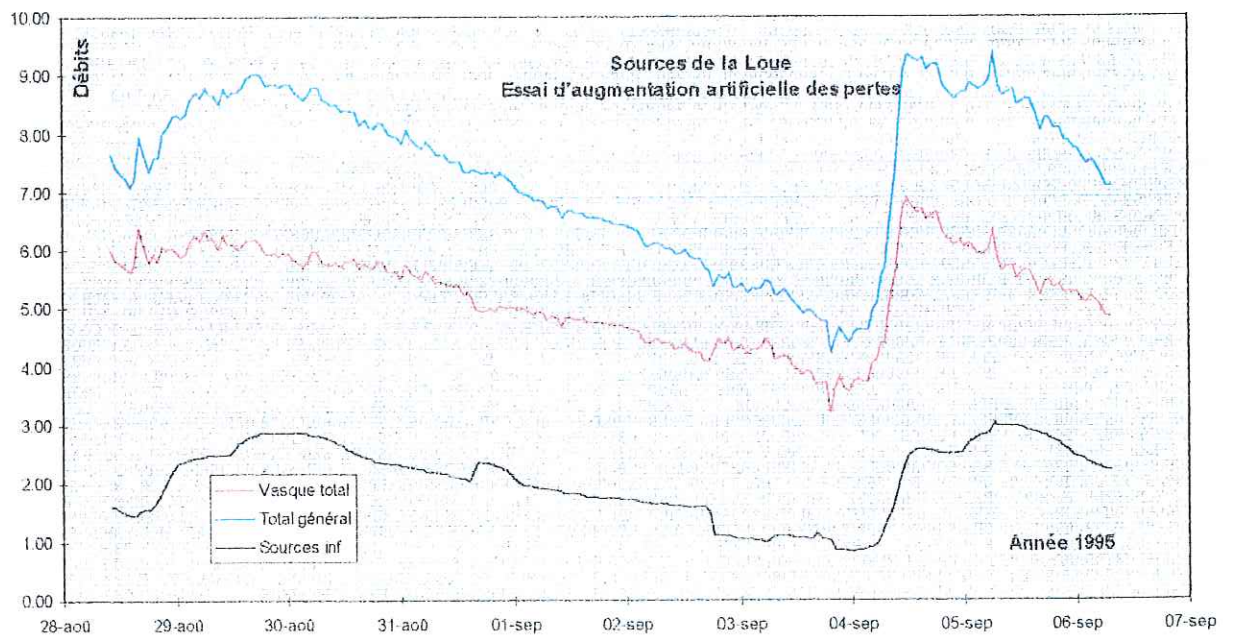


Figure 2.10

Cette expérience confirme donc le fait que les pertes du Doubs sont saturées en moyennes et hautes eaux et qu'il est apparemment inutile de profiter de ces périodes pour injecter davantage de débit dans les pertes.

## 2-4 - PIEZOMETRIE

L'examen détaillé des enregistrements piézographiques montre que seuls les niveaux du piézomètre du Gros Foyard sont en relation directe avec des écoulements dans le karst. Les relevés de cet appareil sont tout à fait démonstratifs du fonctionnement du karst. Pendant la période sèche ou peu pluvieuse, le niveau reste stable à environ - 10 m (référence : niveau d'étiage du Doubs). Ce niveau n'a pas de signification précise ; il prouve simplement que le forage en-dessous de cette cote n'est plus fissuré.

Par contre, lors des périodes très pluvieuses, le niveau monte brutalement et pour les périodes les plus arrosées, il semble que le niveau se mette en équilibre avec la rivière. Le graphique (figure 2.11) montre à titre d'exemple la période du 01/05/94 au 01/05/95 où l'on a superposé les niveaux du Doubs à Doubs situés quelques kilomètres en amont.

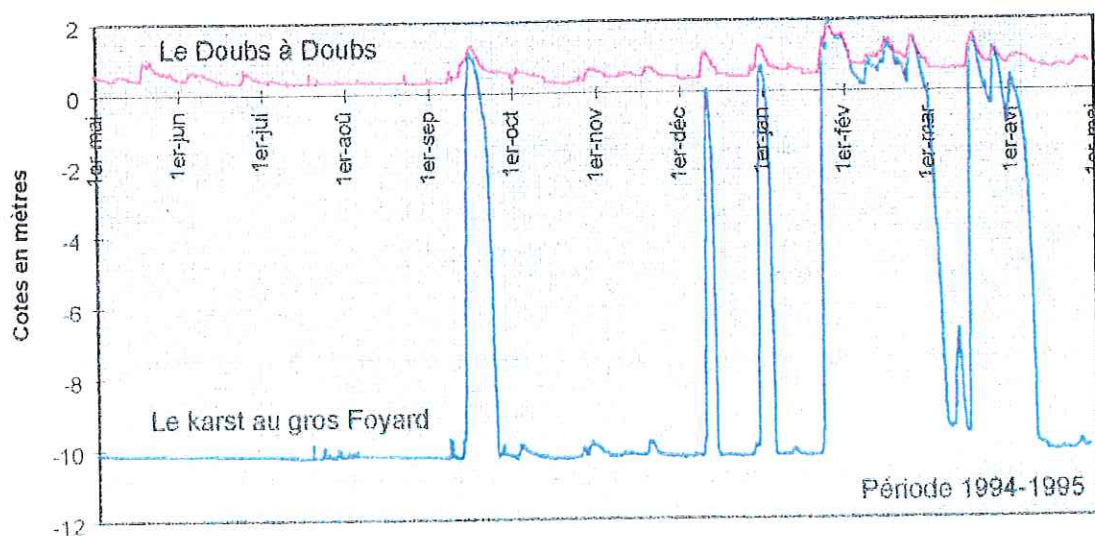


Figure 2.11

Ce graphique tant à confirmer qu'en période de hautes eaux, le niveau du karst étant en équilibre avec celui de la rivière, les fuites ne peuvent plus augmenter.

III.  
HYDROLOGIE DE LA LOUE



### 3-1 - DEBITS CHRONOLOGIQUES

#### 3-1-1 - Débits mesurés aux sources

##### Débits aux sources supérieures (vasque + cheminée)

Le calcul des débits à la source haute nécessite le calcul des débits sur le déversoir et des débits turbinés. La figure 3.1 présente au niveau journalier les débits calculés sur la période du 2ème semestre 1994. On y observe notamment les étiages des mois de juillet et août, voisins de 2 m<sup>3</sup>/s.

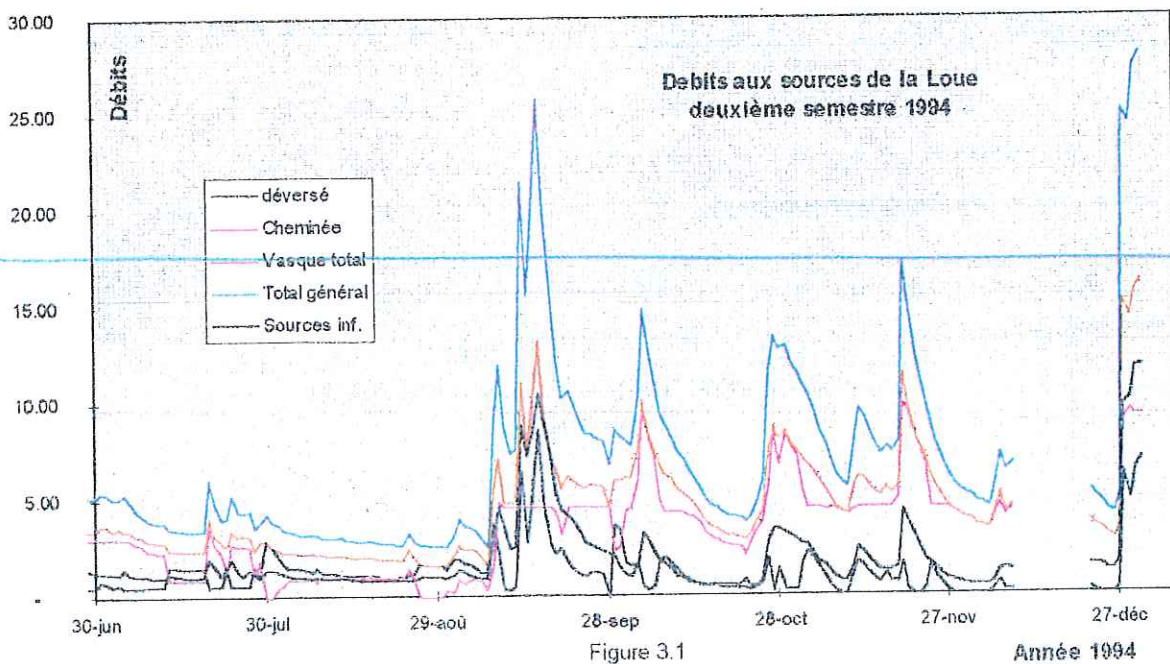


Figure 3.1

Année 1994

Des relevés avaient été effectués par le S.R.A.E. au cours des années 78-79 sur les sources supérieures. Ces relevés confirment le niveau des étiages.

Les autres résultats sont présentés en annexe 3.



### Débits aux sources inférieures

Pour les stations sur les sources inférieures, le traitement est plus classique ; les graphiques détaillent les débits obtenus, ils montrent une assez forte similitude entre les réponses des différentes sources aux événements pluviométriques.

### Débits sur l'ensemble des sources

Des graphiques de corrélation ont été réalisés pour préciser cette similitude au niveau des débits journaliers.

La corrélation entre les débits de la vasque et ceux des deux sources inférieures est moyenne (figure 3.2) ; le coefficient de corrélation n'atteint que 0,85. Ceci semble donc montrer une certaine indépendance entre :

- les débits à la vasque
- les débits des sources inférieures.

ces deux dernières étant toutefois partiellement alimentées par la vasque comme il a été dit ci-dessus.

En moyenne, sur la période observée, la répartition des débits est la suivante :

- sources hautes (vasque) : 70 %
- sources inférieures : 30 %

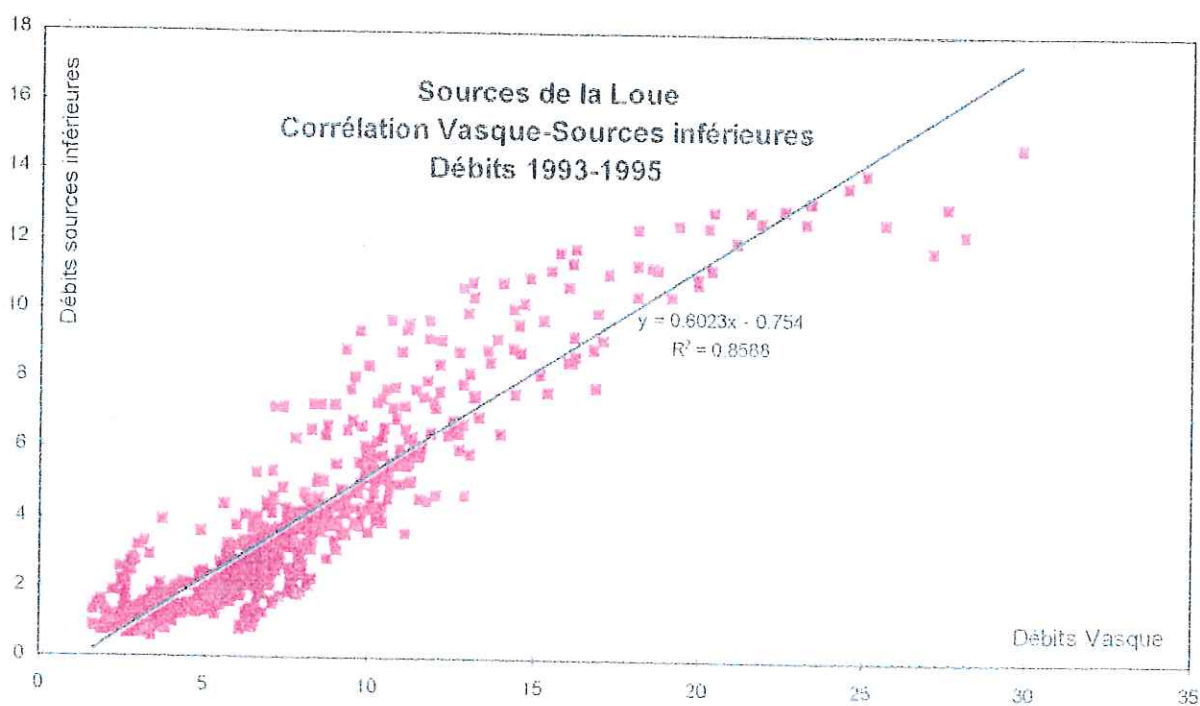
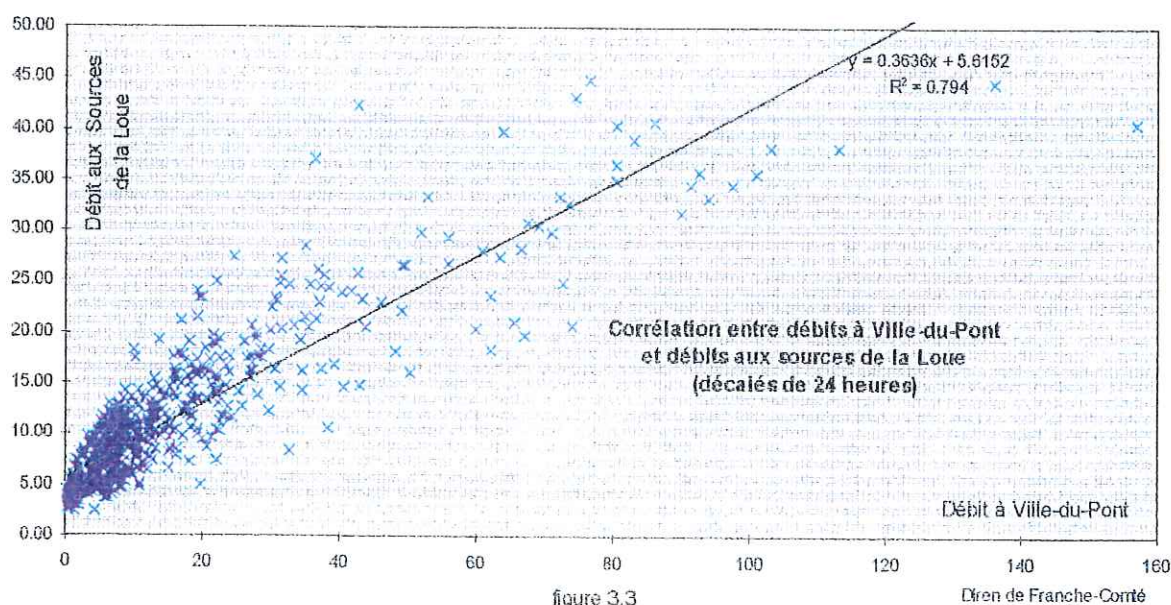


Figure 3 2

### 3-1-2 - Corrélation avec les débits du Doubs

Toutes les corrélations entre débits journaliers à la source de la Loue et débits du Doubs se montrent relativement décevantes. Le coefficient de détermination ( $R^2$ ) atteint au maximum 0,75, ce qui ne permet d'expliquer que 50 % de la variance des débits et confirme en quelque sorte que le débit aux sources de la Loue est très faiblement dépendant du débit du Doubs.



La figure 3.3 montre, à titre d'exemple, le graphique de corrélation entre les débits des sources et les débits à Ville-du-Pont. Un décalage de 24 heures (seul possible avec les données actuelles) améliore très faiblement la corrélation.

Les mêmes graphiques ont été effectués entre Vuillafans et les débits amont : les conclusions sont tout à fait similaires.

# Source de la Loue

## Courbe cumulative des débits

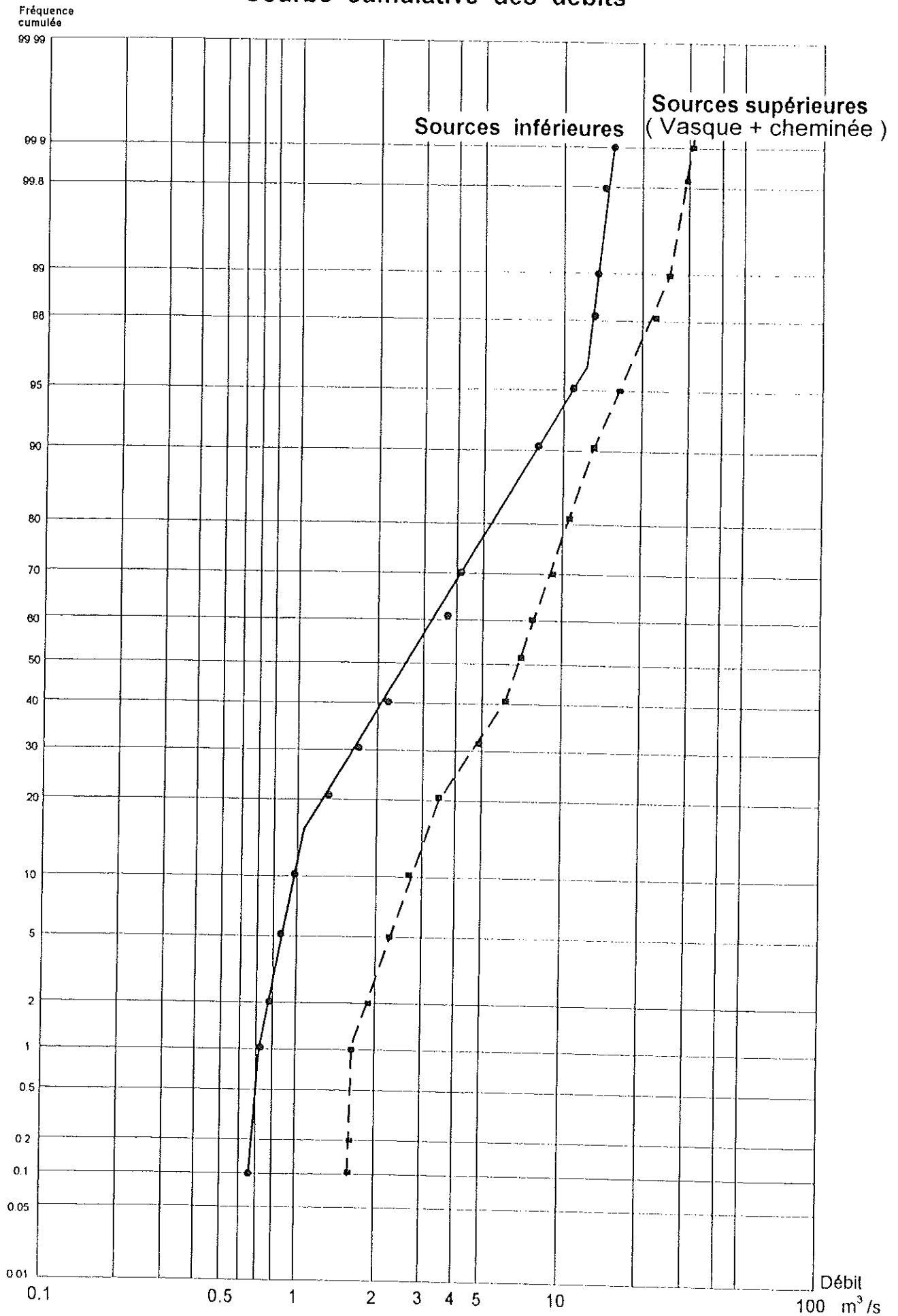


Figure 3.4

### 3-2 - DEBITS CLASSES

#### ■ Principe :

La courbe des débits classés est construite en portant pour une classe de débit donné, le nombre de jours pendant lesquels ce débit a été observé.

A. MANGIN a adapté à la courbe observée une dérivée de la Loi de LAPLACE qui permet d'obtenir une droite lorsque l'on reporte sur un diagramme, en ordonnée les fréquences cumulées sur une échelle de probabilité, et en abscisse les valeurs des classes de débits sur une échelle arithmétique ou logarithmique.

Dès qu'une hétérogénéité intervient (influence de la réserve, mobilisation d'un autre aquifère) les points s'écartent de l'alignement pour former une nouvelle droite qui correspond à une loi de répartition des débits dont les paramètres sont différents.

Une augmentation de pente de la droite obtenue traduit une croissance ou une décroissance moins rapide des débits pour ces classes et inversement lors d'une diminution de pente.

#### ■ Comparaison Vasque - Sources inférieures :

La courbe de débits classés (figure 3.4) sur la période 93-95 montre que 30 % des débits les plus faibles décroissent plus rapidement à la vasque (source supérieure + cheminée) de 4,78 m<sup>3</sup>/s à 1,6 m<sup>3</sup>/s qu'aux sources inférieures (1,53 à 0,65).

# La Loue

## Courbe cumulative des débits

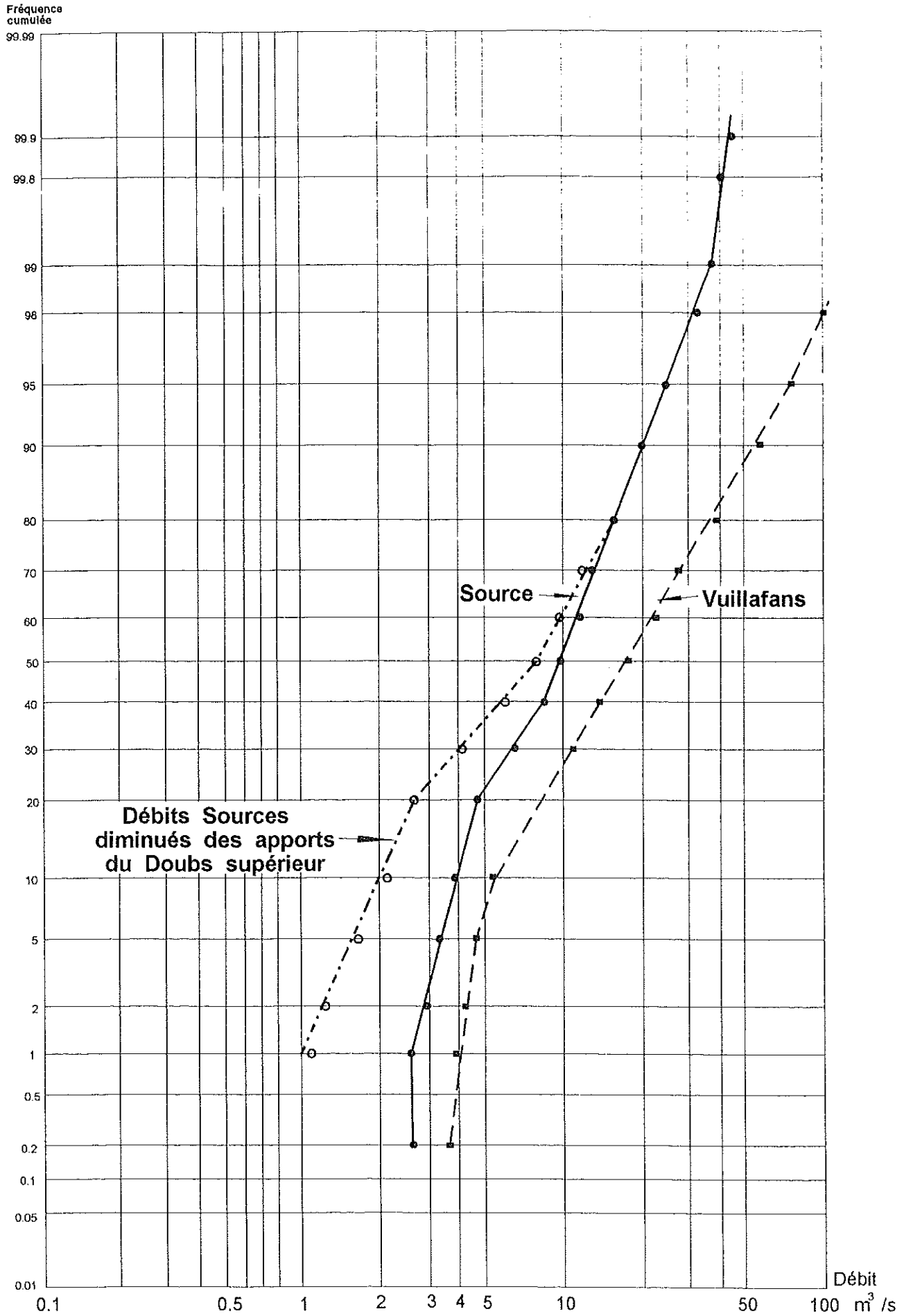


Figure 3.5

#### ■ Comparaison Source de la Loue - Vuillafans :

Pour des valeurs inférieures à 10 m<sup>3</sup>/s à la Source de la Loue, la pente des courbes de distribution des débits selon les fréquences entre cette dernière et Vuillafans est sensiblement identique (figure 3.5).

En deçà de ces valeurs (fréquence 20 %), les droites sont parallèles ; l'écart permet de retrouver les valeurs du tarissement des épisodes cités plus loin. Ceci démontre un apport minimum de 1 m<sup>3</sup>/s entre la Source et la station de Vuillafans.

#### ■ Apport du Doubs :

Cette figure permet également de comparer les débits mesurés à la Source avec les mêmes débits diminués des apports du Doubs supérieur (Pontarlier + Drugeon - Ville du Pont).

Les hydrogrammes des années 79 et de la période 93-95 montrent que l'apport du Doubs supérieur à la Source de la Loue est continu. La courbe cumulative le révèle dès 15 m<sup>3</sup>/s et l'écartement des droites confirme pour les débits inférieurs 5 m<sup>3</sup>/s l'apport constant de 1,5 à 2 m<sup>3</sup>/s en période de basses eaux.

### 3-3 - CORRELATION

La corrélation entre les débits à la Source et ceux à Vuillafans montre une certaine dispersion de points au-delà de 10 m<sup>3</sup>/s aux sources. En deçà de cette valeur, la dispersion diminue (figure 3.6).

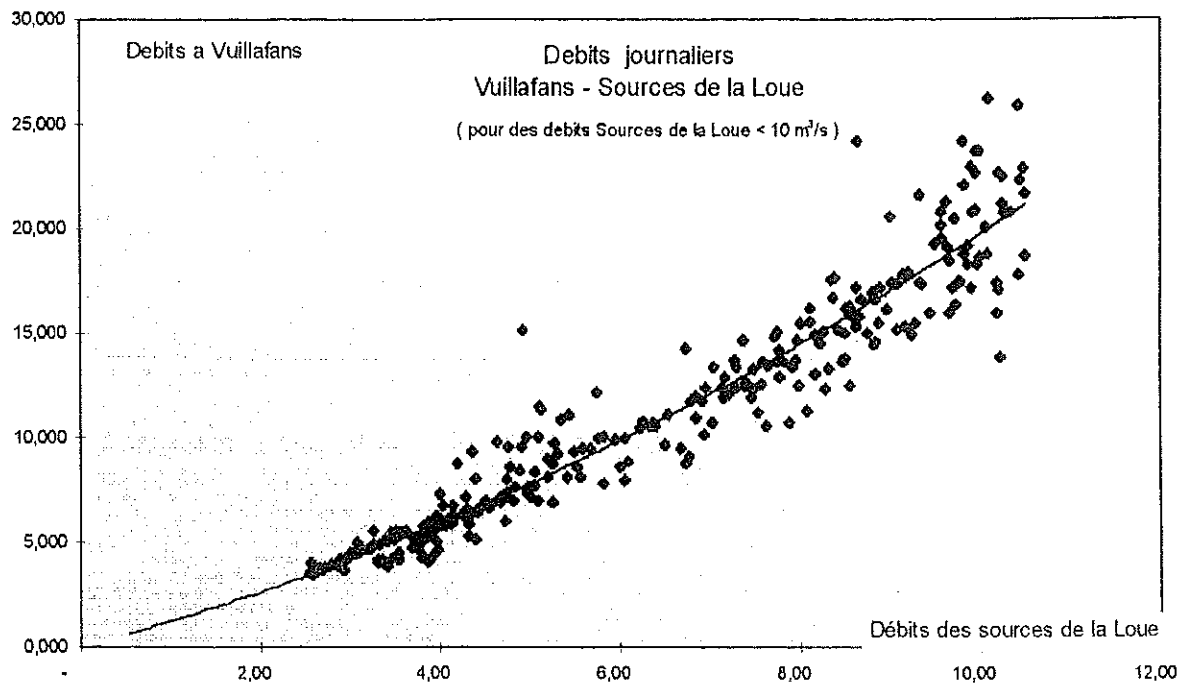


Figure 3.6

Pour un étiage aux sources de 2 m<sup>3</sup>/s qui semble le minimum observé, le débit à Vuillafans sera de 3 m<sup>3</sup>/s, ce qui confirme l'approche précédente par les débits cumulés.

### 3-4 - COURBES DE DECRUE ET TARISSEMENT

#### ■ Principe (A. MANGIN 1970)

La partie décroissante d'un hydrogramme peut être décomposée en deux :

- La décrue sur laquelle influent toujours les eaux d'infiltration.
- Le tarissement pendant lequel seules les eaux du réservoir karstique participent au débit de l'exutoire.

Soient :

Q le débit de l'exutoire

Q<sub>r</sub> le débit imputable aux eaux de la réserve

q le débit imputable aux eaux d'infiltration

On a pendant la décrue :

$$Q = Q_r + q$$

et pendant le tarissement :

$$Q = Q_r$$

Sous une forme dynamique, le débit à l'exutoire peut être considéré comme la somme de deux fonctions :

$$Q = \phi(t) + \psi(t)$$

avec  $\phi(t)$  = participation de la réserve à l'écoulement

et  $\psi(t)$  = participation de l'infiltration à cet écoulement.

En 1905, MAILLET propose une formule de décrue des cours d'eau qui correspond bien au tarissement dans le karst :

$$\phi(t) = Q_{r_0} \cdot e^{-\alpha t}$$

où  $\alpha$  est le coefficient de tarissement

et t, le temps en jours.

Cette exponentielle  $\phi(t)$ , une fois ajustée, il est possible de tracer la fonction  $\psi(t)$  point par point pour chaque hydrogramme.

A. MANGIN a montré que la fonction homographique rendait le mieux compte de la courbe de décrue ainsi obtenue :

$$\Psi(t) = \frac{q_0 - \eta t}{1 + \varepsilon t}$$

avec  $\eta$  = coefficient de durée ou de vitesse d'infiltration

$\varepsilon$  = coefficient d'hétérogénéité d'écoulement.

L'équation générale d'un hydrogramme de décrue et de tarissement peut donc s'écrire :

$$Q = Q_{r_0} \cdot e^{-\alpha t} + \frac{q_0 - \eta t}{1 + \varepsilon t}$$



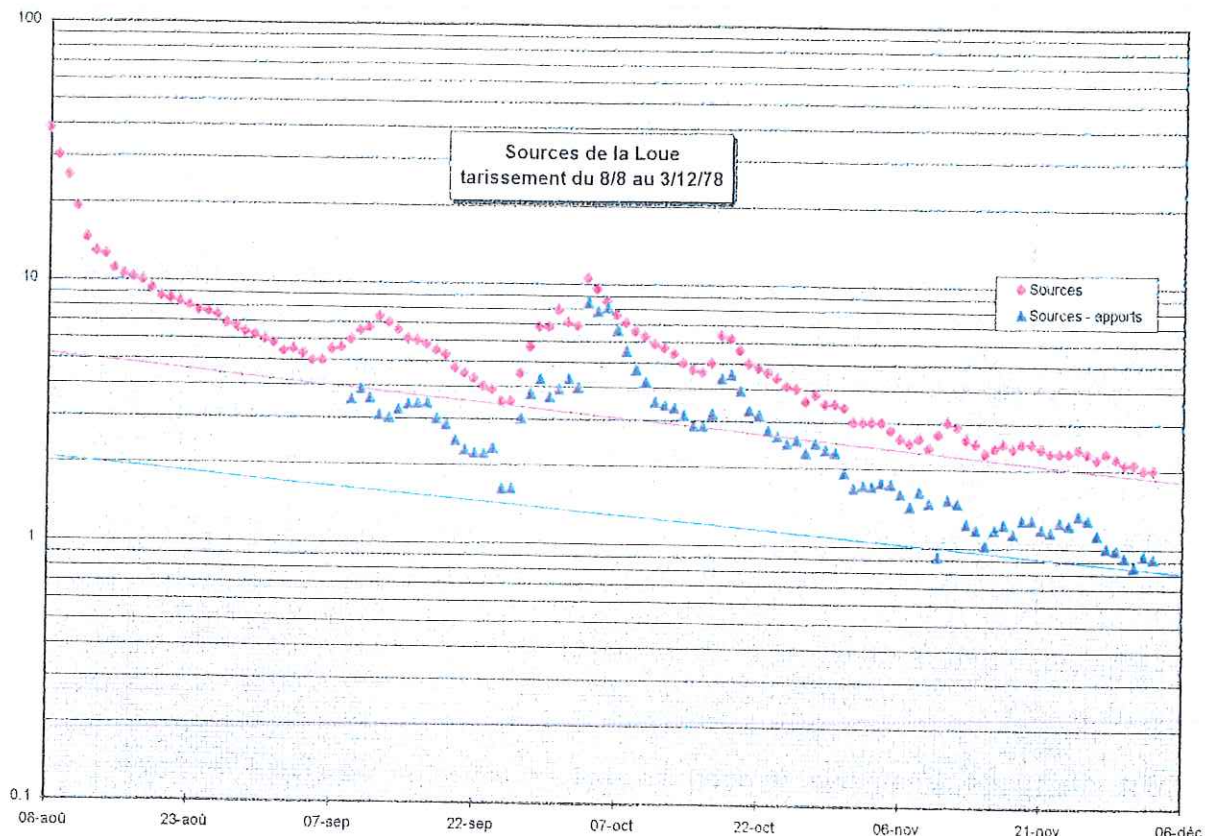


figure 3.7 (a)

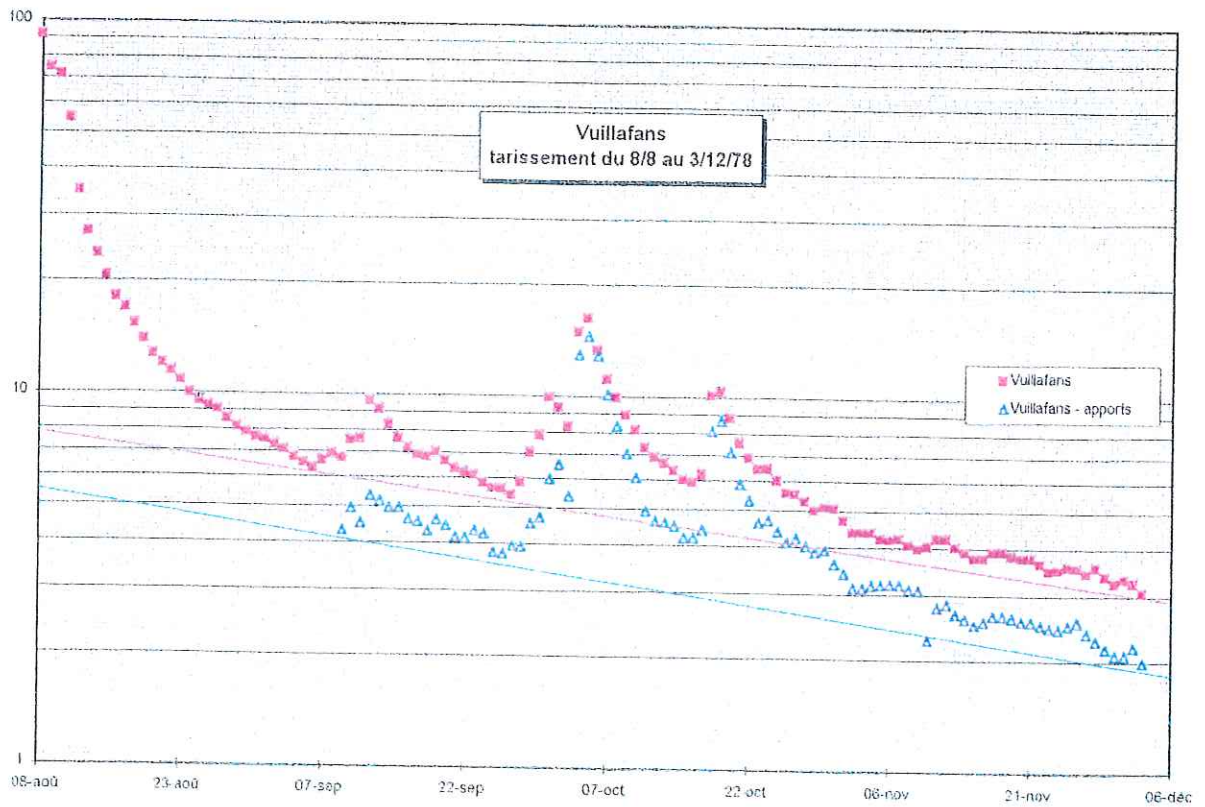


figure 3.7 (b)

### ■ Aspect pratique

L'hydrogramme de la période choisie est reporté en échelle semi-logarithmique à partir du sommet de la dernière crue importante.

On trace la droite représentative de l'exponentielle du tarissement dont le coefficient  $\alpha$  s'écrit :

$$\alpha = \frac{\text{Log}Qr1 - \text{Log}Qr2}{0,4343(t2 - t1)}$$

Graphiquement on détermine  $Q_0$  (débit imputable à la réserve lors de la pointe de crue).

Par le calcul, on détermine le volume d'eau du karst noyé en mouvement, dont la dynamique détermine les variations de débit à l'exutoire.

$$V_{do} = \frac{Q_0}{\alpha} \times 86400$$

Trois épisodes ont été retenus sur les stations de Vuillafans et des Sources de la Loue avec estimation des apports des débits du Doubs durant ces périodes de tarissement.

#### EPISODE DU 08/08 AU 03/12/78 (figure 3.7)

Vuillafans	Source de la Loue
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pic de crue 92 m<sup>3</sup>/s le 08/08</li> <li>• Tarissement débutant le 06/09</li> <li>• Se terminant le 03/12 T = 87 jours</li> <li>• Le débit décroît de 6,4 à 3,08 m<sup>3</sup>/s malgré une crue le 04/10 : 15 m<sup>3</sup>/s</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pic de crue 38,4 m<sup>3</sup>/s le 08/08</li> <li>• Tarissement débutant le 25/09</li> <li>• Se terminant le 03/12 T = 69 jours</li> <li>• Le débit décroît de 3,5 à 2 m<sup>3</sup>/s malgré une crue le 04/10 supérieure à 10 m<sup>3</sup>/s</li> </ul>
$\alpha = 0,019$	$\alpha = 0,0186$
$V_{do} = 35,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	$V_{do} = 23 \cdot 10^6 \text{ m}^3$

- Les pentes des droites sont identiques. Sur une durée de tarissement longue, le volume dynamique du bassin karstique entre la Source et Vuillafans s'accroît d'un tiers.

Vuillafans - Pertes du Doubs	Source Loue seule sans apport du Doubs
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tarissement débutant le 09/09</li> <li>• Se terminant le 03/12 T = 84 jours</li> <li>• Le débit décroît de 4,32 à 1,98 m<sup>3</sup>/s</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tarissement débutant le 25/09</li> <li>• Se terminant le 03/12 T = 69 jours</li> <li>• Le débit décroît de 1,61 à 0,906 m<sup>3</sup>/s</li> </ul>
$\alpha = 0,021$	$\alpha = 0,019$
$V_{do} = 23,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	$V_{do} = 10,9 \cdot 10^6 \text{ m}^3$

- La station de Ville du Pont ne fonctionnant qu'en septembre 1978, les apports du Doubs n'ont pu être mis en évidence avant cette période.
- La contribution des pertes du Doubs au volume dynamique potentiel est de  $12 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ .

