

THÈSE

présentée

A LA FACULTÉ DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES DE
L'UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTE
- BESANÇON -

pour obtenir le

DIPLOME de DOCTEUR de
TROISIEME CYCLE en GEOLOGIE APPLIQUEE

par

Philippe JACQUEMIN

Maitre es-Sciences

**REPONSES HYDRODYNAMIQUES DES HAUTS BASSINS
DU DOUBS ET DE LA LOUE :**

**Simulation des écoulements, Influence de l'enneigement
et de la traversée du lac S^t Point,
Etude des pertes du Doubs**

Soutenu le 3 juillet 1984 devant la Commission d'Examen :

MM.	P. CHAUVÉ,	Professeur à l'Université de Franche-Comté	Président
	J. MANIA,	Professeur à l'Université de Franche-Comté	Rapporteur
	M. DAHAN,	Chargé de Recherche CNRS, Université de Franche-Comté	Examineur
	G. de MARSILY,	Professeur Ecole Nationale des Mines de Paris	Examineur
	G. CASTANY,	Professeur à Paris VI	Examineur
	P. DEMANGELLE,	Chef du S.R.A.E. de Franche-Comté	Invité
	S. PIEYNS,	Ingénieur Hydrologue, ORSTOM Paris	Invité



THÈSE

présentée

A LA FACULTÉ DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES DE
L'UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTE
- BESANÇON -

pour obtenir le

DIPLOME de DOCTEUR de
TROISIEME CYCLE en GEOLOGIE APPLIQUEE

par

Philippe JACQUEMIN

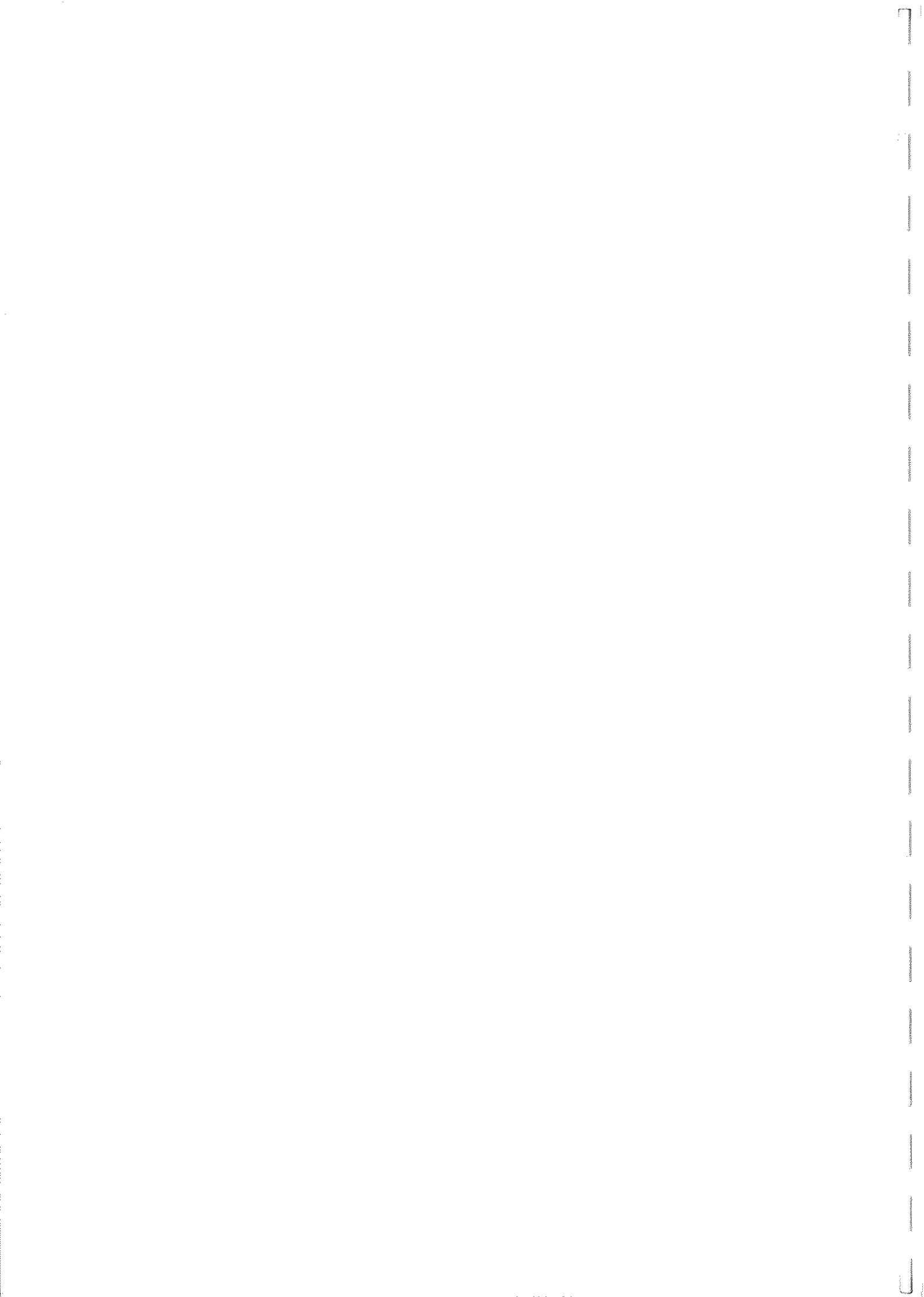
Maitre es-Sciences

**REPONSES HYDRODYNAMIQUES DES HAUTS BASSINS
DU DOUBS ET DE LA LOUE :**

**Simulation des écoulements; Influence de l'enneigement
et de la traversée du lac S^t Point;
Etude des pertes du Doubs**

Soutenue le 3 juillet 1984 devant la Commission d'Examen :

MM.	P. CHAUVE,	Professeur à l'Université de Franche-Comté	Président
	J. MANIA,	Professeur à l'Université de Franche-Comté	Rapporteur
	M. DAHAN,	Chargé de Recherche CNRS, Université de Franche-Comté	Examineur
	G. de MARSILY,	Professeur Ecole Nationale des Mines de Paris	Examineur
	G. CASTANY,	Professeur à Paris VI	Examineur
	P. DEMANGELLE,	Chef du S.R.A.E. de Franche-Comté	Invité
	S. PIEYNS,	Ingénieur Hydrologue, ORSTOM Paris	Invité



Président : Monsieur le Professeur Jacques ROBERT

DOYEN

M. le Professeur Jean BULABOIS
Physique Générale-optique

PRÉSIDENTS HONORAIRES

MM. THIÉBAUT, LÉVÊQUE

ASSESSEUR

M. le Professeur Bernard MILLET
Botanique

DOYENS HONORAIRES

MM. GLANGEAUD, JACQUEMAIN, CHATELET, THIÉBAUT,
BERNARD, GALATRY

PROFESSEURS HONORAIRES

MM. BENNETON, CHATELET, MESNAGE, PERROT, QUANTIN
REAL, THIRY, TRILLAT, TRONCHET, UEBERSFELD

PROFESSEURS

MM. ALBIGNAC Roland	: Biologie anim. et Ecologie	LAUDE Bernard	Chimie organique
BANTEGNIE Robert	: Mathématiques	LESAINTE Pierre	Mathématiques I
BENILAN Philippe	: Mathématiques	LHOTE François	Automatique
BERNARD Jean	: Chimie Physique	MANIA Jacky	:Hydrogéologie
BIDAULT Michel	: Taxonomie expérimentale	MERIGOUX Henri	Cristallographie
BROQUET Paul	: Géologie	MIELLOU J-Claude	Analyse numérique
BRUCKERT Sylvain	: Ecologie végétale	MILLET Bernard	Botanique
BULABOIS Jean	: Physique Gle Optique	MONTAGNER Hubert	Psychophysiologie
CAPODANNO Pierre	: Mécanique théorique	MOREELS Guy	Astronomie
CERUTTI Ernest	: Chimie appliquée	OLIVIER Marcel	Electronique quantique
CHALEAT Raymond	: Mécanique appliquée	OYTANA Claude	: Mécanique appliquée
CHAMBAUDET Alain	: Chimie	PAGETTI Jacques	Corrosion et traitements de surface
CHARDON J-Claude	: Spectroscopie	PARIZET Jean	: Mathématiques
CHAUVE Pierre	: Géologie minéralogie	PLUVINAGE Philippe	: Physique théorique
COUGNARD Jean	: Mathématiques	POTIER Robert	: Physique des solides
DEVIN Claude	: Chimie 1er cycle	RANGHEARD Yves	: Géologie
DOBREMEZ J-François	: Biologie	RIPPLINGER Jean	: Physiologie animale
DUBOUCHET Jacques	: Physiologie végétale	ROBERT Daniel	: Physique
GALATRY Louis	: Physique moléculaire	ROBERT Guy	: Electrochimie
GAUDEMER Yves	: Biochimie	ROBERT Jacques	: Mathématiques I
GIRARDET Claude	: Physique Moléculaire	STRICKER Christophe	: Mathématiques
GOMOT Lucien	: Zoologie-Embryologie	THEOBALD J-Gérard	: Spectroscopie hertzienne
GOUARNE René	: Mathématiques	THIEBAUT Jean	: Pétrogr. minéralogie
GRAS Georges	: Mathématiques	TREHEL Michel	: Informatique
GREMILLARD Jean	: Mathématiques	VERNEAUX Jean	: Zoologie-Embryologie
JOLICARD Georges	: Physique moléculaire	VIENOT Jean-Charles	: Physique Gle Optique
KARCHE J-Paul	: Pétrographie Minéralogie	VIGOUREUX J-Marie	: Physique
LALLEMENT Gérard	: Mécanique appliquée	WEIL Michel	: Mathématiques

Responsable des services administratifs : M. Jean-Marie RUNGE

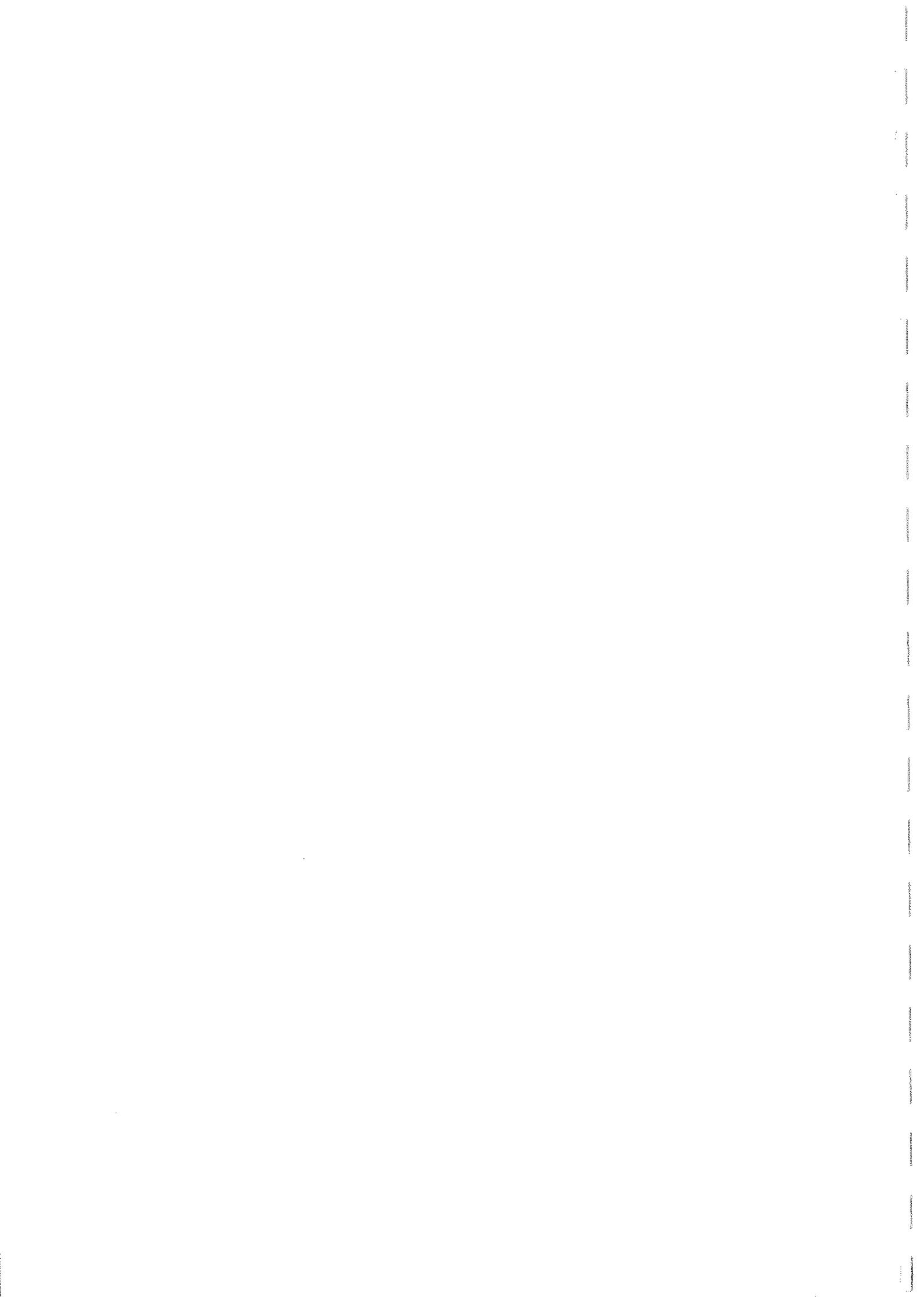
Professeurs des Instituts Universitaires de Technologie dont les activités de Recherche sont rattachées à la Faculté des Sciences et des Techniques de Besançon

I.U.T. de BESANÇON

MM. GENTYL Claude : Spécialité : Physique
MARTINET André : Spécialité : Chimie
SONZOGNO Robert : Spécialité : Mécanique

I.U.T. de BELFORT

KAUFFMANN J-Marie : Spécialité : Electro-
technique
MANDRET Gérard : Spécialité : Electronique
OIKNINE Claude : Spécialité : Mécanique
PRENEL Jean-Pierre : Spécialité : Physique
STAMON Georges : Spécialité : Informatique



S O M M A I R E

	<u>Pages</u>
. Avant-Propos	
. Introduction	1

P R E M I E R E P A R T I E

CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES DES HAUTS BASSINS DU DOUBS ET DE LA LOUE	3
. CHAPITRE I - LE CONTEXTE METEOROLOGIQUE	5
. CHAPITRE II - ETUDE HYDROLOGIQUE	37
. CHAPITRE III - ESSAI DE SIMULATION DES ECOULEMENTS	69
. CONCLUSIONS	85

D E U X I E M E P A R T I E

INFLUENCE DES PHENOMENES DE SURFACE SUR L'HYDROGRAMME .	87
. CHAPITRE IV - ESSAI DE SIMULATION DE LA FUSION NIVALE ...	89
. CHAPITRE V - COMPORTEMENT DYNAMIQUE DU LAC DE St POINT	107
. CHAPITRE VI - LES PERTES DU DOUBS	117
. CONCLUSIONS	151
. CONCLUSIONS GENERALES	153
. BIBLIOGRAPHIE	155
. LISTE DES FIGURES	159
. LISTE DES TABLEAUX	162
. TABLE DES MATIERES	164
. ANNEXES .	

à

BRICE

à

HUGO

à

ISABELLE

à

mes Familles

pour leur présence indispensable

A V A N T * P R O P O S

En tête de ce mémoire il m'est de tâche agréable de remercier toutes les personnes qui ont contribué à son élaboration.

Je voudrais tout d'abord témoigner de ma gratitude envers Monsieur le Professeur P. CHAIVE, qui a bien voulu m'accorder sa confiance au long de ce 3ème cycle et qui m'a confié la responsabilité de diverses études. Il a su manifester une grande patience à mon égard et un vif intérêt pour ce travail, qu'il a ponctué par ses remarques empreintes de toute son expérience scientifique et de ses parfaites connaissances régionales. Je désire également le remercier pour sa présence sur le terrain et citer les membres de sa famille qui ont effectué, durant l'été 1983, l'essentiel des observations relevées au lac de St Point.

J'exprimerais toute ma sympathie et mes remerciements à Monsieur le Professeur J. MANIA, qui m'a initié aux techniques de modélisation, qui a cru en mes recherches, les stimulant par son dynamisme intellectuel et son expérience de chercheur. Je lui sais gré par ailleurs des marques d'amitié que lui et sa famille ont porté à mes fils.

• A tous deux je leur suis infiniment reconnaissant pour leur tentative en vue d'une intégration au Laboratoire et je souhaite vivement que le contenu de ce mémoire réponde aux aspirations de leurs enseignements.

Je voudrais aussi associer à ces remerciements Monsieur P. DEMANGELLE, Directeur du Service Régional de l'Aménagement des Eaux qui a favorisé les contacts entre le Laboratoire et son Service. Le soutien matériel et technique apporté et la collaboration de Messieurs J.P. METTETAL et R. REYLE ont permis d'aborder efficacement le problème des pertes du Doubs.

Il m'est agréable de remercier aussi les autres membres du jury

* Monsieur le Professeur G. de MARSILY qui a suivi les prémices de ces travaux dans le cadre du Greco "Hydrogéologie" et du CNRS.

* Monsieur le Professeur G. CASTANY, Monsieur S. PIEVNS, Monsieur M. DAHAN, Chargé de Recherche au CNRS au Laboratoire de Mécanique Appliquée de la Faculté des Sciences de Besançon, qui m'honorent par leur présence et qui veulent bien me faire profiter de leur longue expérience.

Je tiens à remercier tout spécialement Monsieur le Professeur P. BROQUET qui a toujours été attentif à mes problèmes et qui, le premier, m'a associé à la réalisation d'une étude géologique en m'enseignant par ailleurs les subtilités d'un métier.

De nombreuses personnes ont participé de manière directe ou indirecte à la réalisation de ce mémoire, que chacune trouve ici l'expression de ma gratitude. Notamment :

- Messieurs P. CHOPPY, Chef de la Station Météorologique de Besançon et R. REYLE, Responsable du Service Hydrologique du SRAE, qui m'ont facilité l'accès aux données recueillies par leur service respectif.

- Monsieur Y. ROSSIER chez lequel j'ai découvert les mêmes aspirations de recherche et avec qui j'ai établi une réelle collaboration scientifique.

- Les étudiants qui m'ont accompagné sur le terrain : Messieurs F. SEQUEIROS, D. MOREL, G. DELACQUIS, J.L. BOURGUET, M. VALDIVIA, A. RECOULES, P. HUGUENY, T. PECCARD ...

- Messieurs D. MOREL, G. DELACQUIS et Y. ROSSIER, ainsi qu' leurs proches qui m'ont gentiment accueilli sous leur toit.

- Madame G. SALOMON pour sa célérité dactylographique ainsi que pour le soin apporté dans la présentation de ce mémoire. Je n'omettrai pas de mentionner sa précieuse sympathie.

- Madame O. BOQUESTAL et Monsieur J. PEQUENET et l'ensemble des membres du Laboratoire pour leur collaboration technique et leur amabilité.

INTRODUCTION

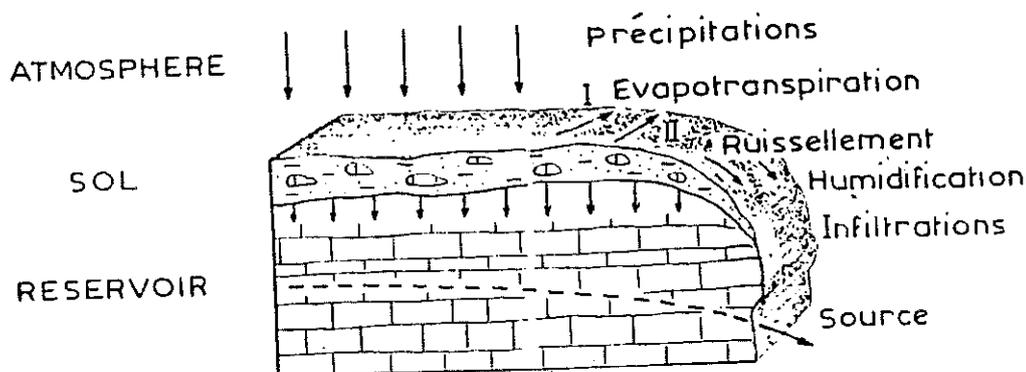
Dans le cycle de l'eau la pluie constitue le premier maillon d'une chaîne dont chacun des éléments est directement soumis à l'influence de celui qui le précède.

Les précipitations sont aléatoires par nature alors que les écoulements résultants sont directement déterminés par des paramètres physiques propres à leur bassin d'alimentation.