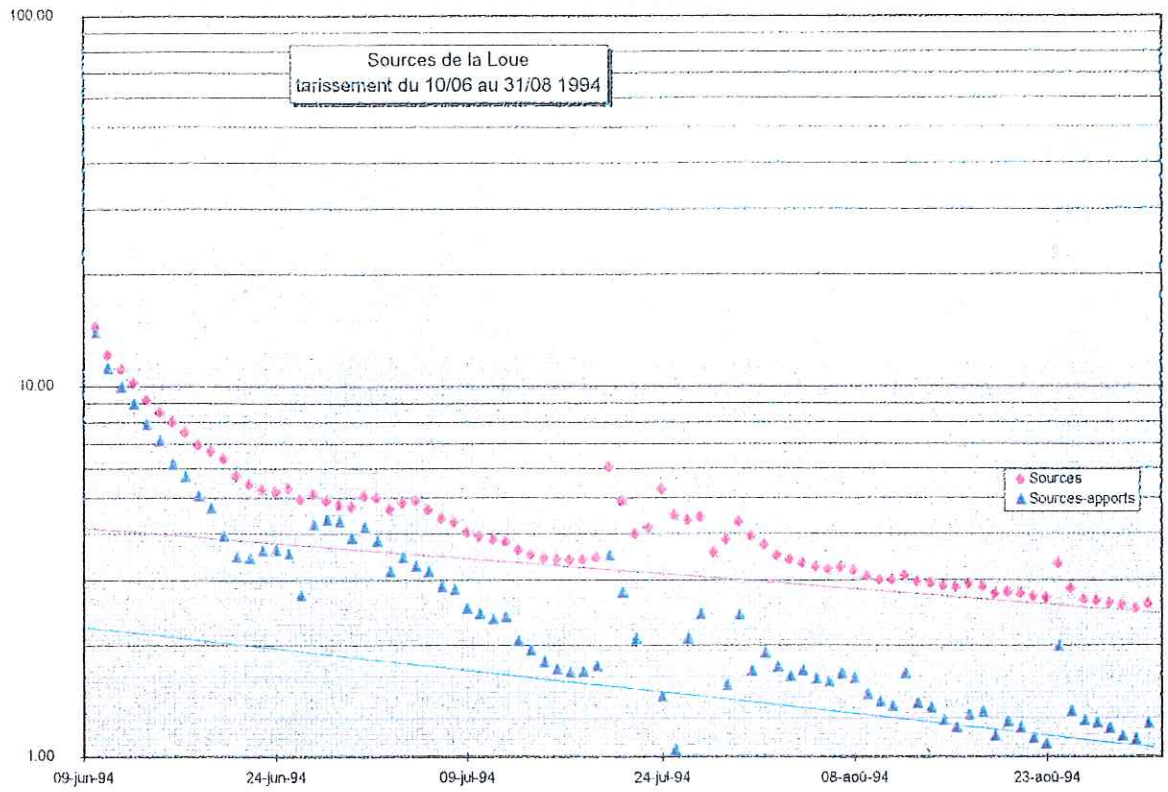


figure 3.8 (a)

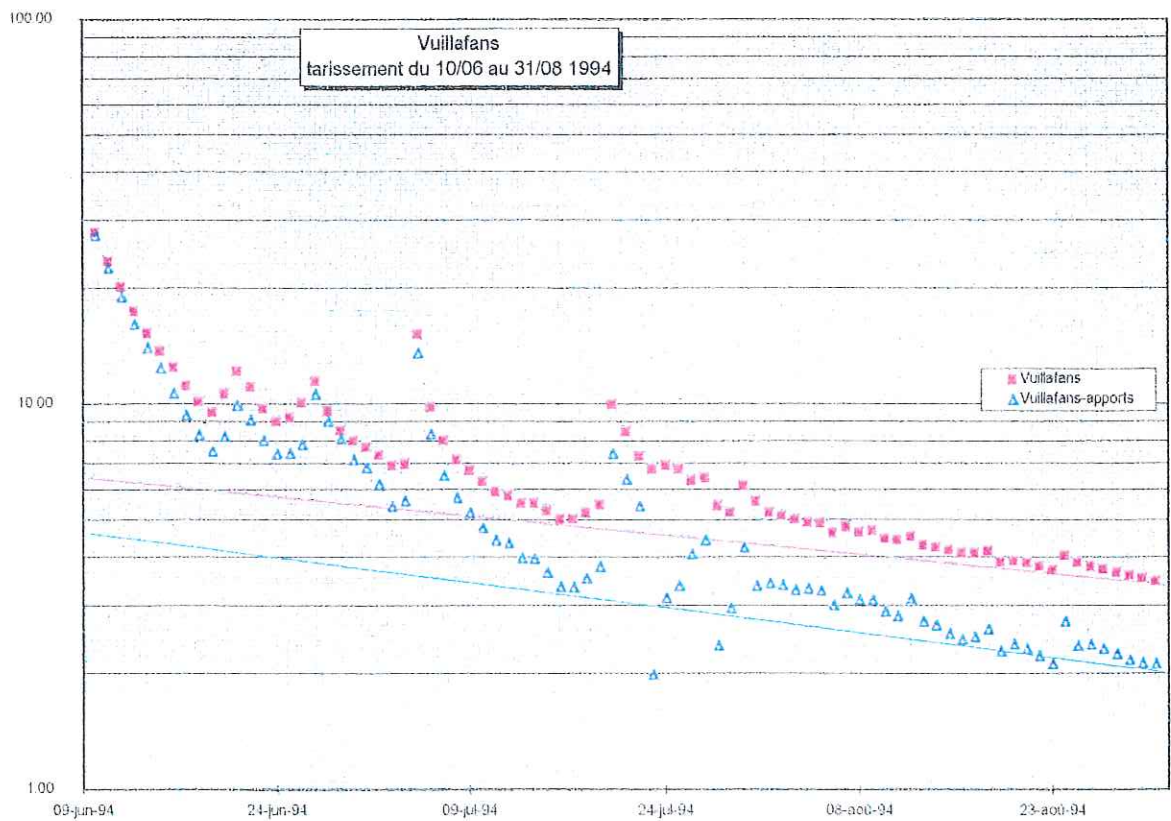


figure 3.8 (b)

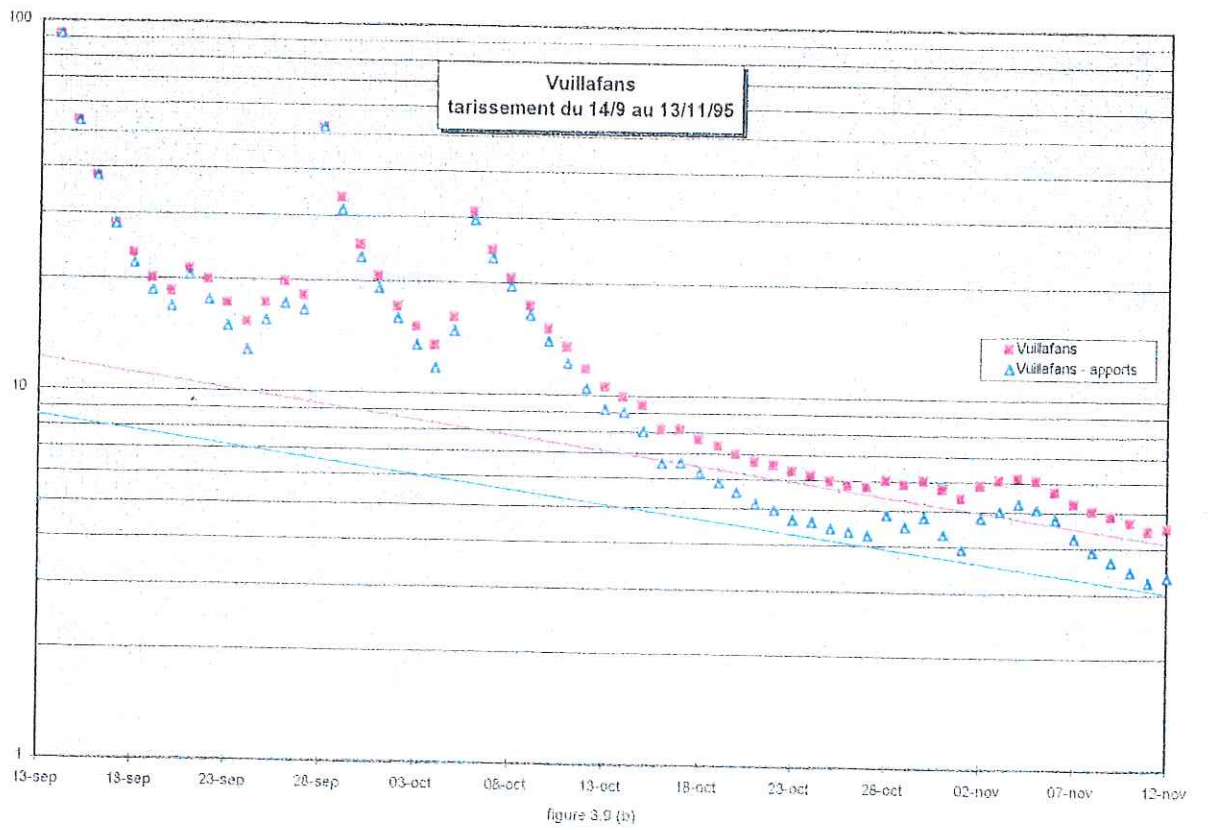
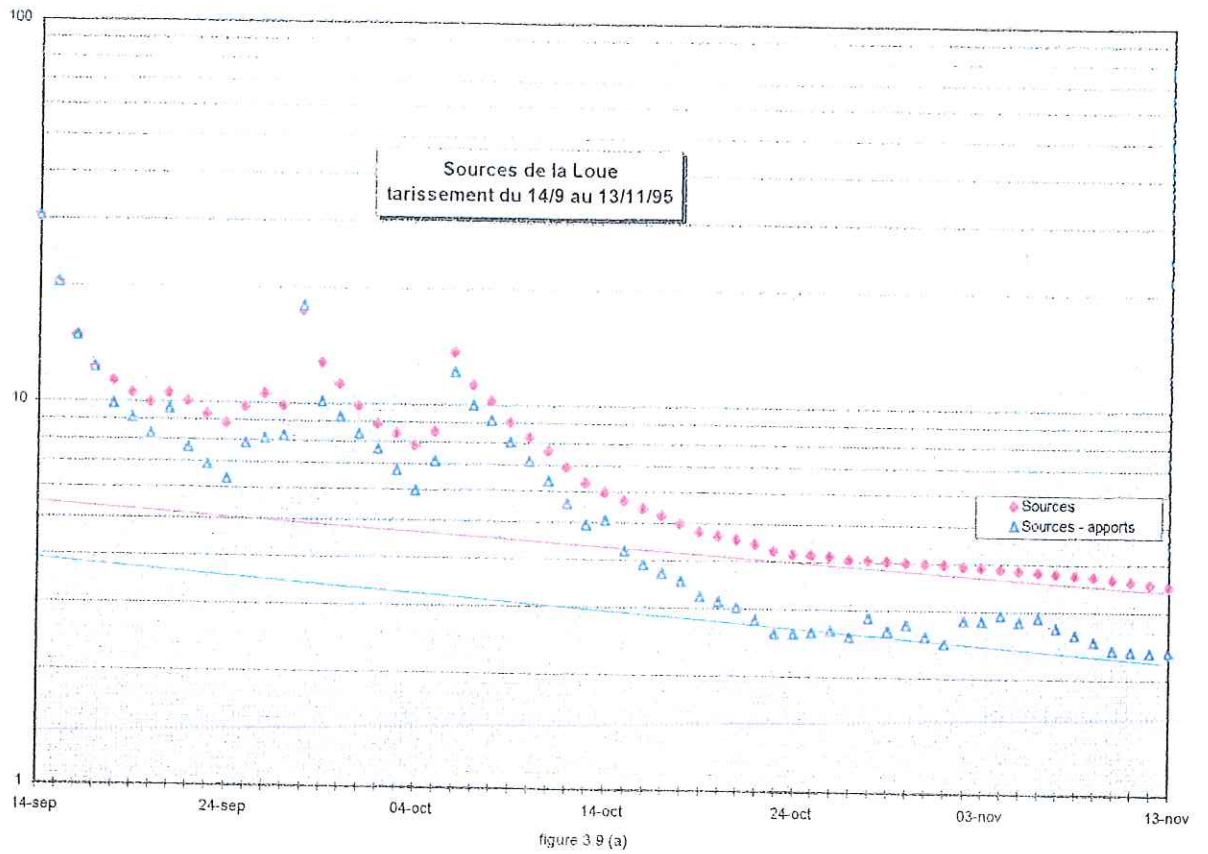
**EPISODE DU 09/06 AU 30/08/94 (figure 3.8)**

Vuillafans	Source de la Loue
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pic de crue 35,7 m<sup>3</sup>/s le 09/06</li> <li>• Tarissement débutant le 16/07</li> <li>• Se terminant le 31/08</li> <li>    T = 46 jours</li> <li>• Le débit décroît de 5,05 à 3,48 m<sup>3</sup>/s</li> </ul> <p><math>\alpha = 0,018</math></p> <p>Vdo = 32 . 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pic de crue 15,6 m<sup>3</sup>/s le 10/06</li> <li>• Tarissement débutant le 17/07</li> <li>• Se terminant le 30/08</li> <li>    T = 44 jours</li> <li>• Le débit décroît de 3,39 à 2,51 m<sup>3</sup>/s</li> </ul> <p><math>\alpha = 0,0157</math></p> <p>Vdo = 23,7 . 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup></p>

Vuillafans - Perte du Doubs	Source Loue seule sans apport du Doubs
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pic de crue 35,1 m<sup>3</sup>/s le 09/06</li> <li>• Tarissement débutant le 17/07</li> <li>• Se terminant le 31/08</li> <li>    T = 45 jours</li> <li>• Le débit décroît de 3,34 à 2,11 m<sup>3</sup>/s</li> </ul> <p><math>\alpha = 0,0232</math></p> <p>Vdo = 18,2 . 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pic de crue 15,6 m<sup>3</sup>/s le 10/06</li> <li>• Tarissement débutant le 17/07</li> <li>• Se terminant le 30/08</li> <li>    T = 44 jours</li> <li>• Le débit décroît de 1,80 à 1,20 m<sup>3</sup>/s</li> </ul> <p><math>\alpha = 0,021</math></p> <p>Vdo = 9,5 . 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup></p>

- Sur un tarissement de plus de 44 jours, la pente des droites est assez voisine pour les couples Loue Source et Vuillafans toutes deux sans apports du Doubs (> 0,020).
- L'accroissement du volume dynamique à Vuillafans est proche de l'épisode précédent (1/3).
- Le volume lié aux apports du Doubs supérieur est de 14 . 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>.





**EPISODE DU 14/09 AU 13/11/95 (figure 3.9)**

<b>Vuillafans</b>	<b>Source de la Loue</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pic de crue 92 m<sup>3</sup>/s le 14/09</li> <li>• Tarpissement débutant le 25/10</li> <li>• Se terminant le 11/11</li> <li style="padding-left: 20px;">T = 17 jours</li> <li>• Le débit décroît de 6,00 à 4,48 m<sup>3</sup>/s</li> </ul> <p><math>\alpha = 0,0395</math></p> <p><math>V_{do} = 25,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3</math></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pic de crue 30,5 m<sup>3</sup>/s le 14/09</li> <li>• Tarpissement débutant le 23/10</li> <li>• Se terminant le 13/11</li> <li style="padding-left: 20px;">T = 21 jours</li> <li>• Le débit décroît de 4,25 à 3,50 m<sup>3</sup>/s</li> </ul> <p><math>\alpha = 0,0213</math></p> <p><math>V_{do} = 22,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3</math></p>

<b>Vuillafans - Perte du Doubs</b>	<b>Source Loue seule sans apport du Doubs</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pic de crue 92 m<sup>3</sup>/s le 14/09</li> <li>• Tarpissement débutant le 25/10</li> <li>• Se terminant le 11/11</li> <li style="padding-left: 20px;">T = 17 jours</li> <li>• Le débit décroît de 4,45 à 3,24 m<sup>3</sup>/s</li> </ul> <p><math>\alpha = 0,043</math></p> <p><math>V_{do} = 16,9 \cdot 10^6 \text{ m}^3</math></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pic de crue 30,5 m<sup>3</sup>/s le 14/09</li> <li>• Tarpissement débutant le 21/10</li> <li>• Se terminant le 13/11</li> <li style="padding-left: 20px;">T = 23 jours</li> <li>• Le débit décroît de 3,01 à 2,35 m<sup>3</sup>/s</li> </ul> <p><math>\alpha = 0,0247</math></p> <p><math>V_{do} = 13 \cdot 10^6 \text{ m}^3</math></p>

➤ La contribution des pertes du Doubs au volume dynamique potentiel est de  $9 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ .

L'interprétation de cet épisode est moins évident : il semblerait que la décrue à Vuillafans soit anormalement rapide (coefficient supérieur à 0,04).

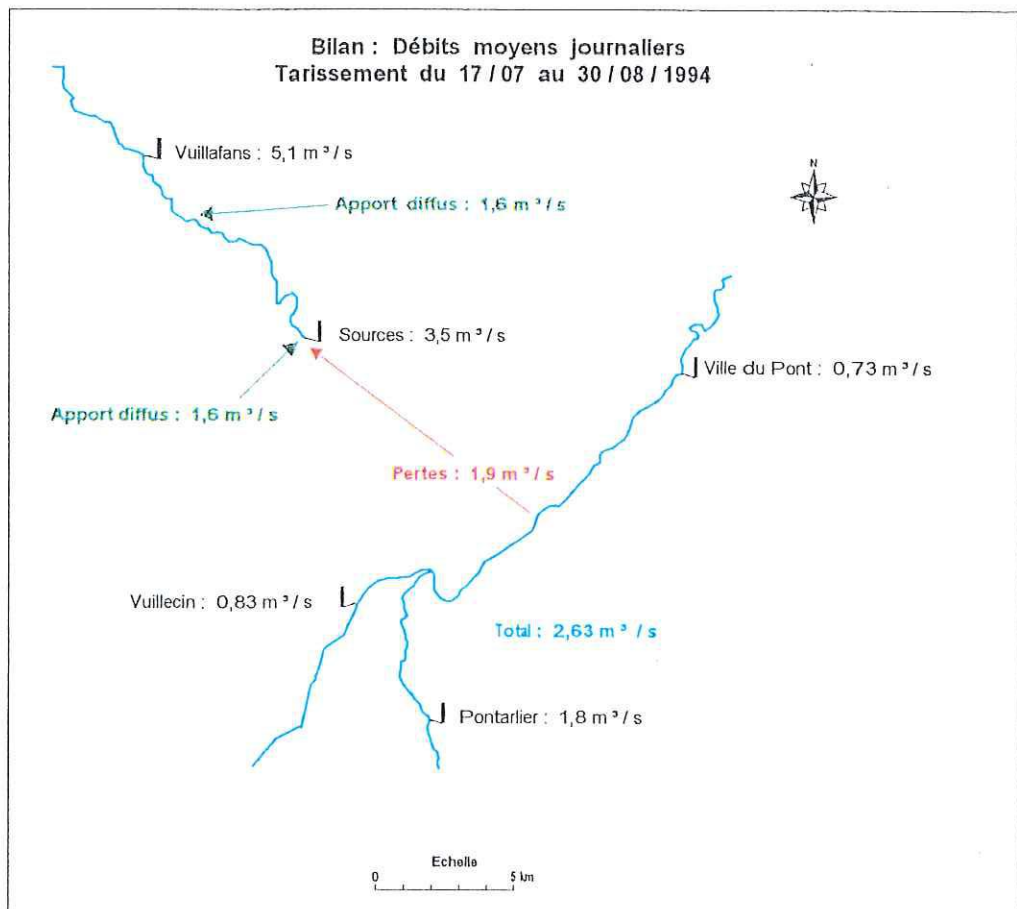
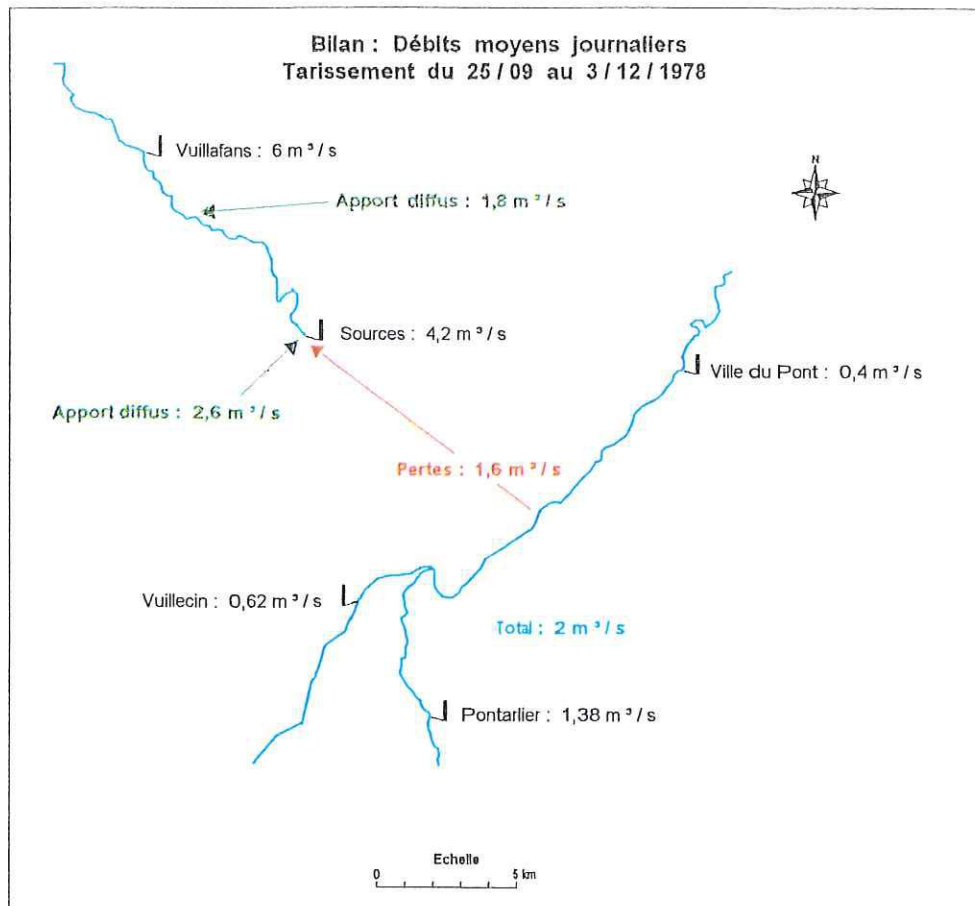


Figure 3.11

### 3-5 - BILAN D'ETIAGE

Les périodes étudiées au paragraphe précédent permettent d'affecter un débit moyen sur chaque période d'étiage (tarissement). Les figures 3.10 et 3.11 résument les principales informations moyennes sur les étiages observés. Pour les périodes d'étiage, l'apport diffus résulte essentiellement de la vidange des réservoirs karstiques. Ces graphiques montrent qu'en moyenne les apports d'étiage dus à la vidange du karst sont le plus souvent au moins équivalents aux apports dus aux pertes du Doubs.

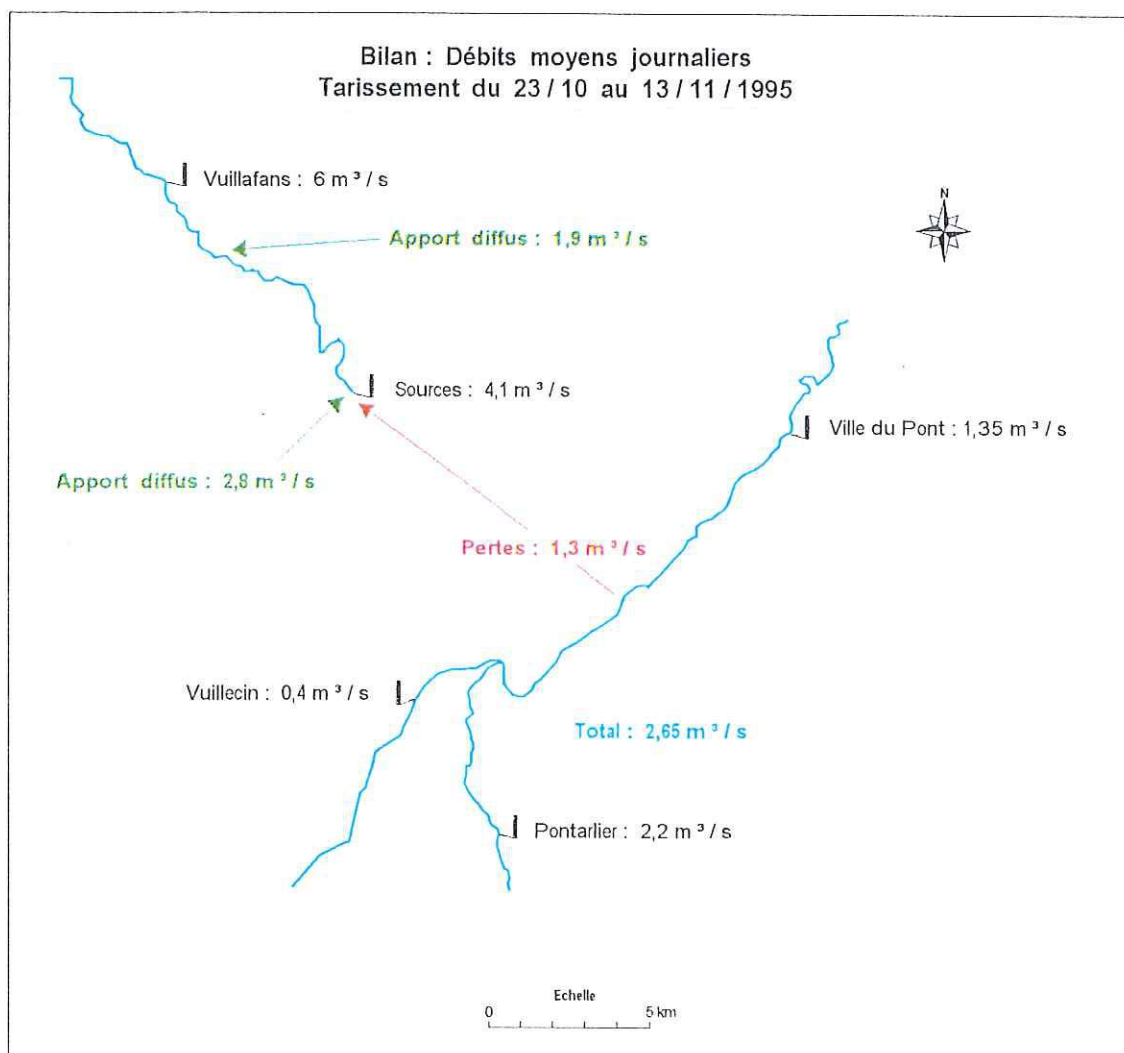


Figure 3.10



### 3-6 - ESSAI DE BILAN GLOBAL

En prenant les écoulements annuels aux différentes stations limnigraphiques installées sur le Doubs supérieur et la Loue (figure 3.12), on constate que les volumes mesurés à Ville-du-Pont sont inférieurs à la somme des volumes des stations de Pontarlier et de Vuillecin sur le Drugeon exceptées les années 86-87-92-93-94 (87-92-94 étant des années humides).

La même constatation, en basses eaux a pu être faite entre les stations d'Oye-et-Pallet et Pontarlier, ce qui étendrait la zone active des pertes en amont de Pontarlier - Les Rosiers.

Écoulements chronologiques  
en millions de m<sup>3</sup>

STATIONS	B.V. TOPOGRAPHIQUE	1978	1979	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	B.V. HYDROLOGIQUE 1984-1994
Mouthe	30			55	47	53	69	69		56	49	77	62	67	60
Labergement	170	168	170	132	113	134	172	159	78	134	119	146	136	143	133
Oye-et-Pallet	241			215	170	218	280	262	132	189	186	240	218	236	213
Pontarlier	350	274	287	258	211	233	306	281	145	217	202	265	230	258	237
Doubs	396						347	306	139	233	224	299	268	271	
Vuillecin	191	106	117	95	68	90	129		60	101	91	123	104	107	97
Doubs + Vuillecin							479		199	334	315	422	372	378	
Pontarlier + Vuillecin		380	404	353	279	323	435		205	318	293	388	334	365	329
Ville-du-Pont	658		375	328	256	337	479	451	177	309	281	422	359	378	343
Source Loue		368	379											332	
Vuillafans	326	735	754	662	536	640	801	814	470	615	612	760	599	723	657
Vuillafans + Ville du Pont	984		1129	990	792	977	1280	1265	647	924	893	1182	958	1101	1000

Figure 3.12

Sur la moyenne des écoulements des années 84 à 94, l'équation du bilan s'écrit :

$$Q = P - ETR \pm \Delta R$$

Q volume écoulé aux exutoires

P = Précipitations

ETR = enveloppe maximale de l'évapotranspiration

$\Delta R$  = variation des réserves

# BASSIN DOUBS - LOUE

Volumes d'eau écoulés en millions de m<sup>3</sup>  
pour une année moyenne

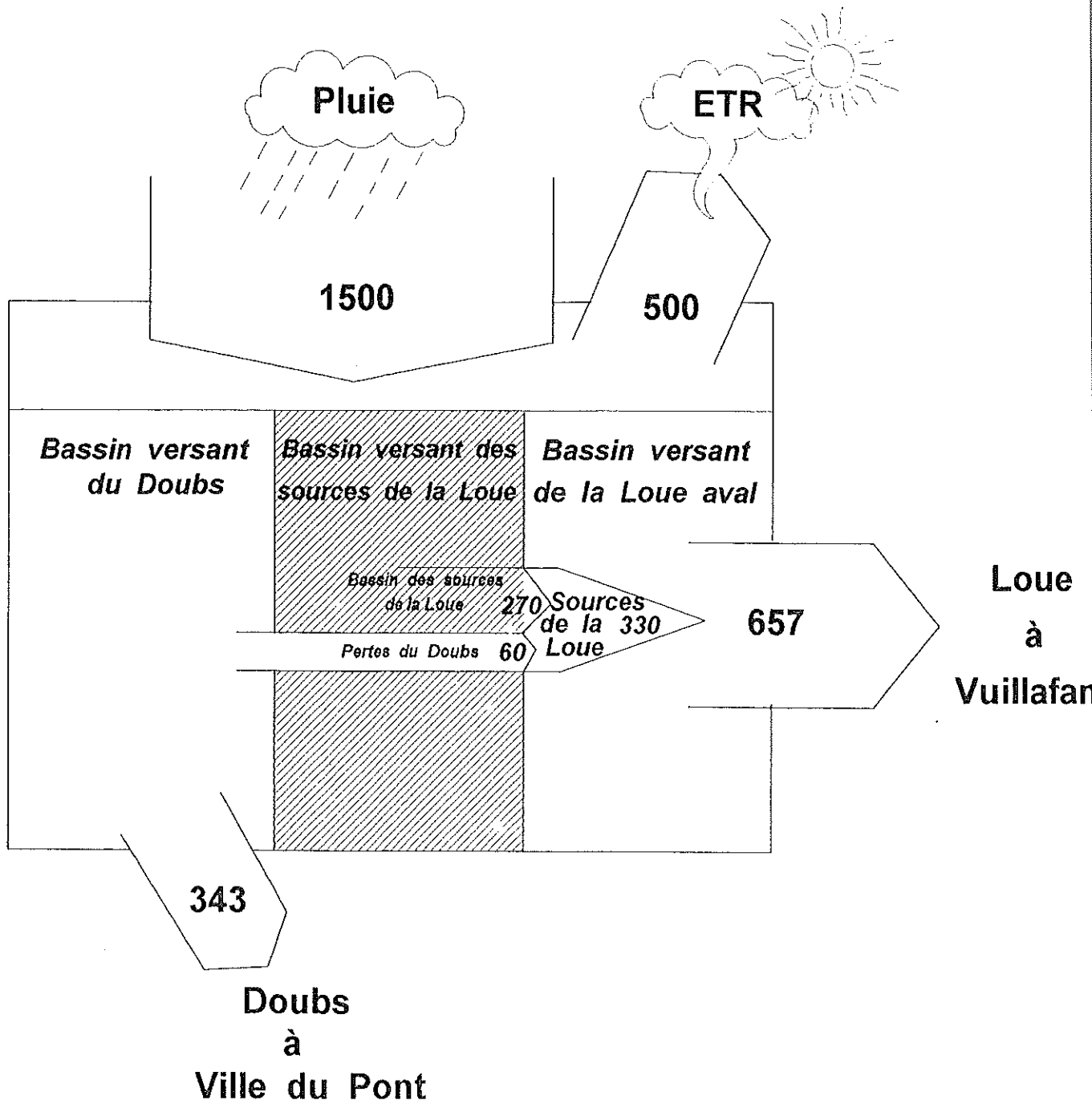


Figure 3.14

Sur l'ensemble du bassin Doubs Loue (Ville-du-Pont + Vuillafans) d'une superficie proche de 1000 km<sup>2</sup>

avec P = 1500 mm (données Météo France 1984 à 1994)

ETR = 500 mm

soit une disponibilité de 1000 mm à l'écoulement ou 1000 millions de m<sup>3</sup>.

En reportant graphiquement en ordonnées les écoulements et en abscisses les valeurs de bassins versants, on peut ajuster la valeur « hydraulique moyenne » des bassins versants figure 3.13).

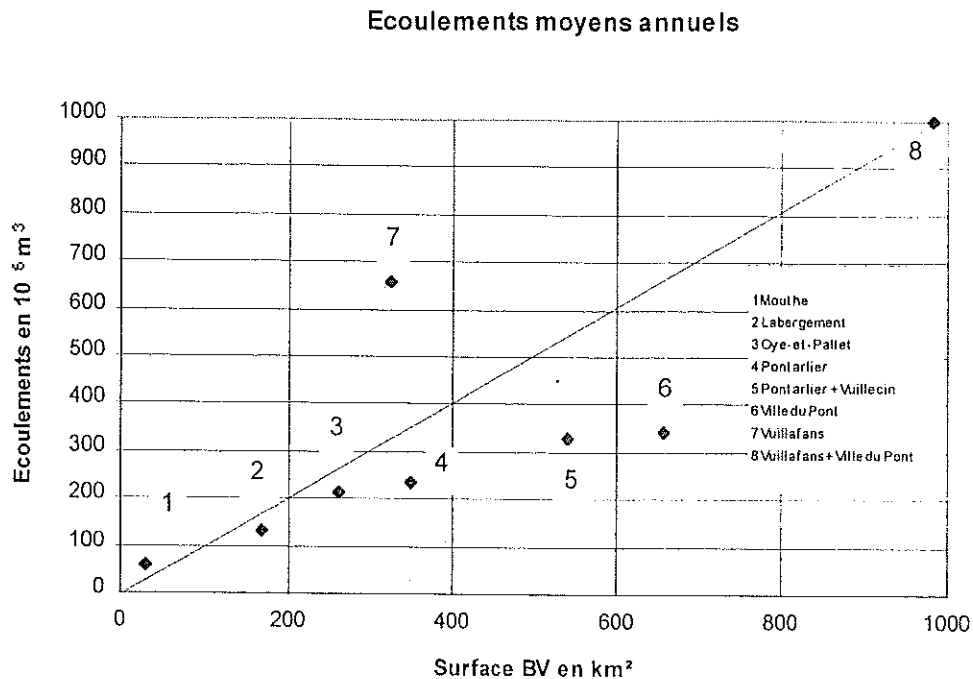


Figure 3.13

Les écoulements mesurés aux Sources de la Loue, calculés à partir des données 93-95, correspondent à une surface de B.V. d'environ 300 km<sup>2</sup>.

Le schéma de la figure 3.14 synthétise le bilan moyen interannuel sur le bassin versant Doubs - Loue.

Conformément aux résultats ci-dessus, le bassin a été découpé en trois parties :

- le bassin réel du haut Doubs avec les écoulements de sortie à Ville du Pont ;
- le bassin des sources de la Loue avec les apports supplémentaires dûs aux pertes du Doubs ;
- le bassin à Vuillafans ne comprenant pas le bassin propre des sources.

IV.  
CONCLUSION GENERALE SUR L'HYDROLOGIE

La complexité du phénomène des pertes du Doubs a nécessité une approche multiple basée sur un parc de matériel enregistreur important notamment au niveau des sources de la Loue. Les principales conclusions après deux années de mesure aux sources et en s'appuyant sur les données anciennes permet d'établir un certain nombre d'assertions.

➤ Les pertes du Doubs se produisent sur un linéaire important, les premières apparaissent probablement dès la sortie du Lac de Saint Point ; des pertes apparaissent également sur le bassin du Drugeon sans que l'on puisse déterminer leur destination. Par ailleurs, de nombreuses infiltrations se produisent directement sur le bassin versant.

➤ Les pertes les plus importantes se produisent sur le parcours Pontarlier - Ville-du-Pont et notamment entre Arçon et Maison-du-Bois. L'analyse effectuée a mis en évidence :

- une constance de pertes qui semblent se maintenir, hors étiage sévère, aux environs de  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  et pour la plupart du temps inférieures à  $3 \text{ m}^3/\text{s}$  ;
- en étiage sévère (débit amont inférieur à  $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ), les pertes peuvent être totales, le débit nul étant observé le plus souvent en aval d'Arçon ou aux environs de Maison-du-Bois. Toutefois, le comportement des pertes s'est montré variable selon les années sans que l'on puisse trouver une cause parfaitement objective.
- une saturation des pertes en hautes eaux : un supplément d'apport par le lac Saint-Point ne provoque aucune augmentation des débits aux sources de la Loue.

➤ Les débits aux sources de la Loue sont fortement soutenus par le Doubs. Toutefois l'analyse des débits propres aux sources de la Loue (débits bruts diminués des apports) montre l'existence d'une certaine réserve dynamique qui maintiendrait un débit aux sources en étiage moyen de  $1,5$  à  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  et presque toujours supérieur à  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ .

➤ Les sources de la Loue sont organisées en deux systèmes relativement distincts : source supérieure (vasque) et sources inférieures (canal + pont). La corrélation entre les deux débits aux deux sources, et les mesures physicochimiques confirment cette hypothèse. La source supérieure fournit en moyenne 70 % des débits et les sources inférieures 30 %.

➤ Les débits à Vuillafans montrent un excédent par rapport aux débits de la source pratiquement toujours supérieur à  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  (étiage sévère). En moyennes et hautes eaux, le débit à Vuillafans est environ deux fois celui des sources.

➤ Les bilans interannuels sur les écoulements montrent donc tout naturellement un hiatus entre les bassins versants topographiques et les bassins versants hydrologiques.

En étiage, le bassin versant hydrologique à Ville-du-Pont devrait ainsi être de près de moitié, alors que celui des sources devrait être doublé.

Il est toutefois nécessaire de nuancer les affirmations précédentes, d'une part en raison des difficultés expérimentales qui diminuent la précision des résultats, et d'autre part en raison de la faible durée des mesures.

En conclusion, la mise en place de dispositifs de gestion visant à une diminution modérée des pertes (de l'ordre de 200 à 500 l/s) ne semble pas devoir générer de conséquences graves sur les débits de la Loue. Compte tenu de la faible durée d'observation, on ne peut toutefois étendre ces affirmations aux conditions extrêmes. Il conviendrait de veiller à ce que de tels dispositifs restent réversibles.