L'étude de l'hydrodynamisme sur une région, puis une reconstitution des écoulements à partir des données pluviométriques suppose :

- une description météorologique du secteur (signal Entrée)
- une analyse hydrométrique des rivières qui y circulent (signal Sortie).

Le passage du hyétogramme à l'hydrogramme se schématise classiquement de la façon suivante



Le déterminisme de ce modèle est proprement hydrogéologique puisque des paramètres structuraux et lithostratigraphiques peuvent y caractériser la géométrie et la dynamique des réservoirs.

Le dessein de ce travail est de montrer l'adéquation de cette conception simple des écoulements souterrains avec la traditionnelle boîte noire des aquifères karstiques.

L'essai d'application aux Hauts Bassins du Doubs et de la Loue nous a conduit à aborder trois problèmes hydrologiques particuliers, à savoir l'influence :

- des précipitations neigeuses,
- de l'inertie du lac de St Point,
- du détournement d'une partie de l'écoulement du Doubs vers la Loue, sur les hydrogrammes de restitution.

La présentation et le développement de ces recherches s'articulent en deux parties distinctes .

La première est consacrée à la description des caractéristiques météorologiques et hydrogéologiques des différents bassins. Un essai de simulation des écoulements conclut cette étape en intégrant l'ensemble des données recueillies à un modèle hydrométéorologique.

La seconde s'attache à préciser le rôle des phénomènes de surface (enneigement, inertie des lacs et capture partielle du Doubs) sur l'hydrodynamisme local.

Remarque : La présentation générale de ce travail permet une lecture séparée des différents chapitres à l'intérieur des deux parties.

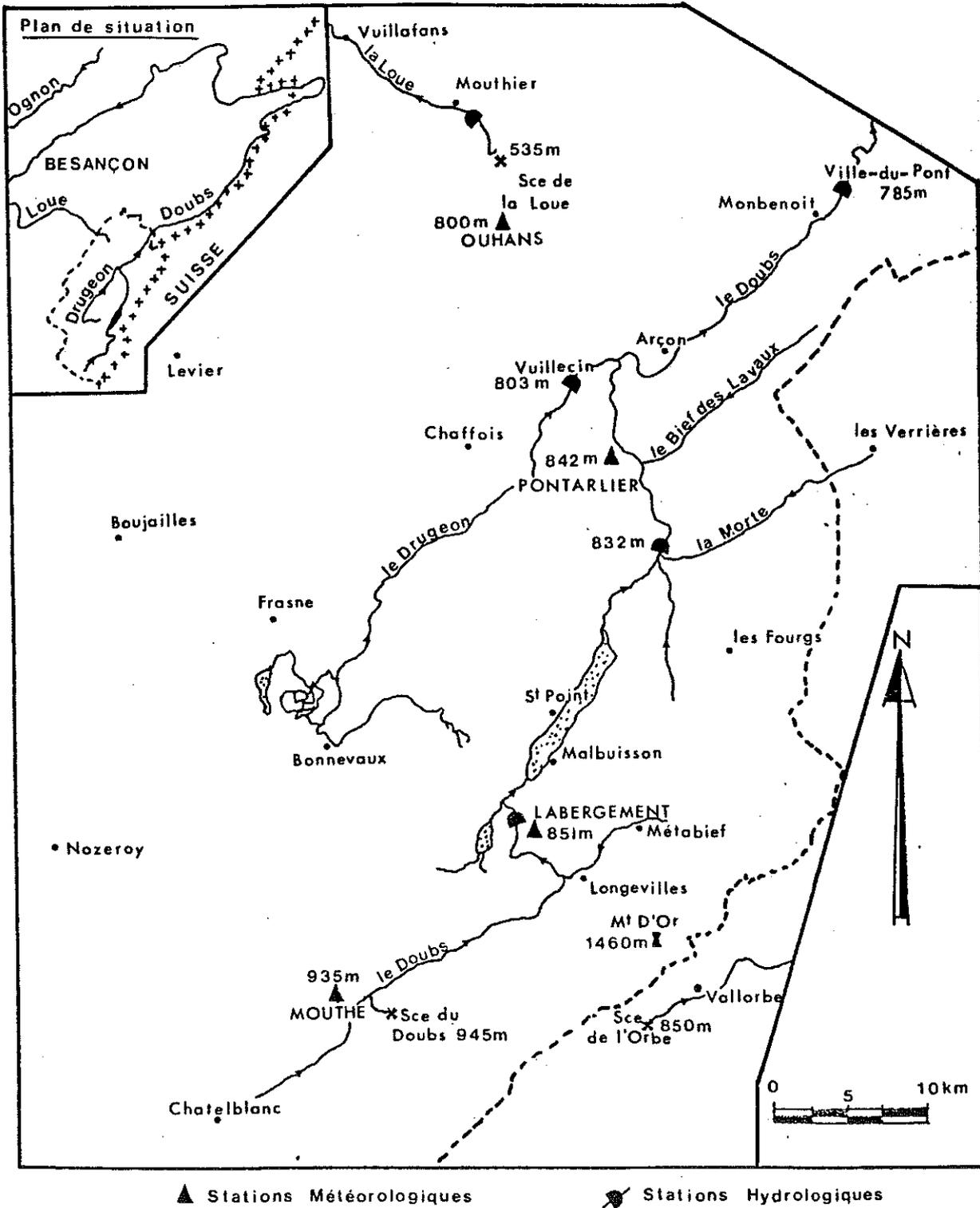


Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude.
Implantation des stations météorologiques et hydrologiques.

P R E M I E R E P A R T I E

CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES DES HAUTS BASSINS
DU DOUBS ET DE LA LOUE

L'étude hydrodynamique des Hauts Bassins du Doubs et de la Loue tente dans un premier temps de définir les signaux "entrée" et "sortie" des différents systèmes hydrologiques, puis s'oriente vers un essai de reconstitution des débits en fonction de la pluviométrie.

Le chapitre I analyse quantitativement la variabilité régionale et interannuelle des phénomènes météorologiques (pluviométrie, nivométrie et thermométrie) qui modulent les lames de ruissellement et d'infiltration.

Le chapitre II s'intéresse statistiquement à la distribution des débits puis à leur ajustement à une loi probabiliste pour reconnaître l'individualité des bassins étudiés. La description des bassins hydrogéologiques complète cette étude à partir des données géologiques, de la résolution des bilans hydrologiques, et de la décomposition des hydrogrammes de décrue.

Le chapitre III commente l'essai de simulation des écoulements par le modèle hydrométéorologique MERO, puis propose une définition hydrodynamique des bassins dans un système de référence à quatre réservoirs superposés.

Remarque : *Les chroniques de données sont découpées du 1er Septembre au 31 Août pour que douze mois consécutifs coïncident avec la réalité des cycles hydrologiques.*

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	J	A	TOTAUX											
122.7	.4	123.5	17.5	170.7	53.7	156.2	59.	145.3	69.3	142.7	64.9	140.4	58.2	117.5	49.1	140	12.3	162.2	-.7	128.5	0	136.5	0	1686.1	31.5
103.4	18.5	111.3	14.6	164.6	3.9	152.9	2.3	142.8	2	139.2	2.6	133.3	5.9	106.4	13.1	110.4	24.1	124.1	25.3	94.4	28.9	103.5	26.6	1486.4	14
107.6	.3	109.2	14.7	147.9	52.5	136.1	64.7	124.3	63	124	65.6	110	63.8	101.1	49.6	127.9	8.1	144	1	109	0	133	0	1474.1	31.4
86.1	23.6	96.3	17.7	140.4	5.5	131.6	3.8	120.4	3.7	119.7	4.1	100.7	9.7	88	17	96.1	87.8	104.9	29.1	73.4	37	99.7	28.1	1257.2	17.3
92.4	.2	108.3	17.9	146.9	53.6	122.8	60.2	117.6	68.4	115.7	71	122.8	63.7	109	52.7	127.3	7.9	153.2	-.2	104.3	0	132.9	0	1253.5	32.9
72.7	25.2	95.5	14.6	139.3	5.7	118.2	4.2	113.8	3.7	111.4	4.3	113.2	10.4	95.3	15.3	95.9	28.8	113.3	27.9	68	38.6	94.8	31.1	1231.5	17.5
97.9	0	115.6	8.8	156.2	38.5	143.7	44.2	133.5	50.2	128.5	46	110.2	42.8	108.7	35.4	141.2	1.4	157.2	0	117.7	0	121	0	1531.4	22.8
78.7	25.5	102.6	14.8	148.4	5.6	139.2	3.4	129.6	3.3	124.3	3.8	101	9.9	95.6	15.5	111	24.2	119	25.8	853	36.3	92.6	27	1327.2	16.3
85.1	1.2	94.6	13.9	126	47.9	121.4	47.1	108.7	58.7	102.1	60.4	96.9	57	84.9	39.9	123.3	9.4	131.4	18	118.4	0	105.6	0	1298.4	27.3
66.5	24.7	82.4	16.7	119.9	5.1	118	3.2	105.6	3.4	98.5	3.6	89.1	8.7	73.4	17.1	95.3	24.4	95.5	29.6	83	34.2	70.2	34.5	1097.5	17.1

1	2
3	4

1- Précipitations (en mm). 2- Précipitations neigeuses (en %). 3- Pluies utiles (en mm). 4- E T P_T(en %).

Tableau I : Moyennes interannuelles des paramètres pluviométriques

LE CONTEXTE METEOROLOGIQUE

. Introduction .

Le contexte météorologique est défini à partir des quantités d'eau qui entrent réellement dans le système hydrologique sous forme de pluie ou de neige.

Cette notion de pluie efficace intègre à la fois les données pluviométriques et thermométriques puisque les variations de la seconde régissent directement l'évapotranspiration.

Quatre stations de la Météorologie Nationale sont implantées sur le Haut Bassin du Doubs (Fig. 1). Il s'agit des stations de :

- . Mouthe (935 m),
- . Labergement Ste Marie (851 m),
- . Pontarlier - Doubs (842 m),
- . Ouhans (600 m).

L'étude porte sur les données météorologiques enregistrées en ces points du 1er Septembre 1969 au 31 Août 1983 (soit 168 mois). On se propose de :

- reconnaître la distribution spatiale et interannuelle des précipitations,
- souligner la part afférente aux précipitations neigeuses dans la pluviosité totale,
- analyser les températures et l'évapotranspiration potentielle résultante,
- quantifier les alimentations du système hydrologique.

L'analyse intègre, en outre, les données relevées à la station du Russey (900 m) afin de comparer les conditions météorologiques qui concernent le cours supérieur du Doubs à celles qui règnent plus en aval.

A partir des moyennes mensuelles interannuelles (Niveau Régional), on essaye de dégager les tendances fondamentales des phénomènes considérés.

Puis avec les moyennes mensuelles annuelles (Niveau Ponctuel), on tente de définir météorologiquement chacune des stations et de reconnaître les qualités hydrologiques de chacun des cycles interannuels.

I - LA DISTRIBUTION INTERANNUELLE DES PRECIPITATIONS

A. AU NIVEAU REGIONAL

1 - LES MOYENNES ANNUELLES INTERANNUELLES

Les moyennes interannuelles (Tableau I) des quatorze années d'observation révèlent que la pluviosité maximale est enregistrée à Mouthe (1686.1 mm) puis à la station de Ouhans (1531.4 mm). Les stations de Labergement et de Pontarlier viennent ensuite avec pour moyennes interannuelles respectivement 1474.1 et 1436.1 mm.

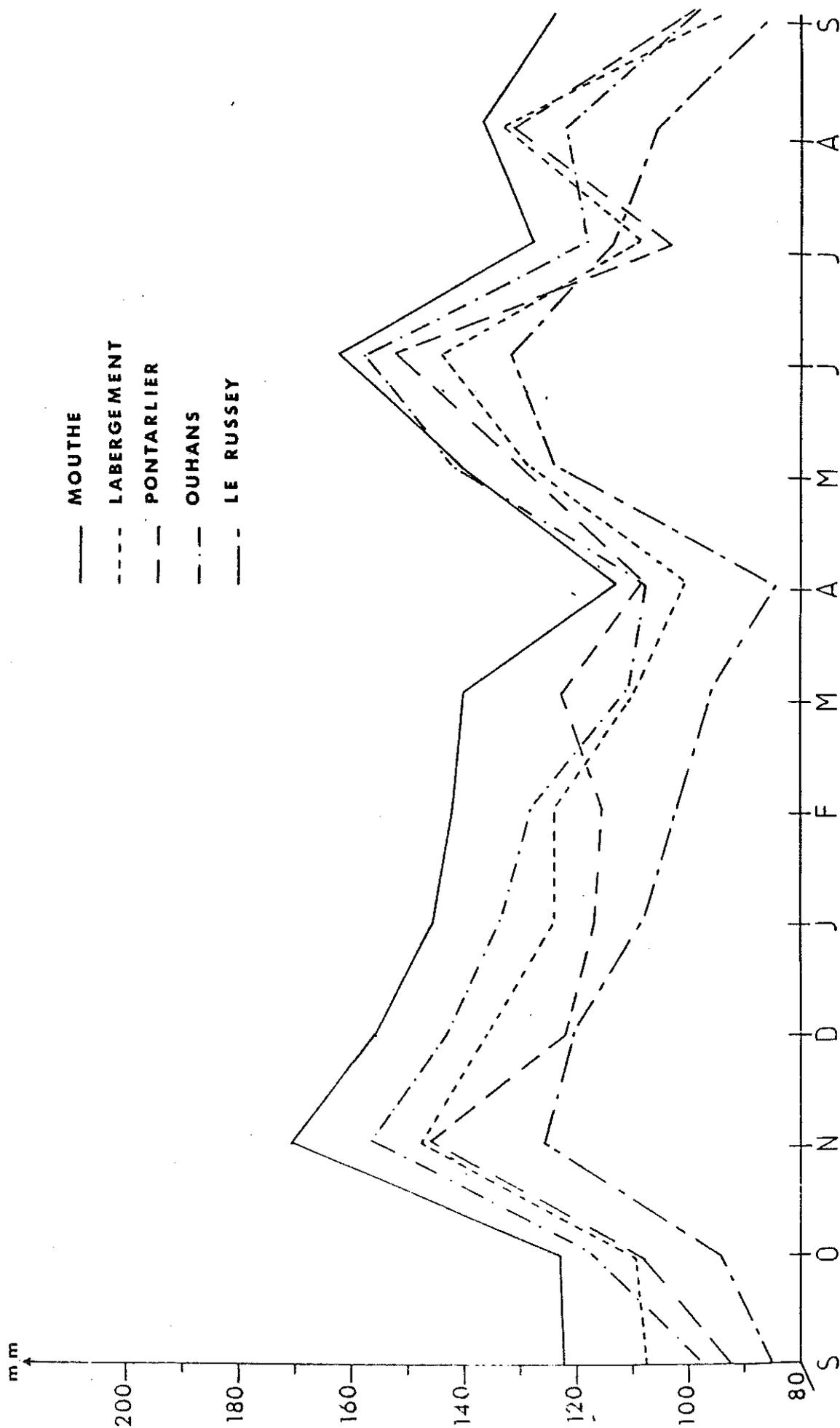
La station du Russey, d'altitude pourtant élevée ne totalise que 1298.4 mm.

2 - LES MOYENNES MENSUELLES INTERANNUELLES

L'examen des trois moyennes mensuelles perturbe sensiblement l'ordre global avancé. Les modules pluviométriques sont toujours les plus importants à la station de Mouthe, mais on note que statistiquement les précipitations enregistrées à Ouhans sont plus faibles qu'à la station de :

- Labergement durant les mois d'Août et Septembre,
- Pontarlier pendant le mois de Mars (la moyenne d'Avril est similaire aux deux points),
- Le Russey au cours du mois de Juillet

Figure 2 : Variations des modules pluviométriques mensuels moyens sur les Hauts Bassins du Doubs et de la Loue (et au Russey)



3 - RESULTATS

Le Haut Bassin du Doubs est soumis à une forte pluviosité (moyenne des stations = 1531.9 mm) qui diminue normalement avec la baisse d'altitude. Le cours moyen du Doubs y est soumis à une pluviosité moindre. (Différence à la moyenne = 233.5 mm).

Les régions de Mouthe et d'Ouhans apparaissent comme les plus pluvieuses. La station de Ouhans montre des variations qui attestent que l'essentiel des précipitations se produisent en hiver.

B. LE NIVEAU PONCTUEL

L'examen des modules pluviométriques mensuels et annuels doit permettre de reconnaître les particularités de la météorologie locale et leur distribution dans le temps (à partir d'un intervalle de classe de 100 mm).

1 - LA PLUVIOSITE A MOUTHE (Annexe I1)

a). Annuelle

La moyenne interannuelle est de 1686.1 mm avec un domaine de variation de 1190.1 mm sur les 14 cycles considérés (2209.2 mm en 1976-1977 et 1019.1 mm en 1971-1972).

La distribution des modules annuels (Fig. 3) montre l'existence de deux familles distinctes. L'une est supérieure à 1800 mm et l'autre est inférieure à 1400 mm. Les quatorze cycles sont également représentés dans ces deux groupes. Une coupure apparaît au sein du premier groupe entre un ensemble de valeurs < 1200 mm (2 cycles = 14.3%) et un autre > 1300 mm (4 cycles = 28.6%).

b). Mensuelle

Les mois de Novembre et de Juin sont en moyenne les plus pluvieux et le mois d'Avril est paradoxalement le plus sec (Fig. 2).

Les précipitations maximales ont été enregistrées en Mai 1978 (442.6 mm) et les minimales en Octobre 1969 (4.9 mm). Les modules mensuels sont eux aussi très variables sur un intervalle de 239.7 mm (de 176.6 mm pour Janvier à 416.3 mm pour Mai) (Tableau II).

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	ANNUEL mm
Min (mm)	18.1	4.9	15.1	27.3	45.3	31.2	26.3	21.7	78.6	13	28	53.1	1 019.1
Année	(77)	(69)	(78)	(71)	(73)	(75)	(73)	(81)	(70)	(76)	(71)	(72)	(71-72)
Max (mm)	270.3	279	304.4	355.6	221.9	427.8	442.6	292.9	373.2	278.1	229.9	198.8	2 209.2
Année	(74)	(81)	(72)	(81)	(81)	(70)	(78)	(83)	(83)	(80)	(77)	(73)	(76-77)
Δ mm	252.2	275.1	289.3	328.3	176.6	396.6	416.3	271.2	294.6	265.1	194.9	145.7	1 190.1
Moyenne	122.7	123.5	170.7	156.2	145.3	142.7	140.4	117.5	140	162.2	128.5	136.5	1 686.1

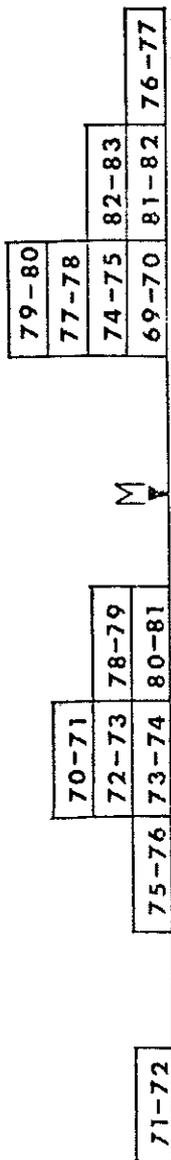
Tableau II: Les variations des modules pluviométriques à Mouthe.

Figure 3 : Distribution des modules pluviométriques annuels par cycle et par station
(du 1.9.69 au 31.8.83).

MOUTHE



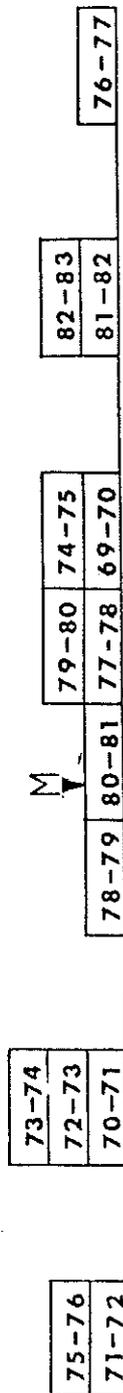
LABERGEMENT



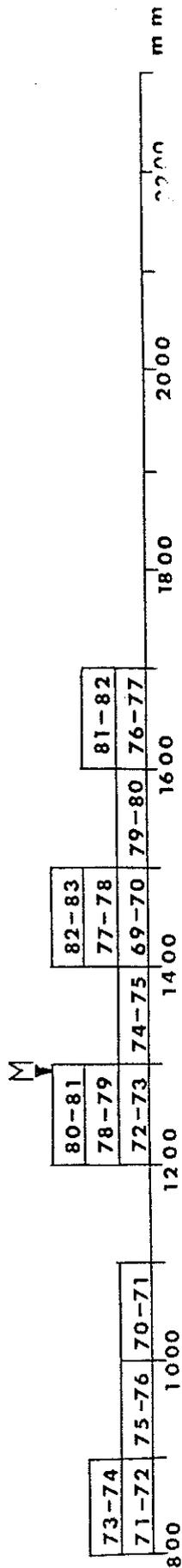
PONTARLIER



OUHANS



LE RUSSEY



2 - LA PLUVIOSITE A LABERGEMENT (Annexe I2)

a). Annuelle

Le module interannuel de 1474.1 mm appartient à l'intervalle de 945.5mm défini par un minimum de 921 mm durant le cycle 1971-1972 et par un maximum de 1870.5 mm durant celui de 1976-1977.

L'ensemble des modules annuels se distribue en deux ensembles (Fig. 3) égaux qui sont l'un supérieur à 1600 mm et l'autre < 1400 m. Un cycle (1971-1972) est inférieur à 1000 mm (70%).

b). Mensuelle

Les modules de Novembre et Juin sont les plus forts et celui d'Avril le plus faible (Fig. 2).

Les maximums et minimums ont été observés l'un en Février 1970 (393.3mm) l'autre en Octobre 1969 (4.6 mm).

La variabilité mensuelle est de 212.2 mm avec au maximum 365.2 mm pour Février et au minimum 153 mm pour Janvier. (Tableau III).

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	TOTAL
Min mm	24.4	4.6	10.9	28.8	36	28.1	23.5	25.2	60.1	9.5	28.5	52.6	921
Année	(77)	(69)	(78)	(71)	(72)	(82)	(76)	(82)	(76)	(76)	(71)	(81)	(71-72)
Max mm	219.4	283.9	297.5	268.2	189	393.3	212.1	220.4	322.7	254.5	189.8	225.4	1 870.5
Année	(74)	(74)	(72)	(81)	(81)	(70)	(78)	(83)	(83)	(80)	(77)	(82)	(76-77)
Δ mm	195	234.3	286.6	239.4	153	365.2	188.6	195.2	262.6	245	161.3	172.8	945.5
Moyenne	107.6	109.2	147.9	136.1	124.3	124	110	101.1	127.9	144	109	133	1 474.1

Tableau III : Les variations des modules pluviométriques à Labergement.

3 - LA PLUVIOSITE A PONTARLIER (Annexe I3)

a). Annuelle

Le module interannuel est de 1453.3 mm avec un minimum observé de 957.2 mm durant le cycle 1971-1972 et un maximum de 1930.3 mm entre Septembre 1982 et Août 1983 (soit une variabilité de 973.1 mm).

La distribution en classes pluviométriques équivalentes des 14 cycles montre (Fig. 3) quatre familles avec :

2 cycles < 1000 mm (14.3%)

5 compris entre 1100 et 1400 mm (35.7%)

4 supérieurs à 1500 mm et inférieurs à 1700 mm (28.6%)

3 dans l'intervalle 1800 mm à 2000 mm (21.4%).

b). Mensuelle (Tableau IV)

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	TOTAL
Min (mm) Année	25.8 (77)	13.2 (69)	61.6 (80)	35.8 (71)	41.9 (72)	19 (82)	31.1 (73)	26.6 (74)	59.9 (82)	18.1 (76)	31.1 (83)	69.8 (76)	957.2 (71-72)
Max (mm) Année	194 (81)	238.1 (74)	264.2 (72)	233 (81)	165.6 (77)	333.7 (70)	395.8 (78)	244.4 (83)	371.2 (83)	239.5 (82)	203.2 (77)	216.7 (82)	1 930.3 (82-83)
Δ mm	168.2	224.9	202.6	197.2	123.7	314.7	364.7	127.8	311.3	221.4	172.1	146.9	973.1
Moyenne	92.4	108.3	146.9	122.8	117.6	115.7	122.8	109	127.3	153.2	104.3	132.9	1 453.3

Tableau IV : Variations des modules pluviométriques à Pontarlier

En moyenne le mois de Juin est le plus pluvieux et celui de Septembre le plus sec (Fig. 2).

Les modules extrêmes ont été observés en Octobre 1969 pour le minimum (13.2 mm) et en Mars 1978 pour le maximum (395.8 mm).

La variabilité la plus faible concerne le mois de Janvier (123.7 mm) et la plus étalée celui de Mars (364.7 mm) soit une variabilité globale de 241 mm (Fig. 3).

4 - LA PLUVIOSITE A OUHANS (Annexe I4)

a). Annuelle

La moyenne interannuelle de 1531.4 mm se situe entre une moyenne annuelle minimum de 1018.6 mm en 1971-1972, et une maximum de 2101.6 mm en 1976-1977 (écart de 1083 mm).

Parmi les cinq groupes qui apparaissent dans la distribution des modules annuels, quatre se limitent à une classe de 100 mm et un à un intervalle de 400 mm (Fig. 3).

Le détail montre :

1000 <	2 cycles	<	1100	soit	14.3%
1200 <	3 cycles	<	1300	soit	21.4%
1400 <	6 cycles	<	1800	soit	43%
1900 <	2 cycles	<	2000	soit	14.3%
2100 <	1 cycle	<	2200	soit	7%

b). Mensuelle (Tableau V)

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	TOTAL
Min (mm) Année	26.1 (72)	8.1 (69)	18.5 (78)	55.9 (75)	39.2 (72)	29.3 (75)	13.9 (76)	28.9 (81)	70 (70)	26.9 (76)	10.8 (71)	58.3 (81)	1 018.6 (71-72)
Max (mm) Année	203.5 (74)	270.2 (74)	290.5 (72)	310.2 (81)	202.4 (81)	361 (70)	202.8 (78)	253.8 (83)	381.4 (83)	298.4 (70)	301.7 (77)	210.4 (82)	2 101.6 (76-77)
Δ mm	177.4	262.1	272	254.3	163.2	331.7	188.9	224.9	311.4	271.5	290.9	152.1	1 083
Moyenne	97.9	115.6	156.2	143.7	133.5	128.5	110.2	108.7	141.2	157.2	117.7	121	1 531.4

Tableau V : Variations des modules pluviométriques à Ouhans

Les mois de Novembre et Juin sont les plus pluvieux dans cette région (156.2 et 157.2 mm) et celui de Septembre le plus sec (97.9 mm). (Fig. 2).

Les extrêmes ont été observés en Octobre 1969 (8.1 mm) pour le plus faible et en Mai 1983 pour le plus fort (381.4 mm).

La variabilité intermensuelle est de 154.3 mm avec une variabilité minimale en Septembre (177.4 mm) et une maximale en Février (331.7 mm).

5 - LA PLUVIOSITE AU RUSSEY (Annexe I5)

a). Annuelle

Les modules annuels qui ont été observés varient entre 868.6 mm (1971-1972) et 1692.4 mm (1981-1982) soit une différence de 823.8 mm pour une moyenne de 1298.4 mm.

La distribution des modules montre deux ensembles distincts ; l'un regroupe 4 cycles (28.6%) et est compris entre 800 et 1100 mm, l'autre le reste (71.4%) entre 1200 et 1700 mm. (Fig. 3).

b). Mensuelle (Tableau VI)

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	TOTAL
Min(mm)	30	5.1	61.7	38.3	29.7	23.6	29.3	22	80.2	21.1	50.7	57.8	868.6
Année	(71)	(69)	(80)	(75)	(72)	(75)	(76)	(74)	(77)	(76)	(83)	(81)	(71-72)
Max(mm)	190	222.1	238.4	283.9	169.1	310	163.8	172	307.6	234.4	186.9	209.4	1692.4
Année	(75)	(74)	(72)	(83)	(81)	(70)	(79)	(83)	(83)	(80)	(82)	(77)	(81-82)
Δ mm	160	217	176.7	245.6	139.4	286.4	134.5	150	227.4	213.3	136.2	151.6	823.8
Moyenne	85.1	94.6	126	121.4	108.7	102.1	96.9	84.9	123.3	131.4	118.4	105.6	1298.4

Tableau VI : Variations des modules pluviométriques au Russey

La valeur des modules moyens mensuels de Septembre et d'Avril indique que ces mois sont les moins pluvieux (85.1 et 84.9 mm), et celle du mois de Juin le désigne comme le plus pluvieux (131.4 mm).

La variabilité mensuelle la plus faible s'observe en Avril (150 mm) et la plus importante en Février (286.4 mm). (La différence est de 136.4 mm).

La pluviosité minimale a été observée en Octobre 1969 (5.1 mm) et la maximale en Février 1970 (310 mm).

6 - RESULTATS

Le module pluviométrique du cycle 1971-1972 est le plus faible en toutes les stations, et celui de 1976-1977 est le plus important, sauf à Pontarlier et au Russey où le module annuel maximum a été observé respectivement en 1981-1982 et en 1982-1983.

Au niveau mensuel il y a une correspondance régionale des modules en :

- Octobre (1969) et Juin (1976) pour les minimums
- Novembre (1972), Février (1970), Avril (1983) et Mai (1983) pour les maximums.

L'observation des modules mensuels maximums de Décembre (1981), Mars (1978) et Juillet (1977) ne diffère que pour la station du Russey.

Le module pluviométrique mensuel le plus petit est le même pour toutes les stations (Octobre 1969) alors que le plus fort est celui de :

- Mai 1978 pour Mouthe
- Février 1970 pour Labergement et Le Russey
- Mars 1978 pour Pontarlier
- Mai 1983 pour Ouhans.

En moyenne (Fig. 2) la pluviosité est importante en Novembre - Décembre et en Mai - Juin. Les mois les plus secs sont ceux d'Avril et de Juillet.

La variabilité mensuelle la plus grande s'observe en Février (Labergement, Ouhans et Le Russey) ou en Mars (Mouthe et Pontarlier) ; la plus faible en Août (Mouthe et Ouhans), en Janvier (Labergement, Pontarlier) ou en Mars (Le Russey).

La différence entre les variabilités mensuelles minimales et maximales indique que c'est à Pontarlier que la pluviosité varie le plus au cours d'un cycle (241 mm). (Les stations de Mouthe, Labergement, Ouhans et Le Russey montrent respectivement des différences de 239.7 mm, 212.2 mm, 154.3 mm et 136.4 mm).

La répartition des quatorze cycles étudiés en classes d'équivalence de 100 mm (Fig. 3) montre :

- l'existence de deux groupes bien distincts à Mouthe et à Labergement,
- une distribution très morcellée à Pontarlier et à Ouhans (et au Russey dans une proportion moindre).

Les domaines de variation sont par ordre décroissant :

- 1190.1 mm à Mouthe
- 1083 mm à Ouhans
- 973.1 mm à Pontarlier
- 945.5 mm à Labergement
- et 823.8 mm au Russey.

C. CONCLUSION

Les Hauts Bassins du Doubs et de la Loue se situent entre les isohyètes 1400 mm (Pontarlier) et 1700 mm (Mouthe). La station de Ouhans qui est la moins élevée (600 m) enregistre une pluviosité moyenne de 1500 mm par cycle.

L'analyse des modules pluviométriques montre une influence régionale avec des variations irrégulières et asynchrones d'un point d'observation à un autre.

Ainsi les cycles les plus pluvieux ne sont pas les mêmes aux cinq stations et les distributions des modules annuels sont très différentes avec des domaines de variations plus ou moins larges. (Il existe néanmoins certains cycles qui occupent une position identique sur les cinq diagrammes. Il s'agit des cycles 1976-1977, 1971-1972 et 1978-1979 qui correspondent respectivement à une pluviosité forte, faible et moyenne).

En moyenne les précipitations sont importantes en Novembre - Décembre et en Mai - Juin. L'épisode sec du mois d'Avril s'observe à toutes les stations et le découpage de Septembre à Août est justifié par les variations des modules mensuels moyens.

II - L'IMPORTANCE RELATIVE DES PRECIPITATIONS NEIGEUSES

Les précipitations sous forme de neige perturbent l'alimentation des réservoirs souterrains en immobilisant temporairement les masses d'eau atmosphérique.

La mise en évidence de l'importance relative de ce paramètre dans la pluviométrie régionale doit permettre de localiser les bassins hydrologiques particulièrement soumis à son influence.

A. AU NIVEAU REGIONAL

1 - LA NIVOSITE ANNUELLE

Le tableau I montre que les précipitations neigeuses représentent en moyenne pour un cycle Septembre-Août :

- . 32.9% à Pontarlier
- . 31.5% à Mouthe
- . 31.4% à Labergement
- . 27.3% au Russey
- . 22.8% à Ouhans.

Ces pourcentages expriment l'importance relative du rapport pluie/neige à chacune des stations mais il tombe une hauteur de neige équivalente à :

- . 531.1 mm à Mouthe
- . 478 mm à Pontarlier
- . 462.9 mm à Labergement
- . 354.5 mm au Russey
- . et 349.1 mm à Ouhans.

2 - LA NIVOSITE MENSUELLE

Les pourcentages moyens mensuels sont nuls en Juillet et en Août et minimes en Juin et en Septembre. Les maximums s'observent en Janvier ou en Février et ils avoisinent 70% des précipitations à Mouthe et à Pontarlier (65.6% à Labergement), 60% au Russey et 50% à Ouhans.

Les pour lesquels les précipitations neigeuses représentent au moins 50% du module moyen mensuel sont au nombre de :

- . 6 à Mouthe, Labergement et Pontarlier (de Novembre à Avril),
- . 3 au Russey (de Janvier à Mars),
- . 1 à Ouhans (en Janvier).

3 - RESULTATS

A ce niveau, trois zones nivométriques se distinguent :

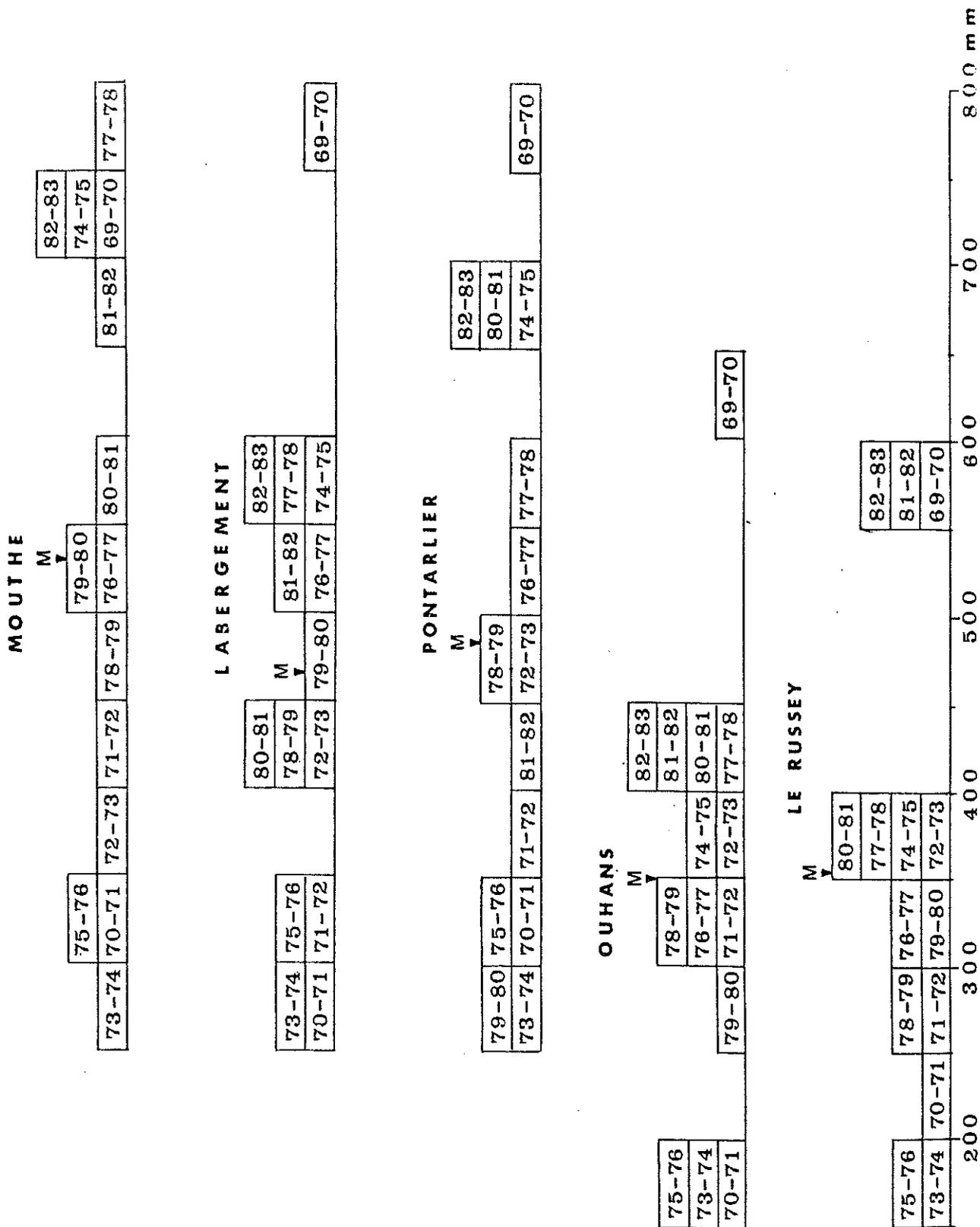
- la zone du Haut Bassin du Doubs caractérisée par les stations de Mouthe, Labergement et Pontarlier. La nivométrie moyenne est de 490.6 mm pour une pluviométrie de 1537.7 mm (soit 31.9%). Durant six mois (de Novembre à Avril) l'équivalent en eau des averses de neige représente au moins la moitié du total des précipitations ;
- la zone d'alimentation des sources de la Loue (région de Ouhans) où il tombe 349.1 mm (22.8% de la pluviométrie totale). En Janvier, la moitié des précipitations est observée sous la forme de neige ;
- la zone du Russey est marquée par une hauteur de neige moyenne équivalente à celle du secteur de Ouhans (354.5 mm). Mais l'importance de ce paramètre est nettement ressentie durant un trimestre (de Janvier à Mars) et la nivosité représente 27.3% de la pluviométrie annuelle.

4 - CONCLUSION

La nivosité sur l'ensemble du Haut Bassin du Doubs se marque par :

- une moyenne de 32% de la pluviométrie locale ;
- une prépondérance des précipitations neigeuses de Novembre à Avril.

Figure 4 : Distribution des modules nivométriques annuels par cycle et par station
(du 1.9.69 au 31.8.83)



Le Haut Bassin de la Loue apparaît nettement moins influencé par ce paramètre avec un rapport de 23% et une prépondérance neigeuse limitée à un seul mois.

La région du Russey montre des caractéristiques intermédiaires (avec un rapport neige/pluie égal à 27% et une prépondérance nivale de Janvier à Mars) bien que son altitude (900 m) corresponde à celle du Haut Bassin du Doubs.

B. AU NIVEAU PONCTUEL

1 - LA NIVOSITE ANNUELLE

L'importance relative des précipitations neigeuses dans la pluviométrie annuelle est très variable. Le rapport neige/pluie est de :

- 18.2% (1973-1974) à 40.8% (1971-1972) à Mouthe
- 20.6% (1973-1974) à 46.6% (1969-1970) à Labergement
- 19.4% (1979-1980) à 46.7% (1969-1970) à Pontarlier
- 13.8% (1973-1974) à 38.8% (1969-1970) à Ouhans
- 17.2% (1975-1976) à 40% (1969-1970) au Russey

La figure 4 montre la répartition des modules nivométriques annuels en classe d'équivalence de 50 mm. Les intervalles de variation sont de 550 mm pour les stations du Haut Bassin du Doubs (compris entre 250 et 800 mm), de 500 mm à Ouhans (entre 150 et 650 mm) et de 450 mm au Russey (entre 150 et 600 mm).

Sur les graphes de distribution on distingue plusieurs ensembles par station. Ils sont au nombre de :

- . deux à Mouthe (avec 64.3% des observations qui se situent entre 250 et 600 mm et 35.7% entre 650-800 mm)
- . trois à Labergement (avec des modules nivométriques annuels qui évoluent de :
 - 250 à 350 mm dans 28.6% des cas
 - 400 à 600 mm dans 64.3% des cas
 - et de 750 à 800 mm pour un cycle (7.1%))
- . trois à Pontarlier, avec :
 - 71.4% entre 250 et 600 mm
 - 21.4% entre 650 et 700 mm
 - un cycle entre 750 et 800 mm
- . trois à Ouhans, avec :
 - 21.4% entre 150 et 200 mm
 - 71.4% entre 250 et 450 mm
 - le cycle 1969-1970 entre 600 et 650 mm
- . deux au Russey, avec :
 - 78.6% entre 150 et 400 mm
 - 21.4% entre 550 et 600 mm.