# ANNEXES

# 1 - STATIONS DE MESURE



JAUGEAGES EFFECTUES VASQUE		
Dates	Hauteurs	Débits (m <sup>3</sup> /s)
30/12/93	0,615	5,110
03/02/94	0,330	0,495
12/08/94	0,500	2,850
29/09/94	0,670	5,380
27/10/94	0,425	0,869
08/02/95	0,395	0,476
24/05/95	0,440	1,280
27/09/95	0,550	3,320
08/11/95	0,280	0,046

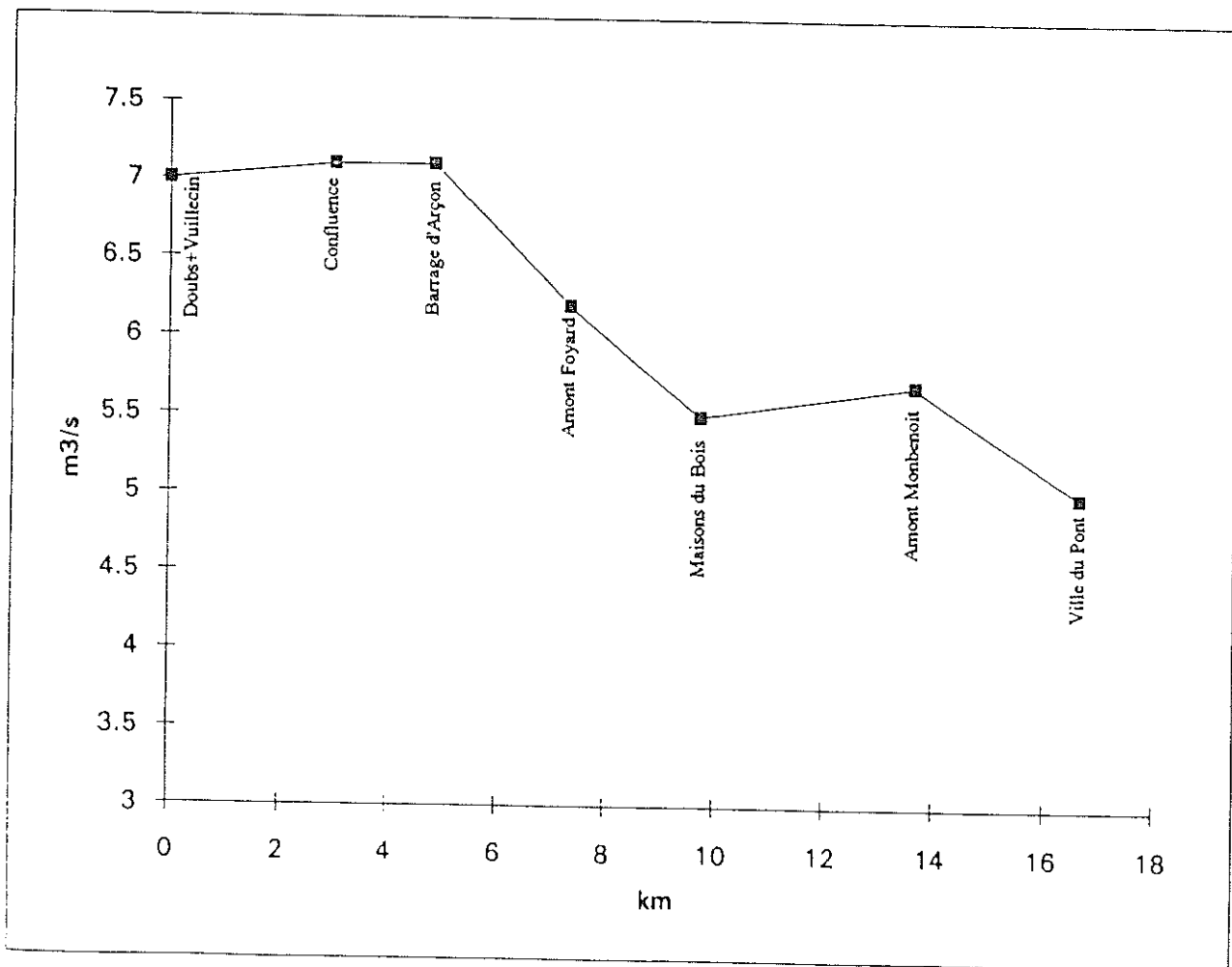
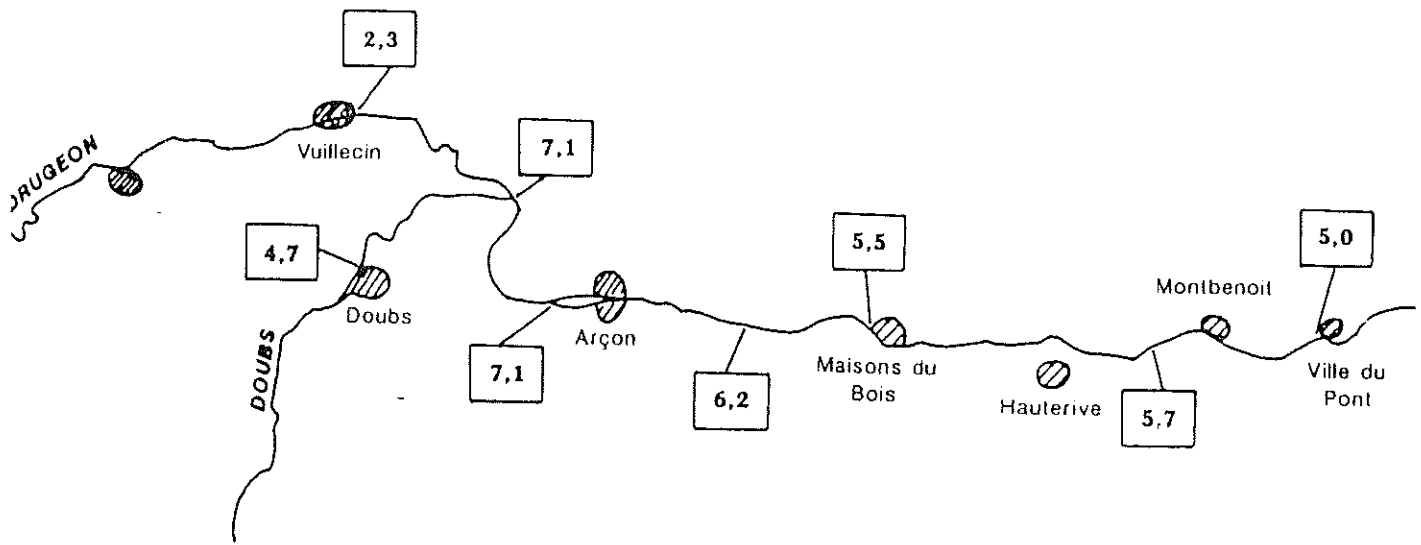
JAUGEAGES EFFECTUES CANAL		
Dates	Hauteurs	Débits (m <sup>3</sup> /s)
30/12/93	0,720	5,430
26/01/94	0,940	9,460
03/02/94	0,485	1,990
29/04/94	0,475	2,150
24/06/94	0,350	0,744
12/08/94	0,325	0,404
29/09/94	0,460	1,380
24/05/95	0,440	1,430
26/07/95	0,300	0,403
08/11/95	0,270	0,248

JAUGEAGES EFFECTUES PONT		
Dates	Hauteurs	Débits (m <sup>3</sup> /s)
30/12/93	0,375	2,430
03/02/94	0,245	0,848
29/04/94	0,250	0,912
24/06/94	0,230	0,740
12/08/94	0,215	0,579
29/09/94	0,250	0,778
27/10/94	0,295	1,160
24/05/95	0,410	0,656
26/07/95	0,190	0,393
08/11/95	0,170	0,523

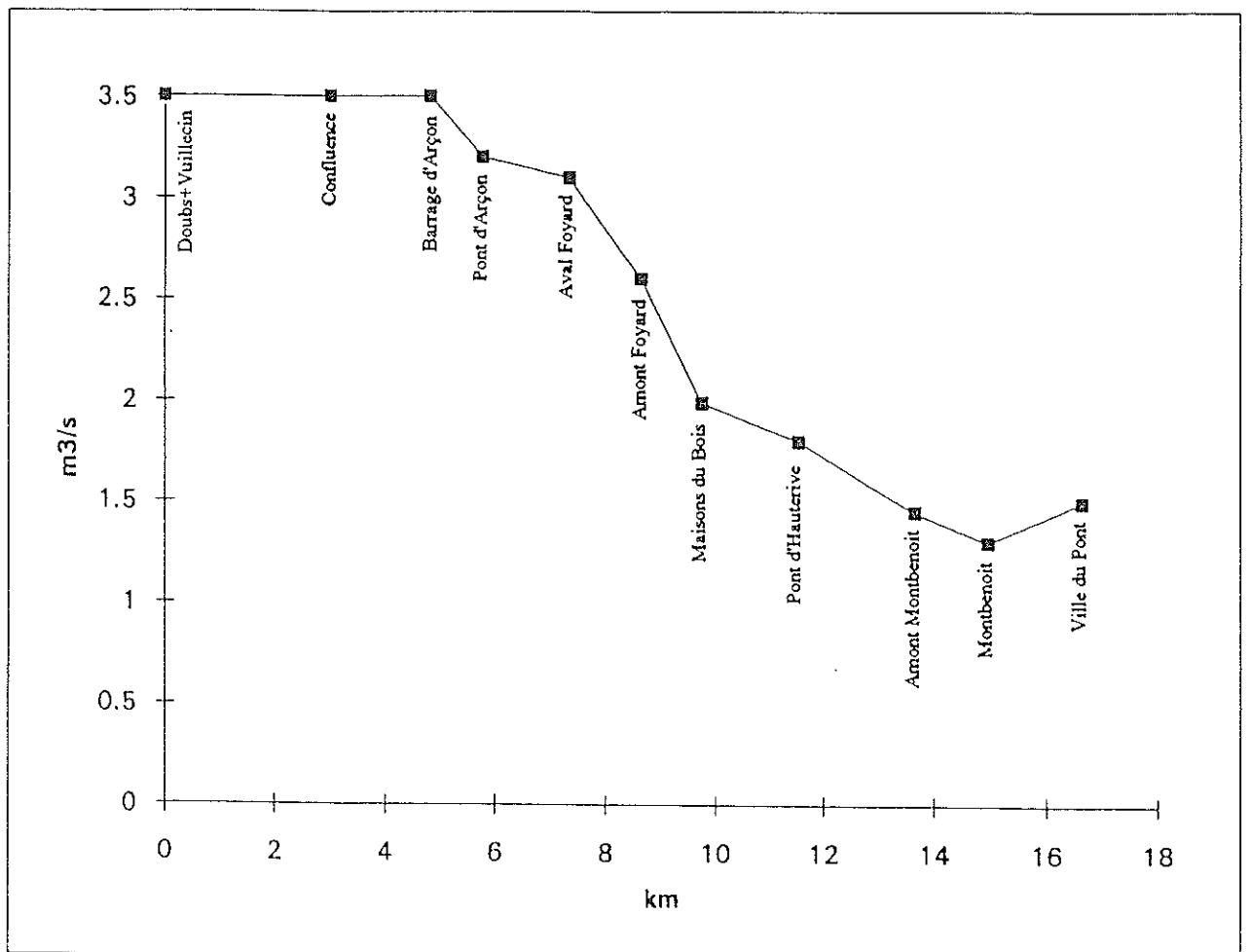
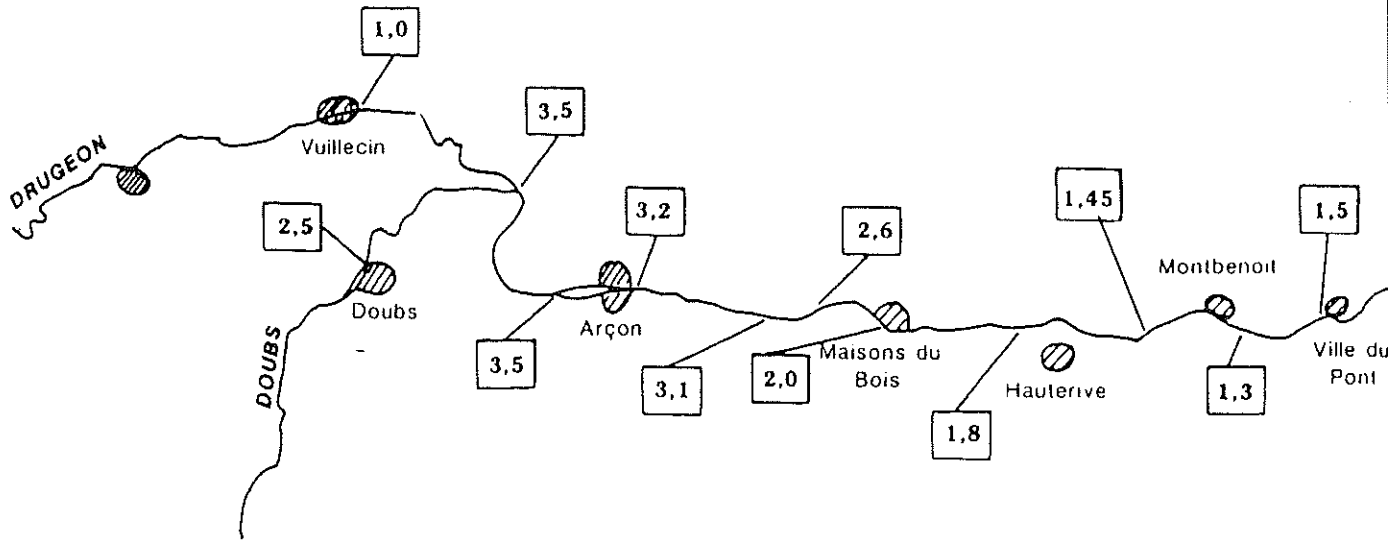
## 2 - HYDROLOGIE DU DOUBS

### 2-1 - CAMPAGNES DE JAUGEAGES

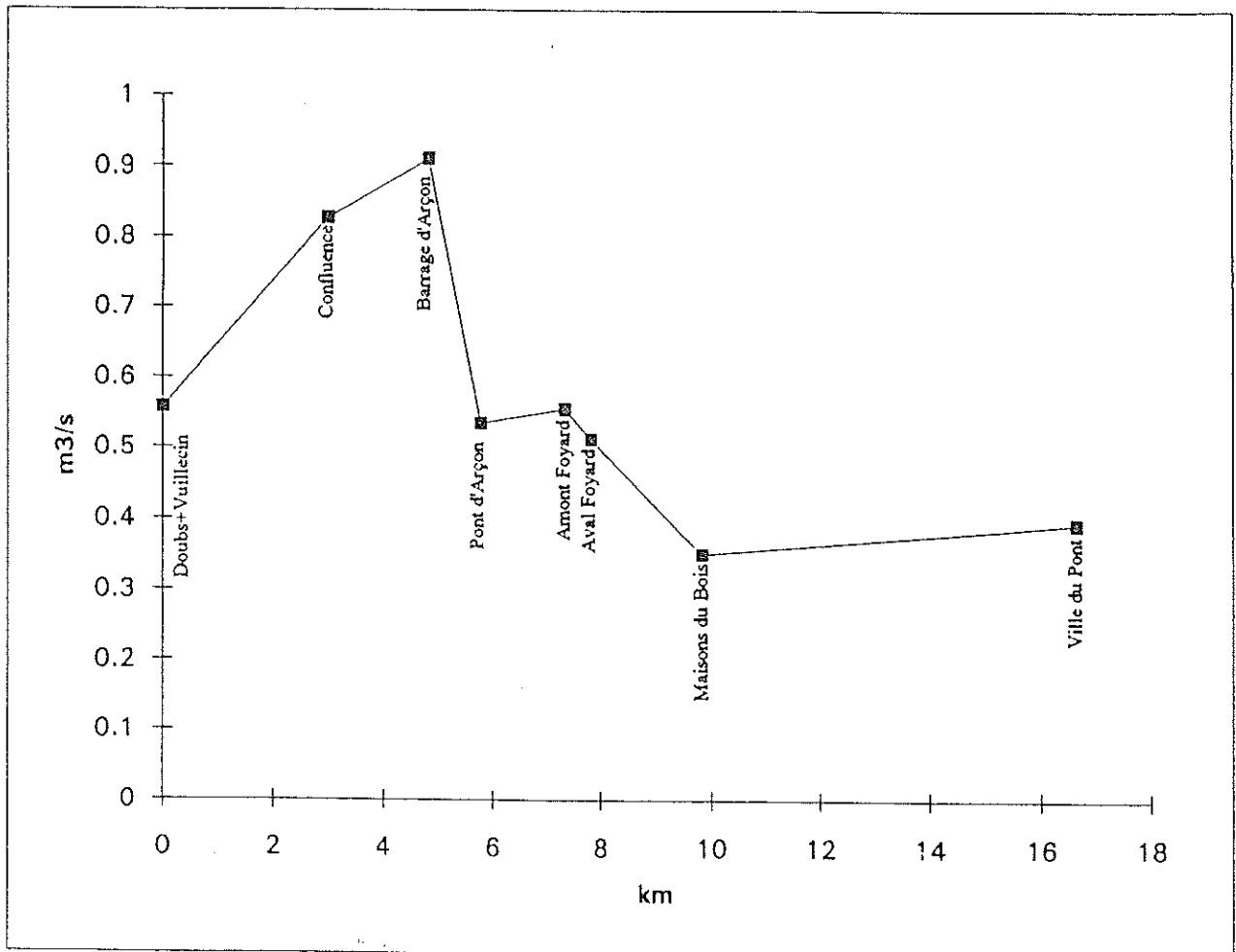
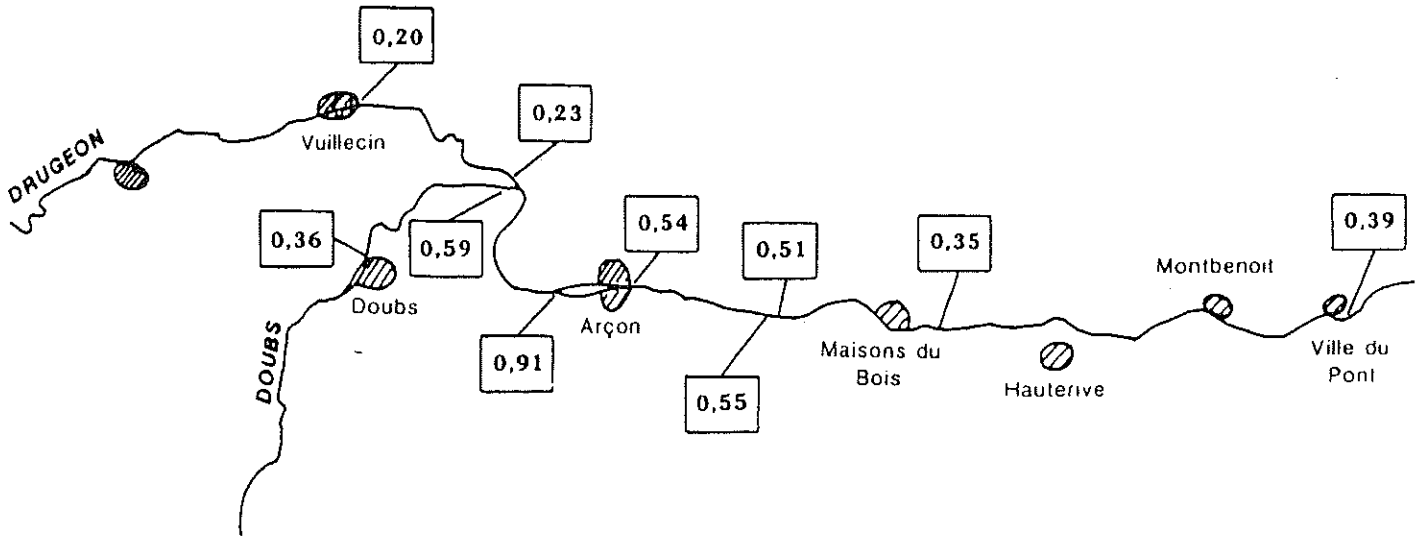
Campagne de jaugeages du  
2/11/1979



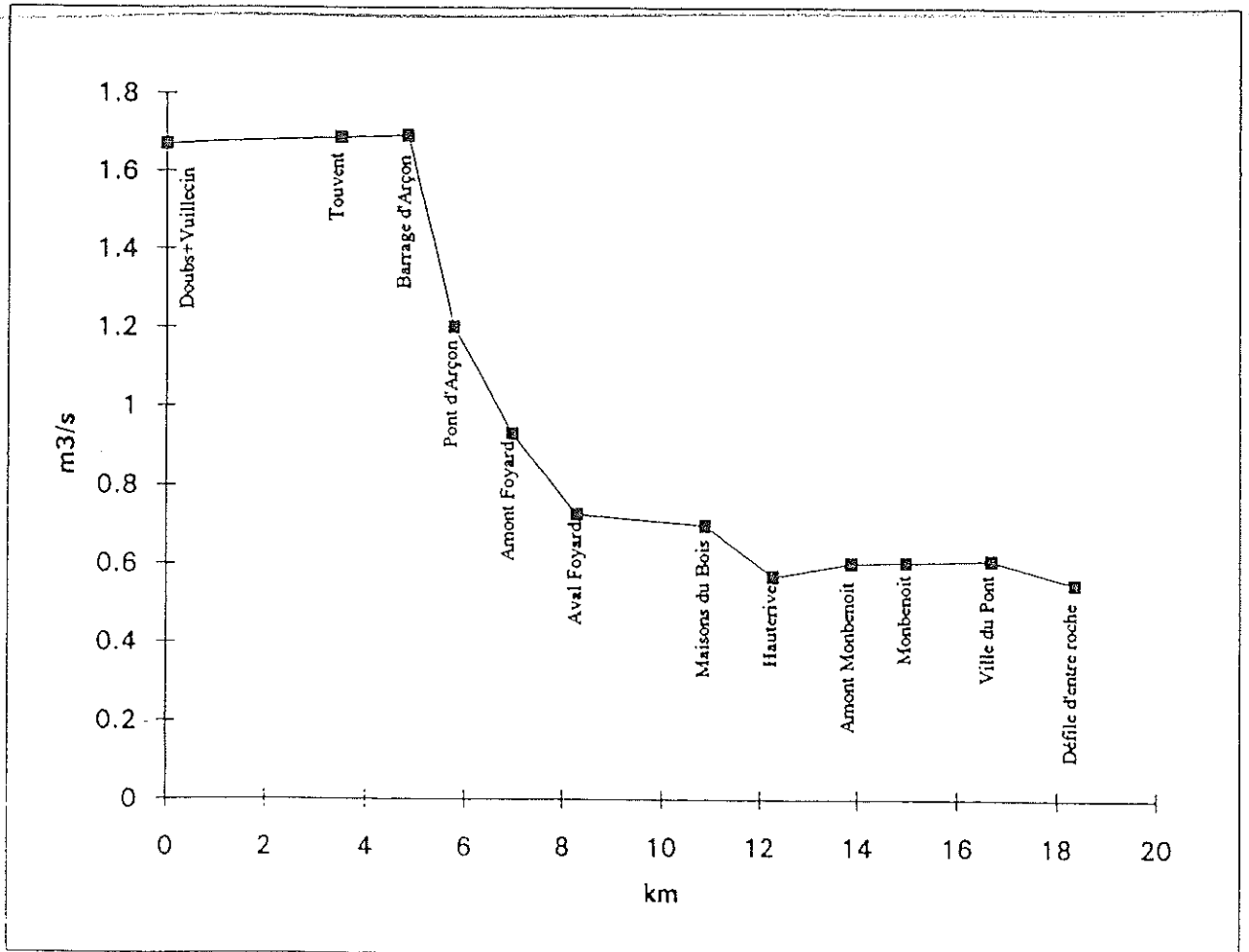
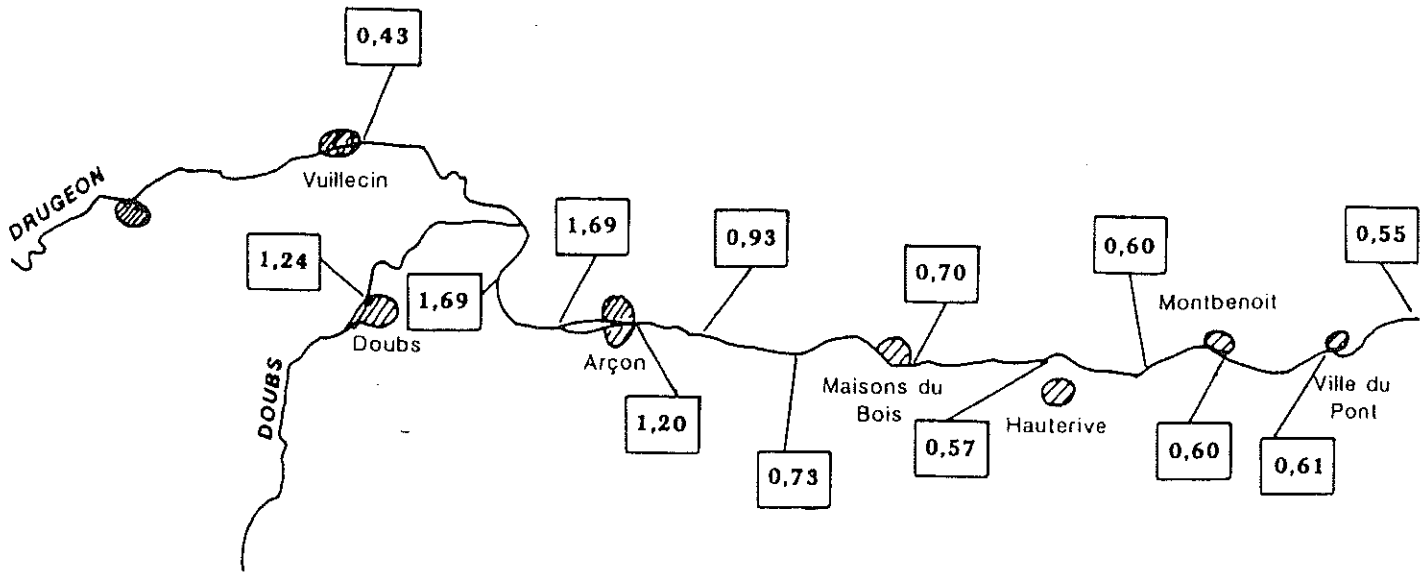
Campagne de jaugeages du  
3/12/1979



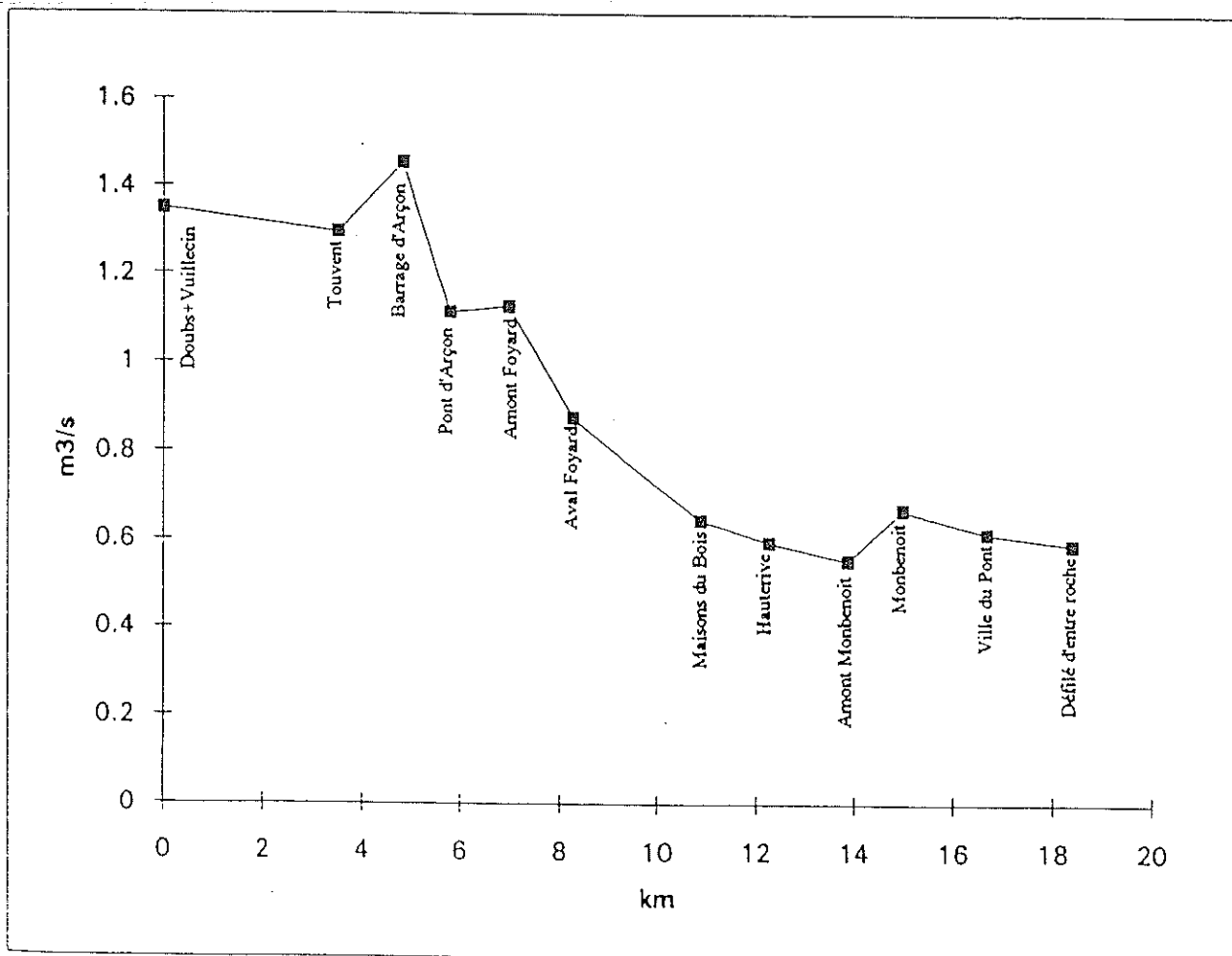
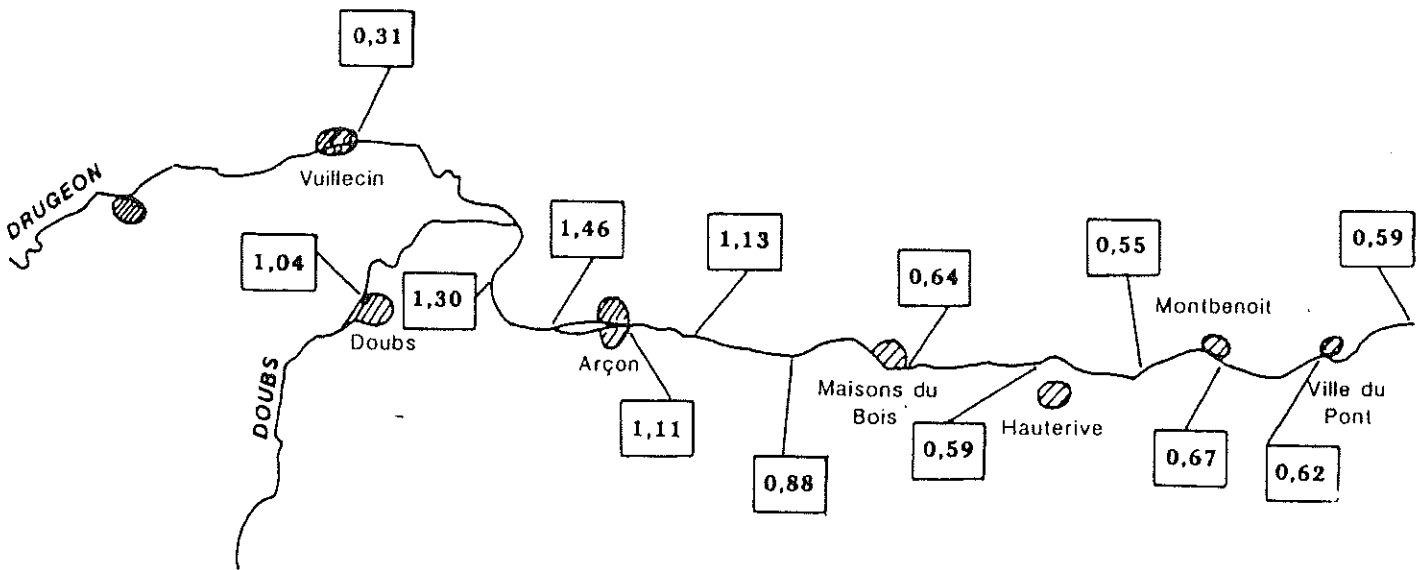
Campagne de jaugeages du  
19/10/1989



Campagne de jaugeages du  
05/08/1994



Campagne de jaugeages du  
26/08/1994



## **2 - HYDROLOGIE DU DOUBS**

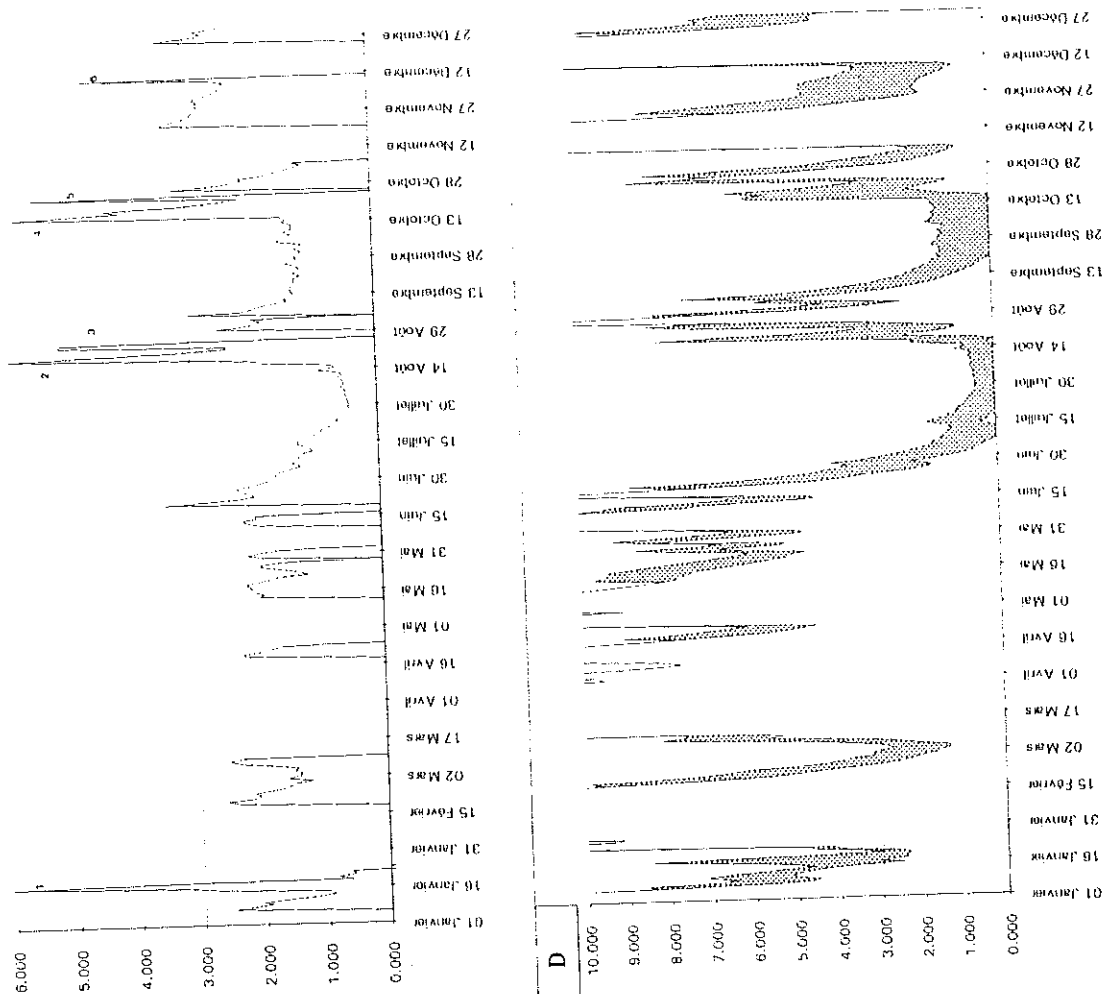
### **2-2 - ANALYSE QUANTITATIVE DES PERTES**



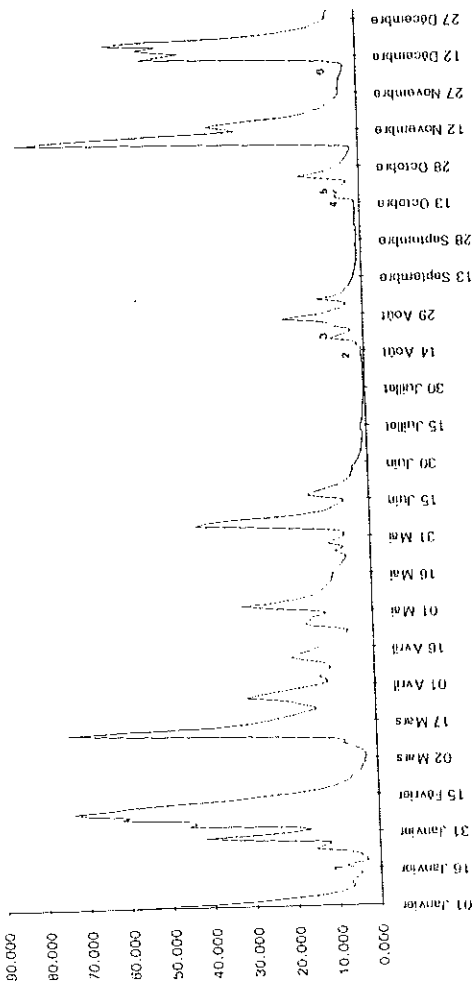
Annexe 1.