La place des cycles à module nivométrique faible est constante sur l'ensemble des graphes. Par contre, la position des cycles moyennement ou fortement neigeux à Mouthe révèle ailleurs une nivosité plus faible ou au contraire plus importante (par exemple les cycles 1979-1980 et 1980-1981).

Le cycle 1969-1970 se retrouve à l'extrémité supérieure de tous les diagrammes, mais seule la distribution des hauteurs enregistrées à Mouthe et au Russey révèle l'appartenance de cette observation à un groupe structuré.

2 - LA NIVOSITE MENSUELLE (Tableau VII)

La variabilité mensuelle est très importante et il arrive (1974-1975) d'observer des précipitations neigeuses durant 10 mois consécutifs.

Parmi les 168 mois d'enregistrement aux 5 stations, on note qu'il n'y en a que 10 (3 au Russey et Pontarlier et 2 à Mouthe et Labergement) où la neige représente la totalité des précipitations.

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J
Min			25 (70)	25.9 (78)	21.7 (82)	7.7 (79)	9.2 (74)	(71)		
MOUTHE Max	5.7 (74)	76.4 (74)	91 (71)	87.7 (69)	97.5 (72)	100 (71)	100 (71)	86.8 (73)	32.9 (83)	7.2 (75)
Min			16.1 (73)	31.2 (78)	28.7 (82)	11.8 (79)	15.5 (77)	0 (70)		
LABERGEMENT Max	4.3 (74)	74.2 (74)	23.6 (78)	100 (69)	95 (72)	100 (73)	92.3 (82)	87.9 (76)	34.2 (79)	7.4 (75)
Min			15.5 (79)	22 (78)	25.4 (82)	12 (80)	23.7 (74)	0 (71)		
PONTARLIER Max	2.9 (74)	77.2 (74)	80.4 (78)	100 (69)	100 (81)	100 (73)	89.6 (71)	87.1 (73)	35.9 (79)	2.9 (75)
Min			5.3 (82)	14.5 (78)	9.1 (75)	0 (75)	3.7 (72)	0 (71)		0
OUHANS Max		57.3 (74)	84.3 (78)	85 (80)	93.4 (72)	90.1 (73)	85.5 (82)	73.7 (73)	20.2 (79)	0
Min			18.4 (70)	11.8 (77)	1.6 (74)	7.4 (80)	21.6 (81)	0 (71-76)	0	
LE RUSSEY Max	11.1 (78)	63.5 (74)	91.2 (71)	89.3 (69)	96.3 (73)	100 (71&75)	100 (71)	75.6 (80)	36.7 (83)	10.7 (78)

Tableau VII : Variabilité relative de la nivosité mensuelle (en mm)

3 - RESULTATS

Les précipitations neigeuses sont très variables d'un point d'observation à un autre et aucune régularité franche n'apparaît au pas de temps mensuel.

La distribution des cycles nivométriques est totalement différente de celle relative à la pluviosité.

Les cycles marqués par une forte nivosité en altitude (comme le cycle 1969-1970 à Mouthe) peuvent apparaître comme exceptionnellement neigeux à des altitudes plus faibles. Inversement le cycle le plus extrême à Mouthe (1977-1978) se caractérise comme moyennement neigeux aux autres stations, et un cycle moyen comme celui de 1979-1980 se révèle très peu neigeux à Pontarlier.

Il est très rare que la totalité des précipitations d'un mois se fasse sous forme de neige.

4 - REMARQUE

L'ensemble de ces résultats ne constitue qu'une approche de l'importance des précipitations neigeuses. Les données météorologiques enregistrées à une station ne sont représentatives que d'une région très limitée et d'altitude

voisine. (Ainsi la station de Mouthe est implantée à 935 m sur le bassin d'alimentation du Doubs et le massif du Risoux-Mt d'Or qui culmine entre 1100 et 1460 m appartient au même impluvium).

C. CONCLUSION

L'enneigement montre une variabilité spatiale interannuelle et mensuelle aussi importante que les pluies sans qu'une correspondance apparaisse entre les modules pluviométrique et nivométrique d'un même cycle.

En certains points (comme les régions de Mouthe et de Pontarlier), les précipitations neigeuses sont prépondérantes durant la moitié de l'année (et elles peuvent être observées jusqu'à 10 mois par an). L'importance de ce paramètre influence certainement l'hydrologie locale puisque sa manifestation atténuée, par immobilisation, les impulsions météorologiques. L'alimentation des réservoirs profonds est alors dépendante de la fusion du manteau neigeux.

Le Haut Bassin du Doubs se révèle plus influencé par la niviosité que celui de la Loue.

III - LES TEMPERATURES ET L'EVAPOTRANSPIRATION

Les températures sont enregistrées à Mouthe, Pontarlier et Le Russey. Le calcul de l'évapotranspiration potentielle de la région est abordé à la suite de celui des modules thermométriques annuels de ces trois stations.

Remarque : La chronique des températures débute le 1.9.73 au Russey.

A. LES DONNEES DE LA THERMOMETRIE

1 - AU NIVEAU REGIONAL (Tableau VIII)

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	MOYENNE
MOUTHE	11.7	7.3	2.2	-2.2	-2.4	-.8	1.3	4.3	8.7	12.6	14.7	13.7	5.9
PONTARLIER	12.6	8.3	3.6	.2	-.1	.8	2.8	5.5	10	13.5	15.7	14.4	7.3
LE RUSSEY	11.5	7	2	-.7	-1.3	-.4	2.3	4.3	8.4	12.1	14.7	13.1	6.1

Tableau VIII : Les températures moyennes interannuelles (du 1.9.69 au 31.8.83)

Le secteur de Pontarlier apparaît comme le plus tempéré (7.3°C) et celui de Mouthe comme le plus froid (5.9°C). Le gradient thermique moyen entre les deux stations est de -1.5°C pour 100 m (il est de -2.6°C/100m en Décembre et de -0.75°C/100m en Août).

L'amplitude annuelle maximale moyenne s'observe entre les mois de Janvier et de Juillet. Sa valeur est de :

- 15.8°C à Pontarlier (de -0.1 à 15.7°C)
- 17.1°C à Mouthe (de -2.4 à 14.7°C)
- 16°C au Russey (de .3 à 14.7°C)

2 - AU NIVEAU PONCTUEL

La variabilité la plus importante ($\pm 3^{\circ}\text{C}$) de la température moyenne annuelle s'observe à la station du Russey. (Elle est de $\pm 2.1^{\circ}\text{C}$ à Mouthe et de $\pm 1.7^{\circ}\text{C}$ à Pontarlier). (Tableau IX)

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	MOYENNE	
Min Année	9.9 (72)	6.1 (80)	1.4 (71)	-5.3 (69)	-3.7 (81)	-3.7 (81)	-1.4 (71)	3.1 (73)	8 (80)	10.9 (80)	12.9 (80)	13.9 (78)	6.4 (81-82)	PONTARLIER
Max Année	14.1 (75)	11.7 (79)	5.8 (70)	2.7 (78)	3.3 (75)	3.5 (77)	6.3 (77)	9.3 (71)	12.1 (71)	15.5 (83)	20.6 (83)	17.2 (73)	8.1 (82-83)	
Δ	4.2	5.6	4.4	8	7	7.2	7.7	6.2	4.1	4.6	7.7	3.3	1.7	
Min Année	9.1 (72)	1.1 (74)	.9 (79)	-7.1 (69)	-6.4 (81)	-6.4 (81)	-2.6 (71)	2.5 (73)	7.3 (75)	10.5 (80)	12 (80)	7.1 (82)	5 (80-81)	MOUTHE
Max Année	13.5 (69)	10.6 (82)	4.1 (72)	1.8 (74)	1.7 (75)	2.3 (74)	4.9 (77)	8.1 (71)	11.1 (71)	13.8 (73)	18.8 (83)	16.5 (73)	7.1 (73-74)	
Δ	4.4	9.5	3.2	8.9	8.1	8.7	7.5	5.6	3.8	3.3	6.0	9.4	2.1	
Min Année	9.4 (77)	1.6 (74)	1.4 71-79-80	-5.3 (69)	-5.3 (81)	-5.8 (81)	-1.4 (71)	2.6 (77)	7.4 (79)	10.5 (80)	12.1 (79)	7.5 (82)	5.4 (80-81)	LE RUSSEY
Max Année	13.9 (75)	10.6 (82)	5.8 (70)	1.5 (79)	2 (75)	3.3 (72)	5 (77)	9.3 (71)	12.1 (71)	15.2 (70)	19.6 (83)	17.2 (73)	7.7 (70-71)	
Δ	4.5	9	4.4	6.8	7.3	9.1	6.4	6.7	4.7	4.7	7.5	9.7	2.3	

Tableau IX : Variabilité des températures moyennes mensuelles (en $^{\circ}\text{C}$)

Les températures mensuelles minimales des mois de Décembre (1969), Janvier (1981), Février (1981), Mars (1971) et Juin (1980) ont été enregistrées la même année aux trois stations. Il en va de même pour l'observation des modules mensuels maximums des mois de Janvier (1975), Mars (1977), Avril et Juillet (1983). Le minimum des mois de Septembre, Avril et de Juillet appartient à la même année pour les stations de Pontarlier et Mouthe (respectivement 1972, 1973 et 1980).

Les modules annuels extrêmes ne se correspondent pas. Ainsi le cycle le plus froid a été celui de 1981-1982 à Pontarlier et celui de 1980-1981 à Mouthe et au Russey. Le cycle caractérisé par le module annuel le plus élevé est celui de 1982-1983 à Pontarlier et au Russey et celui de 1973-1974 à Mouthe.

La variabilité mensuelle la plus importante s'observe au mois de Décembre à Pontarlier ($\pm 8^{\circ}\text{C}$ avec -5.3°C en 1969 et 2.7°C en 1978) et au mois d'Octobre à Mouthe ($\pm 9.5^{\circ}\text{C}$ avec 1.1°C en 1974 et 10.6°C en 1974) et au mois de Février au Russey ($\pm 8.4^{\circ}\text{C}$ avec -5.8°C en 1981 et 2.6°C en 1977). La variabilité mensuelle la plus faible est de $\pm 3.3^{\circ}\text{C}$ en Août à Pontarlier (13.9°C en 1978 et 17.2°C en 1973), de $\pm 3.2^{\circ}\text{C}$ en Novembre à Mouthe (0.9°C en 1979 et 4.1°C en 1972), et de $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ en Mai au Russey (7.4°C en 1979 et 9.9°C en 1976).

3 - CONCLUSION

L'amplitude thermique moyenne annuelle est importante sur l'ensemble de la région (15.8°C à Pontarlier et au Russey et 17.1°C à Mouthe) mais le secteur de Pontarlier est le plus tempéré et celui de Mouthe le plus rigoureux (avec des moyennes respectives de 7.3°C et 5.9°C). Le gradient thermique moyen est donc élevé sur le Haut Bassin du Doubs (-1.5°C par 100 m).

La variabilité du paramètre température est la plus importante au Russey ($\pm 3^{\circ}\text{C}$) au niveau annuel et à Mouthe au niveau mensuel ($\pm 9.5^{\circ}\text{C}$ en Octobre et $\pm 9.4^{\circ}\text{C}$ en Août).

Les cycles marqués par des températures extrêmes ne sont pas identiques aux trois stations bien qu'au niveau mensuel on note une correspondance de cinq des modules minimums et quatre des modules maximums.

La correspondance passe à huit des douze modules minimums si l'on ne considère que les stations de Mouthe et de Pontarlier.

En résumé la température ne montre pas de variations régionales uniformes au niveau annuel bien que l'évolution saisonnière du paramètre soit identique d'un point à un autre. Au niveau mensuel on note que l'observation des modules extrêmes est souvent synchrone à l'échelle de la région.

La répartition des températures montre donc des tendances régionales (observations parasynchroniques des extrêmes) modulées localement.

B. L'EVAPOTRANSPIRATION

L'évapotranspiration est calculée selon la méthode de Thornthwaite dont le concept et la formule sont rappelés.

La proportion d'eau qui retourne à l'atmosphère est calculée aux cinq stations pluviométriques à partir des températures enregistrées à Mouthe, Pontarlier et au Russey. (Les indices thermiques calculés à Mouthe sont rapportés aux chroniques des pluies de Labergement et ceux de Pontarlier à Ouhans).

Les valeurs obtenues sont déduites des précipitations totales observées pour chaque cycle et la distribution des pluies efficaces (pluie-ETP) est comparée à celle des pluies réelles.

1 - RAPPELS

Le terme évapotranspiration désigne la quantité d'eau (sous forme de vapeur) rejetée dans l'atmosphère tant par évaporation directe au niveau du sol que par transpiration des végétaux. On distingue une évapotranspiration potentielle (ETP) et une évapotranspiration réelle (ETR).

a). L'évapotranspiration potentielle ETP

L'évapotranspiration d'un couvert végétal (qui bénéficie d'une alimentation hydrique optimale) tend vers une limite maximale. La valeur de cette limite est l'évapotranspiration potentielle (ETP) basée sur une fonction thermique.

Les travaux de THORNTHWAITTE (1951) suggèrent que l'ETP est à la fois indépendante des espèces végétales représentées et de la nature du sol. L'ETP est finalement fonction des caractéristiques énergétiques et dynamiques de l'environnement atmosphérique (à condition de considérer des surfaces suffisamment étendues (quelques dizaines d'hectares) et un intervalle de temps assez long (une décade par exemple)).

La valeur de ce paramètre se calcule par la formule empirique (établie par ajustement statistique) :

$$\text{ETP}_{\text{mm}} = 16 \times \left(\frac{10t}{I}\right)^a \times F(\lambda)$$

avec

t = température moyenne de la période considérée (en $^{\circ}\text{C}$)

et I = indice thermique annuel qui est la somme des douze indices thermiques mensuels i

$$(i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1.514})$$

a est une fonction complexe $I = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.79 \times 10^{-2} I + 0.49$

et $F(\lambda)$ est le terme correctif qui intègre la durée théorique d'insolation.

Tableau X : ETP annuelle et températures moyennes annuelles : pourcentage des pluies (P) annuelles évapotranspirées

	M O U T H E			P O N T A R L I E R			L E R U S S E Y			L A B E R G E M E N T		O U H A N S
	T°C	ETP mm	P/ETP en %	T°C	ETP mm	P/ETP en %	T°C	ETP mm	P/ETP en %	P/ETP Mouthe %	P/ETP Pontarlier %	P/ETP Pontharlier %
69-70	6.3	541	27.5	6.7	555.6	34.1				32.4		32.2
70-71	6.5	556.7	38.5	7.7	584.5	47.9				43.6		45.8
71-72	6.3	537.8	52.8	7.5	562	58.7				58.4		55.2
72-73	5.6	526.5	40.2	7	550	44				41.2		43.4
73-74	7.1	553.1	36.9	8	575.3	51.7	6.5	533.5	59.4	42.9		47.2
74-75	5.7	449	26.9	7.3	548.4	34.6	6.1	512.7	36.7	29.8		32
75-76	5.6	520.8	43.1	7.6	570.3	56.9	6.6	543.6	54.7	46.8		53.5
76-77	6.2	524.4	23.7	7.7	572	30.5	6.1	529.3	32	28		27.2
77-78	5.4	510.2	26.5	7.2	550.3	34	5.6	511.2	36.5	30.5		33.8
78-79	5.5	511.8	32.3	7.4	563.9	40.4	5.6	511	40.8	37		38.6
79-80	5.6	508.8	27.6	6.9	539.1	35.8	6.1	519.4	34.4	31		32.9
80-81	5	525.1	33.8	6.5	564.4	49.6	5.4	530	42	39		37.3
81-82	5.6	504.1	26.1	6.4	494.5	29.2	6.1	522	30.8	29.1		25.7
82-83	6.6	547.3	26.2	8.1	587.3	30.4	7.4	568.2	36.7	30.5		30.8
Total		7366.6			7817.6			5280.9				
Moyenne	5.9	526.2	31.4	7.3	558.4	39.25	6.1	528.1	38.8	35.7		36.4

La méthode de Thornthwaite utilise des paramètres climatiques facilement accessibles (température moyenne de l'air et la durée théorique d'insolation (fonction de la latitude et de la saison)), mais les valeurs de l'ETP obtenues demeurent approximatives (pour une même température moyenne le pouvoir évaporant de l'air dépend beaucoup de son degré hygrométrique et du vent). Néanmoins l'application de cette formule à une grande échelle (bassin versant par exemple) et à des valeurs cumulées (cas des bilans hydrologiques) donne des résultats satisfaisants compte tenu de l'erreur relative des mesures de pluie et de température.

L'ETP est calculée journalièrement aux trois stations thermométriques précédemment étudiées.

b). L'évapotranspiration réelle : ETR

La définition de l'ETR nécessite l'introduction de la notion de réserve facilement utilisable (RFU) qui limite les possibilités de restitution d'eau des sols.

L'eau des précipitations traverse les sols pour alimenter les réserves plus profondes. Au passage une fraction est retenue sous l'effet des forces d'adhésion (autour des éléments solides du sol) et des forces de capillarité (dans les manchettes intersticielles). Seule une partie de l'eau fixée est disponible pour la plante et constitue la "réserve utile" (RU) du sol. La "réserve facilement utilisable" (RFU) est la quantité d'eau qui permet d'assurer aux plantes leur développement optimal.

Au sens agronomique du terme la RFU représente 50 à 60% de la RU mais pour la pratique de l'hydrologie la distinction entre ces notions n'est pas conservée. La RFU désigne la quantité d'eau dans le sol susceptible d'être transpirée par les végétaux.

(L'état de saturation de la RFU régule les infiltrations profondes et la description des sols des Hauts Bassins du Doubs et de la Loue en fonction de ce paramètre est envisagée plus loin). (Chapitre III).

Lorsque le produit des précipitations journalières et l'état de la RFU ne suffisent pas à alimenter la totalité de l'ETP, l'évapotranspiration réelle se limite à la quantité disponible (pluie + RFU).

Remarque : 1 mm d'eau correspond à 1 kg/m² soit 10³ m³/km².

2. RESULTATS

Dans la formule de calcul de l'ETP seule la température moyenne de l'air est explicitement prise en compte, aussi les variations de l'ETP sont dans le détail identiques à celles de ce paramètre précédemment décrit.

a. Au niveau annuel

En moyenne, l'évapotranspiration potentielle annuelle (Tableau X) est de :

- 31.4% à Mouthe (526.2 mm)
- 39.2% à Pontarlier (558.4 mm)
- 39% au Russey (480.1 mm).

L'amplitude des variations est de :

- 57.7 mm à Mouthe (499 mm en 1974-1975 et 556.7 mm en 1970-1971).
- 92.8 mm à Pontarlier (494.5 mm en 1981-1982 et 587.3 mm en 1982-1983).
- 57.2 mm au Russey (511 mm en 1978-1979 et 568.2 mm en 1982-1983).

La part des précipitations totales qui est évapotranspirée peut atteindre 52.8% à Mouthe (en 1971-1972), 58.7% à Pontarlier (en 1971-1972) et 59.4% au Russey (en 1973-1974).

L'ETP minimale est de 23.7% durant le cycle 1976-1977 à Mouthe, de 29.2% durant le cycle 1981-1982 à Pontarlier et de 30.8% au Russey pour la même période.

En rapprochant les valeurs de l'ETP calculées à Mouthe à la pluviosité observée à Labergement, on trouve une ETP moyenne annuelle de 35.7% avec un maximum de 58.4% (durant le cycle 1971-1972) et un minimum de 28% (durant le cycle 1976-1977).

De la même façon, l'estimation de l'ETP à Ouhans à partir des données thermométriques de Pontarlier indique une ETP moyenne annuelle de 36.4% avec 55.2% en 1971-1972 et 25.7% en 1981-1982.

La comparaison journalière des pluies et de l'ETP calculée indique que la part des précipitations qui retourne directement à l'atmosphère (évaporation ou ETP_I) est de :

- 11.8% à Mouthe (199.7mm) soit une moyenne mensuelle de 14% des pluies
- 14.7% à Labergement (216.9mm) soit une moyenne mensuelle de 17.3% des pluies
- 15.2% à Pontarlier (221.5mm) soit une moyenne mensuelle de 17.5% des pluies
- 13.3% à Ouhans (204.2mm) soit une moyenne mensuelle de 16.3% des pluies
- 15.5% au Russey (200.9mm) soit une moyenne mensuelle de 17.1% des pluies.

L'ETP complémentaire (326.5 mm à Mouthe, 309.3 mm à Labergement, 336.9 mm à Pontarlier, 354.2 mm à Ouhans et 327.2 mm au Russey) est transpirée par les végétaux (ETP_{II}).

Ainsi, à Mouthe en moyenne 11.8% des pluies annuelles sont évaporées, 19.6% sont repris dans le sol et 68.6% s'infiltrent (soit 1148.2 mm).