B

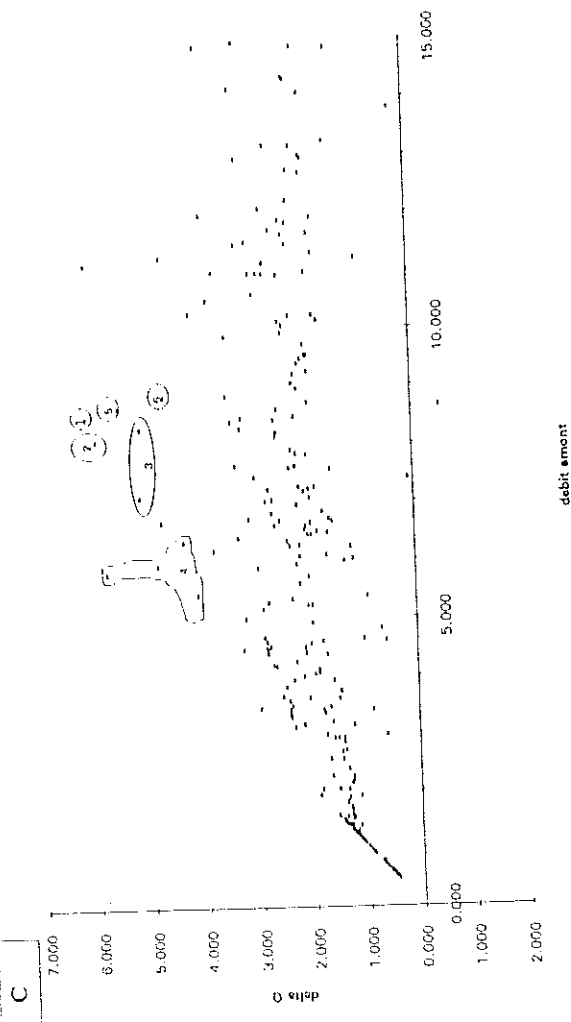
Delta Q pour un débit amont < 10m<sup>3</sup>/s



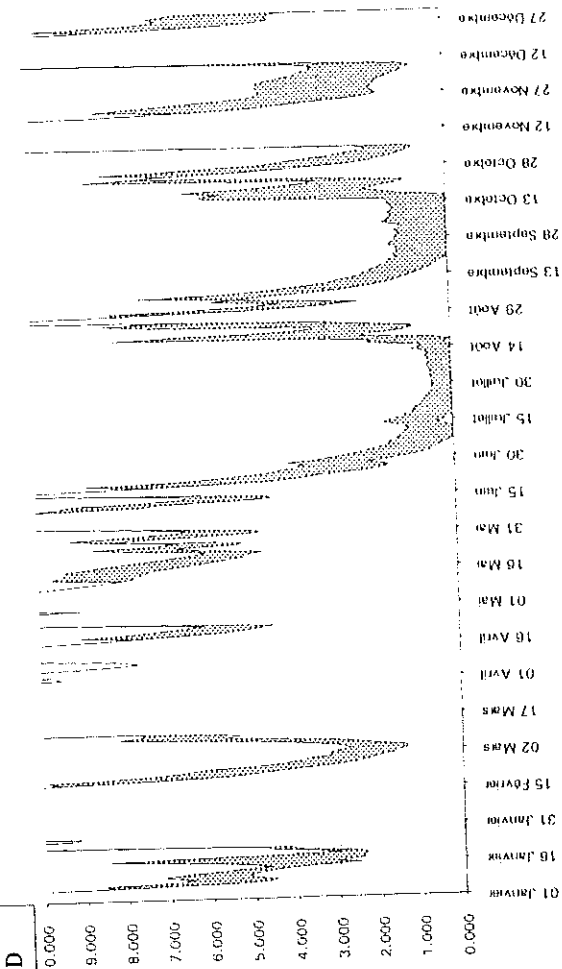
Débit Amont

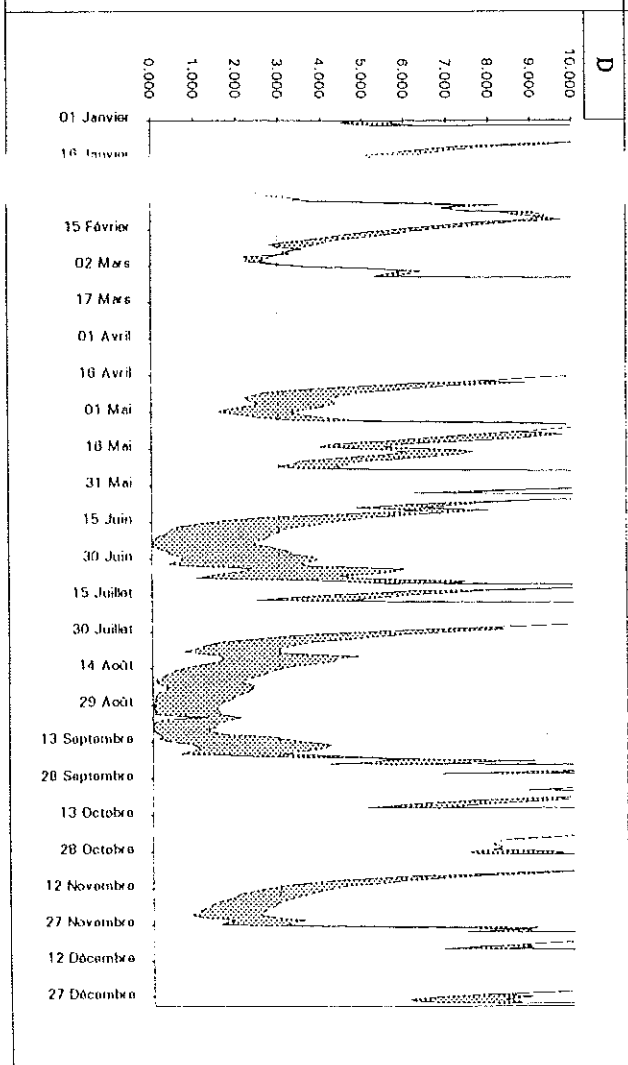
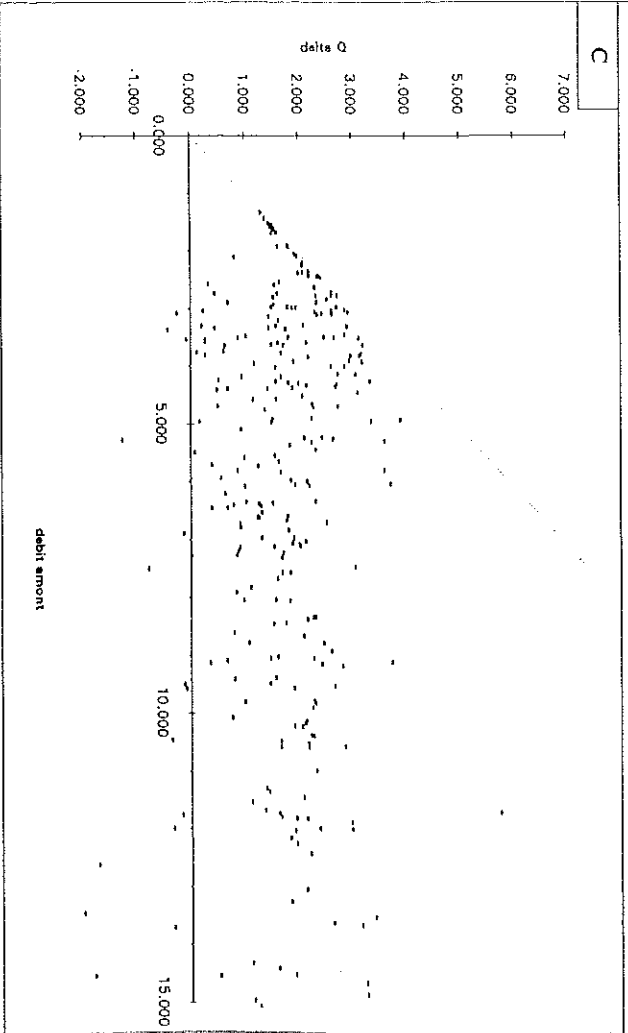
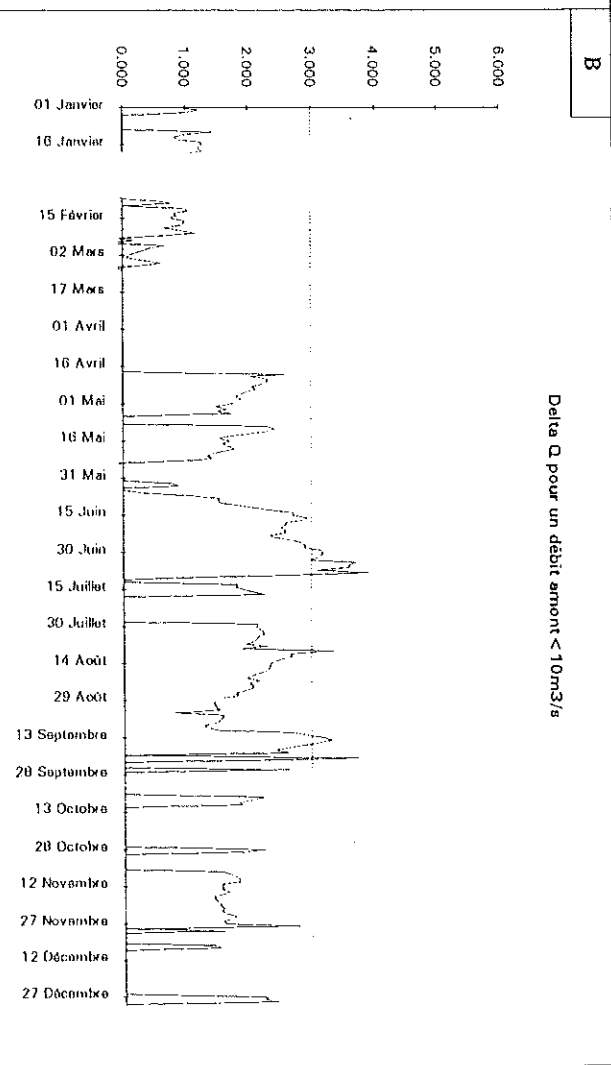
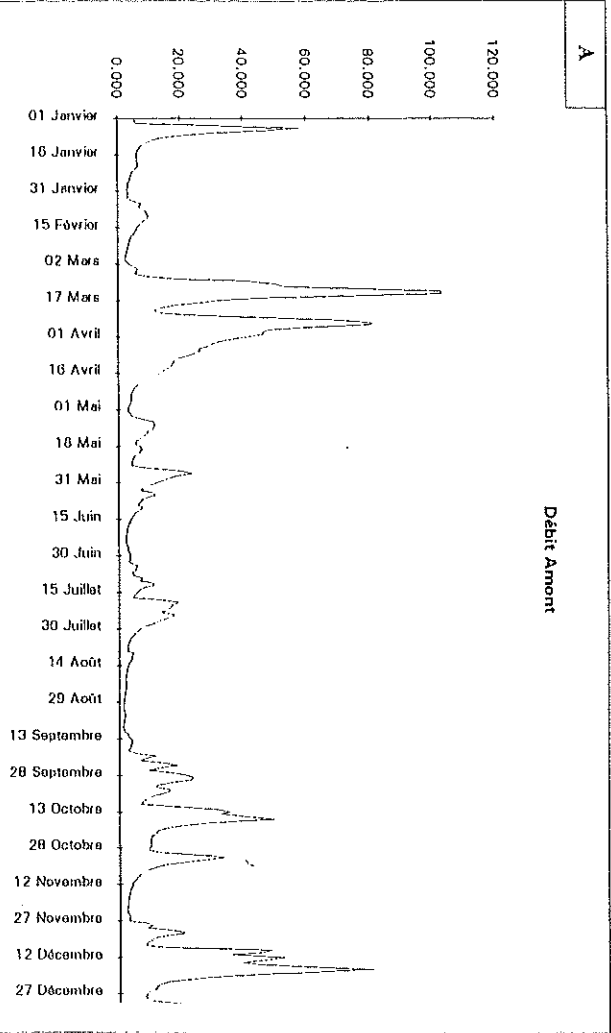


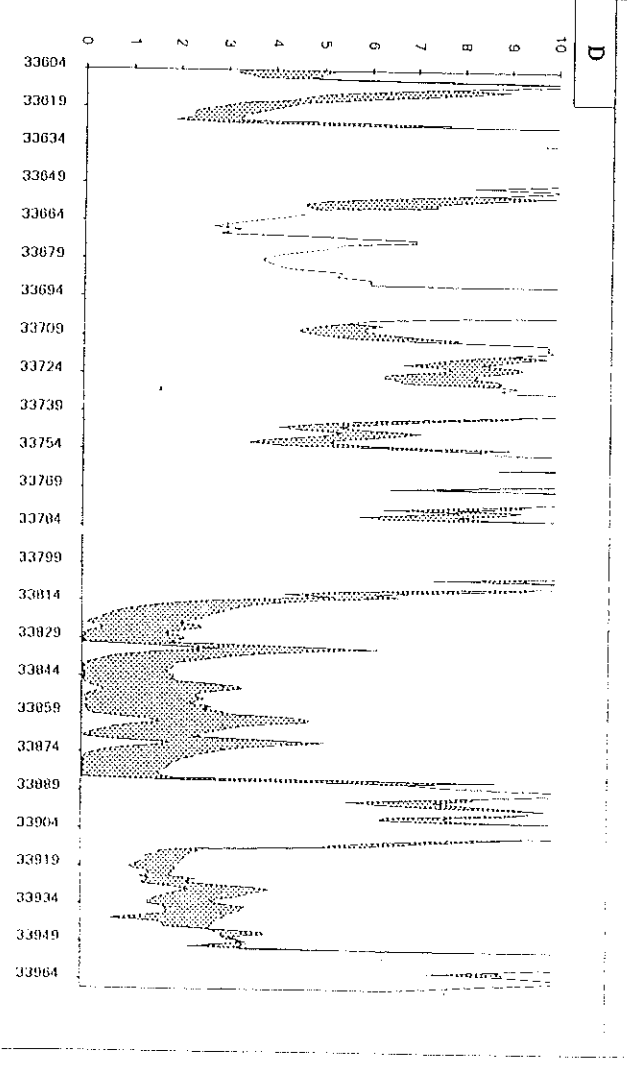
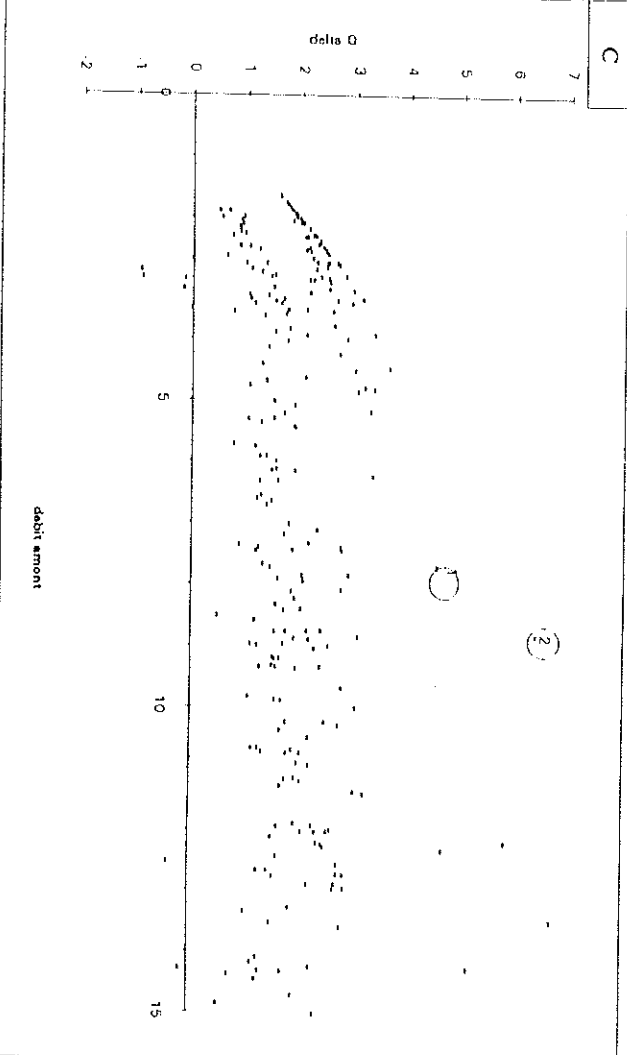
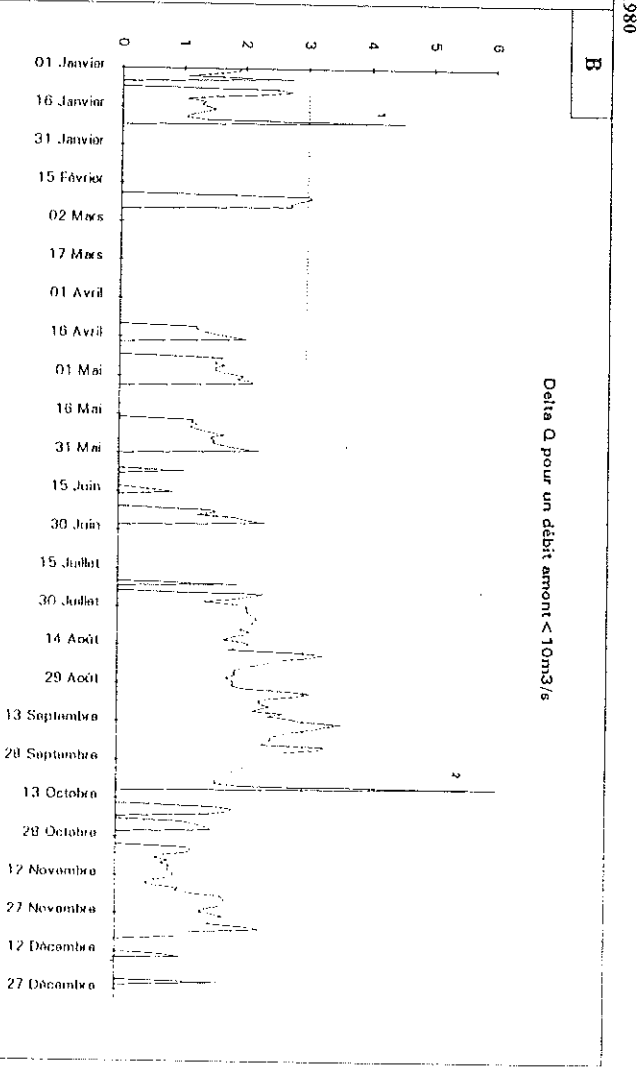
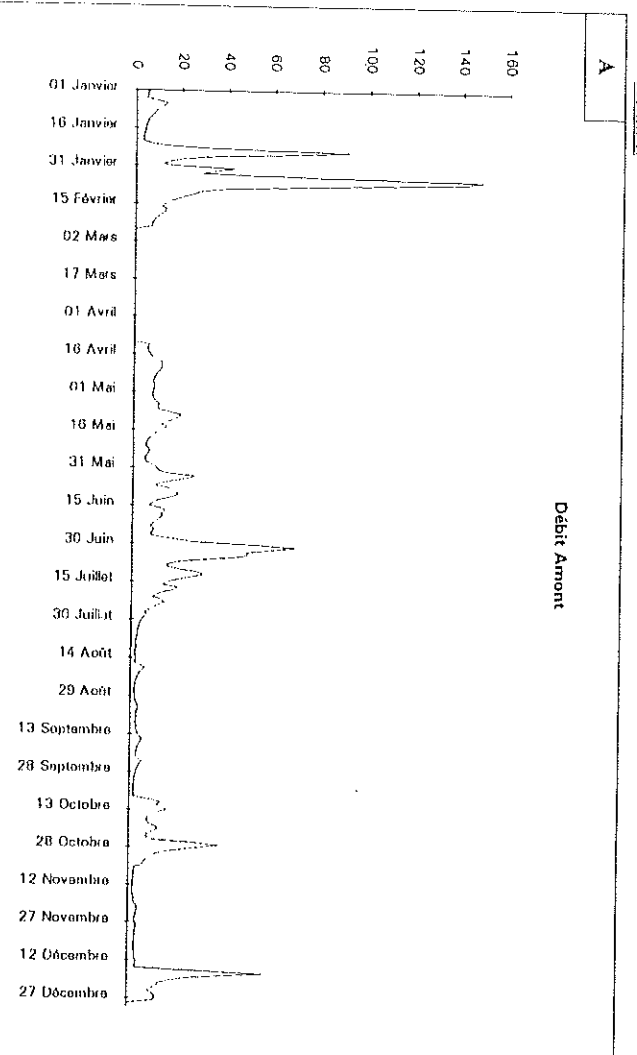
C

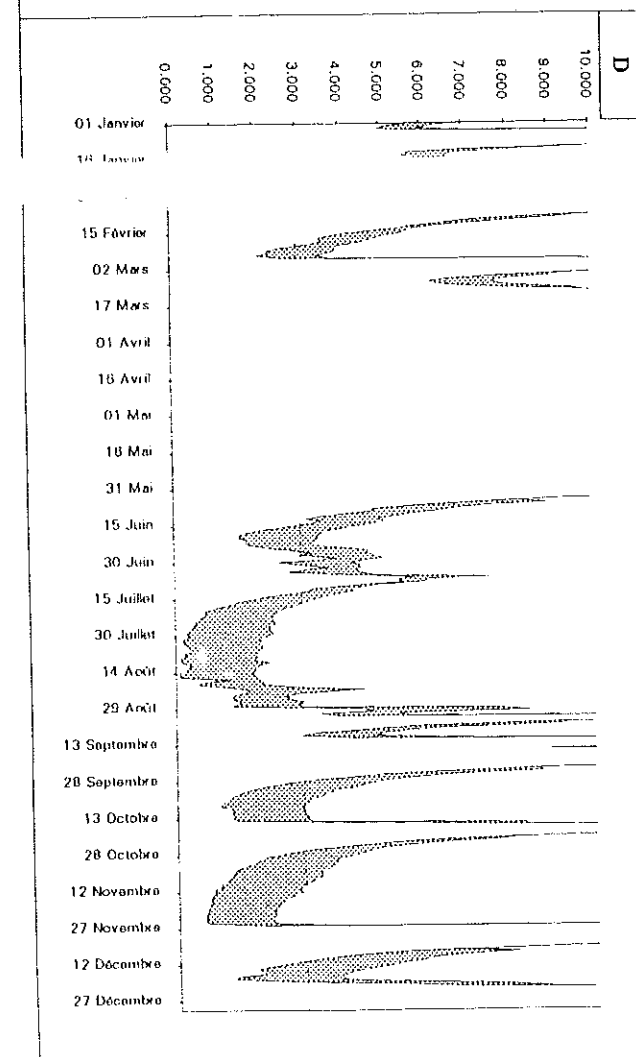
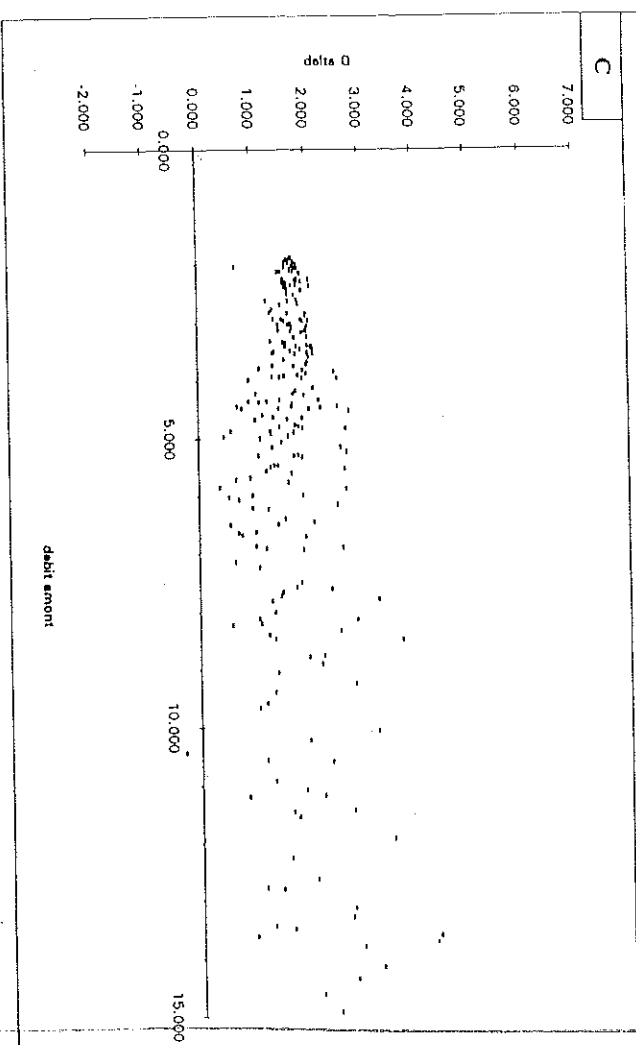
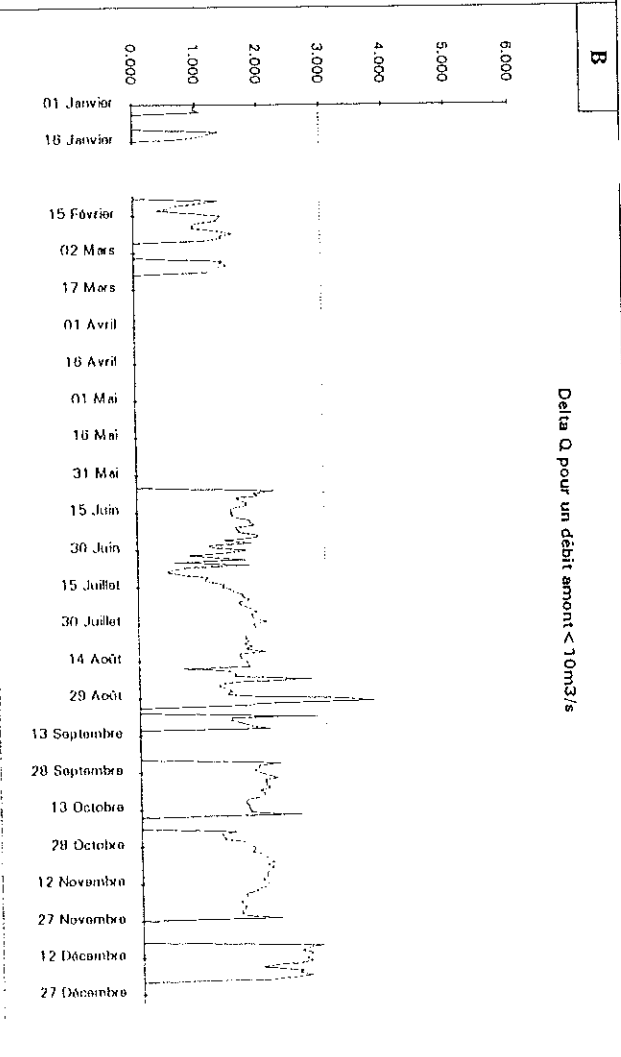
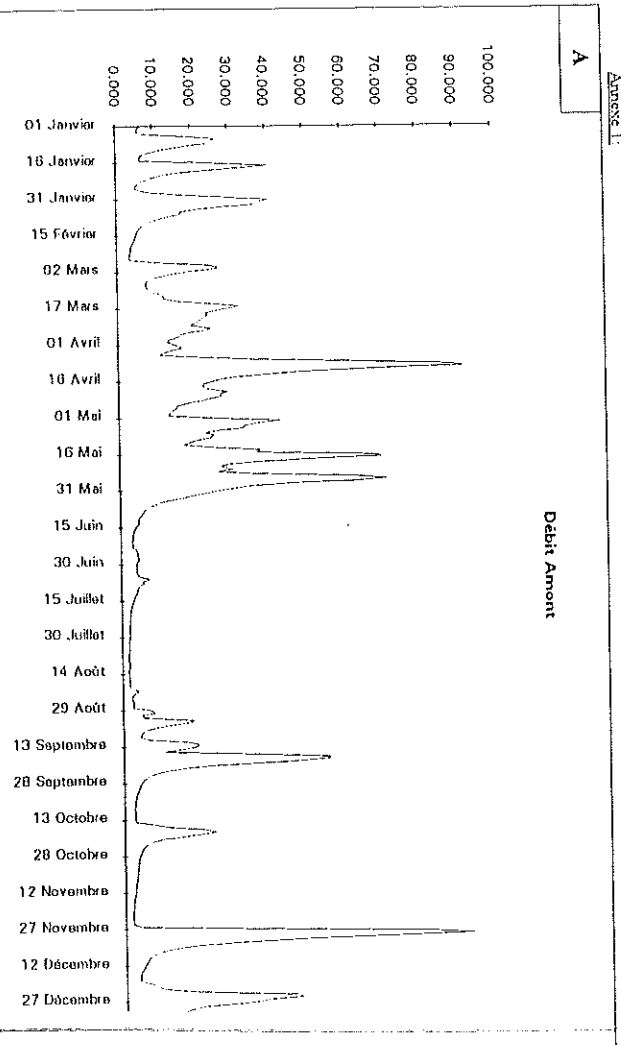


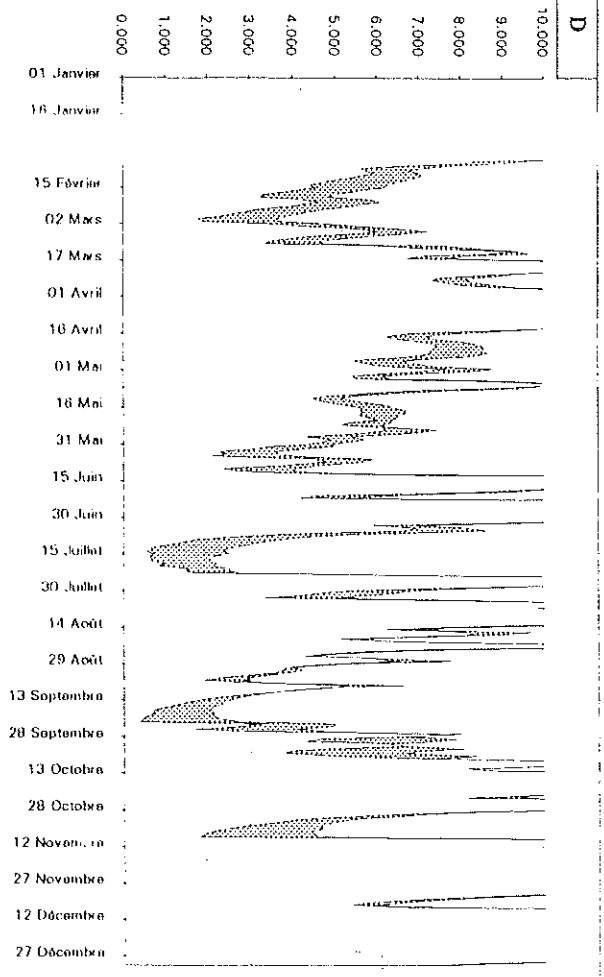
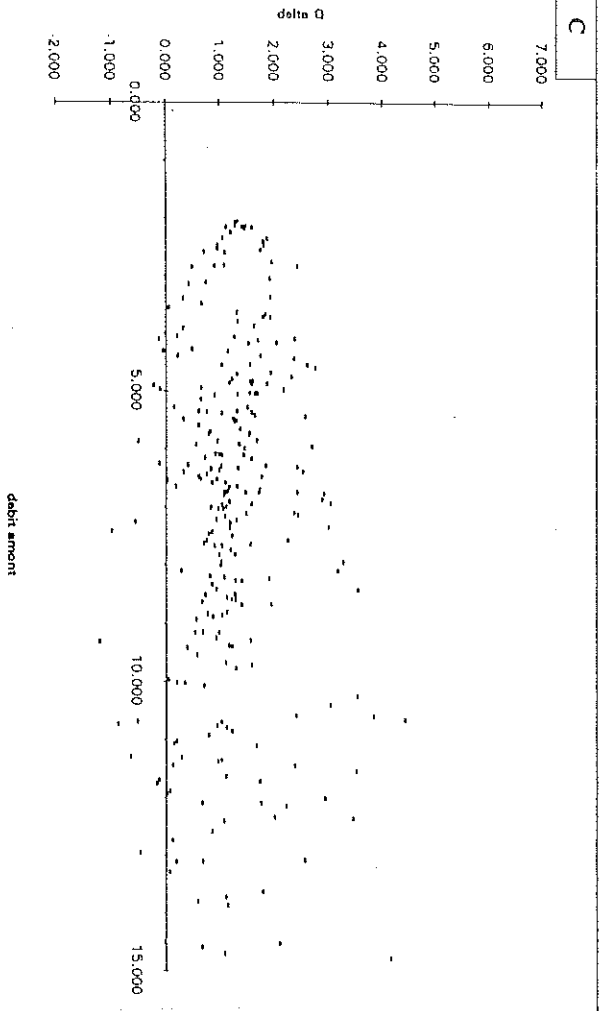
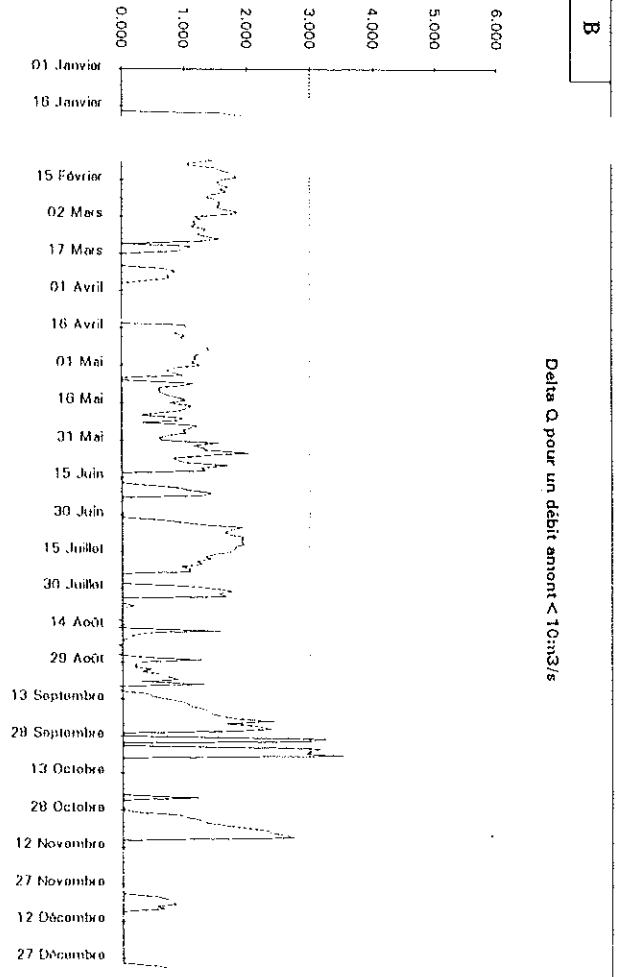
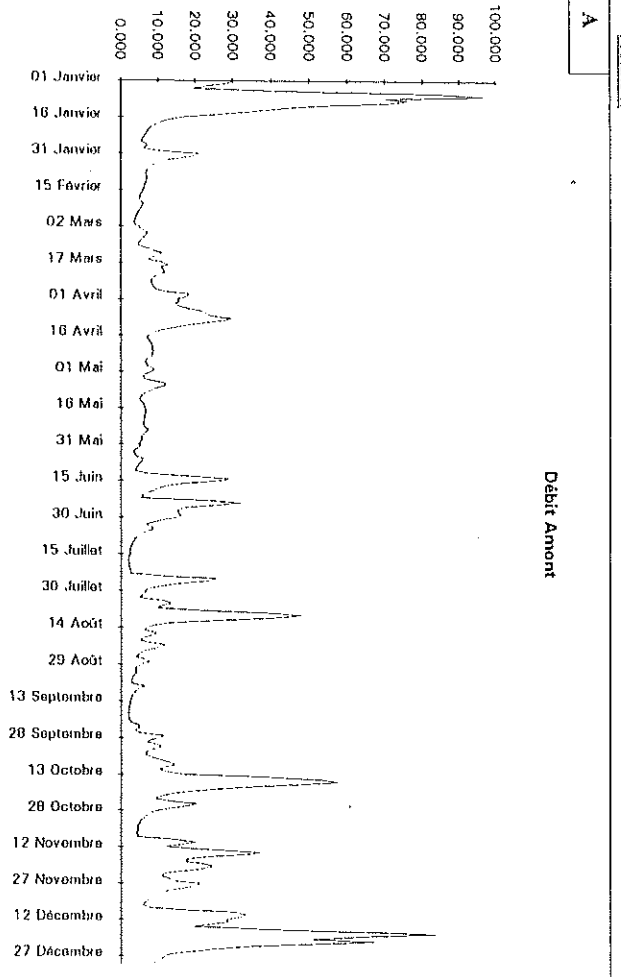
D

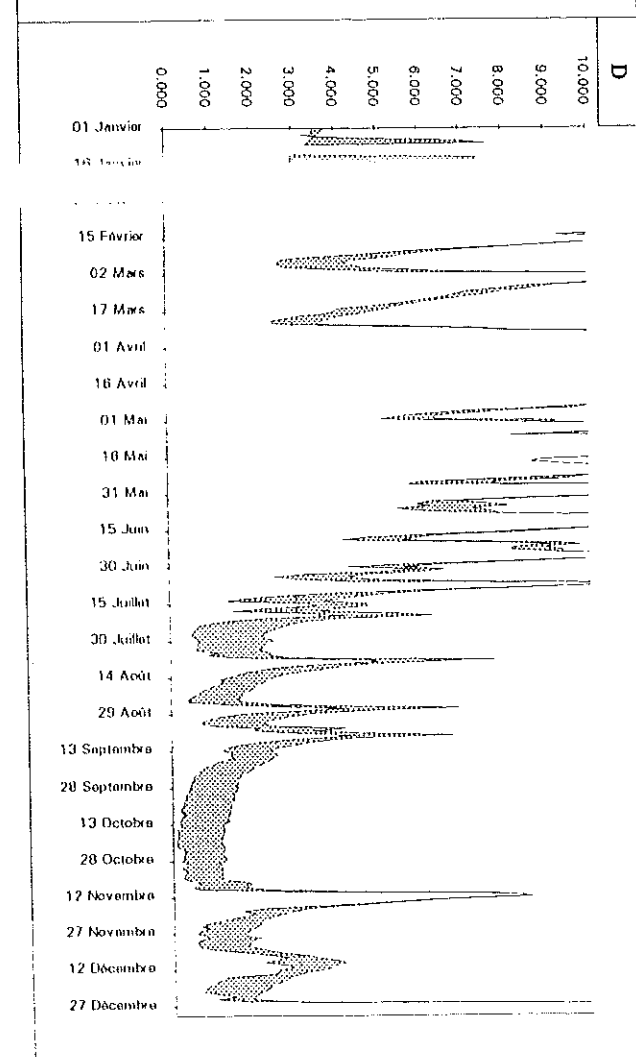
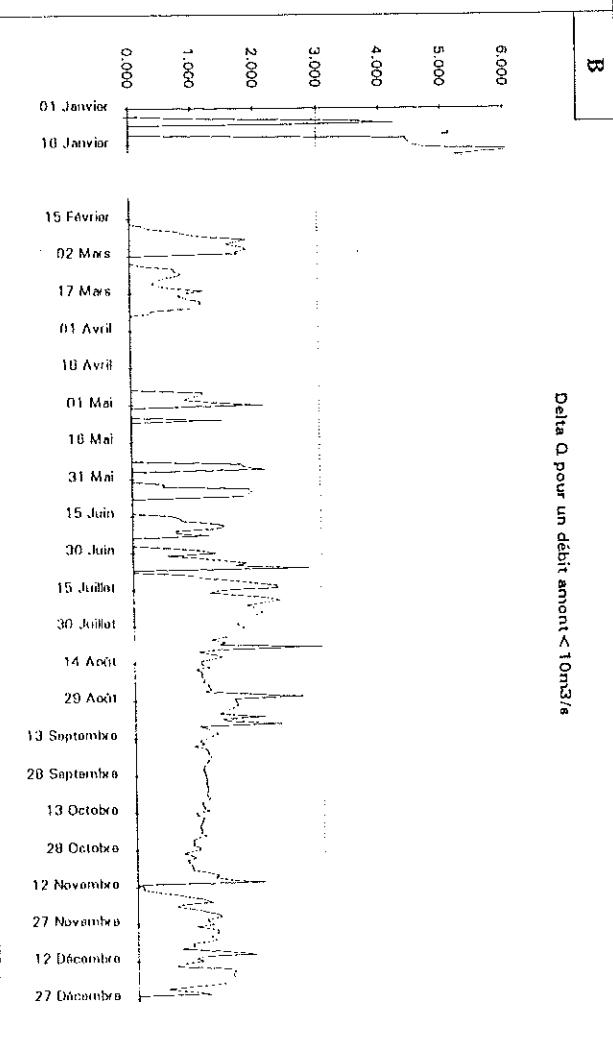
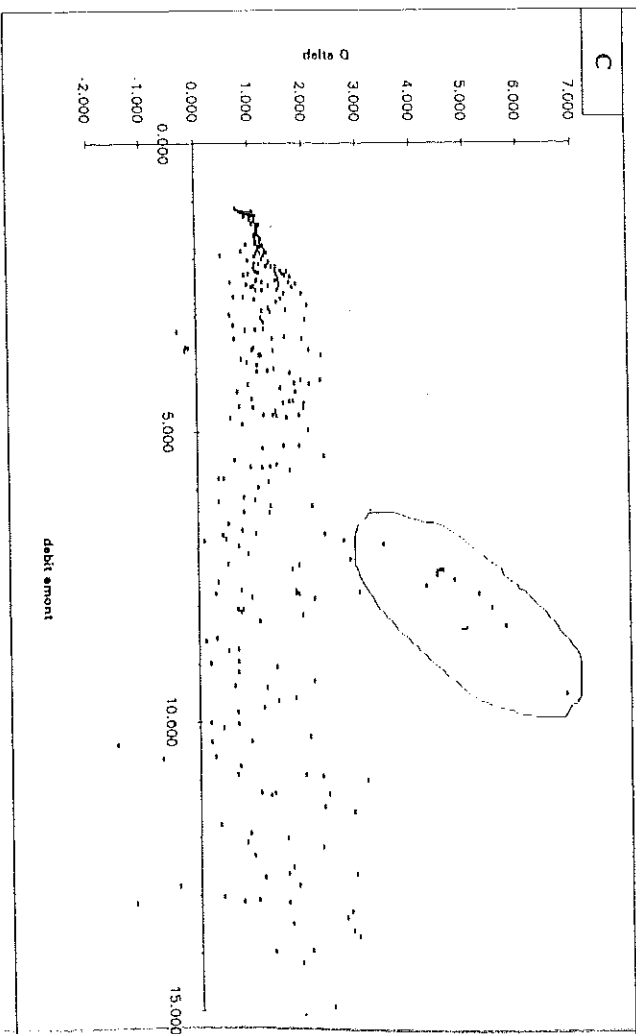
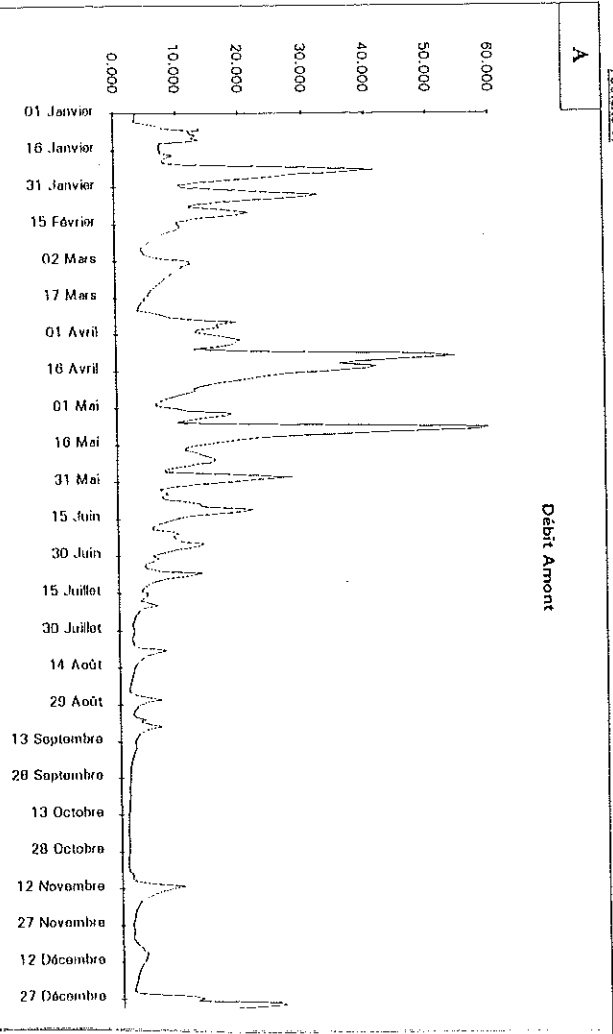


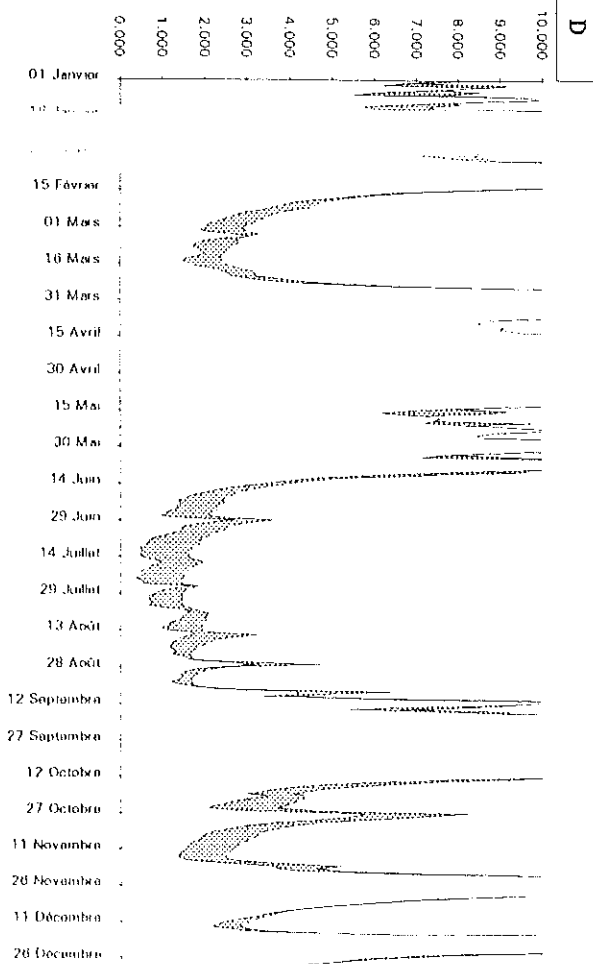
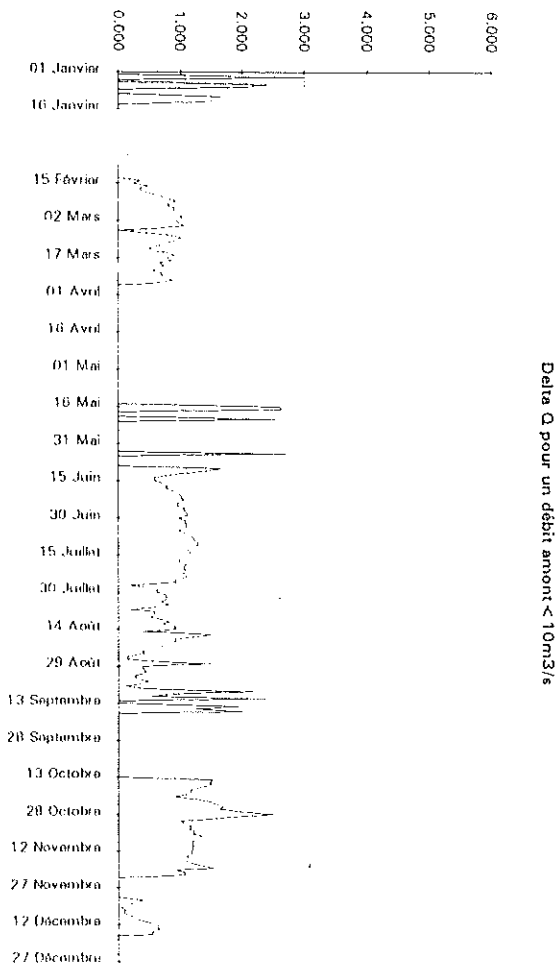
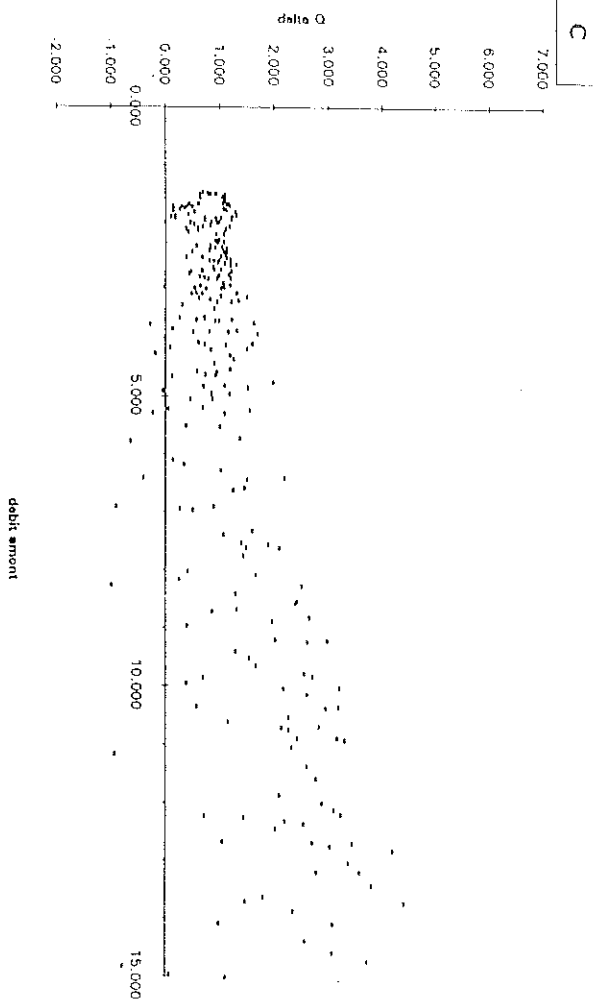
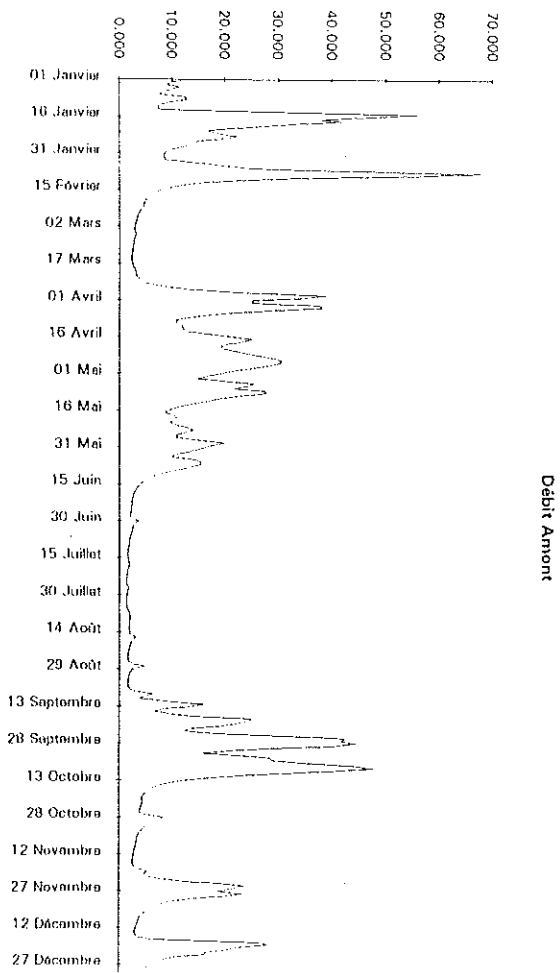




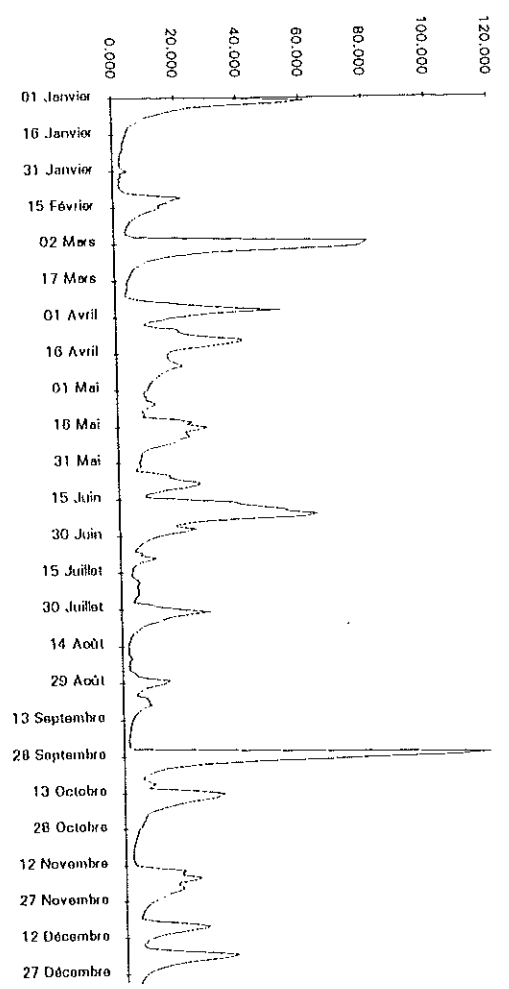




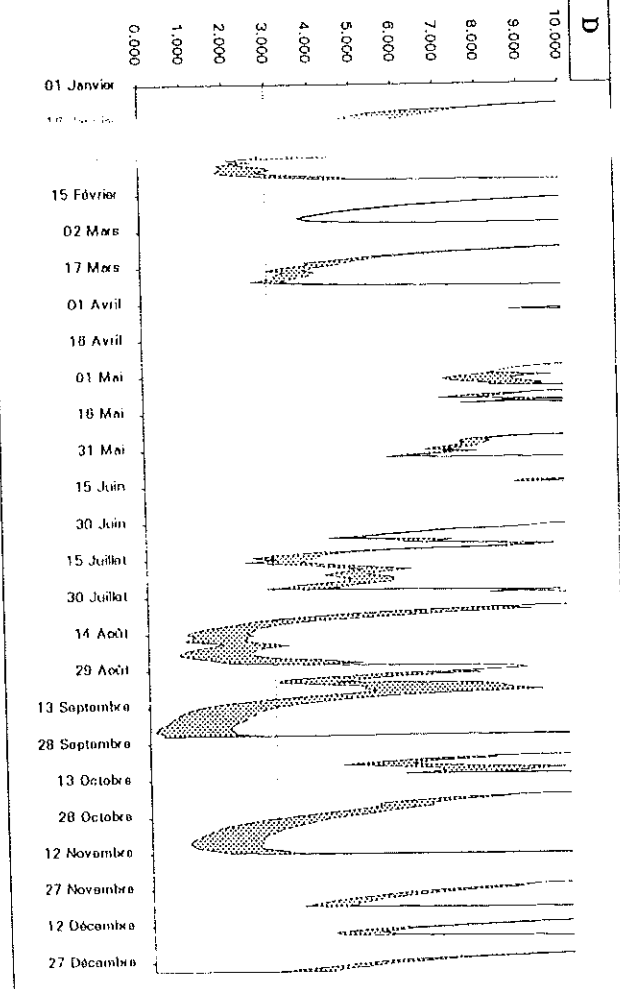
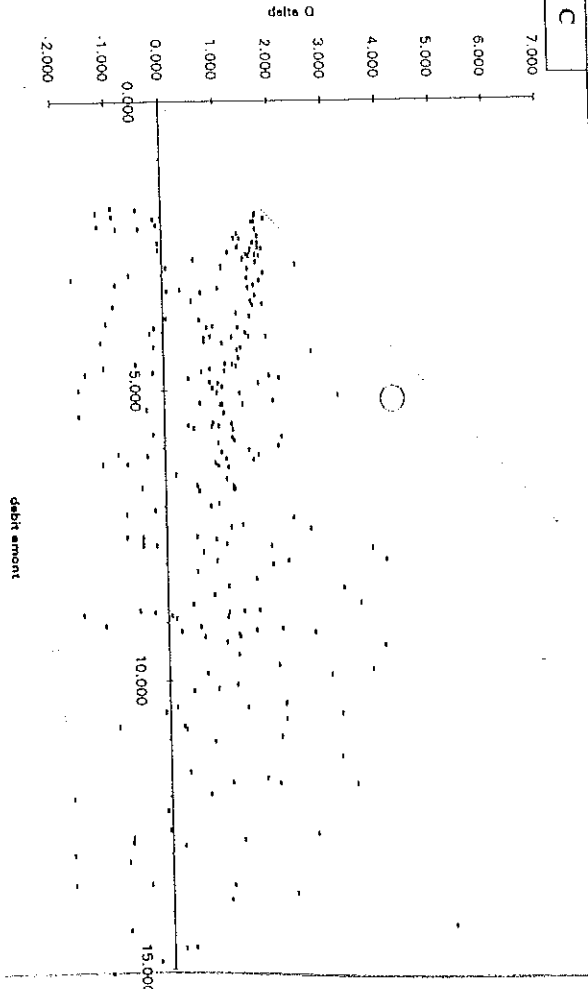
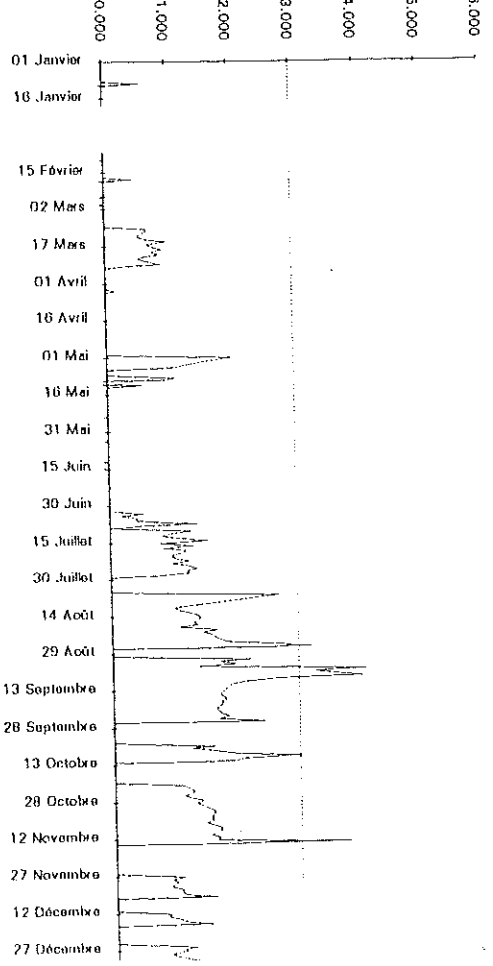




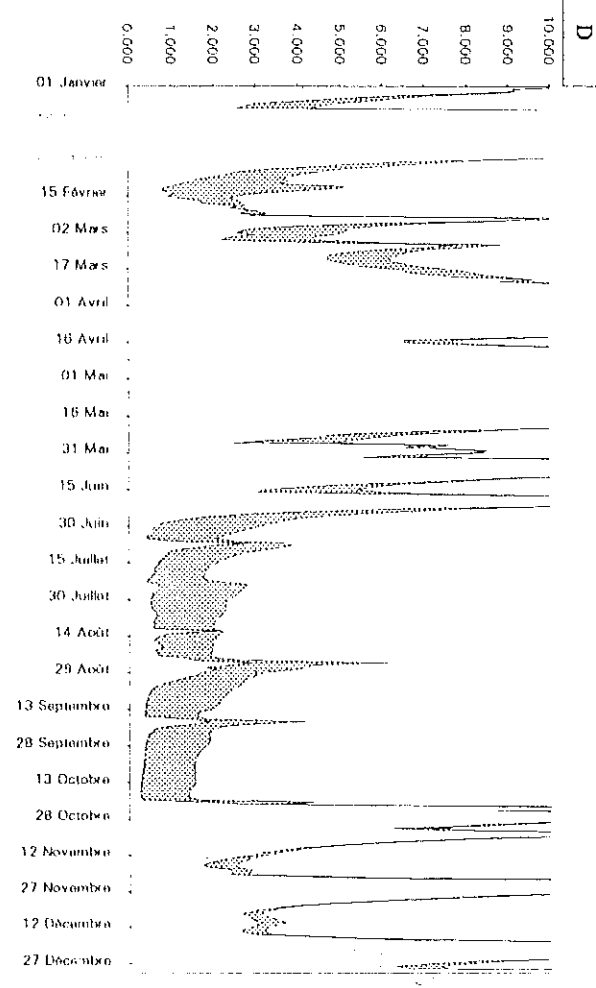
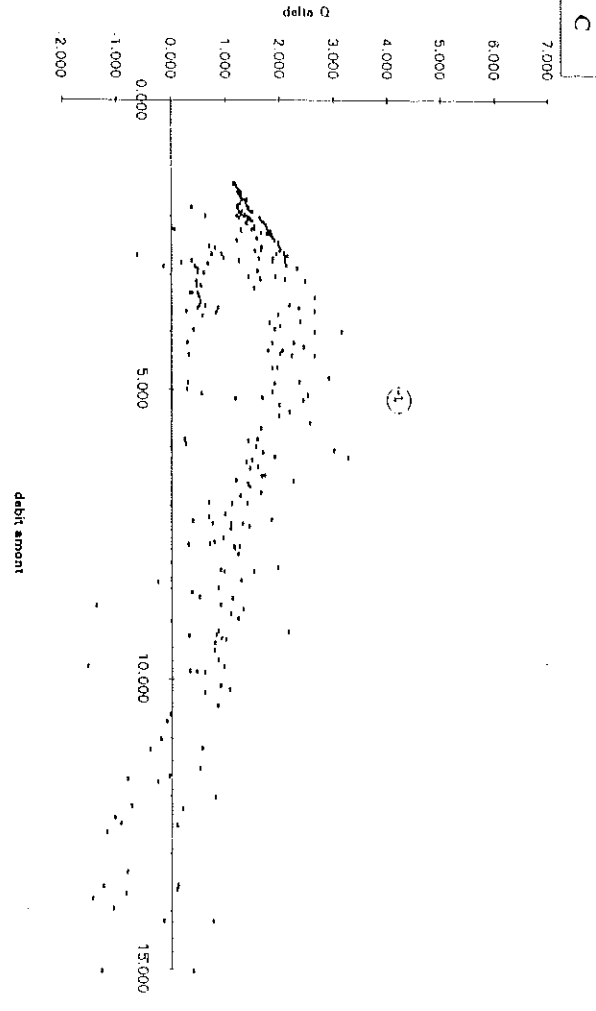
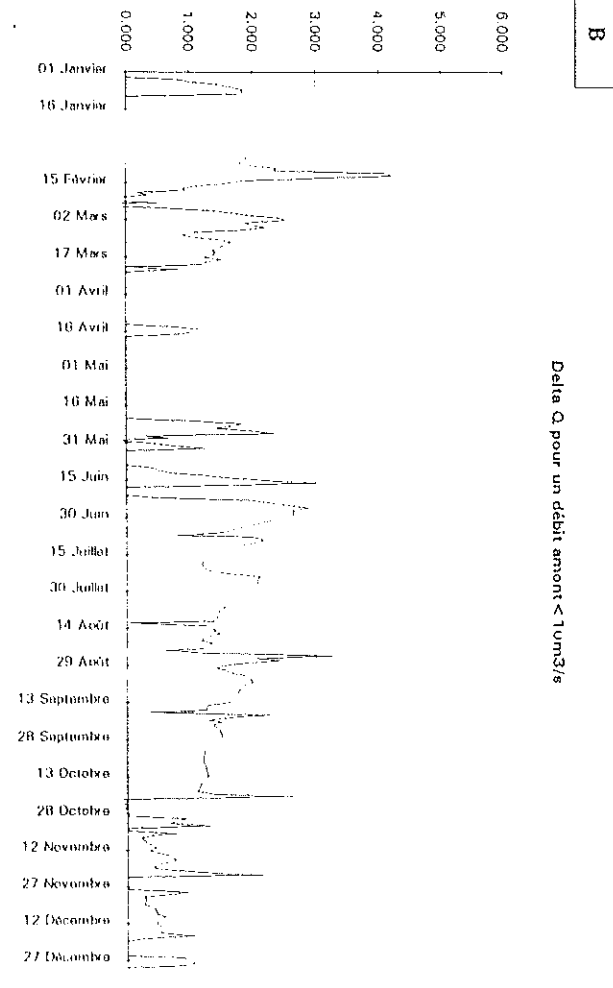
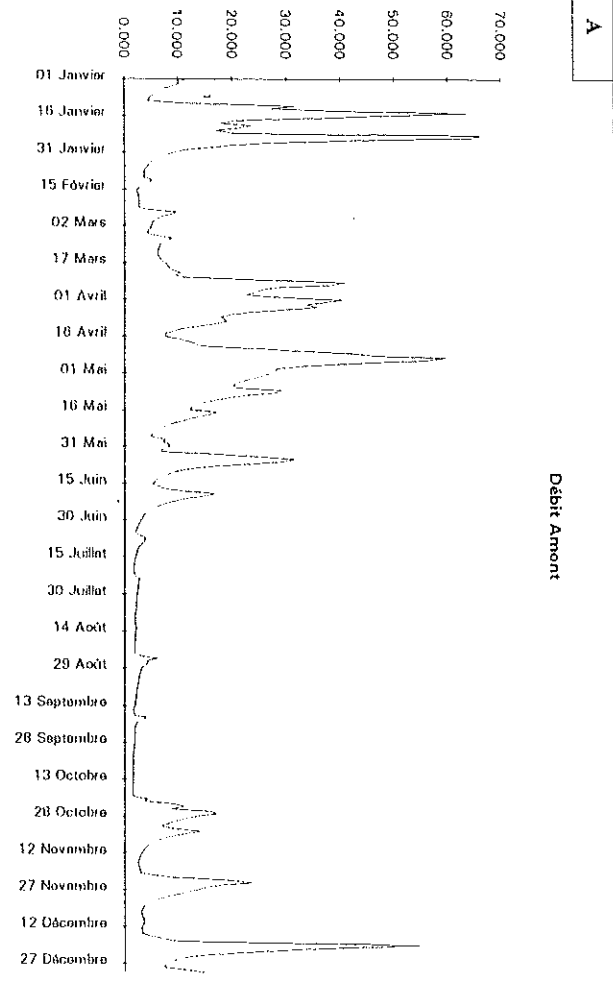
Débit Amont

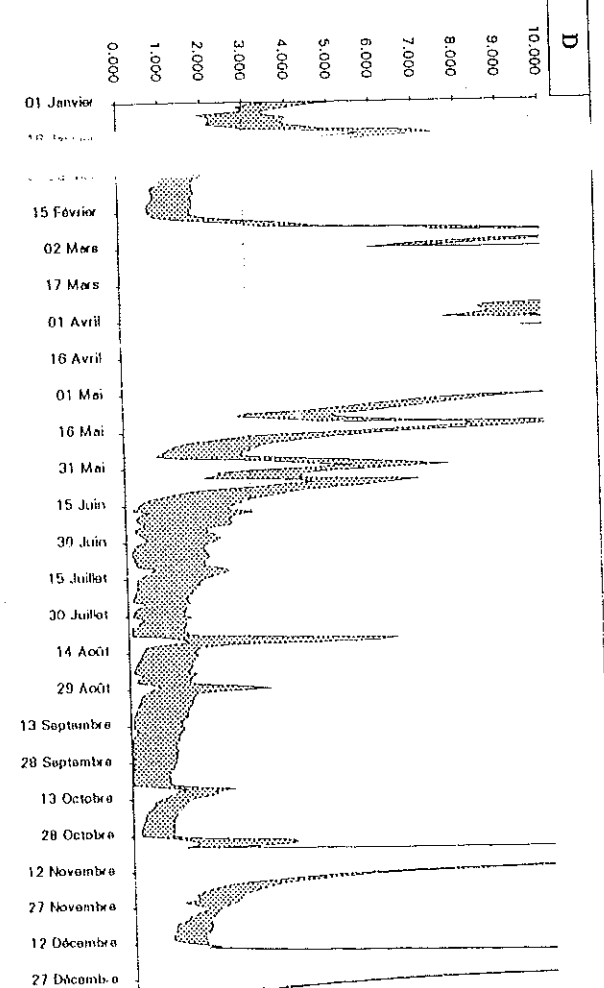
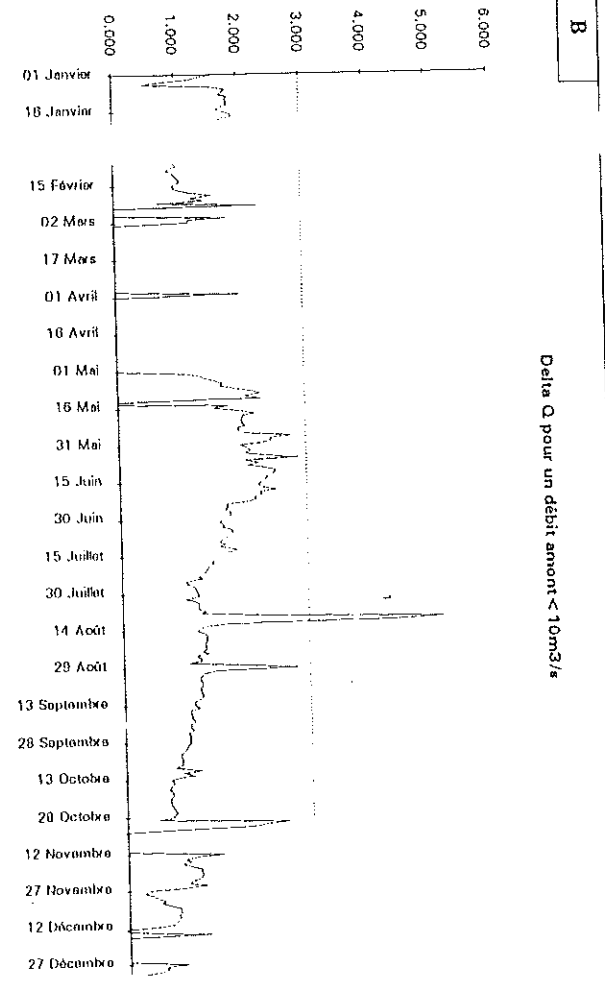
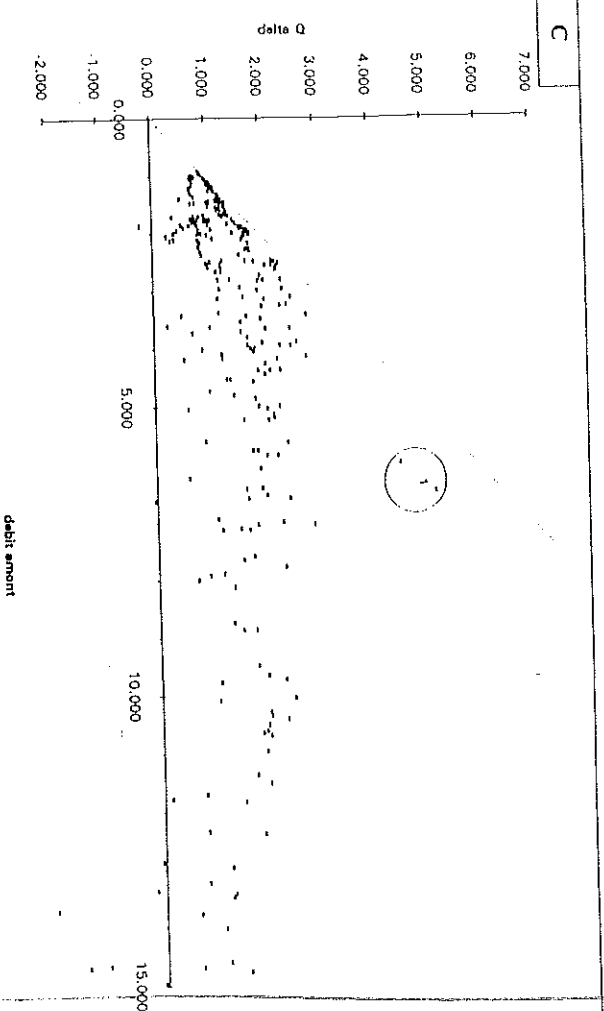
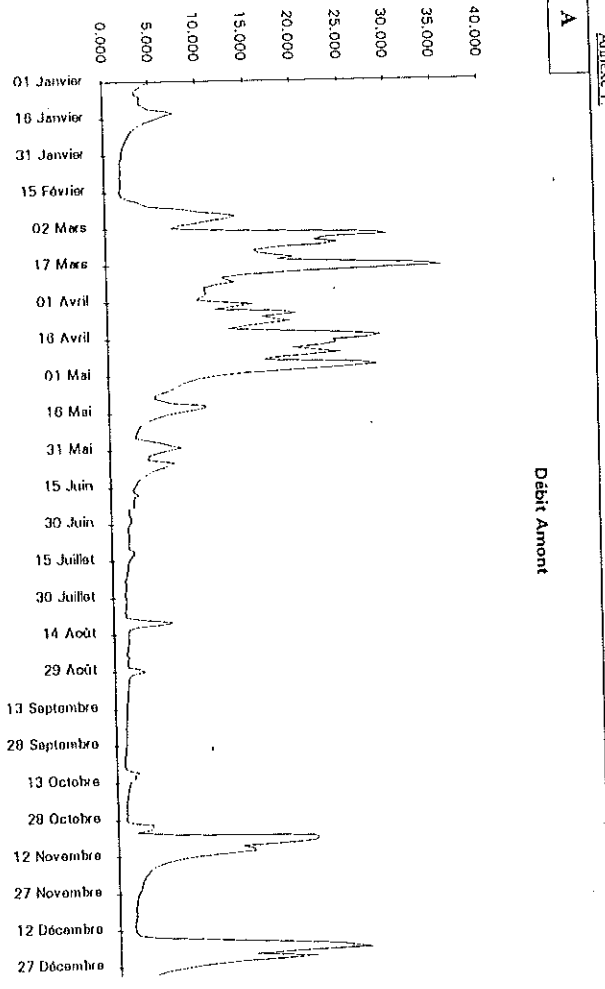


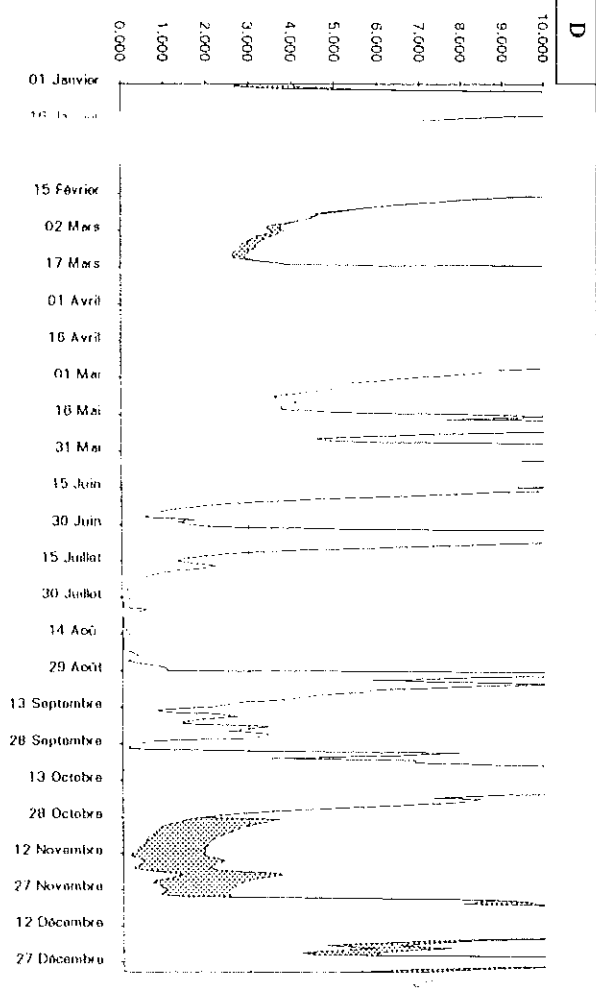
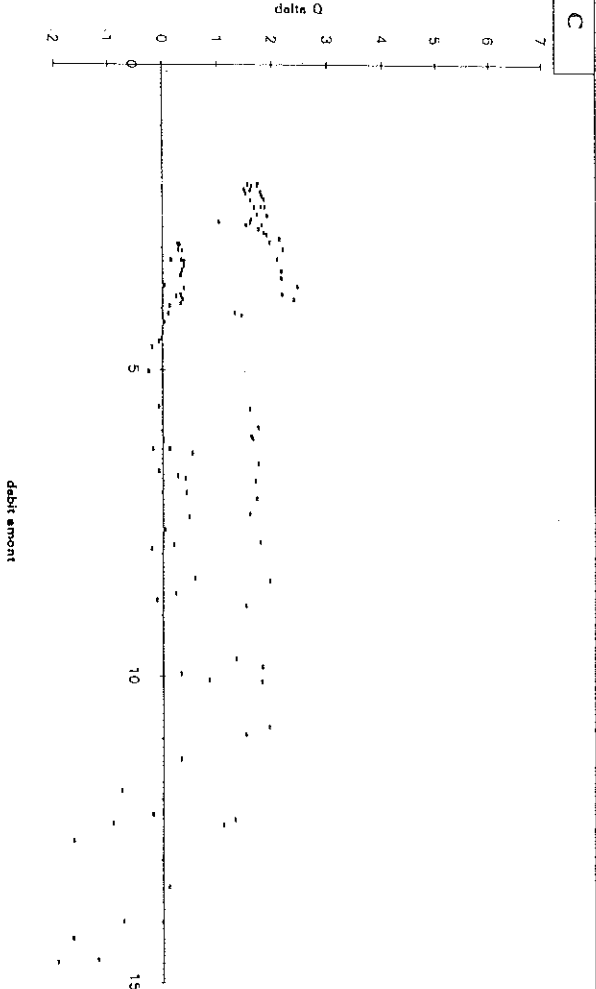
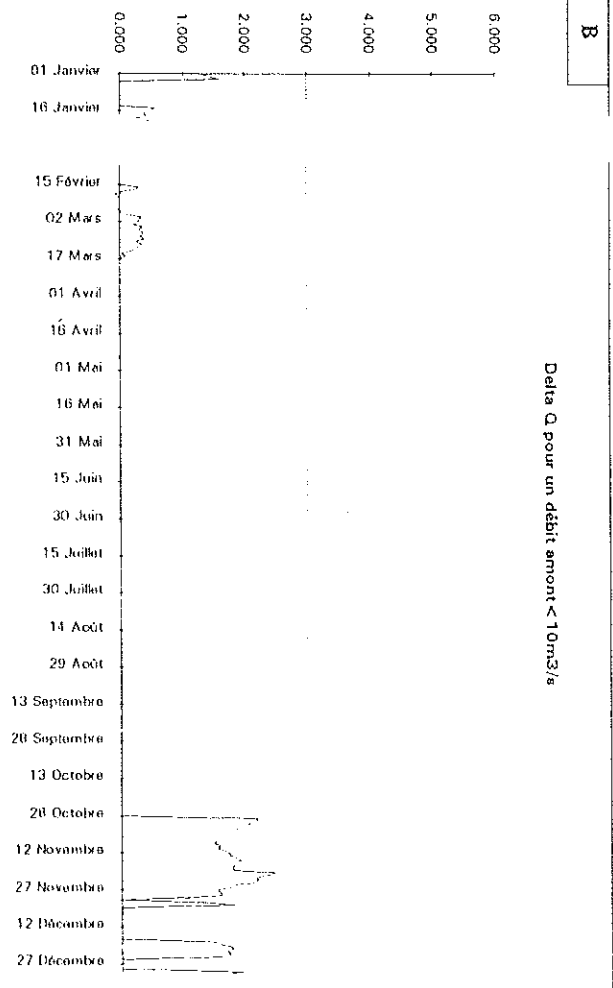
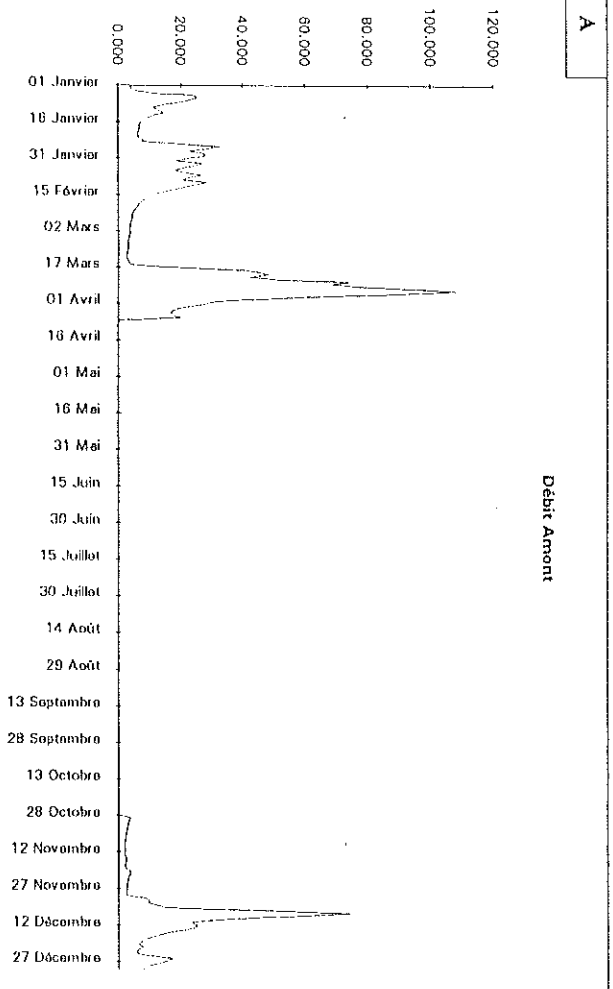
Delta Q pour un débit amont < 10m³/s