L'infiltration moyenne annuelle par rapport à la pluviosité totale est de :

- 64.3% à Labergement (948.6 mm)
- 60.8% à Pontarlier (864.9 mm)
- 70.6% à Ouhans (1081.7 mm)
- et 61% au Russey (792.7 mm).

b). Au niveau mensuel (Annexe I₆)

Les lames de transpiration moyenne sont indiquées dans le tableau XI.

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
MOUTHE	66.1	38.3	13.9	5	3.9	6.4	14.6	30.3	63.1	90	104.2	90.1
PONTARLIER	67.8	40.7	17	7	6.3	8.7	18.6	34	68.2	92.4	107.4	90.1
LE RUSSEY	65.9	39.4	15	5.8	5.4	7.6	16.6	30.6	64.6	88.9	106.6	92.4

Tableau XI : ETP moyenne mensuelle (en mm)

A ce niveau le bilan des pluies diminuées de l'évapotranspiration potentielle (P-ETP) peut être négatif d'Avril (1981 à Mouthe) à Novembre (1979 au Russey).

Les variations mensuelles de ce paramètre correspondent à celles des températures avec une ETP maximale en Juillet et minimale en Janvier. En Juillet, les précipitations moyennes représentent une part de l'ETP qui est de :

- 28.9% à Mouthe (avec 11.5% en 1980 et 50.4% en 1971)
- 37% à Labergement (avec 23.8% en 1982 et 65% en 1983)
- 38.6% à Pontarlier (avec 20.4% en 1982 et 74.1% en 1983)

- 36.3% à Ouhans (avec 17% en 1979 et 90.9% en 1971)
- 34.2% au Russey (avec 16.7% en 1980 et 46.6% en 1972).

En Janvier la totalité de l'ETP est alimentée par les précipitations. La fraction qui retourne directement à l'atmosphère est de :

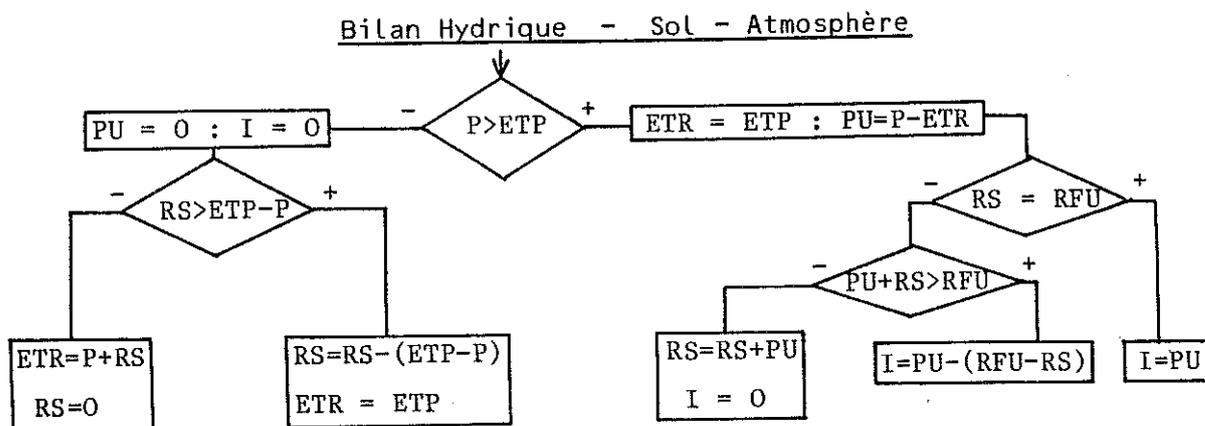
- 2% à Mouthe (avec 0% en 1981 et 5.6% en 1974)
- 3.7% à Labergement (avec 0.7% en 1981 et 10.5% en 1974)
- 3.7% à Pontarlier (avec 0.3% en 1978 et 12.4% en 1974)
- 3.3% à Ouhans (avec 0.3% en 1978 et 11.7% en 1974)
- 3.4% au Russey (avec 0.1% en 1978 et 9.4% en 1974)

Globalement la période de Juin à Octobre correspond à une phase de tarissement des réservoirs souterrains puisque leur alimentation est stoppée. Leur recharge est effective durant le reste de l'année avec un maximum supposé en Janvier (puisque les précipitations de ce mois sont à dominante neigeuse).

3 - CONCLUSION

Au niveau annuel, l'évapotranspiration réelle (ETR) correspond à l'évapotranspiration potentielle (ETP) puisque le bilan pluie (P) diminué de l'ETP est positif. La notion de pluie utile (PU), ou pluie efficace, se justifie par les termes de ce bilan : $PU = P - ETR$.

Pour des périodes inférieures à l'année il est nécessaire d'introduire la notion de "réserve facilement utilisable" des sols (RFU) pour déduire la valeur de l'ETR. L'ordinogramme suivant pose le bilan hydrique au niveau du sol et de l'atmosphère et permet de calculer la pluie utile et les infiltrations (en fait une partie des précipitations participe directement au ruissellement de surface).



RS = Réserve Hydrique du sol

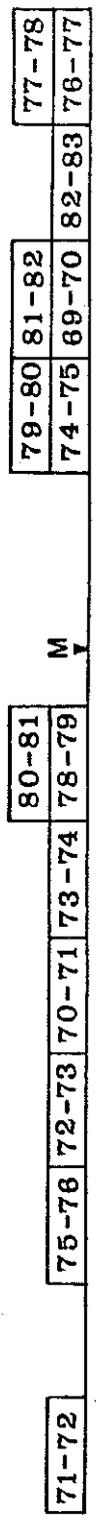
I = Infiltration

L'ensemble des résultats apportés par l'analyse de l'ETP sont à étendre à l'ETR si la valeur de la RFU satisfait aux besoins en eau de l'évapotranspiration secondaire.

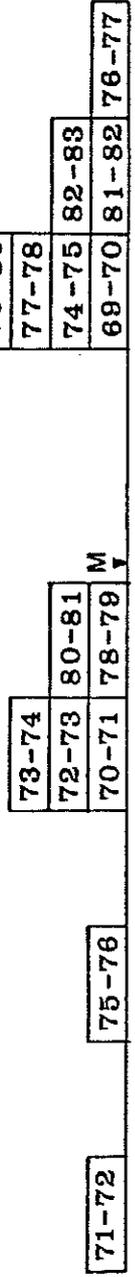
Ainsi l'évapotranspiration calculée selon Thornthwaite est équivalente sur les Hauts Bassins du Doubs et de la Loue avec une moyenne de 542 mm par cycle hydrologique. En moyenne la part des précipitations qui retourne directement à l'atmosphère est de 31.4% à Mouthe, 35.7% à Labergement, 39.2% à Pontarlier, 36.4% à Ouhans et de 39% au Russey. (Il est probable que l'ETP d'Ouhans soit sous-estimée puisque les données thermométriques utilisées sont celles de Pontarlier qui se situe à 842 m alors que la station de Ouhans est à 600 m. Néanmoins, l'altitude du bassin versant de la Loue justifie cette assimilation).

Figure 5 : Distribution des modules pluviométriques efficaces annuels par cycle et par station.

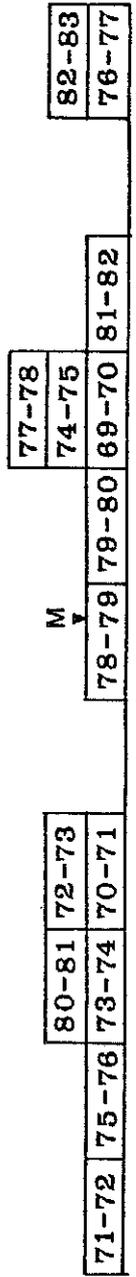
MOUTHE



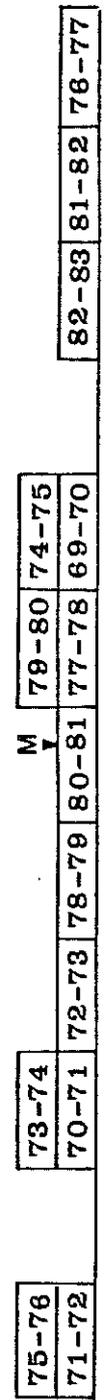
LABERGEMENT



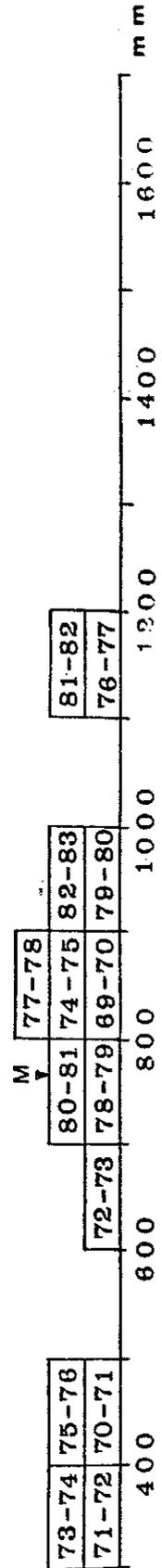
PONTARLIER



OUHANS



LE RUSSEY



La variabilité de ce paramètre est à rapprocher de celle des températures puisque la température moyenne détermine la valeur de l'ETP. L'évapotranspiration est minimale en Janvier et maximale en Juillet. C'est à cette époque que la RFU est la plus sollicitée ce qui accentue le tarissement hydrologique.

C. CONCLUSION. LES PLUIES EFFICACES

La pluviométrie des quatorze cycles étudiés est reportée par station sur la figure 5, déduction faite de l'évapotranspiration correspondante. Les nouvelles distributions obtenues sont comparées à celles des pluies réelles (figure 3).

D'un schéma à l'autre les limites extrêmes sont diminuées de 600 mm (sauf au Russey où elles se déplacent de 500 mm).

A Mouthe le groupe des cycles à forte pluviosité existe toujours (7 cycles entre 1300 et 1700 mm) mais sur un intervalle plus court (-100 mm). Le groupe des cycles à pluviosité moyenne est plus étendu (500 mm au lieu de 300 mm et seul le cycle 1971-1972 apparaît comme exceptionnellement sec.

A Labergement, la distribution des pluviosités efficace diffère peu de celle de la figure 3.

A Pontarlier apparaissent trois groupes distincts mais la majorité des observations est supérieure à la moyenne.

A Ouhans on distingue un groupe important (64.3%) sur un intervalle étendu (de 600 à 1200 mm) centré à la moyenne.

Au Russey la distribution est modifiée par isolement des cycles 1976-1977 et 1981-1982 qui représentent un groupe à forte pluviosité.

En résumé l'introduction du paramètre évapotranspiration diminue d'environ 550 mm la pluviométrie enregistrée aux cinq stations et conduit à une organisation équilibrée des distributions par cycle et par station.

- . Remarque :
- O. DELAROZIERE (1968) a calculé une ETP moyenne annuelle sur le Haut Bassin du Doubs de :
 - 450 mm \pm 50 mm par la formule de TURC
 - et 531 mm par la méthode de THORNTHWAITE.
 - A. JEANBLANC , G. SCHNEIDER (1981) ont donné pour la région de Mouthe les valeurs de 436 mm et de 496 mm pour l'ETP calculée respectivement par les expressions de TURC et de THORNTHWAITE.

Les estimations de ces différents auteurs reposent sur des moyennes mensuelles alors que nos propres résultats intègrent les données journalières.

IV - CORRELATIONS LINEAIRES

Le calcul du coefficient de corrélation linéaire (r) entre deux séries de données (les "x" et les "y") indique, si sa valeur est proche de :

. +1 qu'il y a présomption de relation linéaire à coefficient positif entre les deux séries.

. -1 qu'il y a présomption de relation linéaire à coefficient négatif.

Une valeur de r proche de 0 montre que les "x" et les "y" ne sont pas corrélés de façon linéaire.

L'équation $y = ax + b$ définit la pente (a) et l'ordonnée à l'origine (b) de la droite de régression.

Les coefficients de régression (r, a et b) sont calculés aux niveaux annuel (r_A pour 14 valeurs), mensuel (r_M pour 168 valeurs) et décadaire (r_D pour 672 valeurs) en considérant d'une part les modules pluviométriques

observés aux cinq stations, et d'autre part ces mêmes modules diminués de l'ETP correspondante.

- . Remarque : Les corrélations annuelles intègrent 14 données et dans ce cas le coefficient de corrélation test a pour valeur 0.780 avec un degré de certitude à 99.9% (si le coefficient calculé est supérieur à 0.78 alors 99.9 conclusions sur 100 seraient correctes).

A. LES MODULES PLUVIOMETRIQUES (Tableau XII)

1 - RESULTATS

	MOUTHE (MOU)			LABERGEMENT (LAB)			PONTARLIER (PON)			OUHANS (OUH)			LE RUSSEY (RUSS)		
	Ann	Men	Dec	Ann	Men	Dec	Ann	Men	Dec	Ann	Men	Dec	Ann	Men	Dec
MOU	1	1	1	.989	.95	.94	.953	.914	.906	.963	.906	.89	.892	.875	.851
LAB				1	1	1	.962	.927	.918	.966	.91	.889	.928	.894	.866
PON							1	1	1	.948	.915	.92	.913	.876	.874
OUH										1	1	1	.951	.91	.883
RUSS													1	1	1

Tableau XII : Matrice de corrélations croisées des Modules Pluviométriques

L'ensemble des coefficients de régression ont une valeur significative et les valeurs maximales sont obtenues au niveau annuel (et les minimales au niveau de la décade).

Les meilleures corrélations sont calculées entre les modules pluviométriques de Mouthe et de Labergement ($r_A = .989$, $r_M = .95$ et $r_D = .94$). Les liaisons entre Mouthe et les autres stations diminuent avec l'éloignement (les corrélations les plus faibles sont celles calculées avec Le Russey). On note que la corrélation avec la station de Ouhans est meilleure qu'avec celle de Pontarlier. La même remarque s'applique avec les autres stations.

- . Remarque : Les coefficients a et b sont donnés en annexe. (Annexe II₁).

2 - CONCLUSION

Le coefficient de régression linéaire calculé entre toutes les stations météorologiques est significatif lorsque l'on considère leurs modules pluviométriques.

La région de Pontarlier est soumise à un régime pluviométrique particulier au sein des Hauts Bassins du Doubs et de la Loue (les coefficients de régression sont cependant plus importants avec cette station qu'avec celle du Russey).

B. LES MODULES PLUVIOMETRIQUES UTILES (Tableau XIII)

	MOUTHE (MOU)			LABERGEMENT (LAB)			PONTARLIER (PON)			OUHANS (OUH)			LE RUSSEY (RUSS)		
	Ann	Men	Dec	Ann	Men	Dec	Ann	Men	Dec	Ann	Men	Dec	Ann	Men	Dec
MOU	1	1	1	.988	.956	.936	.952	.923	.903	.96	.915	.88	.905	.909	.844
LAB				1	1	1	.962	.946	.923	.965	.923	.883	.941	.92	.857
PON							1	1	1	.95	.954	.925	.92	.918	.882
OUH										1	1	1	.958	.924	.888
RUSS													1	1	1

Tableau XIII : Matrice de corrélations croisées des Modules Pluviométriques Utiles (P-ETP)

1 - RESULTATS

Les coefficients de régression sont très significatifs (6 valeurs sont inférieures à 0.9 au lieu de 10 lorsque l'on considère les modules pluviométriques). Les mêmes remarques que précédemment sont à formuler au sujet des liaisons entre les stations.

Les régressions calculées au niveau mensuel sont légèrement plus fortes que dans la matrice des modules pluviométriques.

Au Russey les coefficients décennaux sont plus faibles avec Mouthe et Labergement que ceux du Tableau XII (on obtient respectivement 0.844 et 0.857 au lieu de 0.851 et 0.866).

. Remarque : Les coefficients de régression sont en Annexe II₂.

2 - CONCLUSION

La déduction de l'ETP faite aux modules pluviométriques observés à chaque station ne modifie pas la qualité des liaisons calculées (sauf entre le Russey et les stations de Mouthe et Labergement, mais la prise en compte des données de l'ETP de Pontarlier pour les trois premiers cycles peut être responsable de cette atténuation).

C. LES MODULES NIVOMETRIQUES (Tableau XIV)

	MOU	LAB	PON	OUH	RUSS
MOU	1	.906	.796	.749	.791
LAB		1	.855	.872	.858
PON			1	.839	.719
OUH				1	.825
RUSS					1

Tableau XIV : Matrice de corrélations croisées des Modules Nivométriques Annuels.

La corrélation n'est pas possible pour des modules inférieurs au niveau annuel puisque la prise en compte de nombreuses valeurs nulles (4 par cycle au niveau mensuel et 16 par cycle au niveau décadaire, soit au total 56 sur 168 valeurs mensuelles et 284 sur 672 modules décadaires) conduit à surestimer le coefficient.

1 - RESULTATS

Seuls deux coefficients ne sont pas significatifs à 99.9% (mais ils le sont à 90%) et la meilleure liaison est calculée entre les stations de Mouthe et de Labergement.

La nivométrie, comme la pluviométrie, est dépendante entre Labergement et Ouhans.

2 - CONCLUSION

Les corrélations des modules nivométriques sont significatives à 90% au niveau annuel mais non représentatives du phénomène à d'autres pas de temps.

Les coefficients les plus forts sont obtenus entre les stations du Haut Bassin du Doubs.

D. CONCLUSION

Les corrélations calculées entre les cinq stations météorologiques, en considérant d'une part leurs modules pluviométriques et d'autre part leurs modules nivométriques utiles, indiquent que :

- toutes les liaisons obtenues sont significatives même si on observe une diminution continue de la valeur de r du niveau annuel au niveau décadaire (la corrélation est presque inexistante au niveau journalier)
- la station météorologique enregistre des précipitations sensiblement différentes de celles observées à Labergement et à Ouhans
- les pluviométries de Mouthe et de Labergement sont étroitement liées et peuvent se comparer à celles de Ouhans
- l'individualité de la région du Russey s'estompe lorsque l'on s'intéresse aux modules pluviométriques diminués de l'ETP correspondante
- l'introduction du paramètre ETP améliore légèrement la qualité des liaisons au niveau mensuel.

Les corrélations des modules nivométriques sont significatives (à 90%) au seul niveau annuel (elles sont non représentatives à des pas de temps inférieurs du fait de l'abondance des valeurs nulles).

V - LES INDICES PLUVIOMETRIQUES ET NIVOMETRIQUES

L'analyse de ces paramètres complète l'étude du contexte météorologique dans le sens où il permet d'estimer l'intensité des précipitations.

Les indices pluviométriques (IP) ou nivométriques (IN) se calculent par le rapport des quantités tombées sous forme de pluie (PP) ou de neige (PN) et du nombre de jours pluvieux (NP) ou neigeux (NN) pour une période déterminée ($I = P/N$).

■ Remarque - L'analyse est limitée aux indices pluviométriques et nivométriques annuels en chacune des stations. Les indices pluviométriques sont calculés en considérant les modules pluviométriques annuels et tous les jours pluvieux (sans considération du facteur neige).

A. LES INDICES PLUVIOMETRIQUES

1 - LES JOURS DE PLUIE (Tableau XV)

a). Analyse

Il pleut environ un jour sur deux sur l'ensemble des Hauts Bassins du Doubs et de la Loue.

	MOUTHE		LABERGEMENT		PONTARLIER		OUHANS		LE RUSSEY	
	NP+NN	N	NP+NN	NN	NP+NN	NN	NP+NN	NN	NP+NN	NN
69-70	176	61	214	81	212	85	194	66	188	69
70-71	141	39	166	46	174	49	161	29	148	41
71-72	131	46	267	47	165	53	149	29	123	39
72-73	138	42	177	55	160	54	146	43	147	51
73-74	158	41	184	51	179	52	175	28	145	34
74-75	190	74	214	68	217	73	214	36	191	60
75-76	129	42	148	37	153	55	139	25	132	29
76-77	204	53	222	57	231	65	220	38	194	46
77-78	178	64	204	67	208	70	193	55	185	52
78-79	152	60	173	64	185	65	166	45	155	49
79-80	177	53	202	59	185	47	183	36	173	51
80-81	163	61	196	70	152	64	183	57	173	66
81-82	165	64	201	67	180	53	189	42	182	64
82-83	186	62	205	58	204	57	186	38	184	58
Total	2288	762	2667	827	2605	842	2498	567	2320	709
Moyenne	163.4	54.4	190.5	59.1	186	60.1	178.4	40.5	165.7	50.6

Tableau XV : Nombre de jours pluvieux (NP) et neigeux (NN) par cycle et par station.

Le nombre de jours de pluie est toujours le plus faible à Mouthe (moyenne de 163 j) et au Russey (moyenne de 166 j) et le plus important à Labergement (moyenne 190 j) ou à Pontarlier (moyenne 186 j).

On remarque qu'à toutes les stations la valeur maximale est observée durant le cycle 1976-1977 (204 j à Mouthe, 222 j à Labergement, 231 j à Pontarlier, 220 j à Ouhans et 194 j au Russey). Les valeurs minimales sont observées durant le cycle 1975-1976 (sauf à Pontarlier où la valeur de ce cycle est de 153 j alors qu'il y a eu 152 j pluvieux en 1980-1981).

La variabilité de ce paramètre est donc de 75 j à Mouthe, 74 j à Labergement, 79 j à Pontarlier, 81 j à Ouhans et 62 j au Russey. Sur les Hauts Bassins du Doubs et de la Loue, on reconnaît deux zones de domaine de variation distinct. Les stations de Mouthe et de Labergement sont représentatives de la région méridionale et celles de Pontarlier et de Ouhans de la région septentrionale.

b). *Corrélations*

La matrice de corrélations croisées du nombre de jours pluvieux à chacune des stations (Tableau XVI).

	MOU	LAB	PON	OUH	RUSS	y/x
MOU	1	.952	.866	.958	.929	r
	1	.92	.93	1	.94	a
	0	39.39	33.76	14.76	11.59	b
LAB		1	.795	.942	.951	r
		1	.88	1.01	.99	a
		0	18.36	-14.55	-23.67	b
PON			1	.845	.775	r
			1	.82	.73	a
			0	25.67	29.53	b
OUH				1	.918	r
				1	.89	a
				0	6.41	b

Tableau XVI : Matrice de corrélations croisées du nombre de jours pluvieux. ($y = ax + b$).

Les corrélations où apparaissent les valeurs observées à Pontarlier sont les plus faibles (la meilleure liaison avec $r = 0.886$ s'obtient entre ce point et les données de Mouthe).

La station de Ouhans montre une grande similitude avec les stations de Mouthe et de Labergement ($r = 0.958$ et 0.942), (et dans une moindre mesure avec la station du Russey ($r = .958$)). La valeur des coefficients a et b est identique dans les liaisons Ouhans-Mouthe et Ouhans-Labergement avec des coefficients b de signe contraire.

c). *Résultats*

L'analyse des moyennes annuelles des jours pluvieux permet de rapprocher d'une part les stations de Labergement, de Pontarlier et de Ouhans, et d'autre part celles de Mouthe et du Russey.

La variabilité de ce paramètre (nombre de jours pluvieux par an) est distincte entre la partie Sud du bassin (stations de Mouthe et de Labergement) et la partie Nord (stations de Pontarlier et de Ouhans).

La prise en compte des coefficients de corrélation linéaire (r) montre la particularité de la région de Pontarlier par rapport à ce paramètre. Les stations de Mouthe et de Labergement enregistrent un nombre de jours pluvieux très différent ($b = + 39$ jours). La station de Ouhans constitue un moyen terme entre ces deux points (r et a sont équivalents, et dans un cas $b = + 14$ et dans l'autre $- 14$).

d). *Conclusion*

En moyenne il pleut (ou neige) un jour sur deux sur l'ensemble de la région.

La moyenne annuelle du nombre de jours pluvieux est voisine aux stations de Labergement et de Pontarlier. L'analyse de la variabilité de ce paramètre et des corrélations calculées entre les stations montre néanmoins la particularité de la région de Pontarlier.

Les observations de pluie (ou de neige) sont les plus fréquentes à Labergement et les moins nombreuses à Mouthe (avec en moyenne 39 j de pluie en plus à Labergement). Les observations faites à la station de Ouhans ont pu éventuellement de la même façon être comparées à celles réalisées à Mouthe ou à Labergement.

2 - LES INDICES PLUVIOMETRIQUES (Tableau XVII)

a). Analyse

La valeur de cet indice indique l'"intensité" des précipitations au niveau de la station. Ainsi à Mouthe les jours de pluie sont les moins nombreux alors que la pluviométrie y est maximale, l'indice pluviométrique y est donc le plus fort.

	MOUTHE		LABERGEMENT		PONTARLIER		OUHANS		LE RUSSEY	
	IP	IN	IP	IN	IP	IN	IP	IN	IP	IN
69-70	11.2	12	7.8	9.6	7.7	8.9	8.9	10.1	7.7	8.3
70-71	10.3	9	7.7	6.3	7	6.1	7.9	6.8	7.1	5.6
71-72	7.8	9	5.7	7	5.8	7.4	6.8	10.9	7.1	7.4
72-73	9.5	8.4	7.2	7.6	7.8	9.1	8.7	9	8.4	7.2
73-74	9.5	6.7	7	5.2	6.2	5.2	7	6	6.2	5.2
74-75	9.7	9.8	7.8	8.5	7.3	9	8	9.8	7.3	6.5
75-76	9.4	7.8	7.5	8.5	6.5	5.6	7.7	6.6	7.5	5.8
76-77	10.8	10.1	8.4	8.8	8.1	8.2	9.5	8.6	8.5	7.4
77-78	10.8	11.9	8.2	8.5	7.8	8.4	8.4	8	7.6	6.8
78-79	10.4	8.3	8	6.4	7.5	6.7	8.8	6.8	8.1	5.9
79-80	10.4	10.3	8.1	8.2	8.1	6.2	8.9	7.9	8.7	6.8
80-81	9.5	9.1	6.9	6.2	7.5	8.3	8.3	7.7	7.3	5.6
81-82	11.7	10.2	8.6	8.1	9.4	7.8	10.2	10	9.3	8.8
82-83	11.2	11.7	8.7	10.2	9.5	11.4	10.2	10.7	8.4	10.2
Moyenne	10.2	9.8	7.7	7.9	7.6	7.9	8.6	8.6	7.8	7.1

Tableau XVII : Indices pluviométriques et nivométriques par cycle et par station.

Le cycle 1971-1972 est caractérisé par les indices pluviométriques les plus faibles, sauf au Russey où le minimum est observé en 1973-1974, ceux de 1981-1982 et de 1982-1983 montrent les indices les plus importants.

L'intensité des pluies est la plus forte à Mouthe (10.2 mm/j) et à Ouhans (8.6 mm/j). Les autres stations ont des intensités équivalentes.

La variabilité de ce paramètre est de 3.4 mm/j à Mouthe, 3 mm/j à Labergement, 3.7 mm/j à Pontarlier, 3.4 mm/j à Ouhans et de 3.1 mm/j au Russey.

b). Corrélations (Tableau XVIII)

Les valeurs de l'indice pluviométrique se corrélaient bien entre les stations de Pontarlier et de Ouhans ($r = .972$ avec $IP_{OUH} = .95 IP_{PON} + 1.32$).

Toutes les autres liaisons sont inférieures à 0.9 (excepté entre Mouthe et Labergement où $r = .923$ avec $IP_{LAB} + .26$) et donnerait des valeurs calculées différentes de celles observées (par exemple l'indice pluviométrique de

Pontarlier durant le cycle 1981-1982 est de 9.4 mm/j et on trouverait 8.6 mm/j en se référant à l'indice calculé à Labergement).

	MOU	LAB	PON	OUH	RUSS
MOU	1	.923	.83	.843	.608
LAB		1	.819	.829	.645
PON			1	.972	.826
OUH				1	.872
RUSS					1

Tableau XVIII : Matrice de corrélations croisées des Indices pluviométriques annuels.

c). *Conclusion*

Le calcul des indices pluviométriques montre que l'intensité des précipitations est maximale à Mouthe (10.2 mm/j de pluie). Elle est de 8.6 mm/j à Ouhans et de l'ordre de 7.7 mm/j aux autres stations.

La variabilité de cet indice est maximale à Pontarlier (3.7 mm/j) et minimale à Labergement (3 mm/j).

Il n'y a qu'entre les stations de Pontarlier et de Ouhans que la corrélation est satisfaisante.

B. LES INDICES NIVOMETRIQUES

1 - LES JOURS DE NEIGE (Tabl. XV)

a). *Analyse*

Le nombre moyen de jours neigeux est équivalent à Labergement et à Pontarlier avec 60 j/an, soit un jour sur six et un jour sur sept à Mouthe et un jour sur neuf à Ouhans.

Les maximums ont été observés durant le cycle 1974-1975 à Mouthe (74 j) et durant le cycle 1969-1970 aux autres stations (donc 85 j à Pontarlier qui est la plus forte valeur enregistrée). Les minimums correspondent au cycle 1970-1971 à Mouthe (39 j), au cycle 1979-1980 à Pontarlier (47 j) et au cycle 1975-1976 aux autres points. (La valeur extrême de 25 j a été observée à Ouhans).

L'amplitude de l'indice nivométrique est de 35 j à Mouthe, 44 j à Labergement, 38 j à Pontarlier, 41 j à Ouhans et de 40 j au Russey.

b). *Corrélations (Tableau XIX)*

L'ensemble des coefficients obtenus est médiocre, seule une tendance à la liaison est relevée entre la station de Labergement et celles de Ouhans ($r = .879$) et le Russey ($r = .909$).

	MOU	LAB	PON	OUH	RUSS	y/x
MOU	1	.799	.637	.565	.780	r
	1	.84	.62	.62	.86	a
	0	13.17	26.18	6.61	3.63	b
LAB		1	.738	.879	.909	r
		1	.68	.92	.95	a
		0	19.71	-13.68	-5.7	b
PON			1	.735	.556	r
			1	.83	.63	a
			0	-9.22	12.86	b
OUH				1	.792	r
				1	.80	a
				0	18.41	b
RUSS					1	r
					1	a
					0	b

Tableau XIX : Matrice de corrélations croisées du nombre de jours de neige ($y = ax+b$).

c). *Conclusion*

Les jours de neige sont aussi nombreux à Labergement et à Pontarlier (60 j/an ou 1j/6). On en compte 54 à Mouthe (1j/7) et que 40 à Ouhans (1j/9).

Le nombre de jours neigeux est très variable dans le temps et d'un point d'observation à un autre. Aucune corrélation nette de ce paramètre apparaît entre les stations.

2 - LES INDICES NIVOMETRIQUES (Tabl. XVII)

a). *Analyse*

Les précipitations neigeuses ont une intensité moyenne maximale à Mouthe (9.8mm/j de neige). L'indice thermique est important à Ouhans (8.6mm/j), il est identique aux stations de Labergement et de Pontarlier (7.9 mm/j) et il est faible au Russey (7.1 mm/j).

L'intensité maximale a été calculée pour le cycle 1969-1970 à Mouthe (12 mm/j). Aux autres stations l'indice nivométrique maximum est associé au cycle 1982-1983. Les valeurs minimales ont été observées durant le cycle 1973-1974 à toutes les stations.

L'amplitude de ce paramètre est de 4.2 mm/j à Mouthe, 2.7 mm/j à Labergement et à Pontarlier, 2.6 mm/j à Ouhans et de 1.9 mm/j au Russey.

b). *Corrélations (Tableau XX)*

	MOU	LAB	PON	OUH	RUSS
MOU	1	.780	.678	.612	.704
LAB		1	.657	.617	.765
PON			1	.755	.752
OUH				1	.831
RUSS					1

Tableau XX : Matrice de corrélations croisées des Indices Nivométriques Annuels.

Les valeurs de l'indice nivométrique ne se corrélient pas d'une station à l'autre. Seules les stations de Ouhans et du Russey montrent une affinité ($r = .831$).

c). Conclusion

L'indice nivométrique maximal est enregistré durant le cycle 1982-1983 à toutes les stations (excepté à Mouthe où il est de 11.7 mm/j alors qu'il atteint 12 mm/j en 1969-1970).

Les corrélations calculées entre les indices nivométriques annuels de chacune des stations n'indiquent aucune liaison pour ce paramètre.

C. CONCLUSION

En moyenne des précipitations sont enregistrées un jour sur deux sur les Hauts Bassins du Doubs et de la Loue avec durant un tiers de ces jours pluvieux l'observation d'averses de neige.

La région représentée par les stations de Labergement, Pontarlier et Ouhans est marquée par en moyenne 185 j de pluie par an dont 60 j de neige (excepté à Ouhans où les jours neigeux sont au nombre de 40 par an).

Les indices pluviométriques et nivométriques indiquent que l'intensité des précipitations pluvieuses et neigeuses est maximale aux stations de Mouthe et de Ouhans. Les corrélations calculées à partir des jours de pluie annuels confirment l'affinité qui existe entre les stations de Mouthe et Labergement et celle de Ouhans (r est respectivement égal à .958 et .942). Néanmoins les indices pluviométriques de cette station se rapprochent davantage de ceux observés à Pontarlier.

Les corrélations calculées à partir du nombre de jours neigeux et des indices nivométriques ne montrent aucune liaison entre les stations vis à vis du paramètre neige.

En résumé, il pleut 39 jours de plus par an à Labergement qu'à Mouthe (et il y neige 6 jours de plus) mais l'intensité des précipitations est nettement plus forte à Mouthe. La région de Ouhans est affectée par des précipitations d'intensité supérieure à celles qui sont enregistrées sur les secteurs de Labergement et de Pontarlier.

VI - CONCLUSIONS

L'analyse météorologique permet de définir la part des précipitations qui participe à l'écoulement du Doubs et de la Loue sur chacun de leur Haut Bassin, à partir des précipitations (observées à Mouthe, Labergement, Pontarlier et Ouhans) et des températures (enregistrées à Mouthe et Pontarlier).

La région se situe entre les isohyètes 1400 mm et 1700 mm avec des maximums observés à Ouhans (1500 mm) et à Mouthe (1700 mm).

Les précipitations neigeuses s'étalent de Septembre à Juin (10 mois) sur le Haut Bassin du Doubs où elles représentent 31.9% (490.6 mm) de la pluviosité totale. (La neige correspond à au moins la moitié de la quantité tombée durant les mois de Novembre à Avril). La région de Ouhans est nettement moins influencée par ce paramètre (22.8% des pluies soit 349.1 mm tombés entre Octobre et Mai).

La variabilité des précipitations est très importante au niveau ponctuel tant à l'échelle annuelle (1190 mm à Mouthe, 945.5 mm à Labergement, 973.1 mm à Pontarlier et 1083 mm à Ouhans), que mensuelle (l'écart pour le module mensuel minimum est de 271.2 mm à Mouthe, 195.2 mm à Labergement, 168.2 mm à Pontarlier et 177.4 mm à Ouhans, et pour le module maximum il est respectivement de 289.3 mm, 286.6 mm, 221.4 mm et 271.5 mm).

L'importance des précipitations neigeuses est tout aussi variable sans être dépendante de la pluviométrie totale (une année ou un mois très pluvieux n'est pas forcément très neigeux).

Le module thermométrique interannuel est de 5.9°C à Mouthe et de 7.3°C à Pontarlier. Les variations saisonnières de ce paramètre sont synchrones et on note des variabilités régionales et ponctuelles moins importantes que celles des pluies. L'évapotranspiration potentielle (calculée selon Thornthwaite) est directement fonction des températures. Aussi l'importance de ce facteur est-elle saisonnière et sa variabilité est calquée sur celle de la thermométrie.

L'évapotranspiration est donc maximale en Juillet et minimale en Janvier ; elle correspond en moyenne pour l'année à 526.2 mm à Mouthe et 558.4 mm à Pontarlier. La part des précipitations moyennes annuelles retournée directement à l'atmosphère est de 31.4% à Mouthe, 35.7% à Labergement (en considérant les températures observées à Mouthe), 39.2% à Pontarlier et 36.4% à Ouhans (en considérant les températures observées à Pontarlier).

La distribution des modules pluviométriques efficaces annuels par cycle et par station montre :

- 3 groupes à Mouthe qui occupent les intervalles
 - . 400 à 500 mm (7.1% des observations)
 - . 600 à 1100 mm (42.8% des observations)
 - . 1300 à 1700 mm (50% des observations)

- 4 groupes à Labergement répartis de :
 - . 300 à 400 mm (7.1%)
 - . 500 à 600 mm (7.1%)
 - . 700 à 900 mm (35.8%)
 - . 1100 à 1400 mm (50%)

- 3 groupes à Pontarlier distribués de :
 - . 300 à 700 mm (42.8%)
 - . 800 à 1200 mm (42.8%)
 - . 1300 à 1400 mm (14.4%)

- 3 groupes à Ouhans localisés sur les intervalles :
 - . 400 à 500 mm (14.4%)
 - . 600 à 1200 mm (64.2%)
 - . 1300 à 1600 mm (21.4%)

Le cycle 1971-1972 apparaît comme exceptionnellement sec pour l'ensemble de la région et celui de 1976-1977 extrêmement pluvieux.

Par comparaison avec l'analyse des observations faites au Russey, on remarque que les conditions météorologiques sont différentes sur le cours moyen du Doubs avec :

- . une pluviométrie moyenne de 1298.4 mm (soit 233.5 mm de moins que sur l'ensemble du Haut Bassin du Doubs) dont 27.3% de neige. L'importance des précipitations neigeuses est prépondérante de Janvier à Mars.
- . une température interannuelle moyenne de 6.1°C avec une amplitude annuelle de 16°C (comme à Mouthe).
- . une évapotranspiration potentielle moyenne de 39% (soit 480.1 mm) dont la prise en considération modifie sensiblement la distribution des modules pluviométriques annuels. La distribution des modules pluviométriques efficaces montre trois groupes, l'un compris entre 300 et 500 mm (28.5%), le suivant entre 600 et 1000 mm (57.1%) et le dernier entre 1100 et 1200 mm (14.4%).

En résumé, la variabilité spatiale et interannuelle des précipitations efficaces est très importante. Certains cycles montrent cependant des qualités identiques d'une station à l'autre. Ce sont les cycles 1971-1972 et 1975-1976 pour les plus secs et le cycle 1976-1977 pour le plus pluvieux.

Le cycle 1969-1970 est un des plus neigeux à Mouthe et il est nettement isolé sur la distribution aux autres stations. Les cycles 1973-1974 et 1970-1971 sont les moins influencés par ce paramètre.

L'importance relative des précipitations neigeuses montre que leur observation ne doit pas être négligée dans le cadre d'une étude hydrologique de la région où l'immobilisation temporaire d'importantes masses d'eau doit modifier l'hydrodynamisme des rivières (notamment du Doubs).

Les corrélations calculées en considérant les modules pluviométriques puis les modules pluviométriques utiles de chaque station sont toutes significatives. On retient cependant la particularité météorologique de la région de Pontarlier au sein des Hauts Bassins du Doubs et de la Loue (ainsi que celle plus compréhensible à l'échelle régionale du secteur du Russey).

Les précipitations neigeuses donnent des corrélations significatives sur l'ensemble du Haut Bassin du Doubs au seul niveau annuel.

Des précipitations pluvieuses ou neigeuses sont observées en moyenne un jour sur deux sur l'ensemble de la région. (Environ un tiers de ces jours pluvieux est marqué par des chutes de neige).

Les indices pluviométriques et nivométriques sont les plus forts à Mouthe et à Ouhans (bien qu'il ne neige en moyenne que 40 j/an à Ouhans et 60 j/an à Mouthe).

Les corrélations calculées entre les stations à propos de leur nombre de jours de neige sont nettement plus faibles que celles trouvées avec leur nombre de jours de pluie totale, ce qui traduit bien l'influence de l'altitude (donc des températures) sur l'enneigement. Les mesures nivométriques ponctuelles sont donc difficilement applicables à l'ensemble d'un bassin.

E T U D E H Y D R O L O G I Q U E .

. Introduction .

Le Haut Bassin du Doubs appartient dans sa totalité à la Haute Chaîne jurassienne, qui se caractérise par la succession d'anticlinaux jurassiques, parfois chevauchants, séparés par des synclinaux marqués par un coeur crétacé discordant.

L'ensemble structural d'orientation(N60°)est interrompu par de grands décrochements (N180°).

De sa source (945 m) au Défilé d'Entreroche (fig. 6) le cours du Doubs suit les vallées synclinales en passant d'un pli à un autre selon un tracé en baïonnette.

Trois stations hydrométriques enregistrent ses variations de débit sur le secteur de l'étude. Il s'agit d'amont en aval des stations de :

. Labergement Ste Marie (852 m) (Circonscription Electrique (CE)) installée à la sortie des Gorges de Fourperet. Le Doubs emprunte ce passage pour quitter le synclinal de Mouthe où il est rejoint par le Cagnard et le Bief Rouge.

. Pontarlier (839 m) (CE) implantée au débouché de la rivière dans la plaine de Pontarlier. Le Doubs constitue le seul exutoire du synclinal de St Point où il reçoit les apports du lac de Remoray et de diverses émergences karstiques (dont la Source Bleue) en traversant le lac de St Point. Au niveau de la station il est grossi en rive droite des écoulements de la source intermittente de Fontaine Ronde et de la Morte.