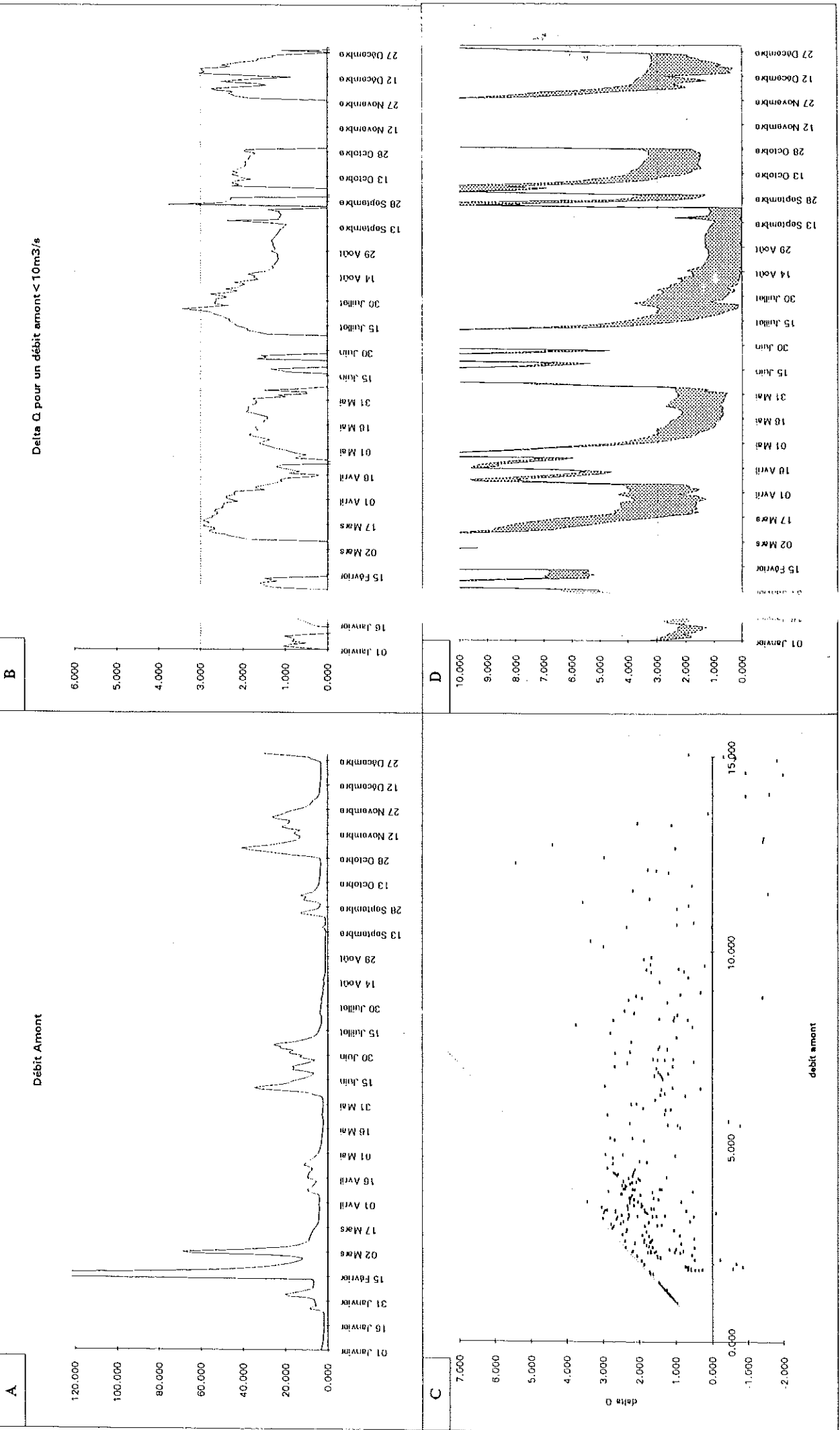


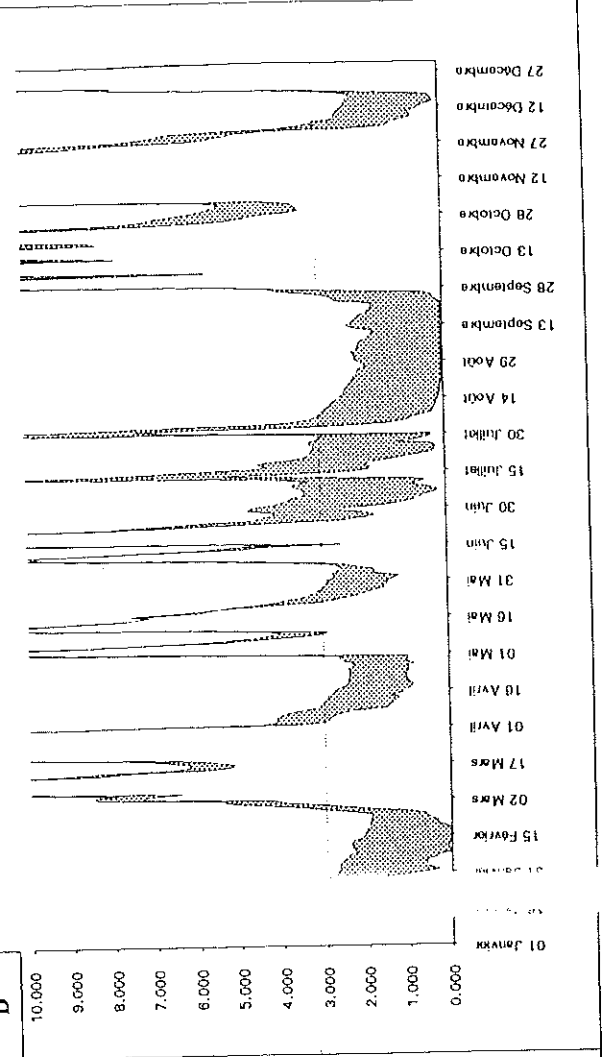
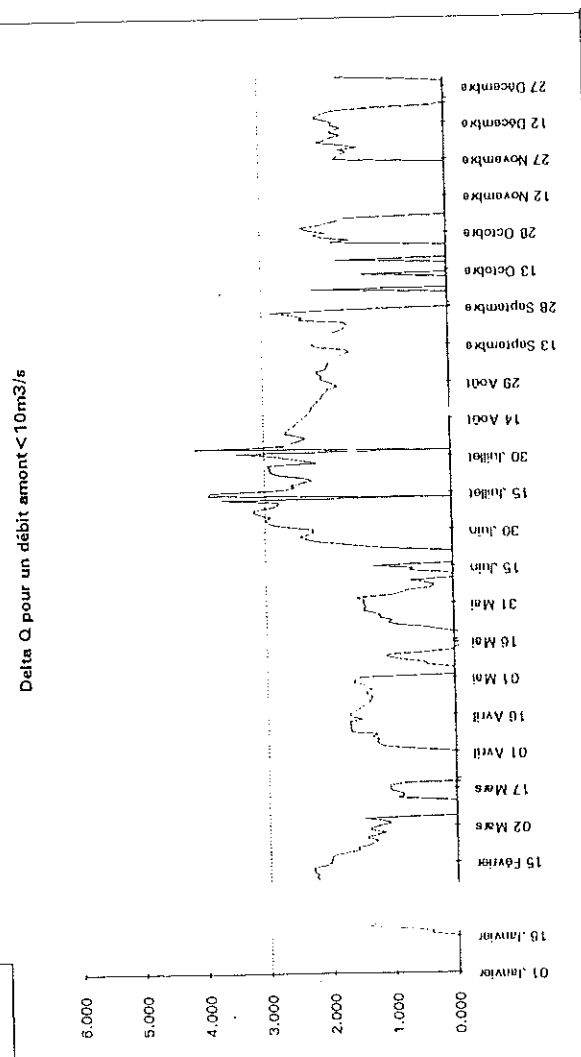
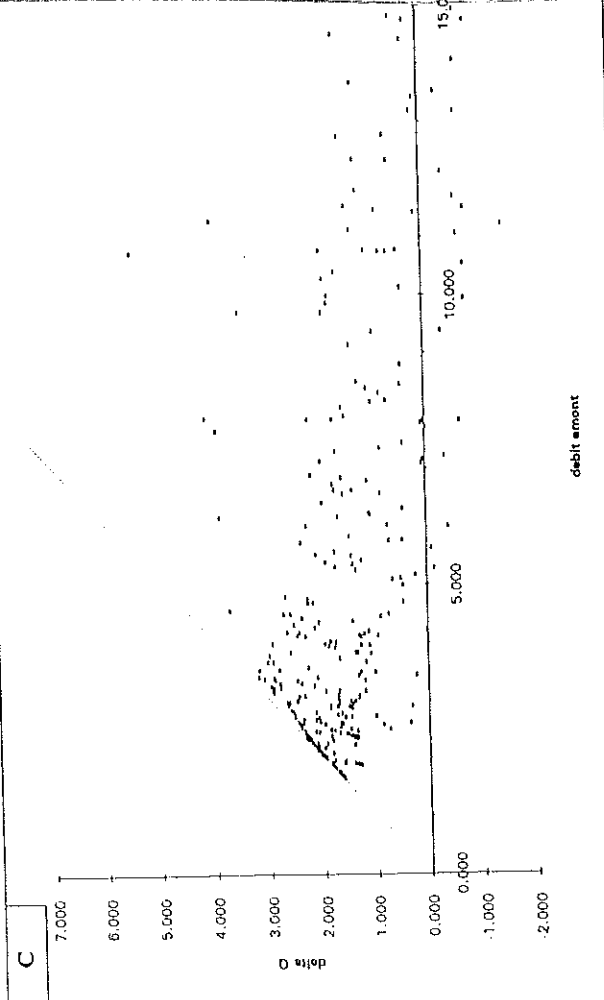
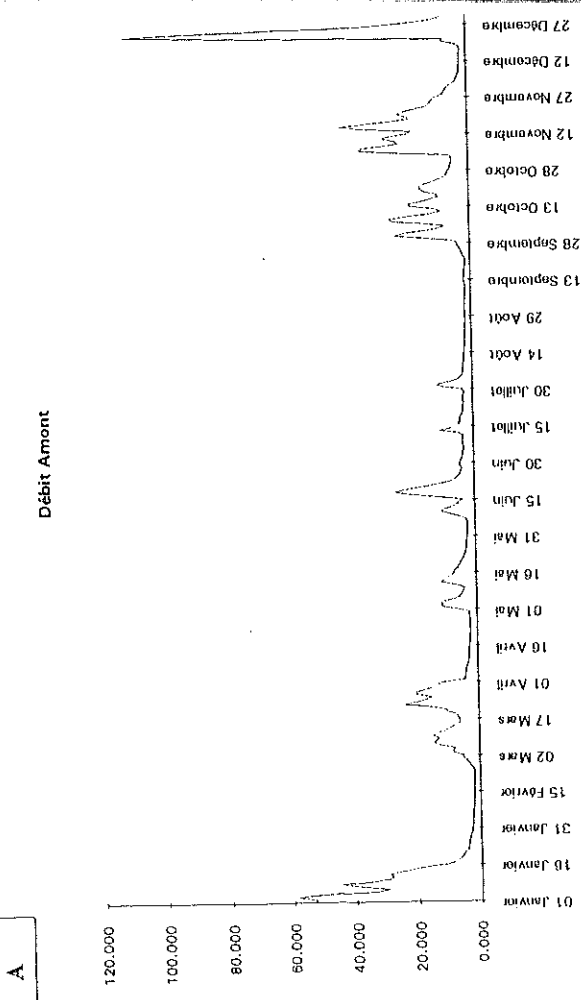






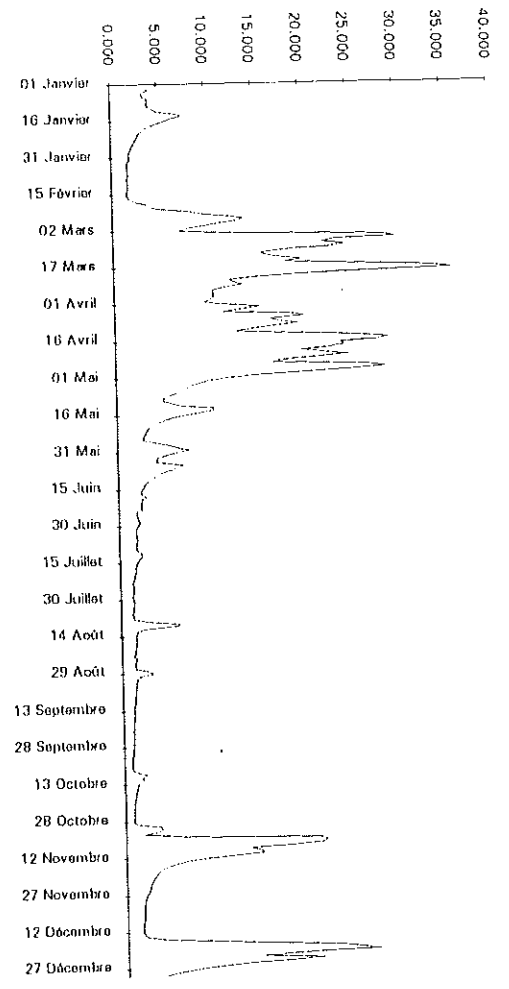




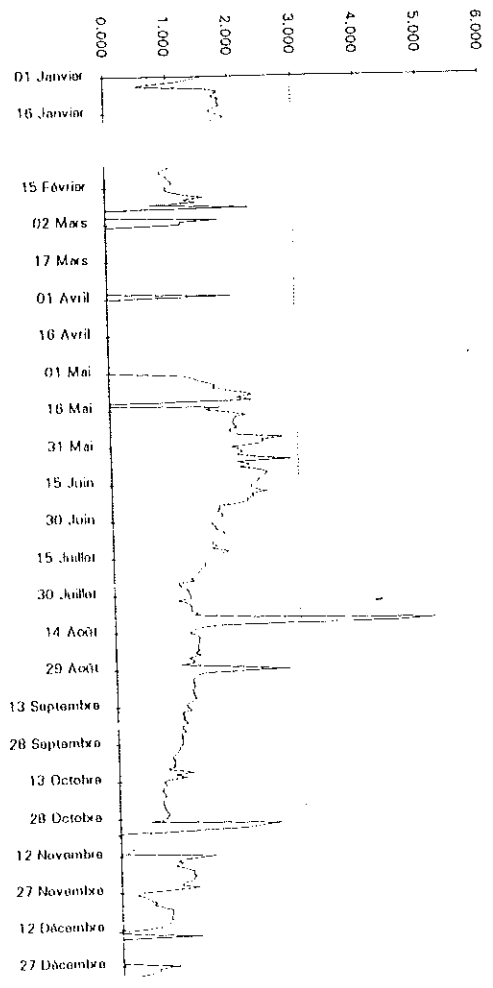


debit amont

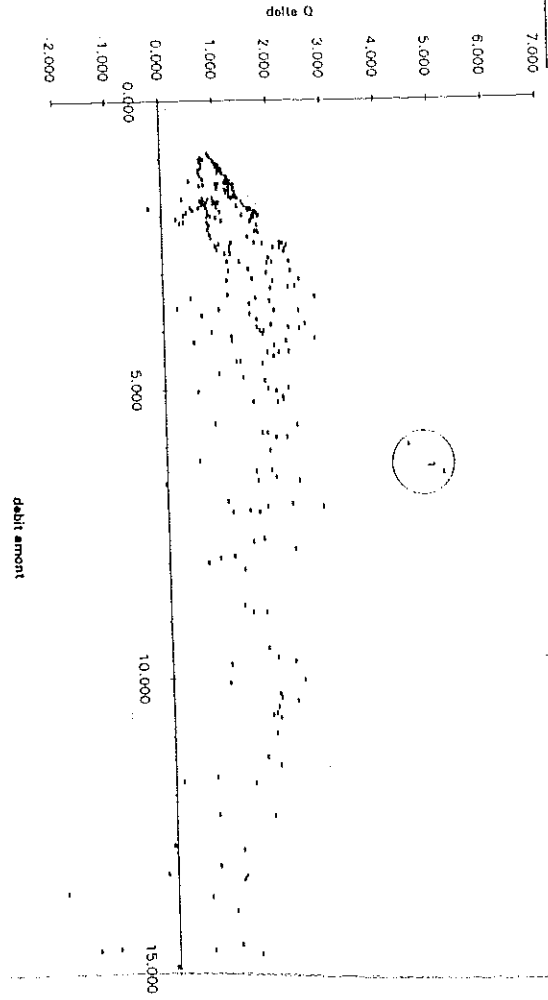
Débit Amont



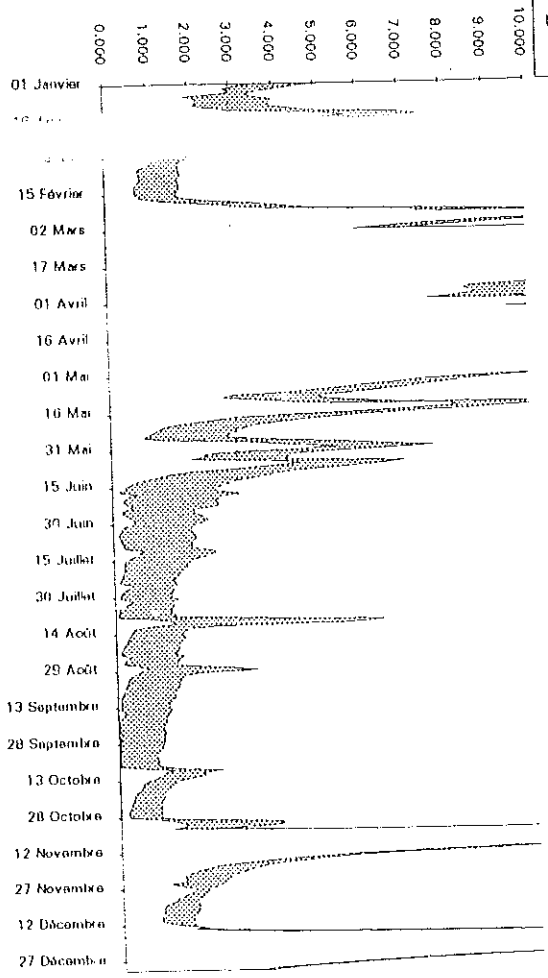
Date Q pour un débit amont < 10m³/s

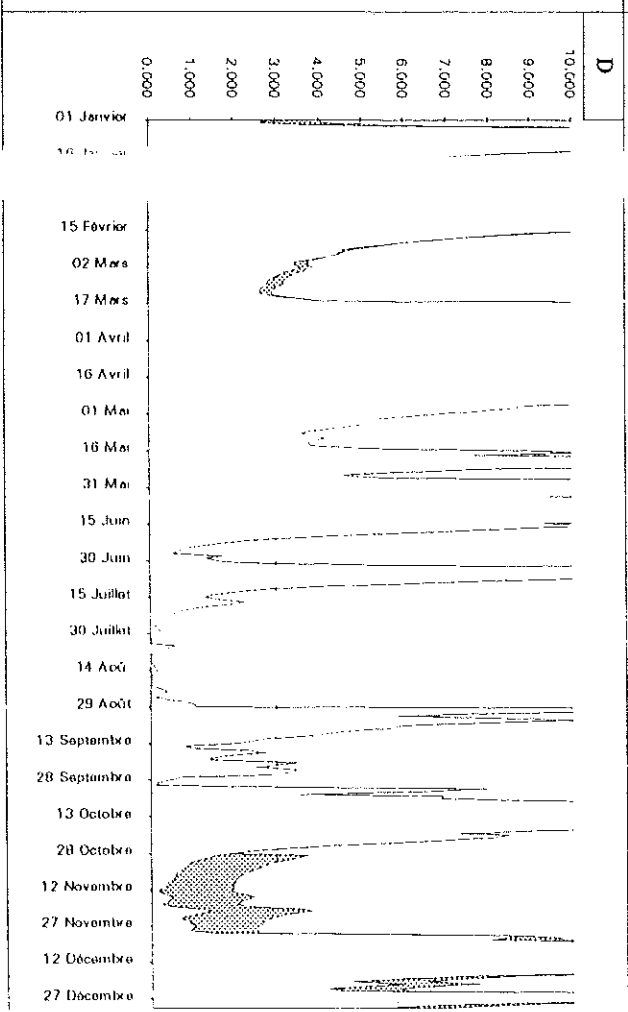
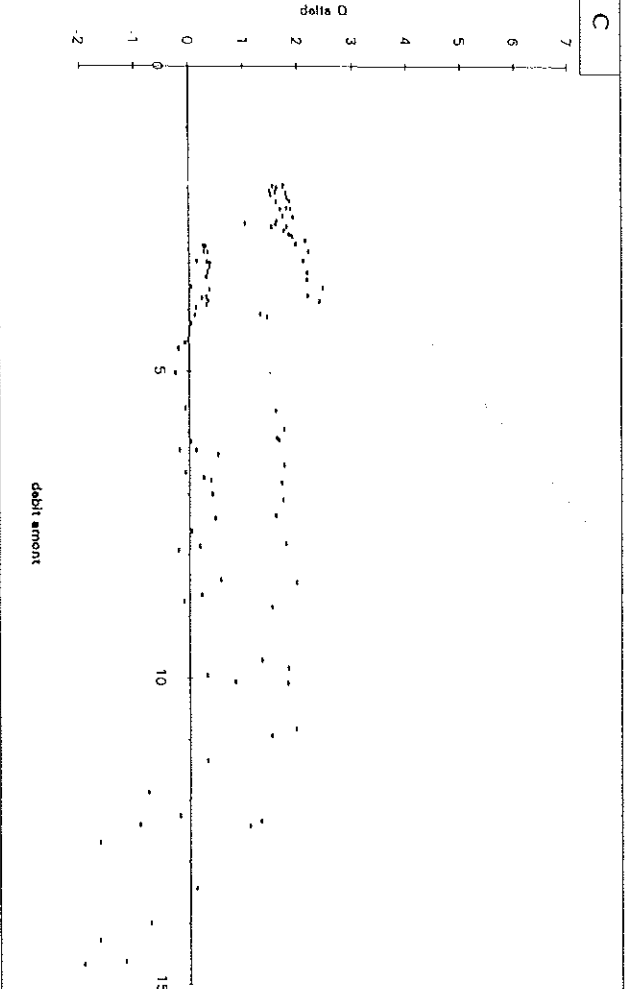
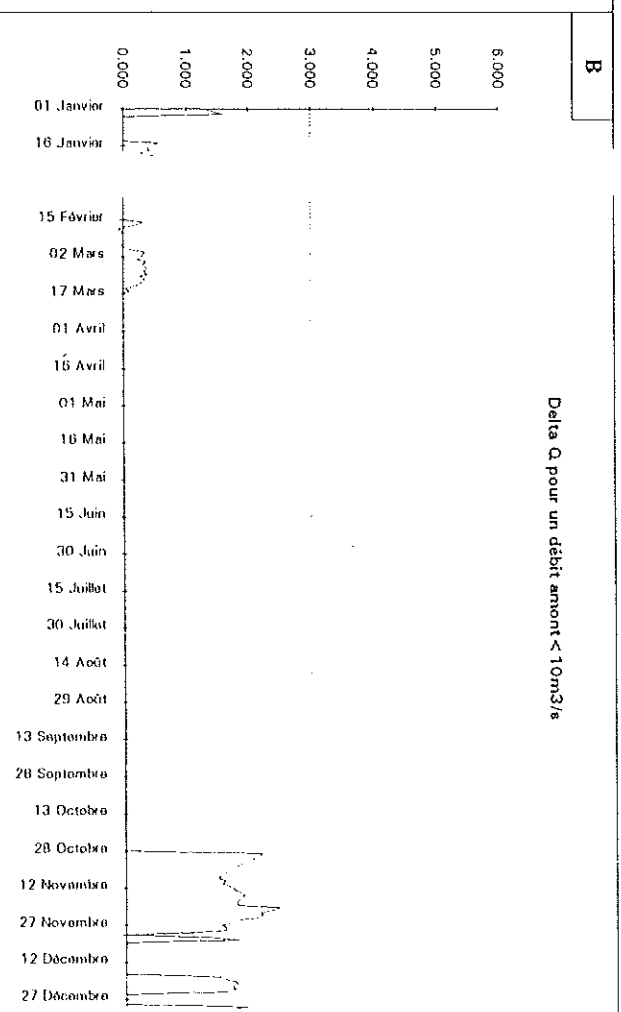
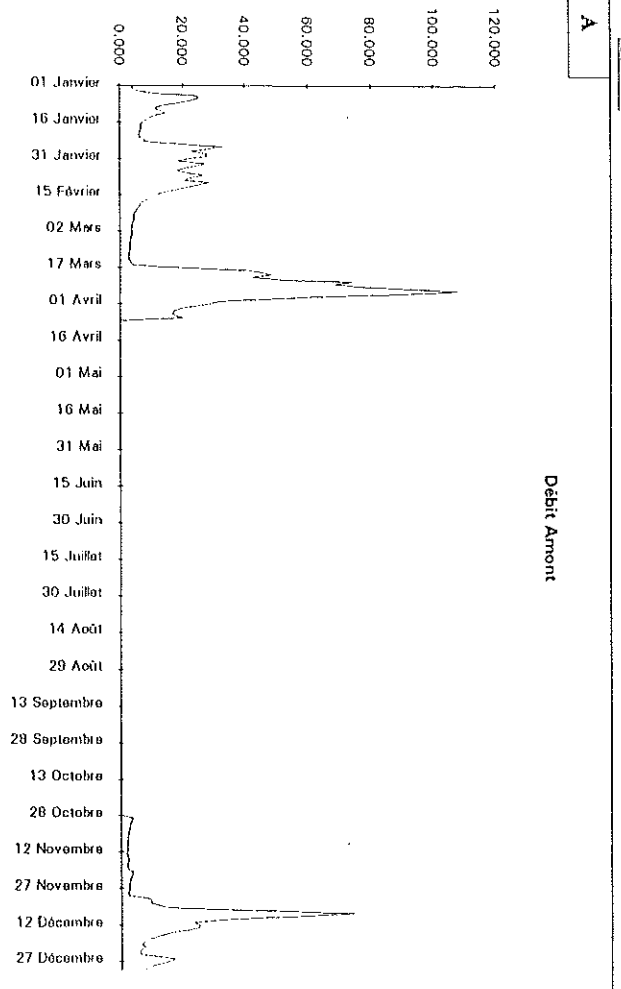


delta Q



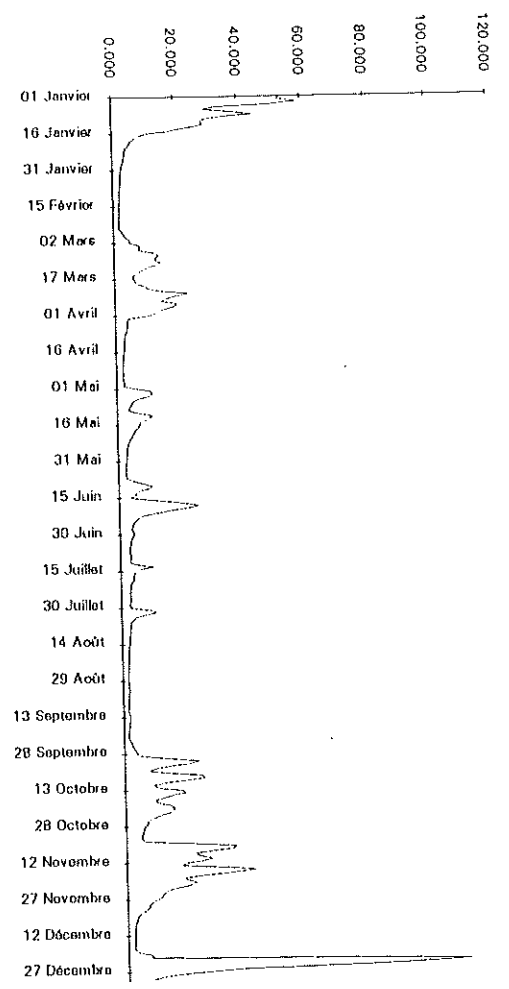
debit amont



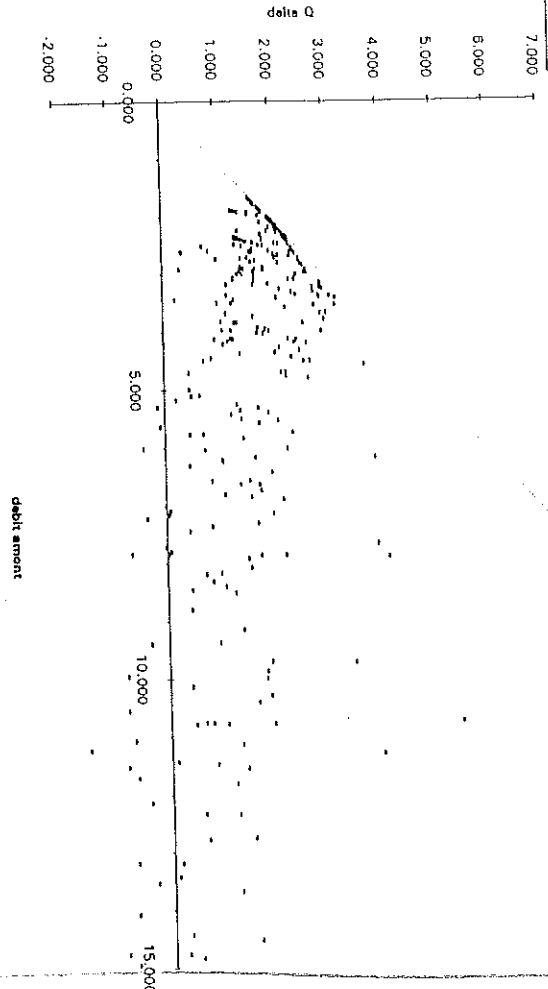


A

Débit Amont

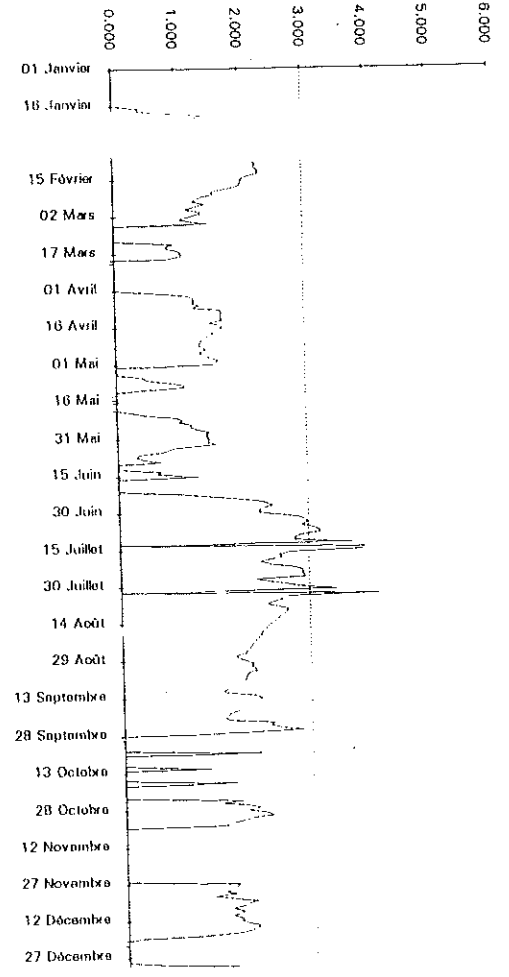


C

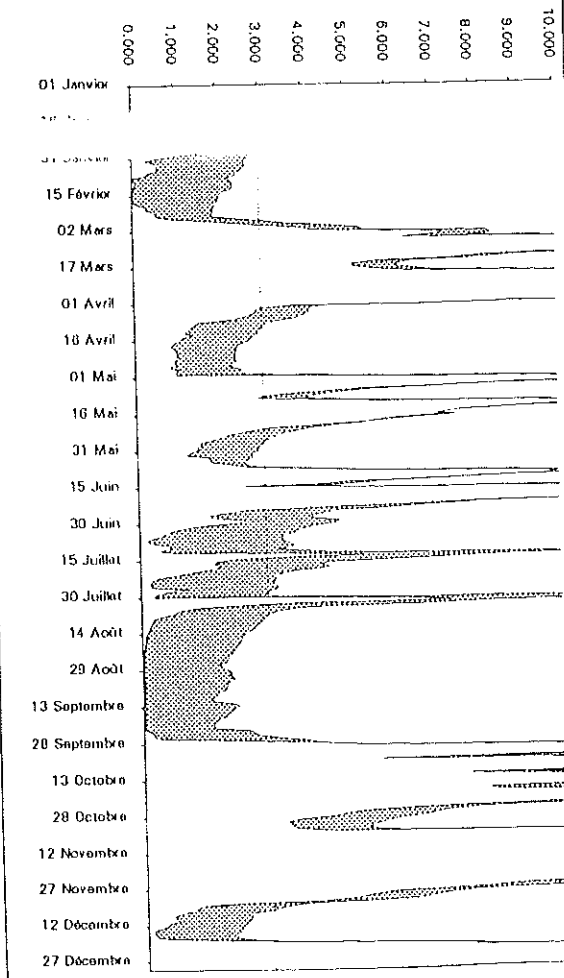


B

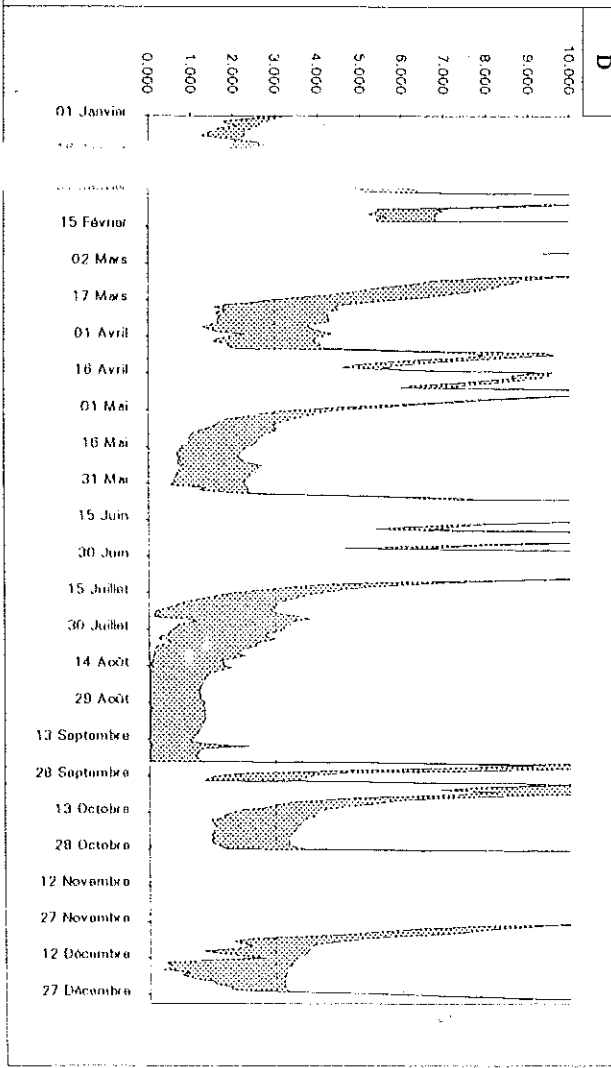
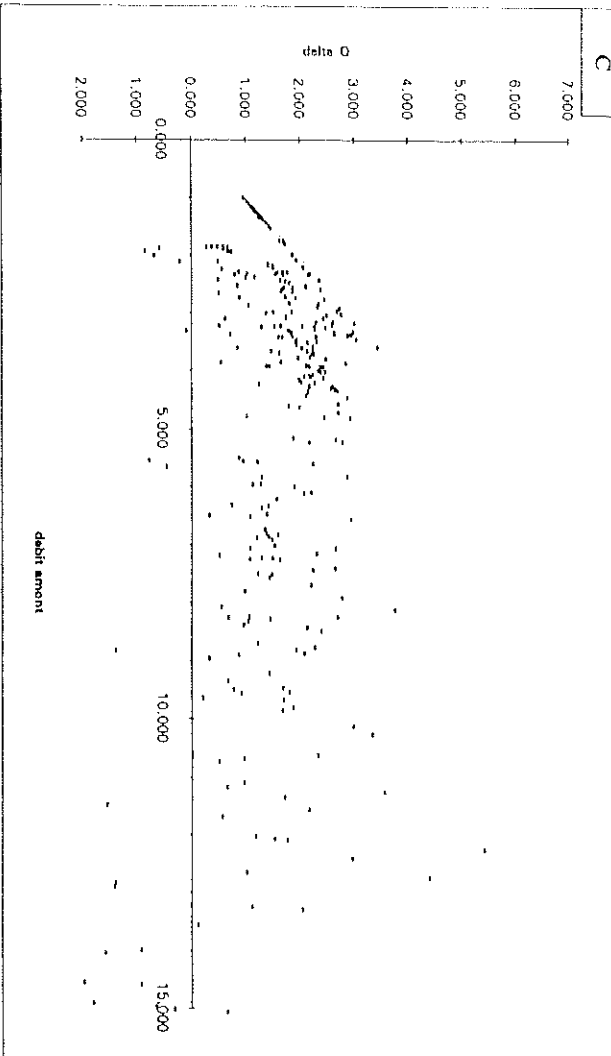
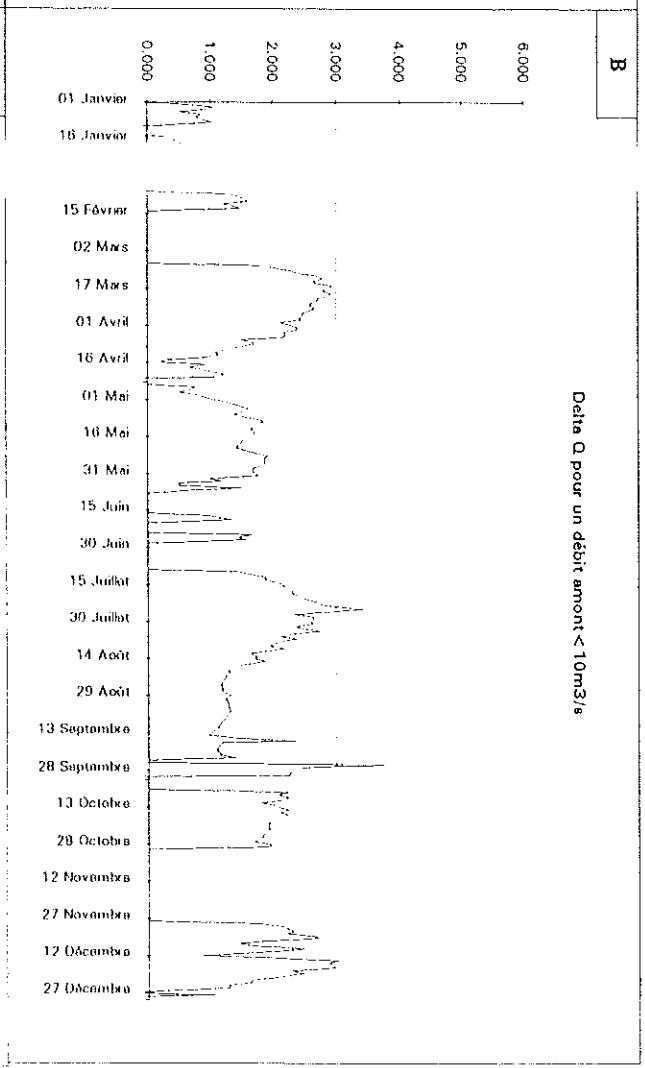
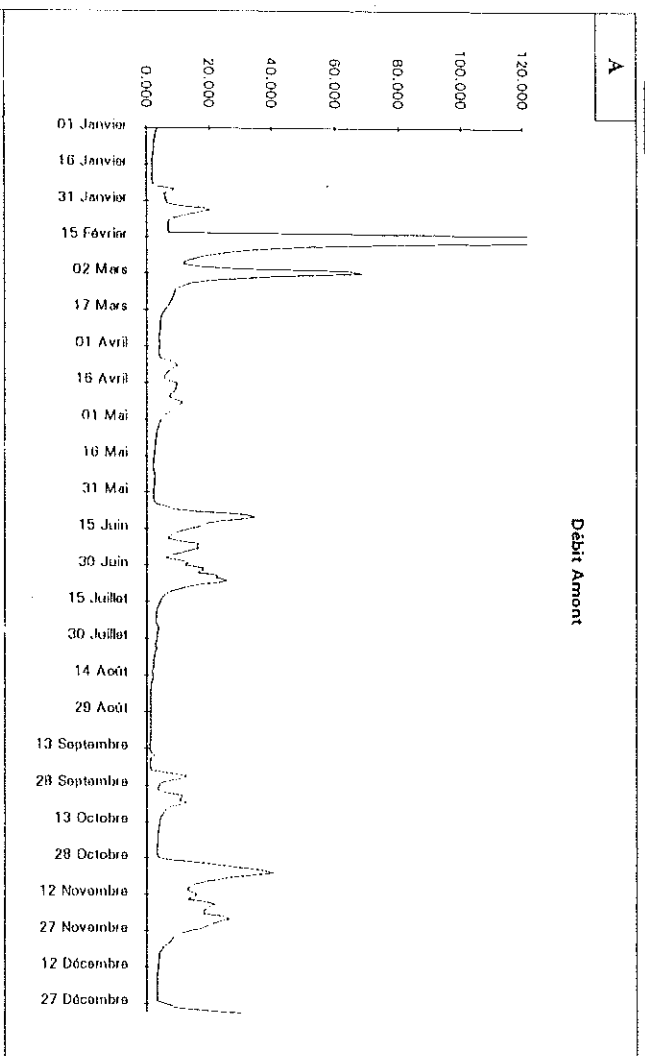
Delta Q pour un débit amont < 10m³/s

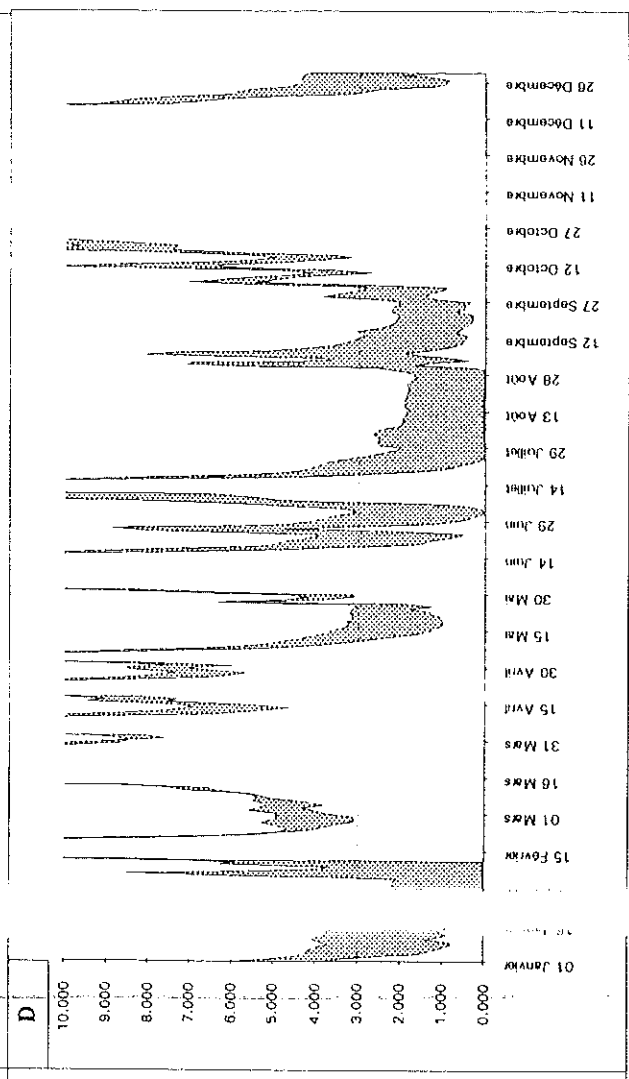
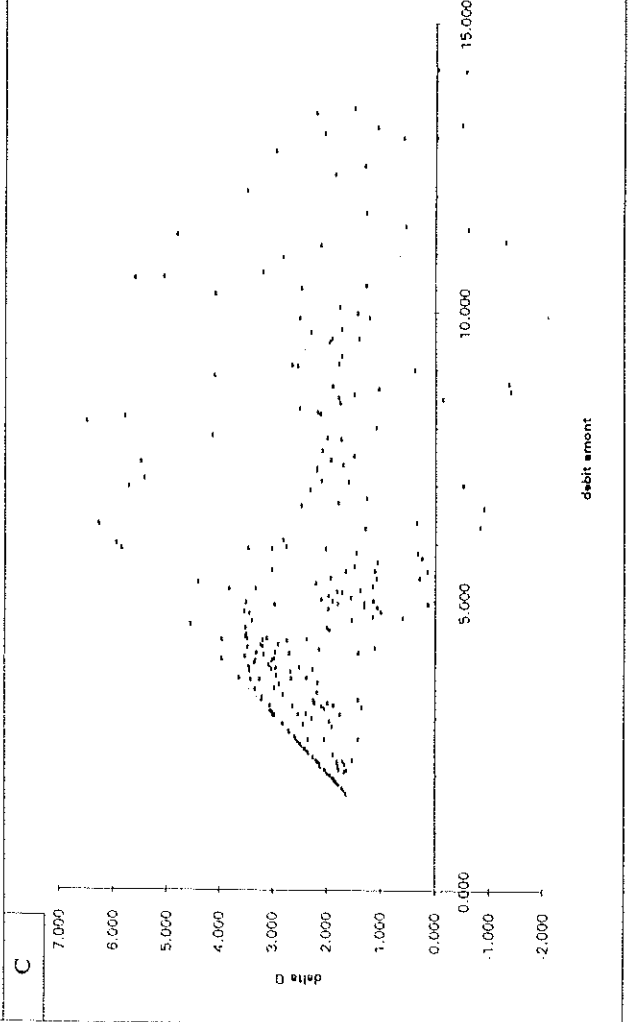
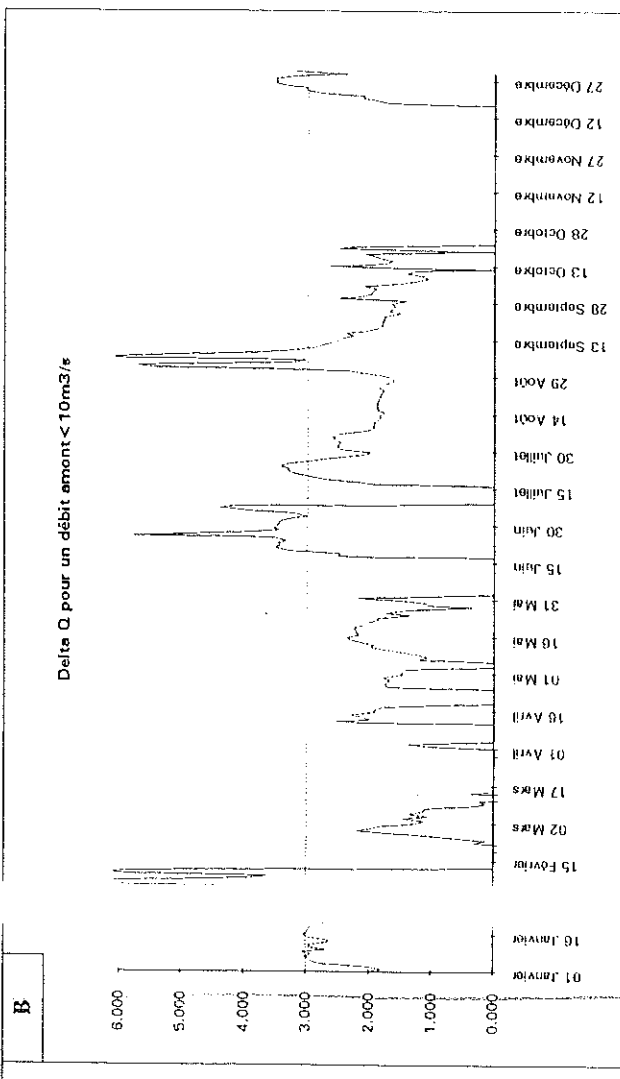
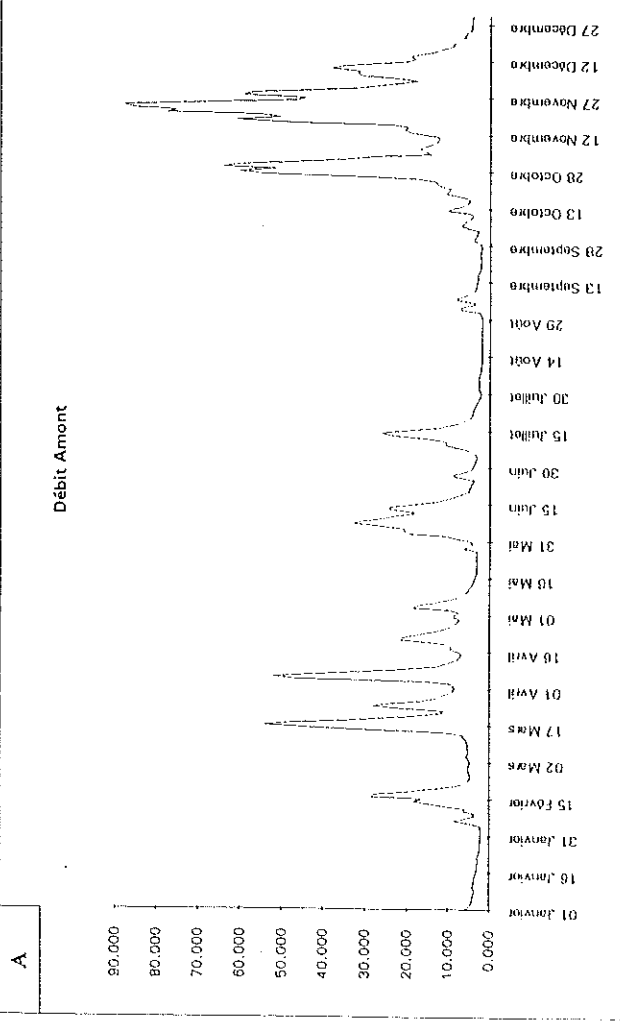


D



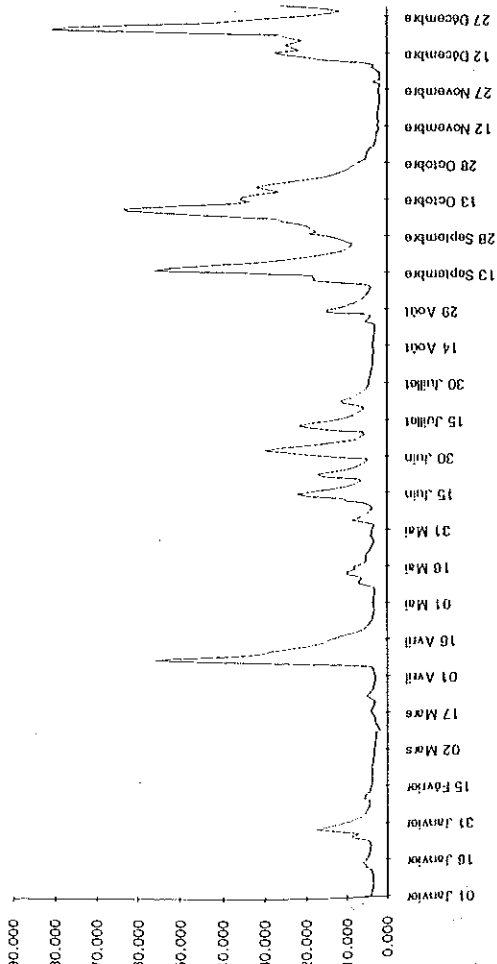






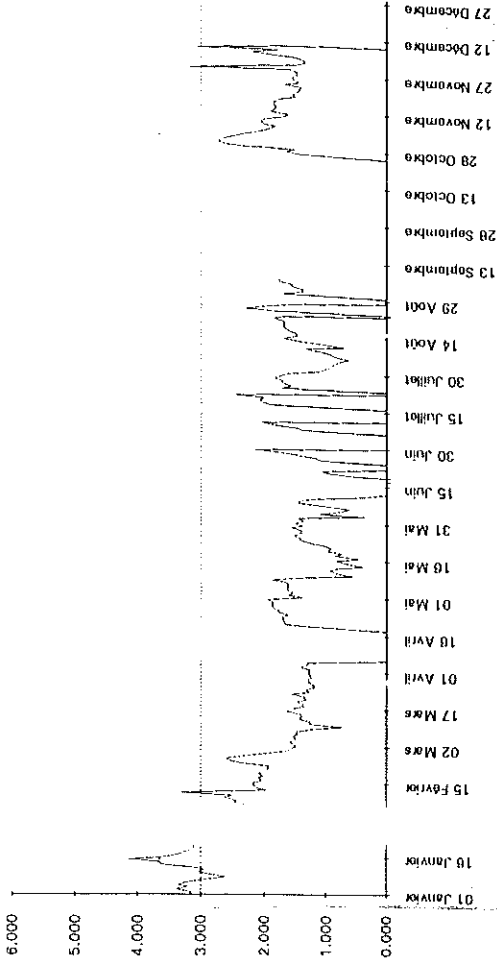
A

Débit Amont



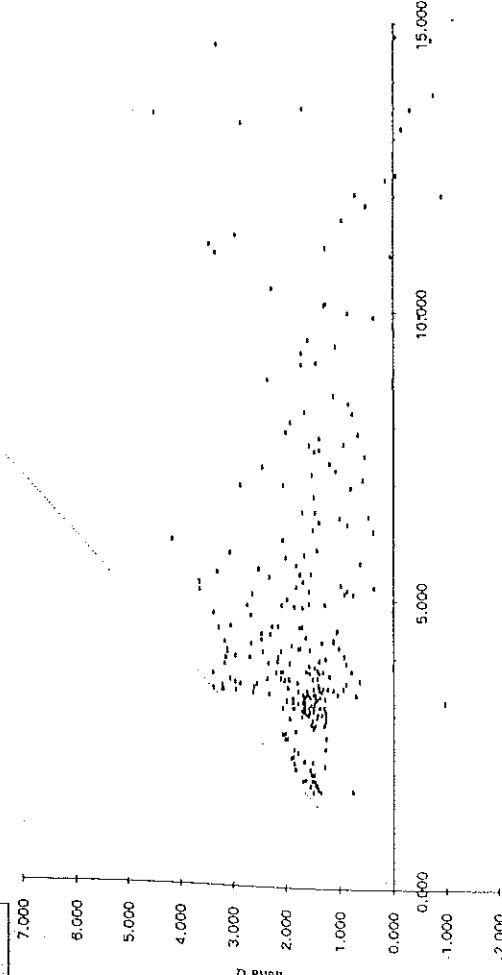
B

Delta Q pour un débit amont < 10m3/s

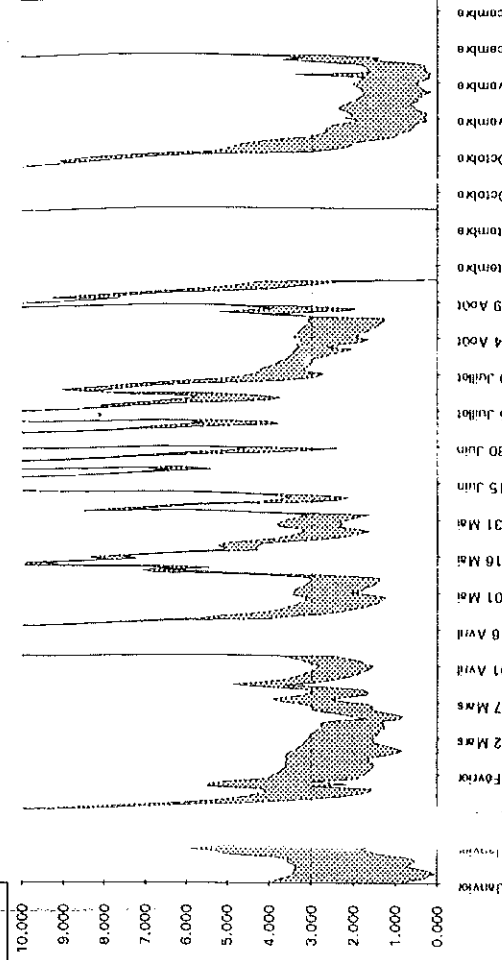


C

delta Q



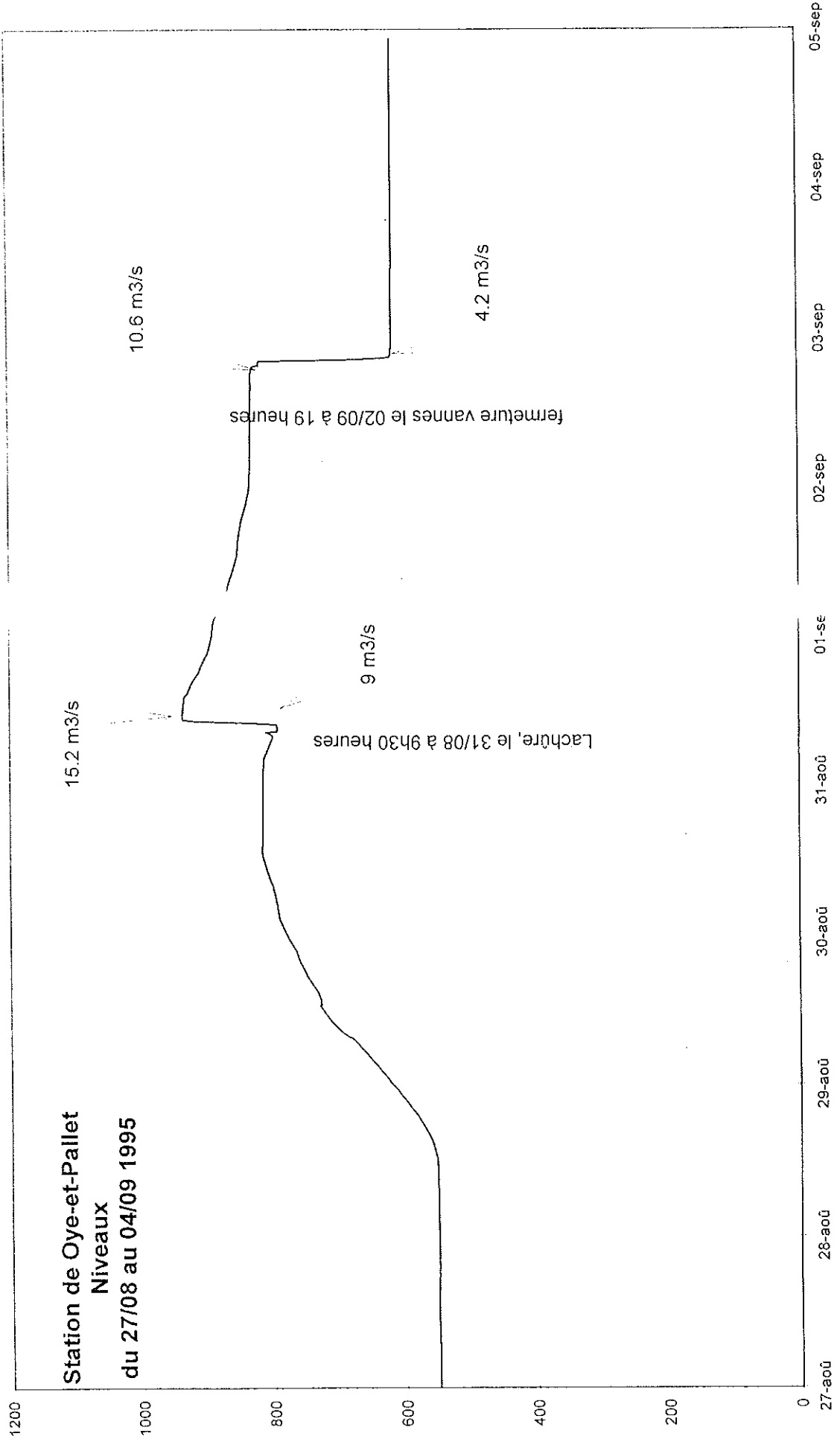
D

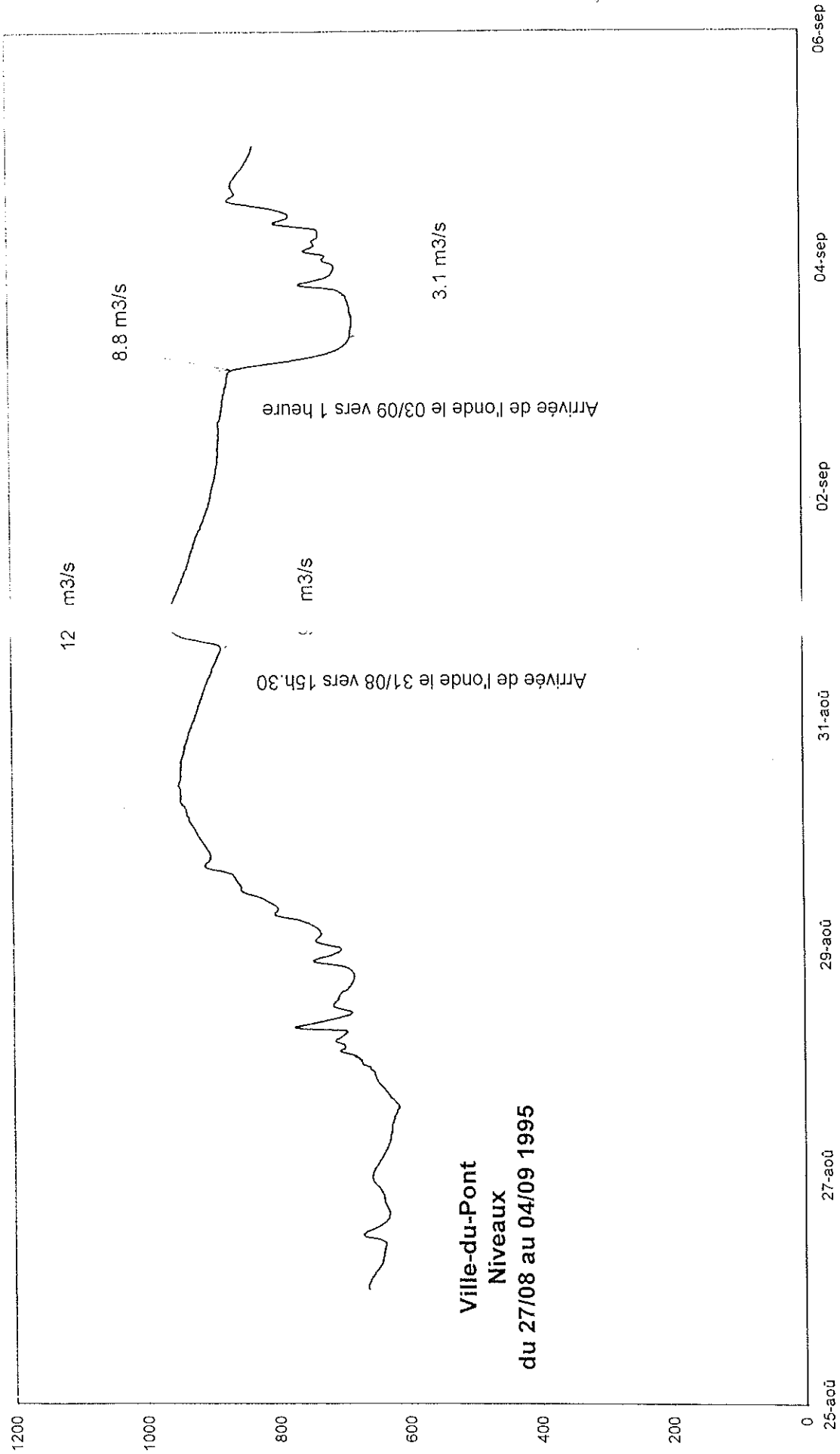


## 2 - HYDROLOGIE DU DOUBS

2-3 - EXPERIMENTATION : AUGMENTATION  
ARTIFICIELLE DES PERTES

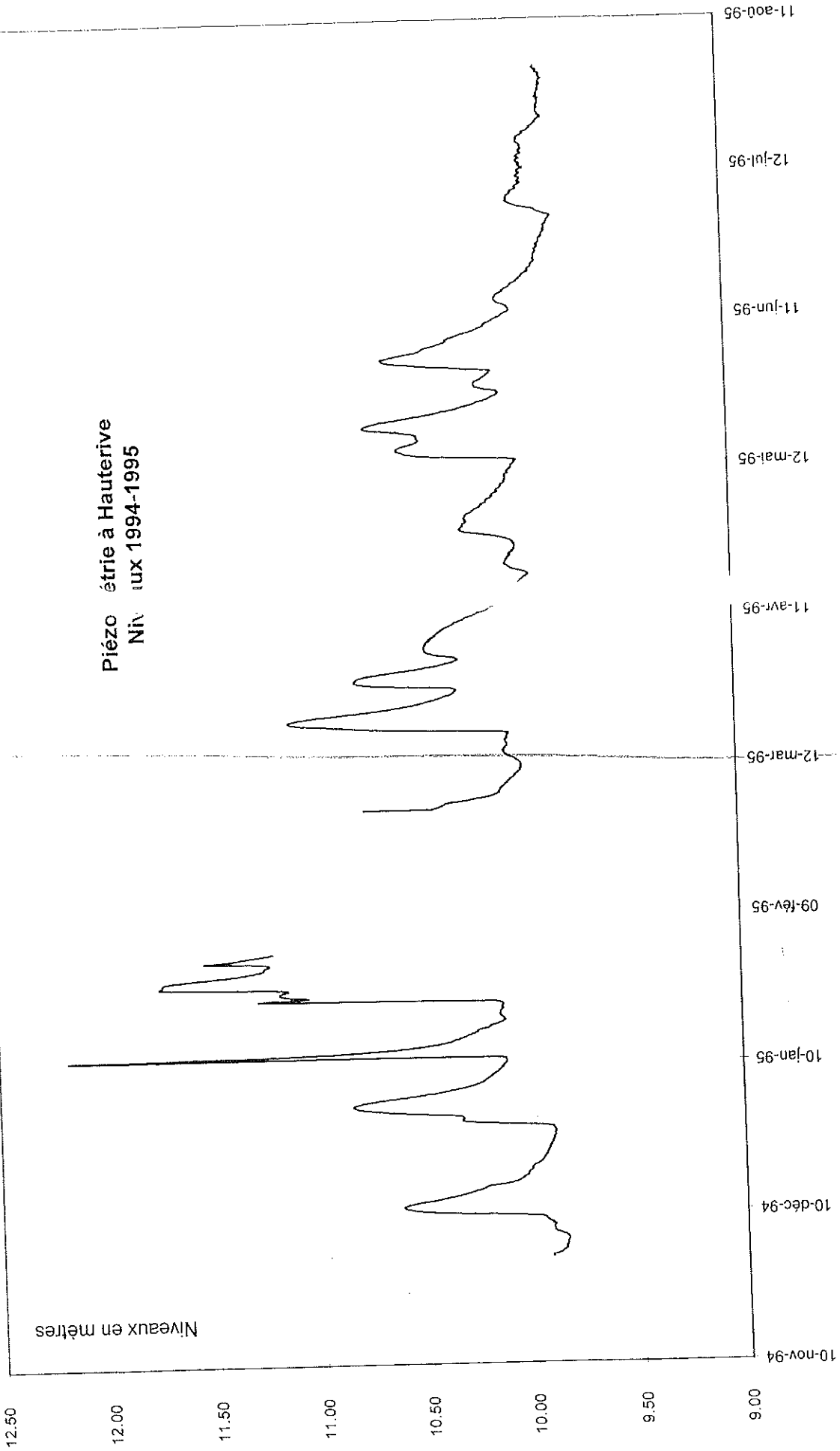
2-4 - PIEZOMETRIE

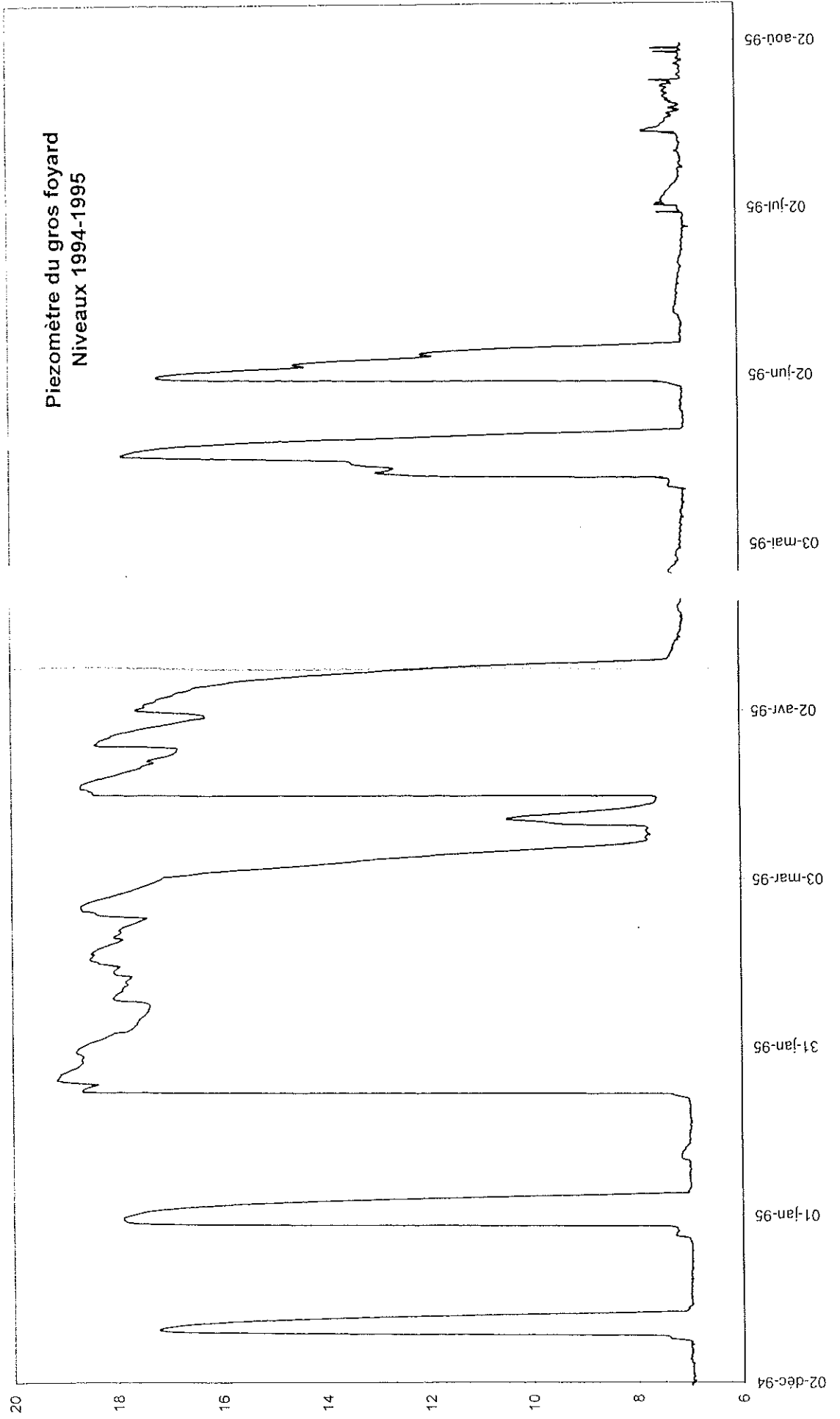




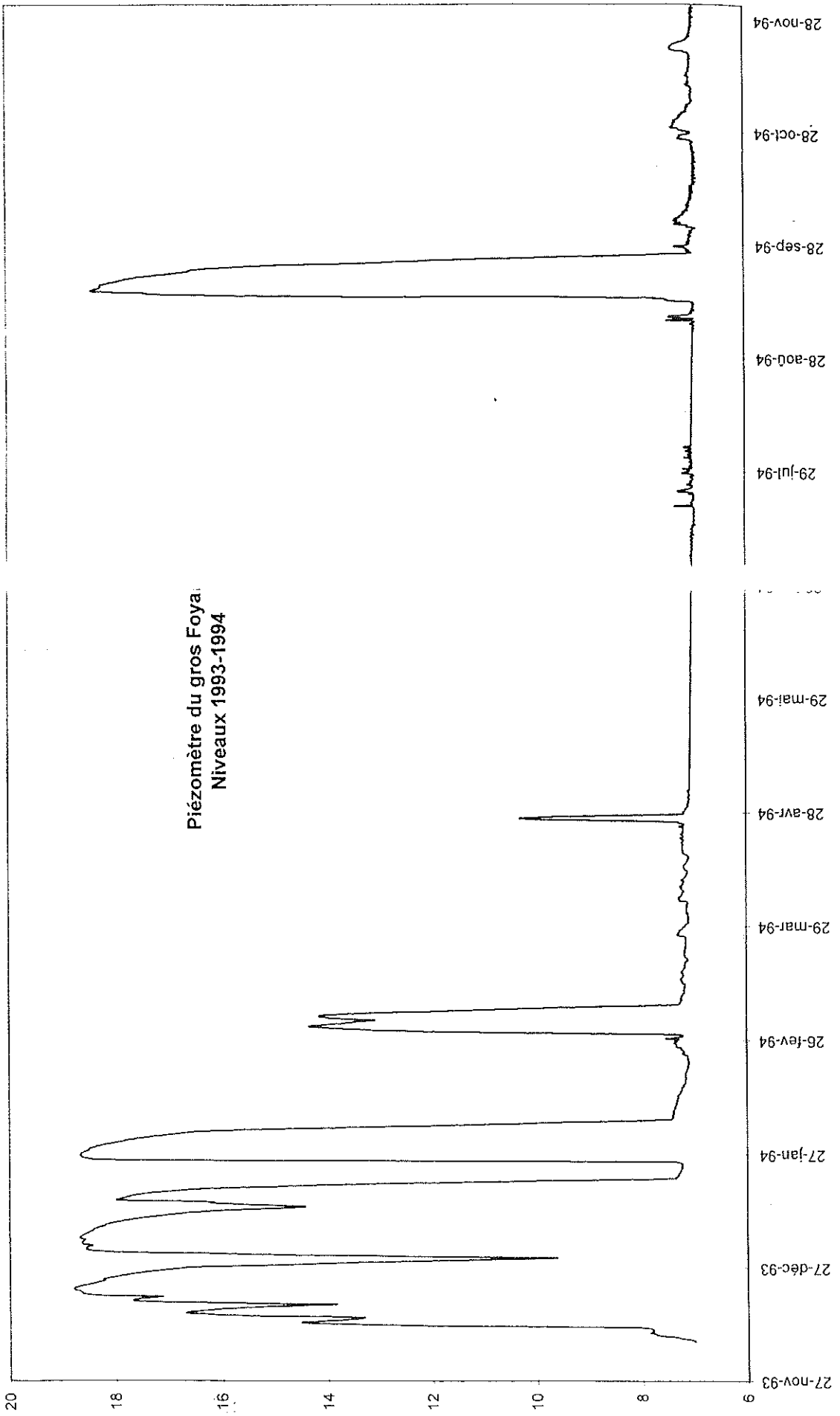
Niveaux en mètres

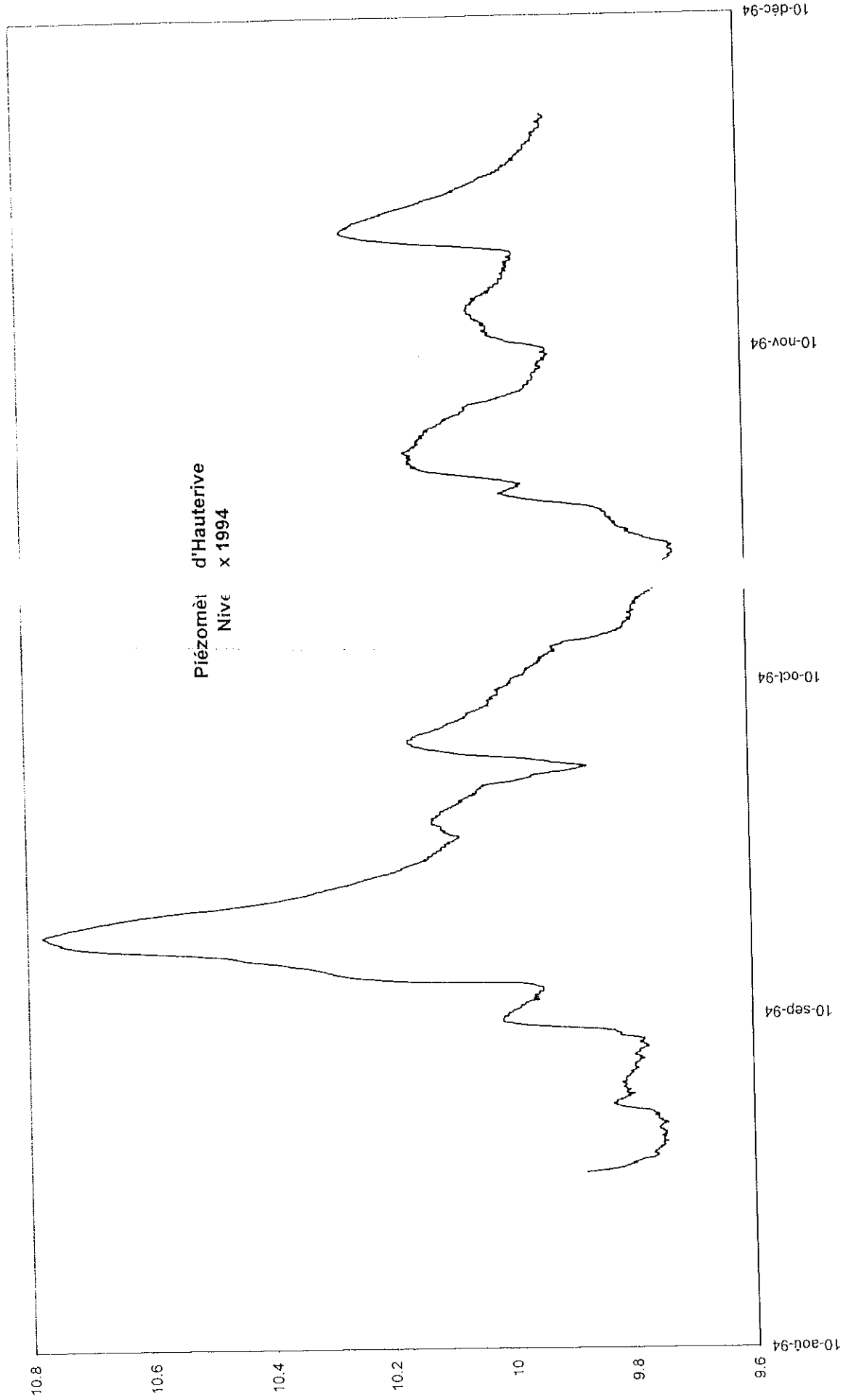
Piézométrie à Hauteferrière  
Niveaux 1994-1995