. Ville du Pont (altitude du zéro de l'échelle inconnue) (Service Régional d'Aménagement des Eaux (SRAE)) qui marque la limite du cours supérieur du Doubs. Les débits observés sont augmentés des écoulements du Drugeon mais diminués par des pertes au bénéfice de la Loue.

Le Drugeon draine un ensemble de formations marécageuses et tourbeuses quaternaires qui tapissent le fond du synclinal de Frasne-Bonnevaux. Ses débits sont enregistrés au pont de Vuillecin (SRAE) (803,25 m).

Les sources de la Loue (535 m) drainent une partie du plateau de Levier et du Haut Bassin du Doubs et sont exploitées à l'Usine Hydroélectrique de Mouthier.

Les écoulements du Doubs, du Drugeon et des sources de la Loue sont définis à partir de l'analyse statistique des chroniques de débits moyens journaliers constitués à Labergement et Pontarlier pour le Doubs à Vuillecin pour le Drugeon et à l'Usine Hydroélectrique de Mouthier pour la Loue. (La chronique établie à Ville du Pont est analysée dans le chapitre qui traite du déficit d'écoulement du Doubs (Deuxième Partie, Chapitre VI).

La période commune d'observation est de 108 mois entre le 1.9.71 et le 31.8.80 (3288 débits journaliers).

L'ajustement des modules limnimétriques mensuels à une loi probabiliste permet de préciser le régime des rivières dans leur importance (en fonction de leur moyenne) et leurs irrégularités (en fonction de l'écart-type).

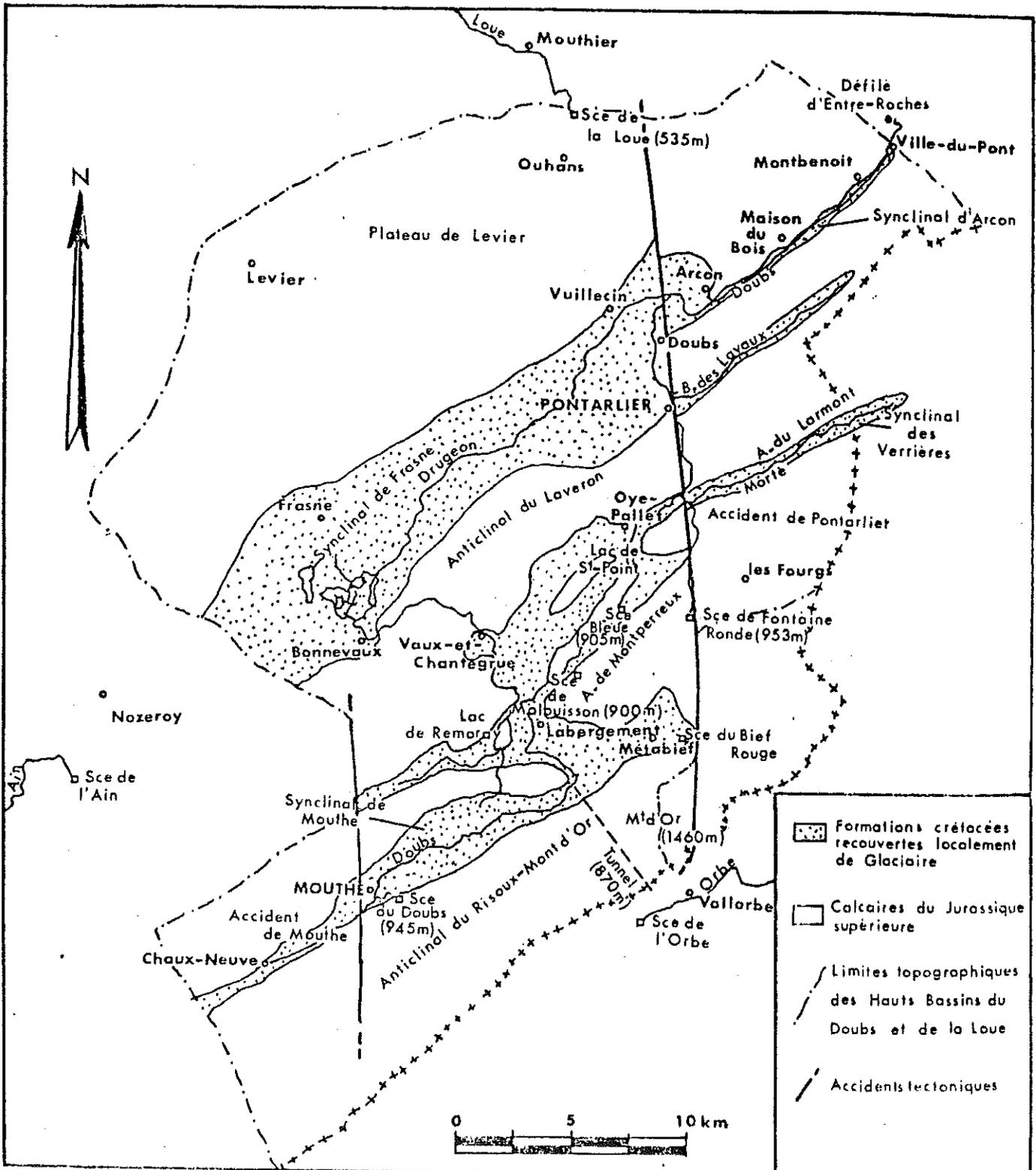
Le calcul des coefficients de corrélations linéaires complète l'étude statistique des écoulements.

Un schéma de fonctionnement du système d'écoulement des bassins considérés est proposé à partir des résultats issus de l'analyse des bilans hydrologiques et de la décomposition des hydrogrammes.

I - ANALYSE STATISTIQUE DES DEBITS

L'analyse statistique des données hydrométriques doit permettre de définir les régimes d'écoulements à partir de valeurs caractéristiques.

Figure 6 : Le réseau hydrographique sur les Hauts Bassins du Doubs et de la Loue : carte géologique simplifiée.



Il importe de reconnaître leur fréquence et leur dispersion (caractéristiques empiriques) sur la période considérée tout en cherchant à situer la vraie valeur de ces paramètres (caractéristiques théoriques des écoulements sur une période infinie).

Les caractéristiques des débits du 1.9.71 au 31.9.80 sont déduites de l'analyse de la distribution des débits moyens journaliers et leur extension à une chronique plus longue est calculée avec la recherche de leur ajustement à une loi probabiliste.

Remarque : Les débits moyens journaliers publiés par la Circonscription Electrique (CE) correspondent à la moyenne arithmétique du débit instantané de 8 heures et celui de 20 heures.
 (Les débits des sources de la Loue correspondent aux débits turbinés (voir Deuxième Partie, Chapitre VI).
 Les débits moyens journaliers fournis par le Service Régional d'Aménagement des Eaux (SRAE) sont calculés par intégration entre 0 heure et 24 heures.
 (Les débits moyens journaliers fournis par le SRAE sont entachés d'une erreur comprise entre 10 et 15%. La station de Vuillecin est l'objet de phénomènes hydrauliques particuliers qui portent l'erreur à 30% pour les forts débits).

A. LA DISTRIBUTION DES DEBITS

La dispersion des débits moyens journaliers est représentée par la courbe de distribution de leurs fréquences (courbes des "débits classés") où les écoulements sont donnés en fonction de leur fréquence au dépassement.

Le régime d'écoulement des rivières est généralement défini, dans ce mode de représentation, par les débits caractéristiques (DC) (débits dépassés durant 1,3,6 et 9 mois (DC₁, DC₃, ...)). Ici les pourcentages d'observations équivalents à ces termes (10,25,50 et 75% des observations) sont utilisés (en plus des repères tracés à 0.5, 1, 2, 5, 10, 20 et 50 m³/s) comme paramètres de définition en raison de l'exploitation d'une chronique interannuelle (3288 valeurs par station).

Remarque : Rapportés à l'année civile les pourcentages 10, 25, 50 et 75% représentent respectivement 32, 91, 182 et 274 j/an (ou approximativement 1, 3, 6 et 9 mois).
 Le détail des distributions par cycle et par station est donné en Annexe III.

1 - ANALYSE

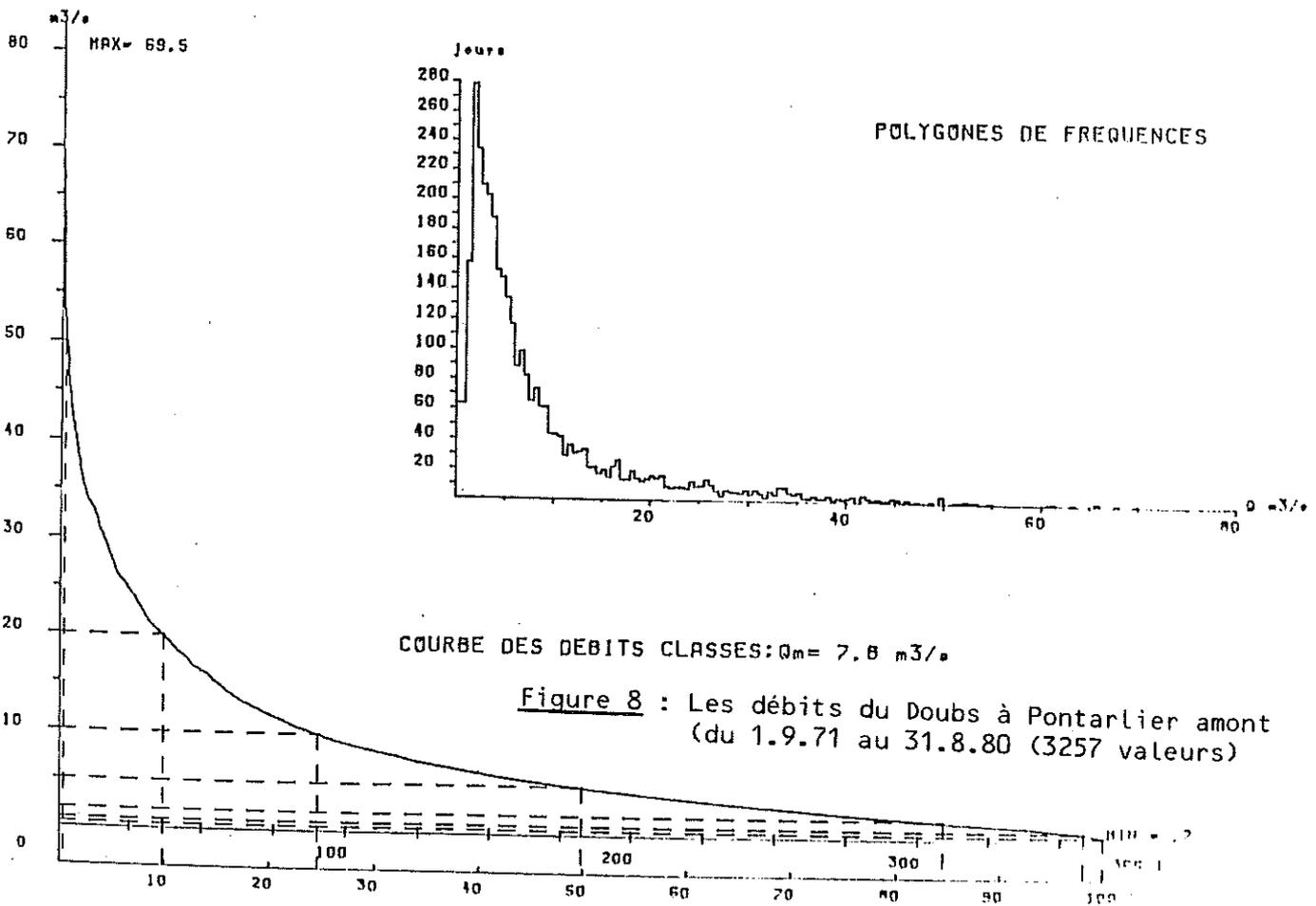
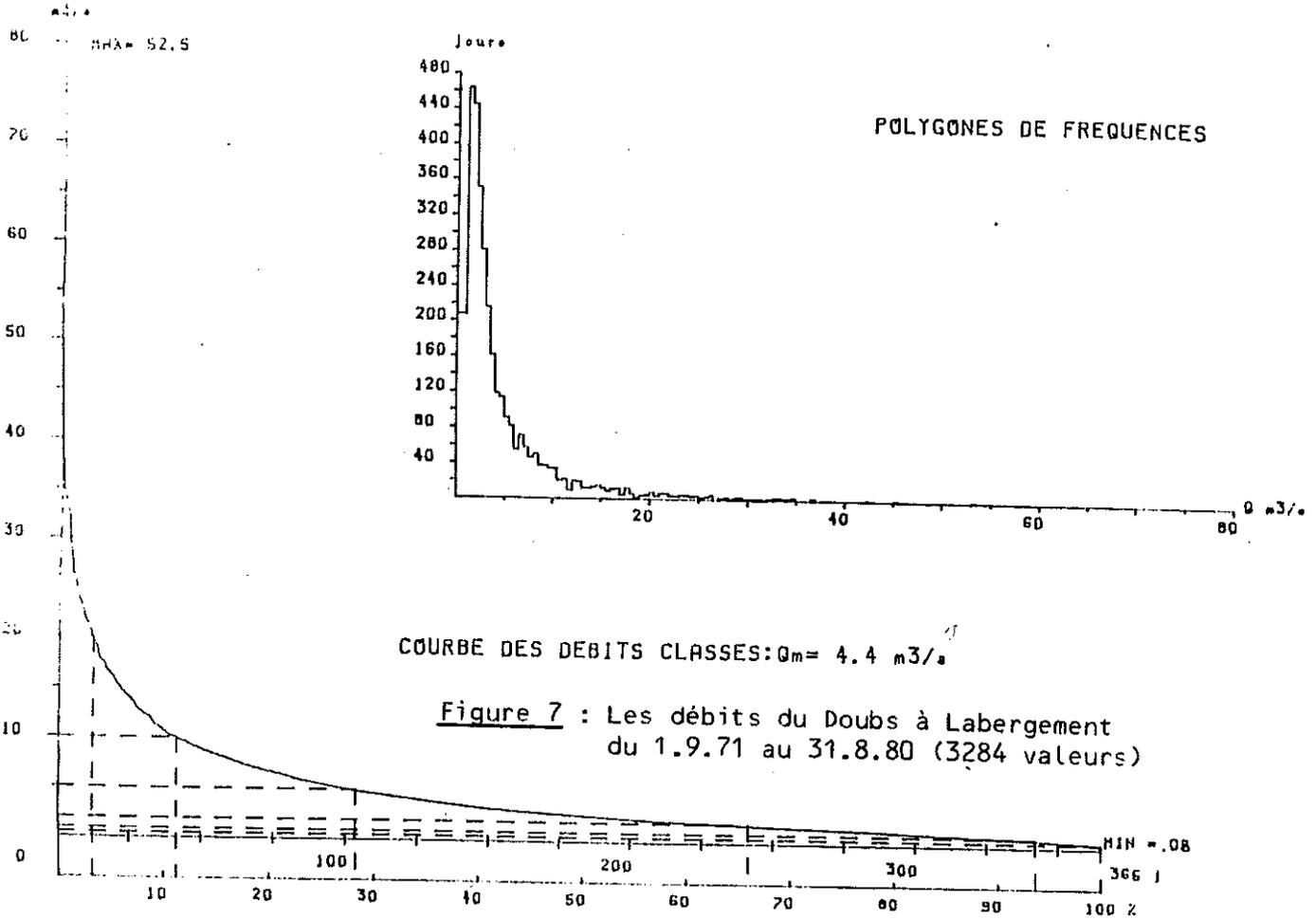
a. Le Doubs à Labergement (fig. 7)

La moyenne interannuelle est de 4.4 m³/s avec un minimum de 0.08 m³/s (le 7.11.71) et un maximum de 52.5 m³/s (le 7.4.79).

La distribution totale (Tableau XXI) évolue entre celles des cycles annuels de 1971-1972 (moyenne de 2.5 m³/s) et de 1977-1978 (moyenne de 6.1 m³/s).

Les valeurs observées pour chacun de ces cycles sont pour

75%	supérieurs à 0.5 m ³ /s en 71-72, à 1 m ³ /s de 71 à 80 et à 1.5 m ³ /s en 77-78
50%	1.5 m ³ /s 2 m ³ /s 3.5 m ³ /s
25%	3 m ³ /s 5 m ³ /s 8 m ³ /s
10%	5.5 m ³ /s 10 m ³ /s 13.5 m ³ /s



Un tiers des 3284 débits moyens journaliers (34.3%) est supérieur à la moyenne globale et les trois quarts d'entre eux sont inférieurs à 5 m³/s avec une fréquence maximale entre 0.5 et 2.5 m³/s (1539 valeurs soit 46.9% appartiennent à cet intervalle).

b. Le Doubs à Pontarlier (fig. 8)

La courbe évolue entre 0.2 m³/s (le 1.7.76) et 69.5 m³/s (le 25.11.72) avec une moyenne de 7.8 m³/s. Les distributions annuelles extrêmes sont celles du cycle 1971-1972 (moyenne de 4.7 m³/s) et de celui de 1977-1978 (moyenne de 10.2 m³/s).

Les débits moyens journaliers sont pour

75%	supérieurs à 2 m ³ /s en 1971-72, à 2.5 m ³ /s de 1971-80 et à 3 m ³ /s en 1977-78
50%	3.5 m ³ /s 4.5 m ³ /s 6 m ³ /s
25%	6 m ³ /s 9 m ³ /s 13 m ³ /s
10%	9 m ³ /s 19.5 m ³ /s 25 m ³ /s

La fréquence maximale oscille entre 0.5 et 3.5 m³/s (1269 valeurs, soit 38.6%) et 30% des valeurs sont supérieurs à la moyenne.

c. Le Drugeon à Vuillecin (fig. 9)

Les débits sont classés de 0.1 m³/s (le 8.8.76) à 68.5 m³/s (le 5.2.80) et leur moyenne est de 3.3 m³/s. Les cycles annuels extrêmes sont 1971-72 (moyenne de 1.9 m³/s) et 1976-77 (moyenne de 5 m³/s).