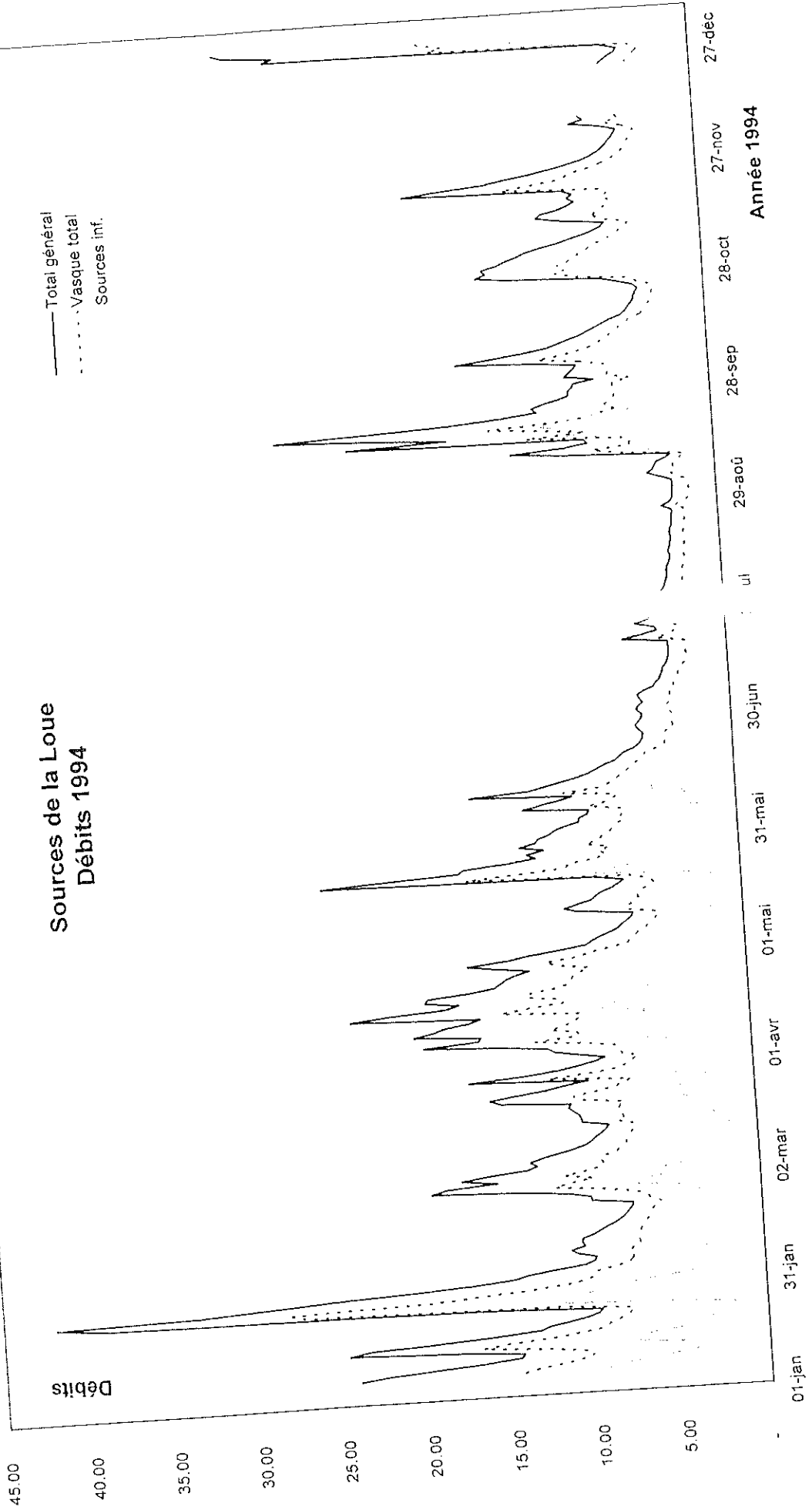




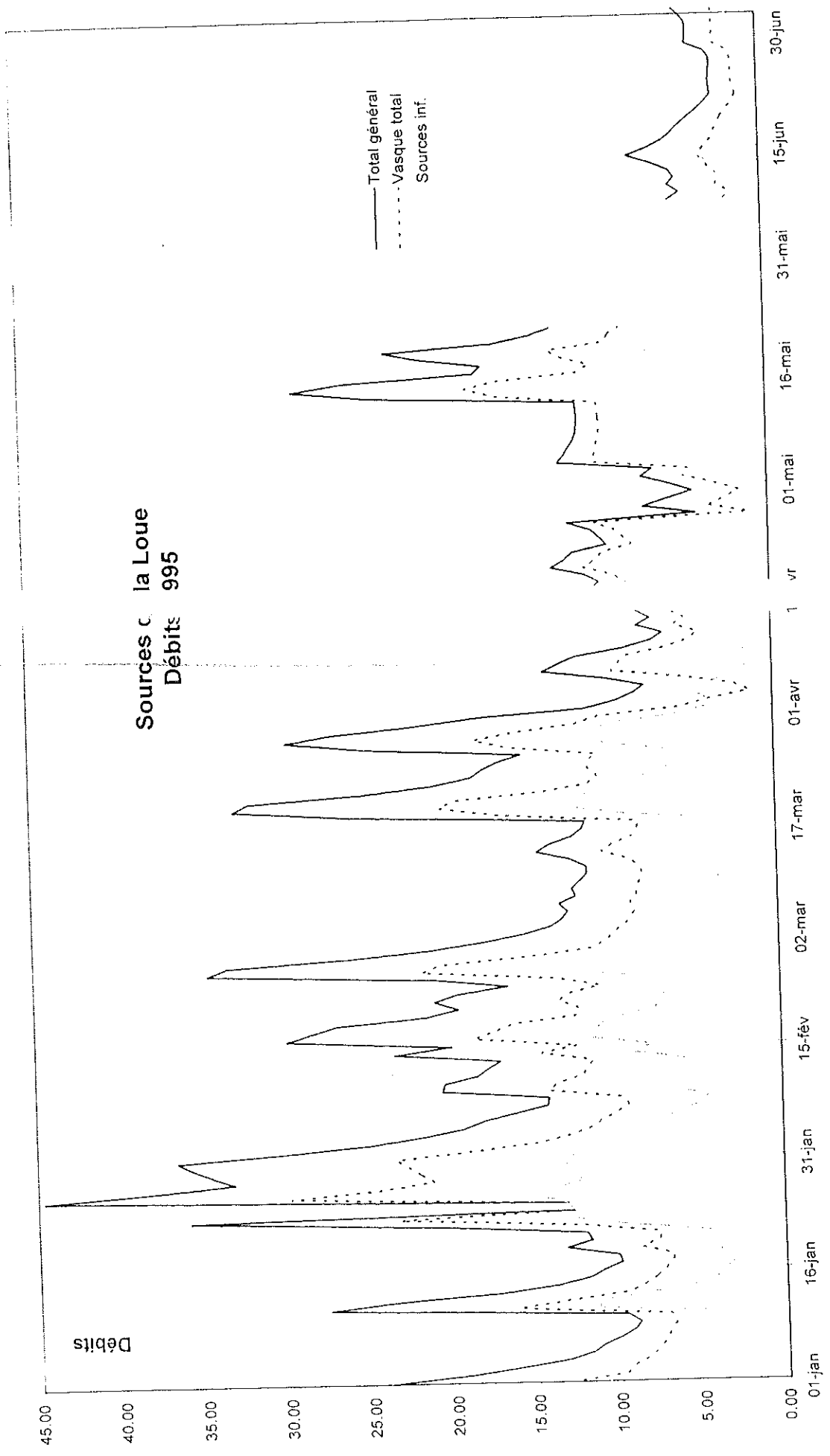


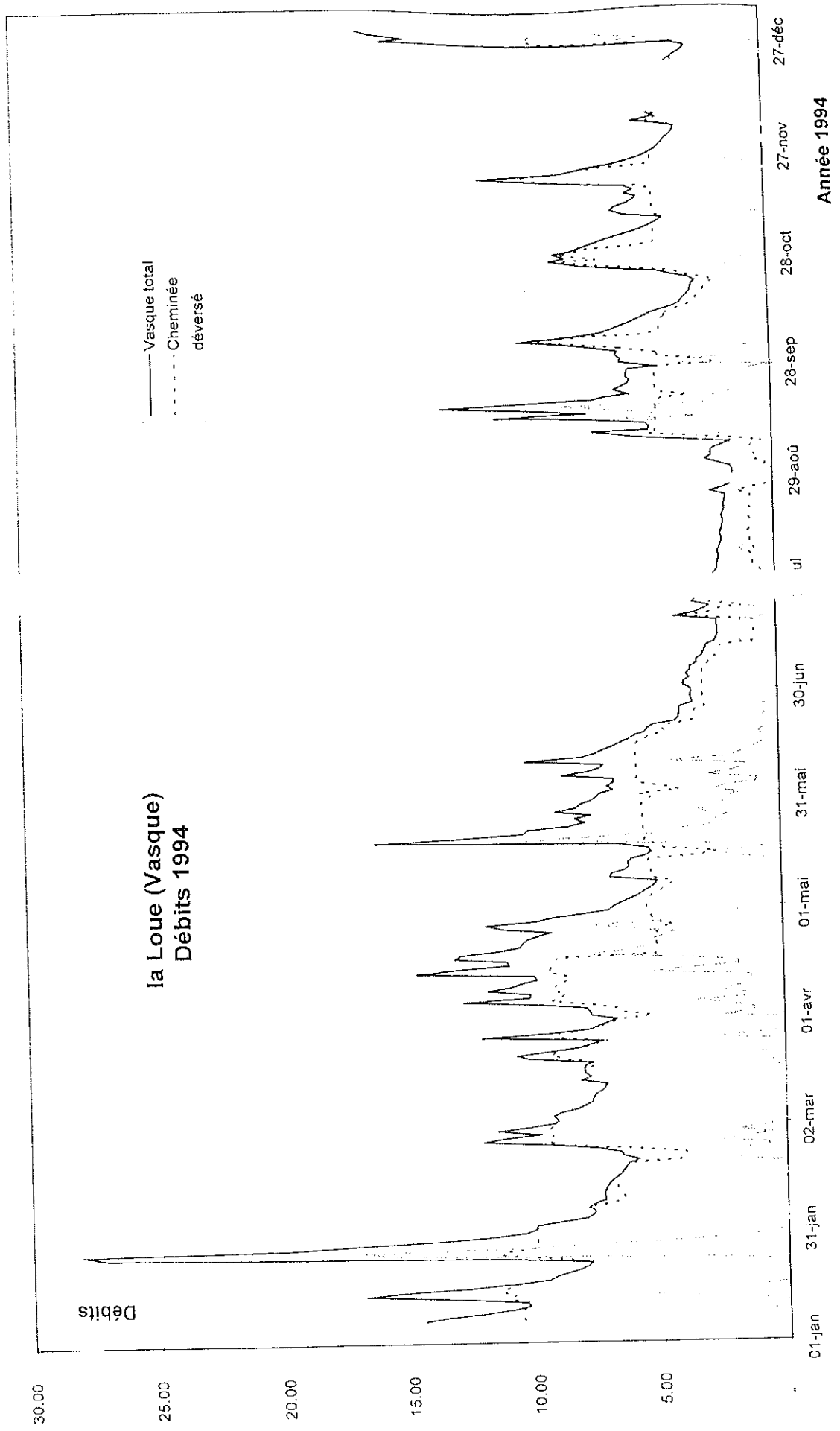
### 3 - HYDROLOGIE DE LA LOUE

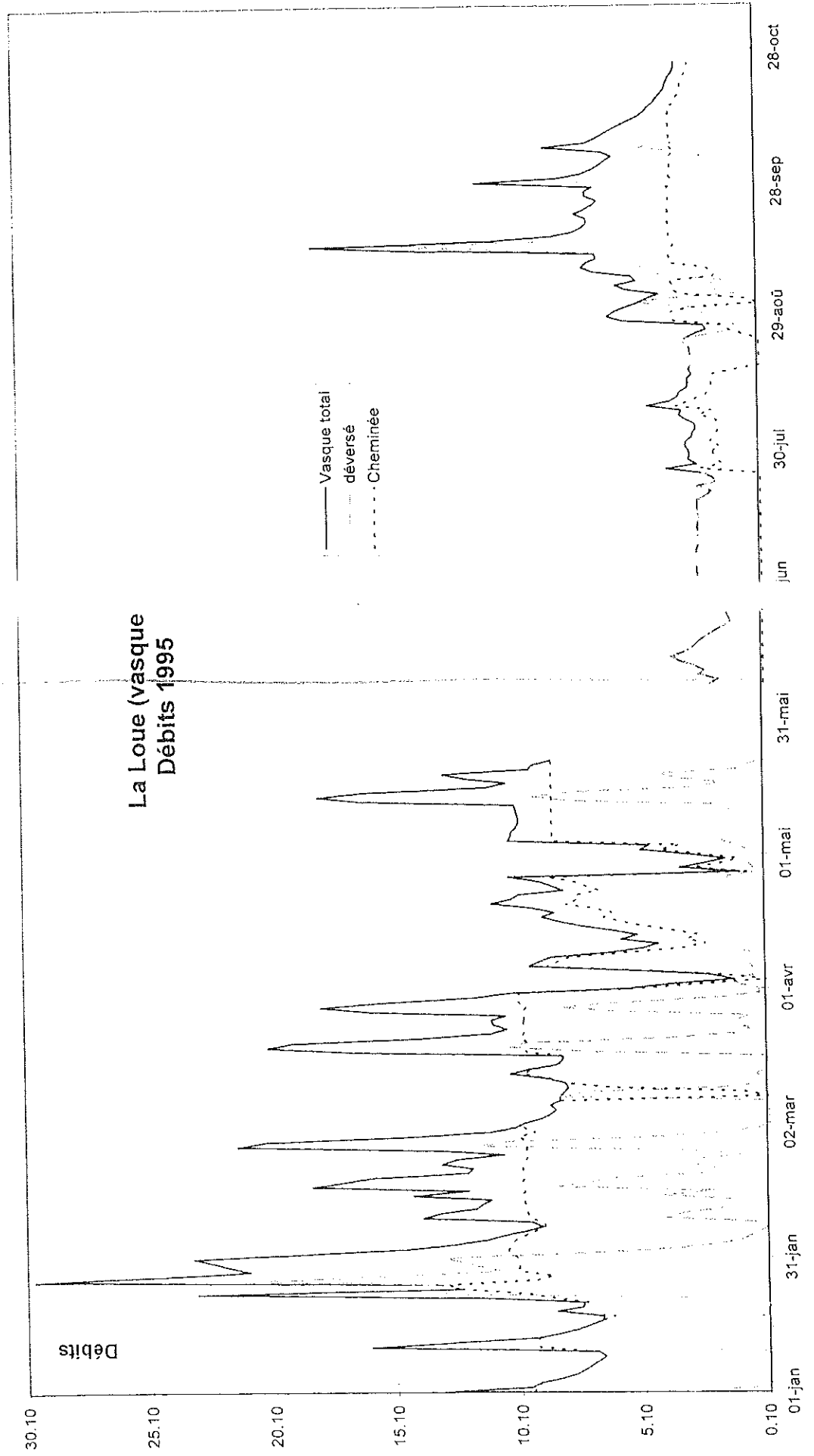
# Sources de la Loue Débits 1994



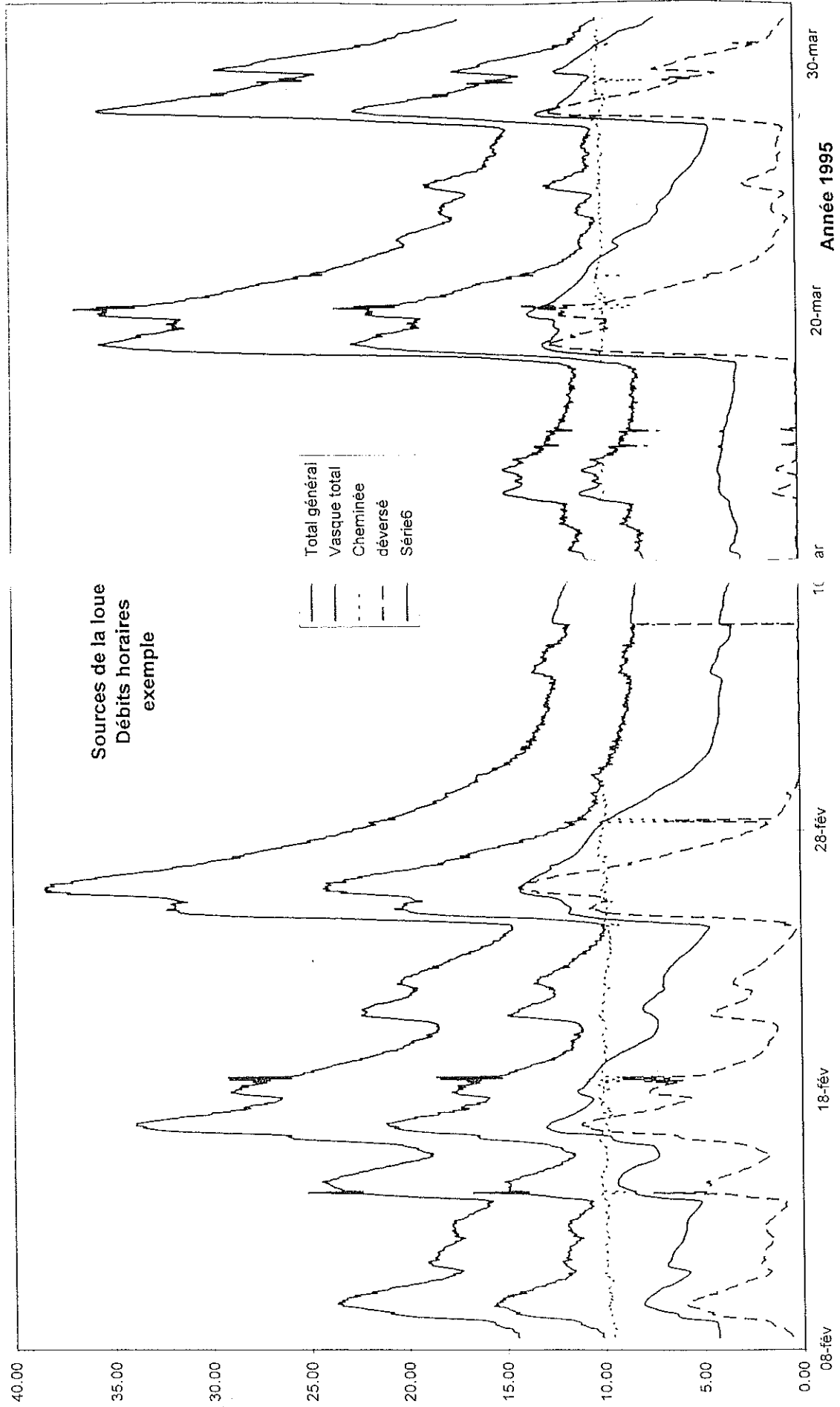
Sources c la Loue  
Débits 995





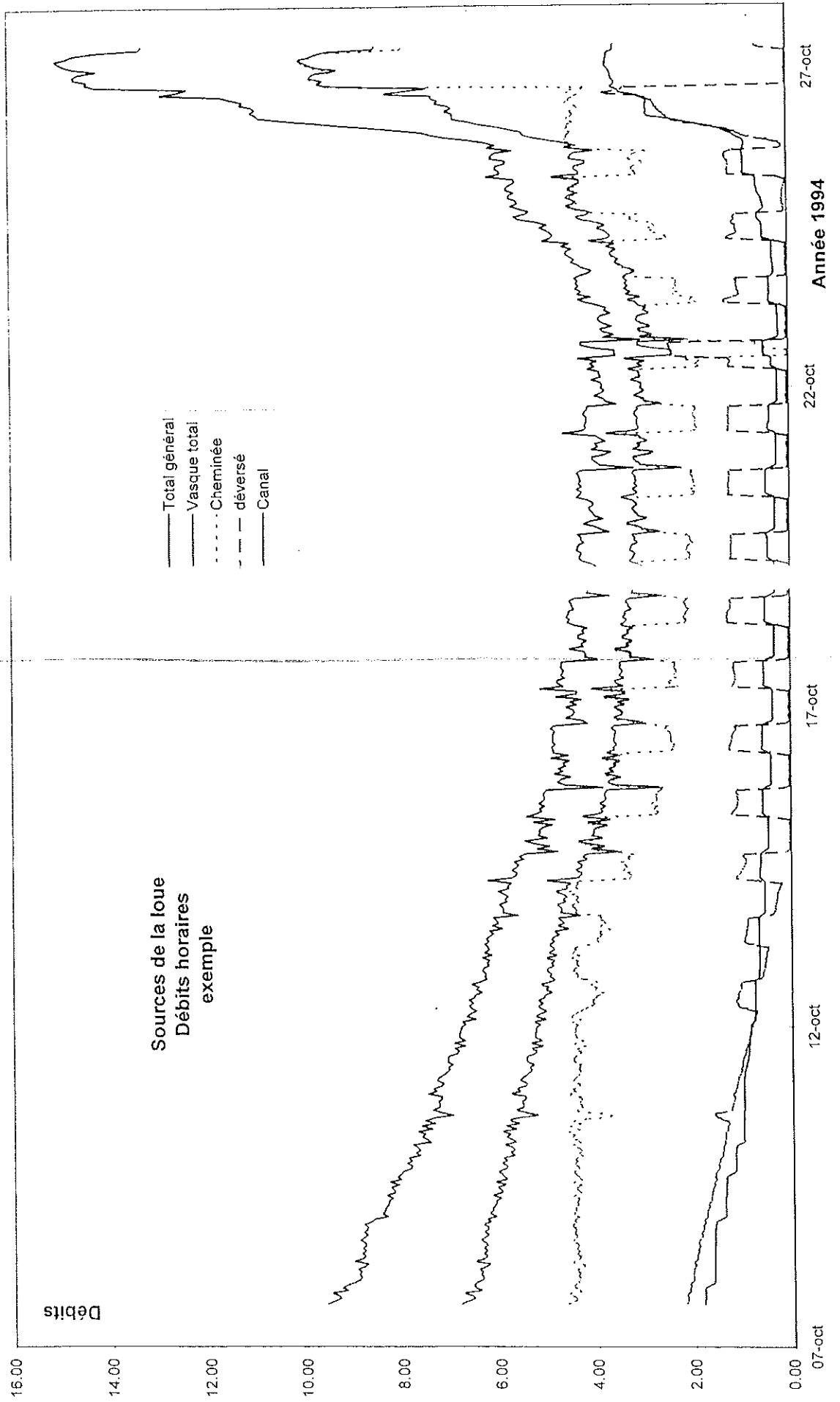


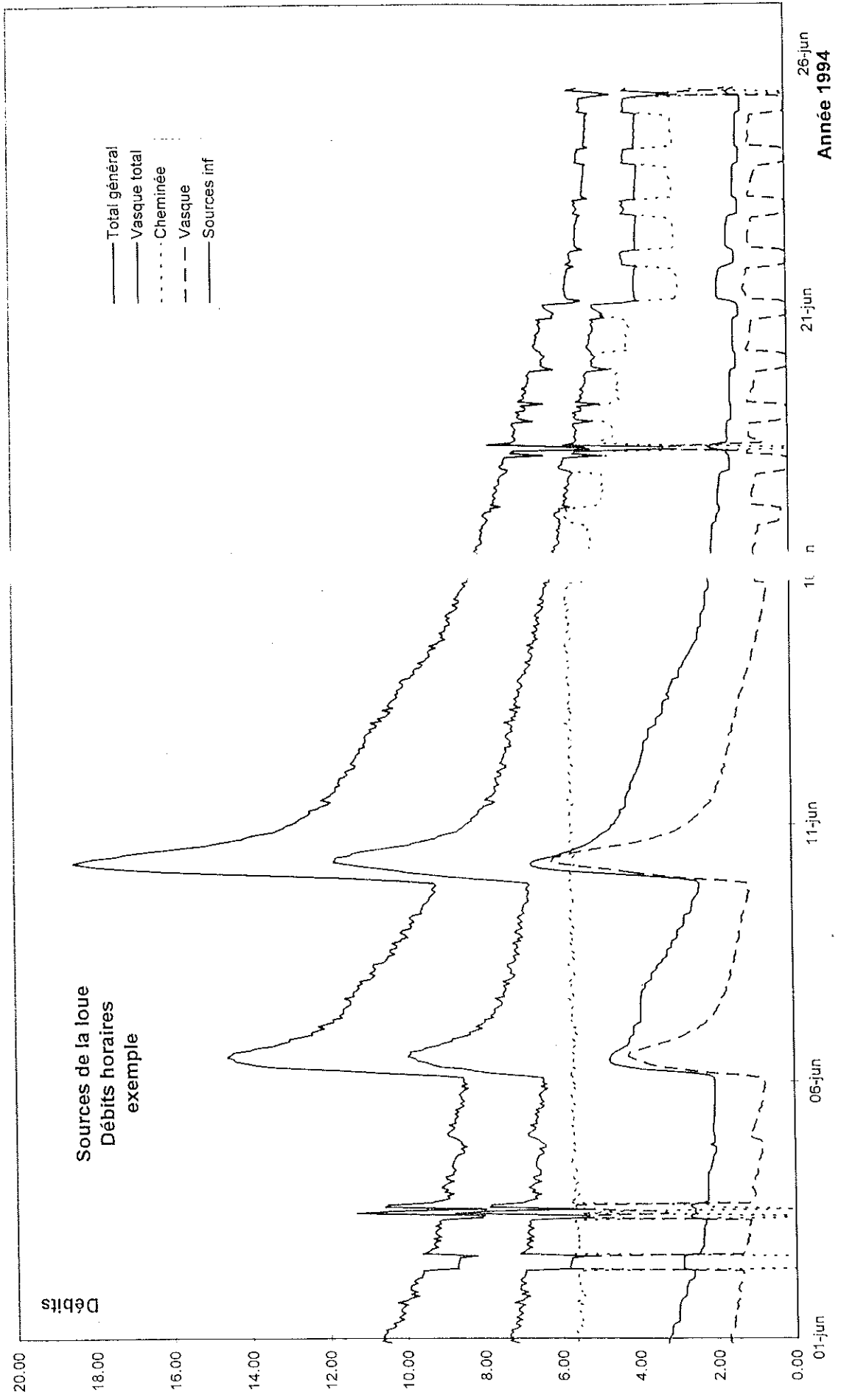
Graphiques Graphique 2

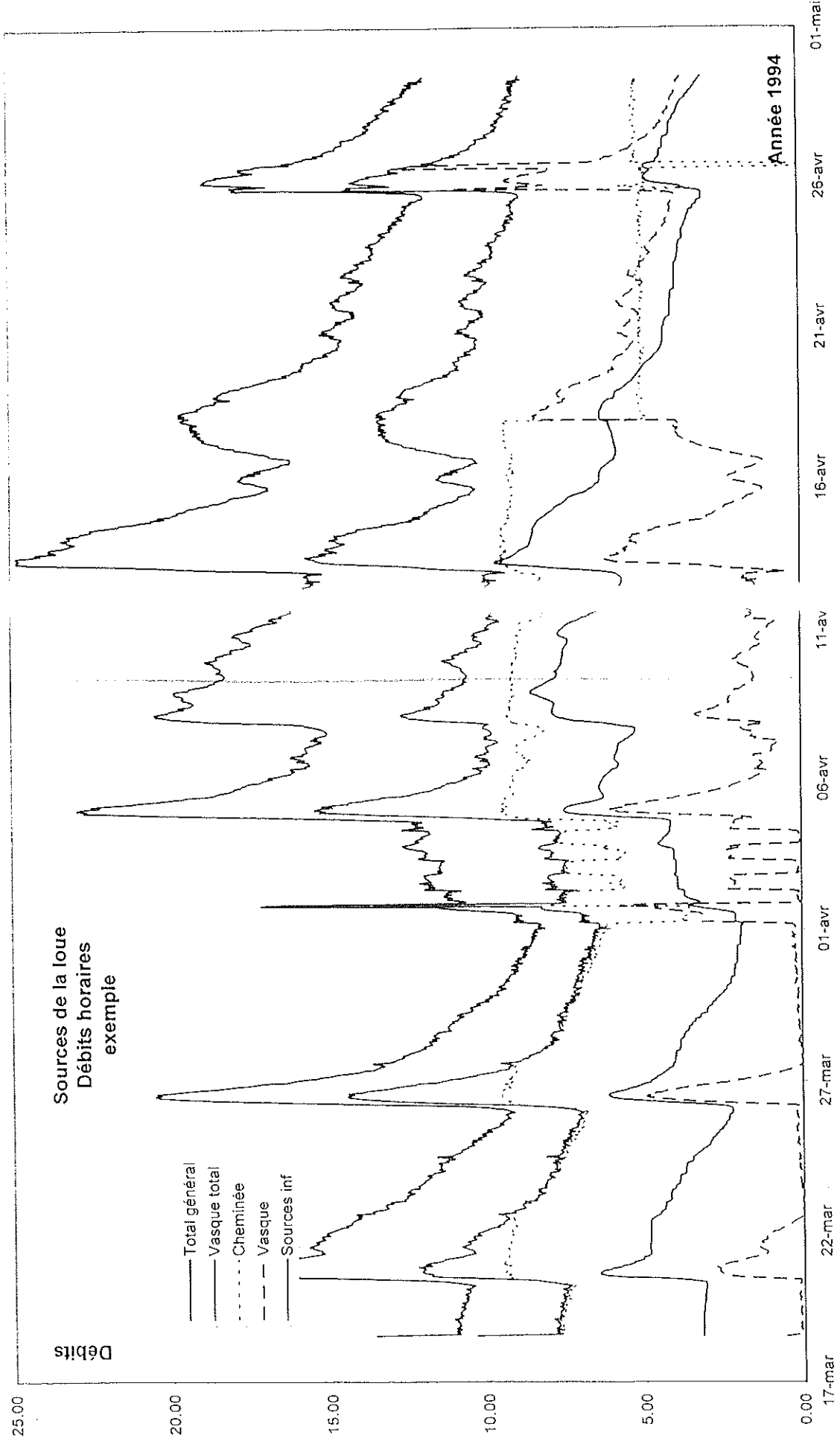


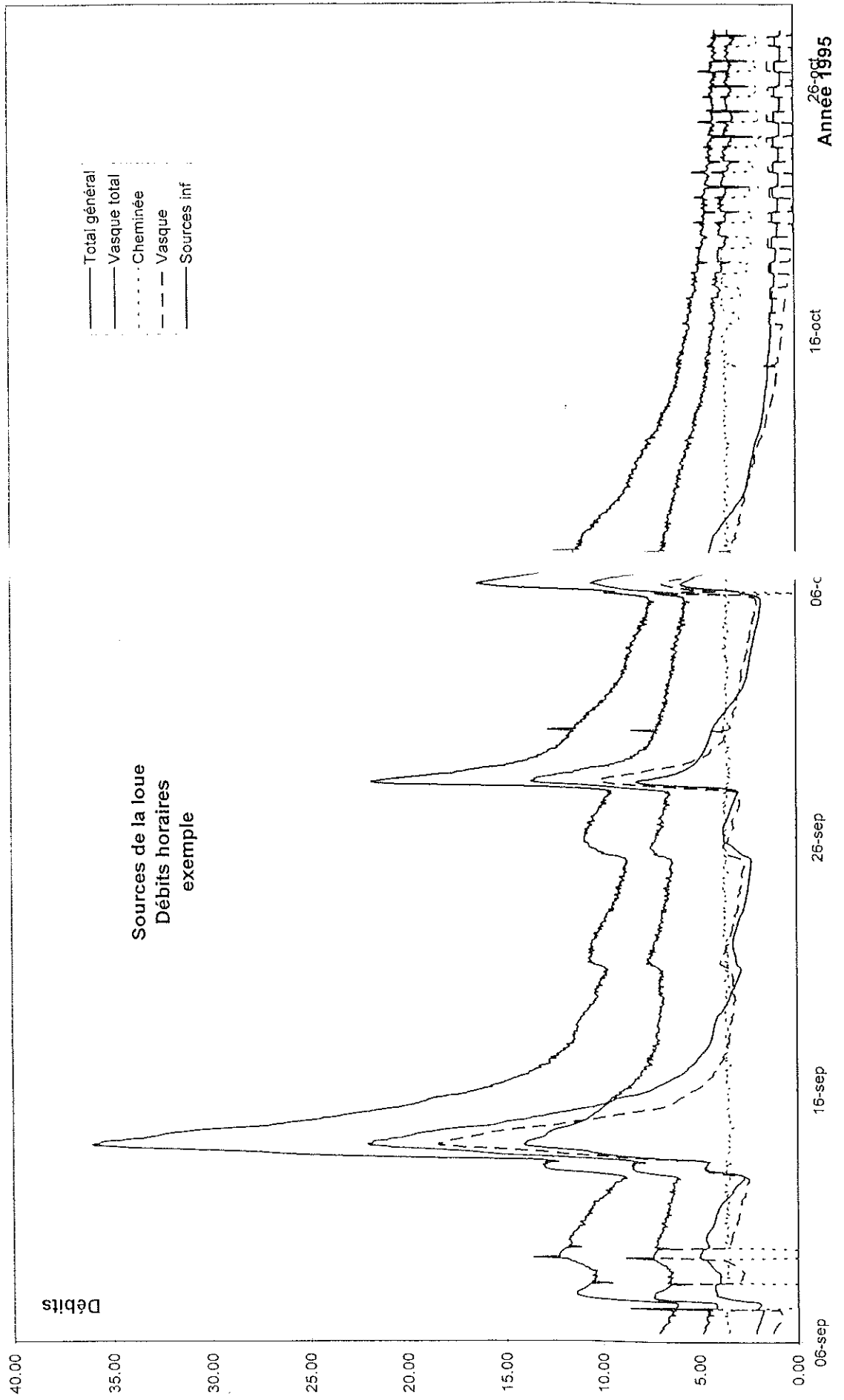


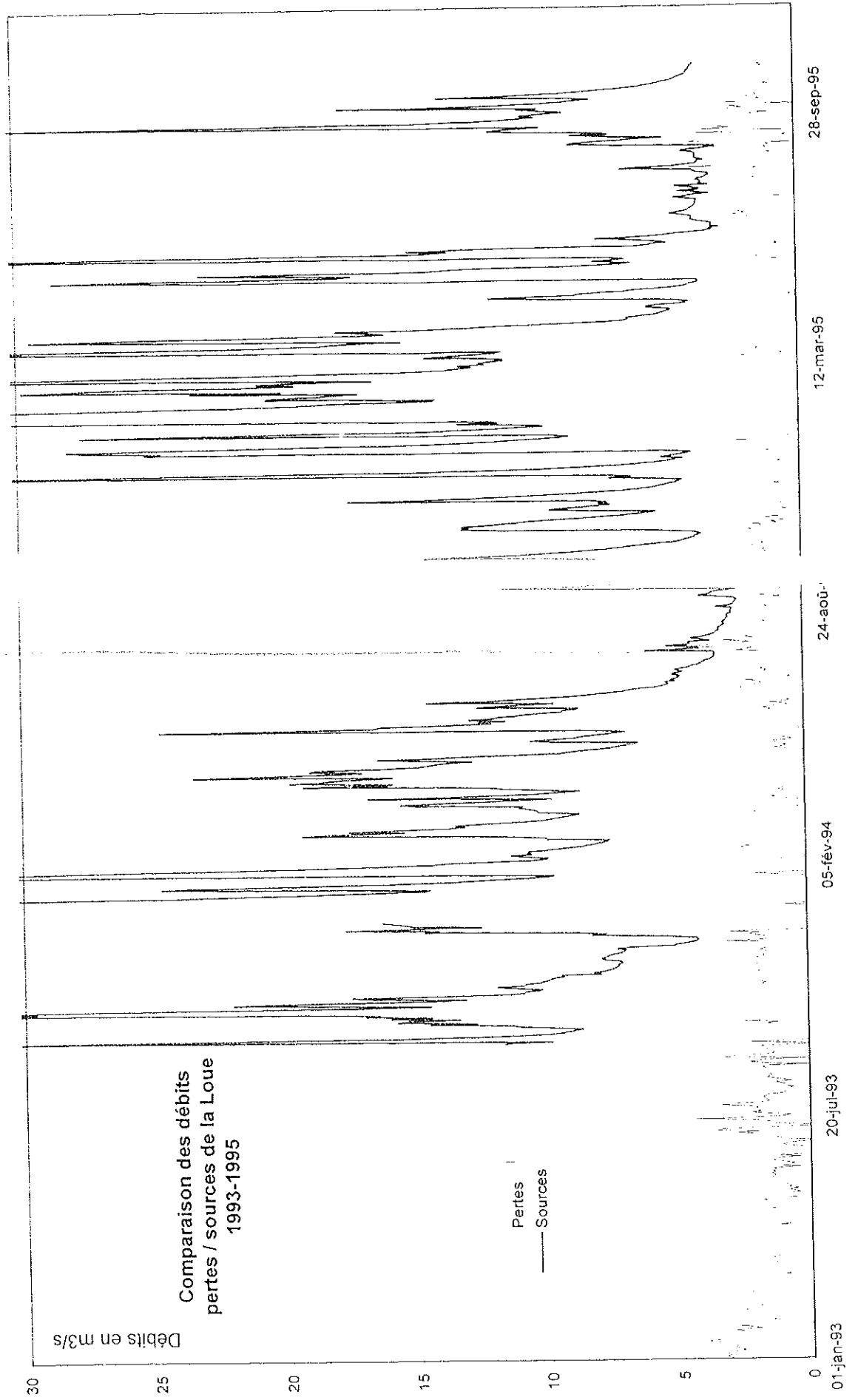
Graphiques Graphique 3



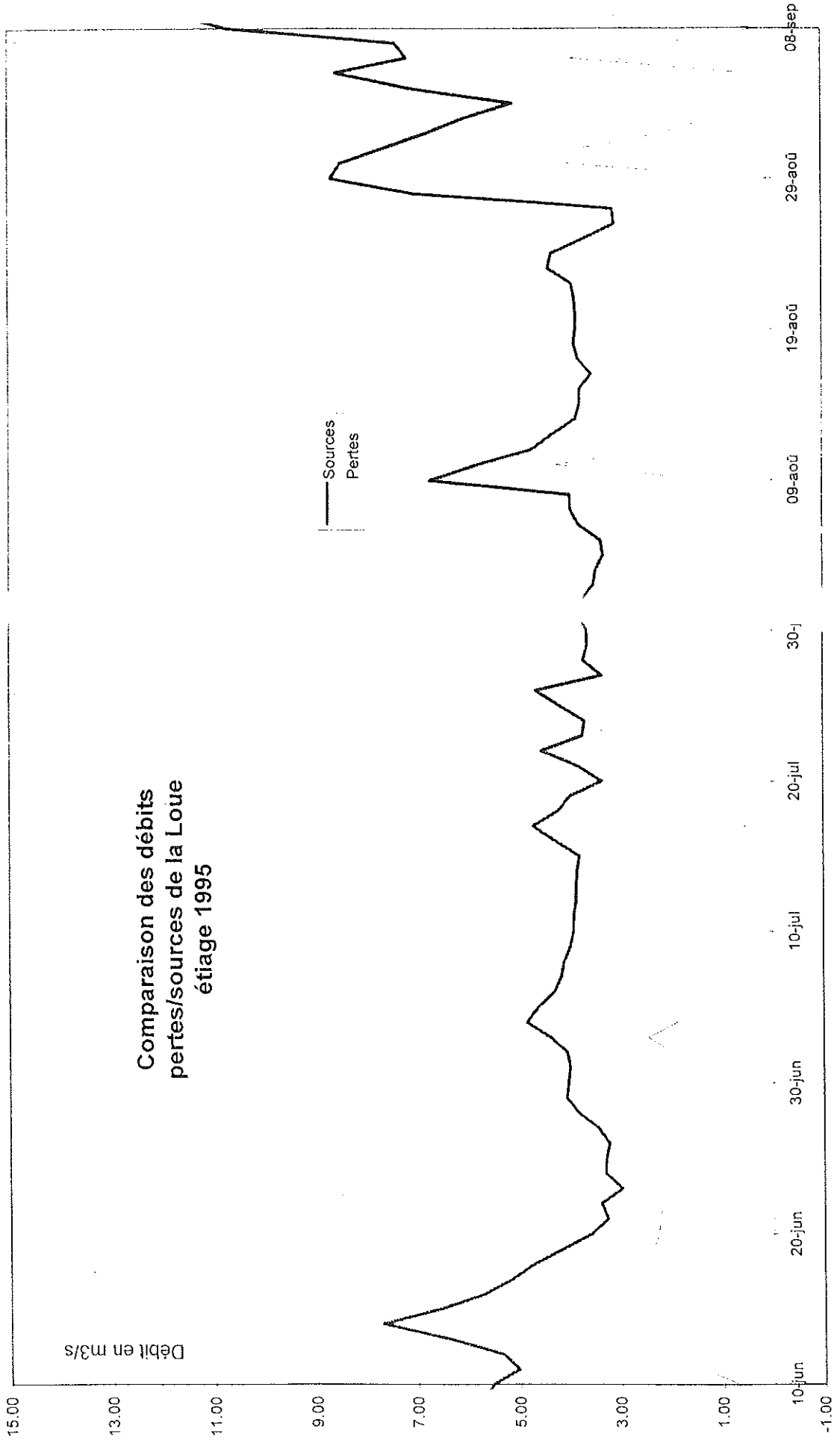








Comparaison des débits  
pertes/sources de la Loue  
étiage 1995



Comparaison des débits  
pertes/sources de la Loue  
étiage 1994