Les valeurs observées sont pour

75%	supérieures à 0.2 m ³ /s en 1971-72, à 0.5 m ³ /s de 1971-80 et à 1 m ³ /s en 1976-77
50%	1 m ³ /s 1.5 m ³ /s 3 m ³ /s
25%	2.5 m ³ /s 3.5 m ³ /s 5 m ³ /s
10%	4 m ³ /s 6.8 m ³ /s 10 m ³ /s

Le mode des fréquences se situe entre 0.5 et 1 m³/s (731 valeurs, soit 22.2% des observations) et 30% des débits sont supérieurs à la moyenne.

d. La Loue à sa source (fig. 10)

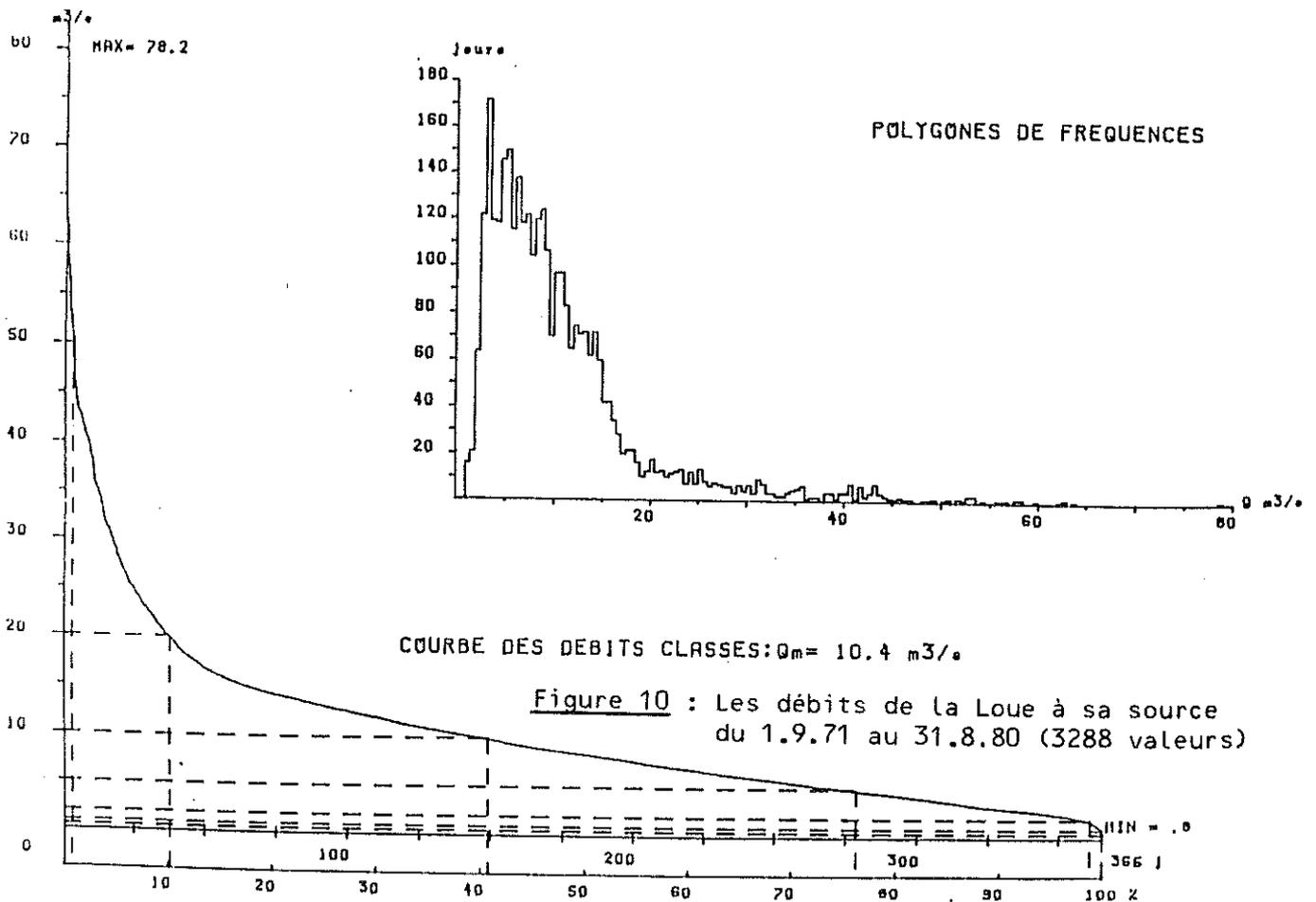
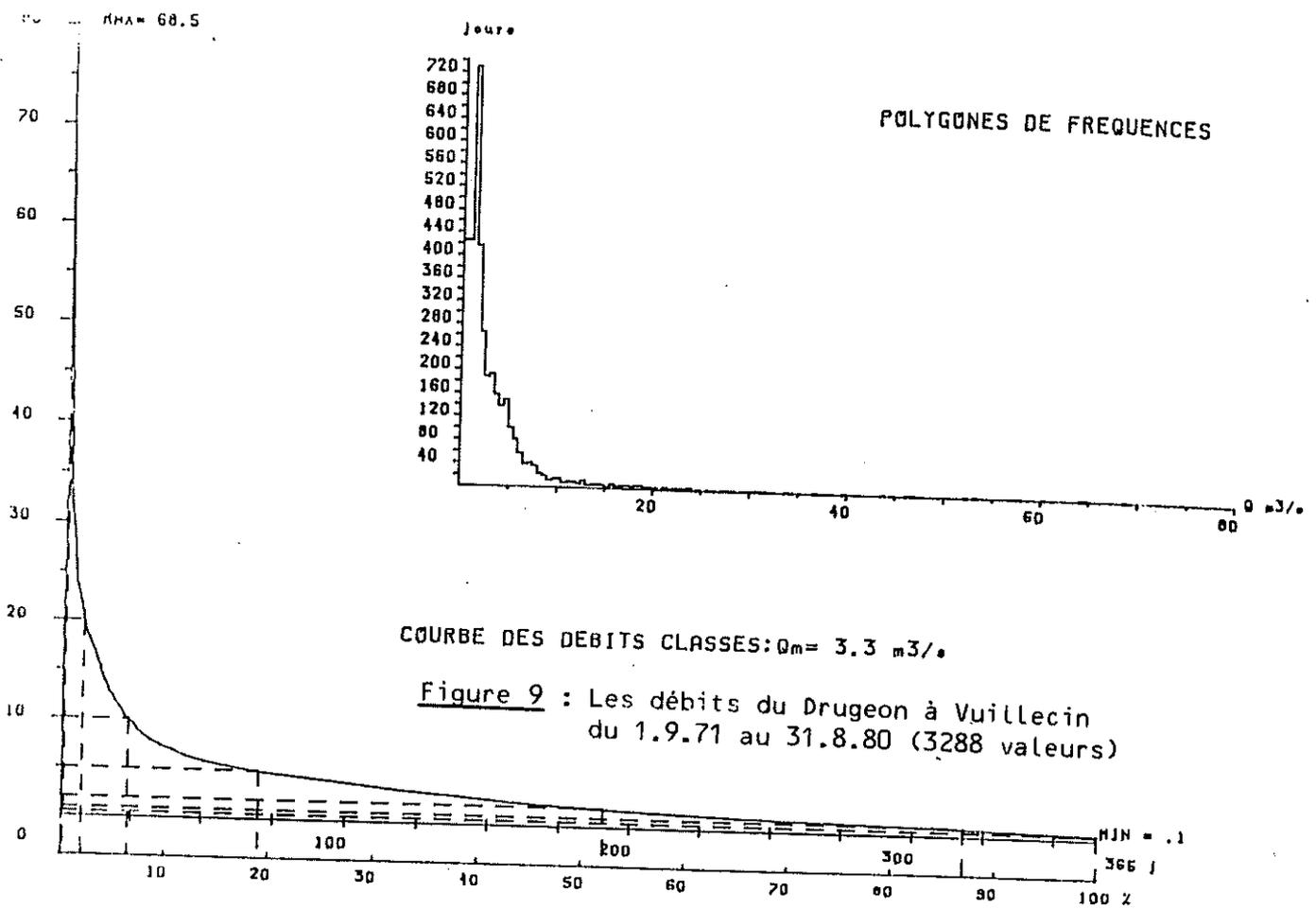
La moyenne interannuelle est de 10.4 m³/s avec un module annuel minimum des 6 m³/s durant le cycle 1971-72 et un maximum de 14 m³/s durant le cycle 1976-77.

Le minimum journalier est de 0.8 m³/s (du 19 au 21.11.72) et le maximum de 78.2 m³/s (le 21.3.78).

Entre la distribution interannuelle (1971 à 1980) et celles des cycles extrêmes les débits moyens journaliers sont pour

75%	supérieurs à 2.5m ³ /s en 1971-72, à 4.5m ³ /s de 1971-80 et à 8m ³ /s en 1976-77
50%	4.5m ³ /s 8 m ³ /s 11m ³ /s
25%	7.5m ³ /s 12.5m ³ /s 14.5m ³ /s
10%	12.5m ³ /s 19.5m ³ /s 24.5m ³ /s

La distribution montre un pôle principal des fréquences entre 2.5 et 3 m³/s (172 valeurs soit 5.2%) et trois pôles secondaires sur les intervalles 4 à 5 m³/s (296 valeurs soit 9%), 7.5 et 8.5 m³/s (244 valeurs soit 7.4%) et 9.5 à 11 m³/s (277 valeurs soit 8.5%). Les débits sont dans 35% des cas (1149 jours) supérieurs à la moyenne.



2. RESULTATS

Le régime des sources de la Loue est le plus important (Tableau XXI) avec en moyenne 99% des observations (361 j/an) $> 1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ et 97% (354 j/an) $> 2 \text{ m}^3/\text{s}$ alors que les écoulements du Doubs à Pontarlier et du Drugeon à Vuillecin sont supérieurs à $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ dans respectivement 98% et à 87% (317 j/an). (Les débits du Doubs à Labergement sont pour 94% (343 j/an) supérieurs à cette valeur).

$\% >$ m^3/s	Lab	Pon	Dru	Loue
5	93.7	98.1	87	100
1	79.5	93.2	64.8	99.5
1.5	66	84.6	52.2	98.9
2	55.4	77.5	44.1	96.9
3	40.3	64.8	32.6	88
5	25.6	45.8	16.1	71.8
10	10.3	23.3	6	37.9
15	5.5	14.6	3.6	16.6
20	3.1	9.5	1.9	9.8
30	.9	4	.7	4.4
50		.4	.2	.8
Min m^3/s	.06	.2	.1	.8
Max m^3/s	52.5	69.5	68.5	78.2
Moy m^3/s	4.4	7.8	3.3	10.4
N Valeurs	3284	3257	3288	3288

Tableau XXI :

Distribution des débits observés entre le 1.9.71 et le 31.8.80 (3288 jours).

Toutefois (Tableau XXII) en se référant aux pourcentages exprimés plus haut, c'est à la station de Mouthier que les intervalles de variation sont les plus importants (sauf pour l'intervalle de variation de 10% qui est plus étendu à Pontarlier).

Δ $\%$	Lab	Pon	Dru	Loue
75	1	1	0.8	5.5
50	2	2.5	2	6.5
25	5	8	2.5	7
10	8	14	6	12

Tableau XXII :

Intervalles de variation définis pour les débits caractéristiques

Les polygones de fréquence montrent un seul mode pour le Doubs et le Drugeon alors que ceux de la Loue permettent d'en distinguer au moins trois.

Les écarts relevés (fig. 11) entre la distribution moyenne des débits à chacune des stations indiquent que :

- les distributions du Doubs à Pontarlier et de la Loue diffèrent essentiellement sur l'intervalle des débits compris entre 1.5 et $10 \text{ m}^3/\text{s}$ (notamment entre 2 et $5 \text{ m}^3/\text{s}$)

- le régime d'écoulement entre

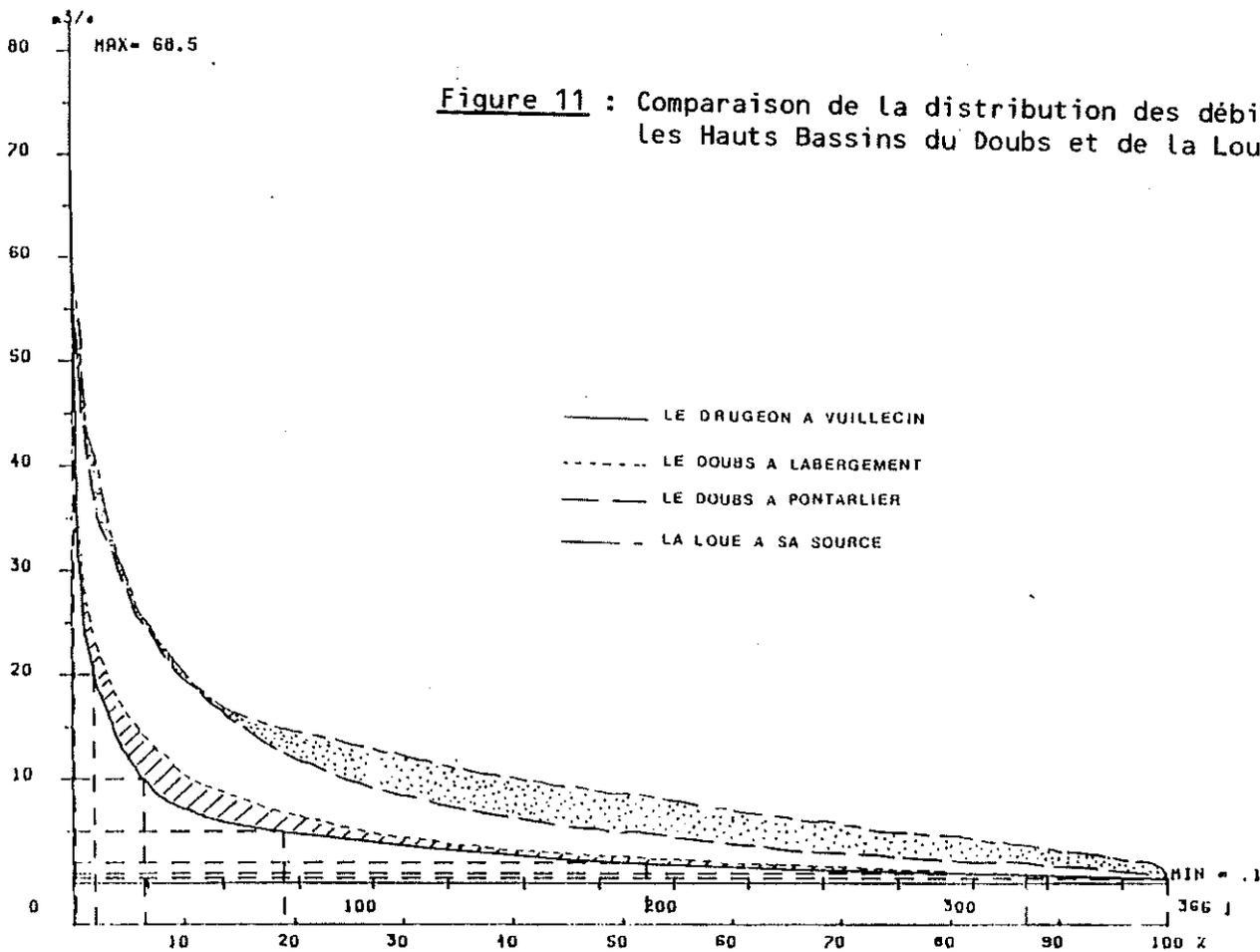
- . le Drugeon et la Loue

- . le Drugeon et le Doubs

- . le Doubs à Labergement et à Pontarlier

montre un accroissement des distributions à chacun des seconds points.

Figure 11 : Comparaison de la distribution des débits sur les Hauts Bassins du Doubs et de la Loue



La comparaison des moyennes révèle que la moyenne du

. Drugeon ($3.3 \text{ m}^3/\text{s}$) représente 75% de celle de Labergement ($4.4 \text{ m}^3/\text{s}$), 42.3% de celle de Pontarlier ($7.8 \text{ m}^3/\text{s}$) et 31.7% de celle de la Loue ($0.4 \text{ m}^3/\text{s}$).

. Doubs à Labergement correspond à 56.4% de celle du Doubs à Pontarlier et à 42.3% de celle de la Loue.

. Doubs à Pontarlier est égale à 75% de celle de la Loue.

Les surfaces équivalentes ($SE = Qm^3/s/Pm$) des bassins d'alimentation fermés à ces quatre stations devraient correspondre, pour une même pluviosité, aux mêmes proportions que celles énoncées pour les débits (pour une pluie P uniformément répartie on aurait par exemple $SE \text{ Drugeon} = 0.75 SE \text{ Labergement}$).

3 - CONCLUSIONS

La distribution globale des écoulements aux stations de Labergement, Pontarlier, Vuillecin et de Mouthier indique la particularité hydrologique de chacun des bassins correspondant.

■ Le Drugeon à Vuillecin montre un régime d'écoulement faible ($Q_m = 3.3 \text{ m}^3/\text{s}$) avec 50% des débits $< 1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ (dont 25% $< 0.5 \text{ m}^3/\text{s}$) et 75% $< 3.5 \text{ m}^3/\text{s}$. Son bassin d'alimentation se révèle petit avec peu de possibilités de mise en réserve (donc marqué par un passage rapide d'un état de tarissement à stade de sursaturation).

■ Le Doubs à Labergement possède comme le Drugeon un bassin d'alimentation restreint ($Q_m = 4.4 \text{ m}^3/\text{s}$) avec 50% des écoulements $< 2 \text{ m}^3/\text{s}$ (dont 25% $< 1 \text{ m}^3/\text{s}$) et 75% $< 5 \text{ m}^3/\text{s}$. La distribution des débits se distingue de la précédente par, d'une part des débits moyens et faibles un peu plus importants ($0.5 \text{ m}^3/\text{s}$), et d'autre part par (fig. 4) une atténuation de la courbe au passage des forts débits. Cette dernière remarque traduit une tendance à la mise en réserve.

■ Le Doubs à Pontarlier bénéficie des apports d'un bassin relativement vaste (équivalent à environ 2.5 fois celui du Drugeon et 2 fois celui de Labergement). Son régime d'écoulement se caractérise par une moyenne de $7.8 \text{ m}^3/\text{s}$ avec 50% des observations $< 4.5 \text{ m}^3/\text{s}$ (dont 25% $< 2.5 \text{ m}^3/\text{s}$) et 75% $< 9 \text{ m}^3/\text{s}$. Le passage des faibles aux forts débits s'effectue graduellement avec une proportion de crues plus importantes qu'à Labergement.

■ La Loue à Mouthier montre une distribution qui enveloppe les précédentes (fig. 11) avec une superposition de son tracé à la courbe de distribution des débits du Doubs à Pontarlier au-delà de $20 \text{ m}^3/\text{s}$ (10% des observations sont supérieurs à $19.5 \text{ m}^3/\text{s}$ dans les deux cas). Il existe donc une équivalence entre les deux bassins perturbée pour des débits faibles et moyens. Le réservoir drainé par les sources de la Loue possède des capacités d'emménagement importantes (qui sont confirmées par la distribution des faibles débits (3% des débits sont $< 2 \text{ m}^3/\text{s}$)).

B. L'AJUSTEMENT DES DEBITS

L'ajustement des données à une loi probabiliste intéresse par définition des variables aléatoires (liées au temps et indépendantes les unes des autres), donc, en matière de débits, des valeurs moyennes sur des périodes assez longues. Par extension la période en-deçà de laquelle l'ajustement n'est plus satisfaisante, suggère une liaison de dépendance entre les valeurs successives.

Le but de cette étude est de rechercher le meilleur ajustement des débits à divers pas de temps pour apprécier la période limite de validité de la loi reconnue, puis de définir les écoulements sur les Hauts Bassins du Doubs et de la Loue en référence à ces critères.

1 - RAPPELS

Les caractéristiques empiriques de l'échantillon telles que la moyenne ($Q_m = \sum Q_i/N$) et la variance ($S^2 = (\sum Q_i^2 - (N \times Q_m)^2)/(N-1)$) ne sont qu'une approximation des vraies valeurs de la population infinie (par exemple le débit moyen du Doubs à Pontarlier est de $7.2 \text{ m}^3/\text{s}$ durant le cycle 1971-72 et elle est de $7.8 \text{ m}^3/\text{s}$ pour les 3288 débits journaliers traités).

La prise en compte des intervalles de confiance permet de situer dans quelles limites se situe la caractéristique théorique de tous les débits qui correspond à la caractéristique empirique déduite de la chronique considérée.

L'amplitude de ces intervalles de confiance est d'autant plus grande que :

- le degré de confiance désiré (pourcentage de chance de trouver la vraie valeur dans l'intervalle calculé) est grand
- le nombre d'échantillons (N) est réduit.

2 - DEFINITION DE LA LOI D'AJUSTEMENT

Le choix d'une loi d'ajustement est effectué en considérant les débits moyens mensuels. (L'importance et la variabilité de la pluviosité régionale conduisent à penser que l'on a peu de chance d'observer un tarissement sur deux mois consécutifs. Aussi peut-on considérer comme aléatoire, à l'échelle des sous-bassins, les modules hydrométriques mensuels).

Un essai d'adaptation de la loi retenue est tenté sur des modules décennaux pour déterminer si à ce niveau la variabilité conserve son caractère aléatoire.

a. Type de loi

Les modules mensuels du Doubs à Labergement sont reportés dans un repère à probabilité normale en abscisse (fig. 12). Les points ne s'alignent pas selon la droite de Henri (d'équation $Q_i = Q_m - S_u$, qui représente la courbe de Gauss) (voir DUBREUIL : Initiation à l'analyse en hydrologie, 1974). La tendance générale montre une concavité positive (vers le haut) qui subsiste dans un repère équivalent mais à échelle d'ordonnée logarithmique (fig. 13). Il convient d'envisager une loi dissymétrique hypergaussienne (la loi de Galton ou la loi de Pearson III).

La loi de Galton (ou log-normale ou encore gausso-logarithmique) est proche de la loi normale (à une anamorphose près, de type logarithmique, sur la variable). En plus des paramètres empiriques, elle utilise un paramètre de position "Qo" qui est la borne inférieure de la variable d'origine.

La valeur de "Qo" est estimée par résolution de l'estimation S^2/μ^3 (carré de la variance S^2 sur le moment centré de 3ème ordre μ^3).

L'ajustement obtenu par cette loi (fig. 14) est très satisfaisant puisque presque toutes les valeurs sont comprises dans l'intervalle de confiance à 50% (et la totalité appartient à l'intervalle à 90% de confiance).

• Remarque : Sur les planches correspondantes (fig. 12 à 18) on a :

Max = Maximum	Min = Minimum	Moy = Moyenne
VAR = Variance	ET = Ecart-type	IC = Intervalle de Confiance
	R = Récurrence.	

b. Ajustement des débits décennaux

La représentation des modules décennaux (fig. 15, exemple des débits du Doubs à Pontarlier) par une loi de Galton déborde l'intervalle de confiance à 90 % (notamment pour les valeurs extrêmes).

c. Conclusion

Les modules hydrométriques s'ajustent de façon satisfaisante à une loi de Galton. Mais le débit moyen d'une décennie n'est pas indépendant de celui de la décennie précédente. De même le module hydrométrique décennal détermine pour une part la valeur des écoulements pour les dix jours à venir. Aussi l'ajustement des débits à une loi probabiliste est possible pour des modules supérieurs à la décennie.

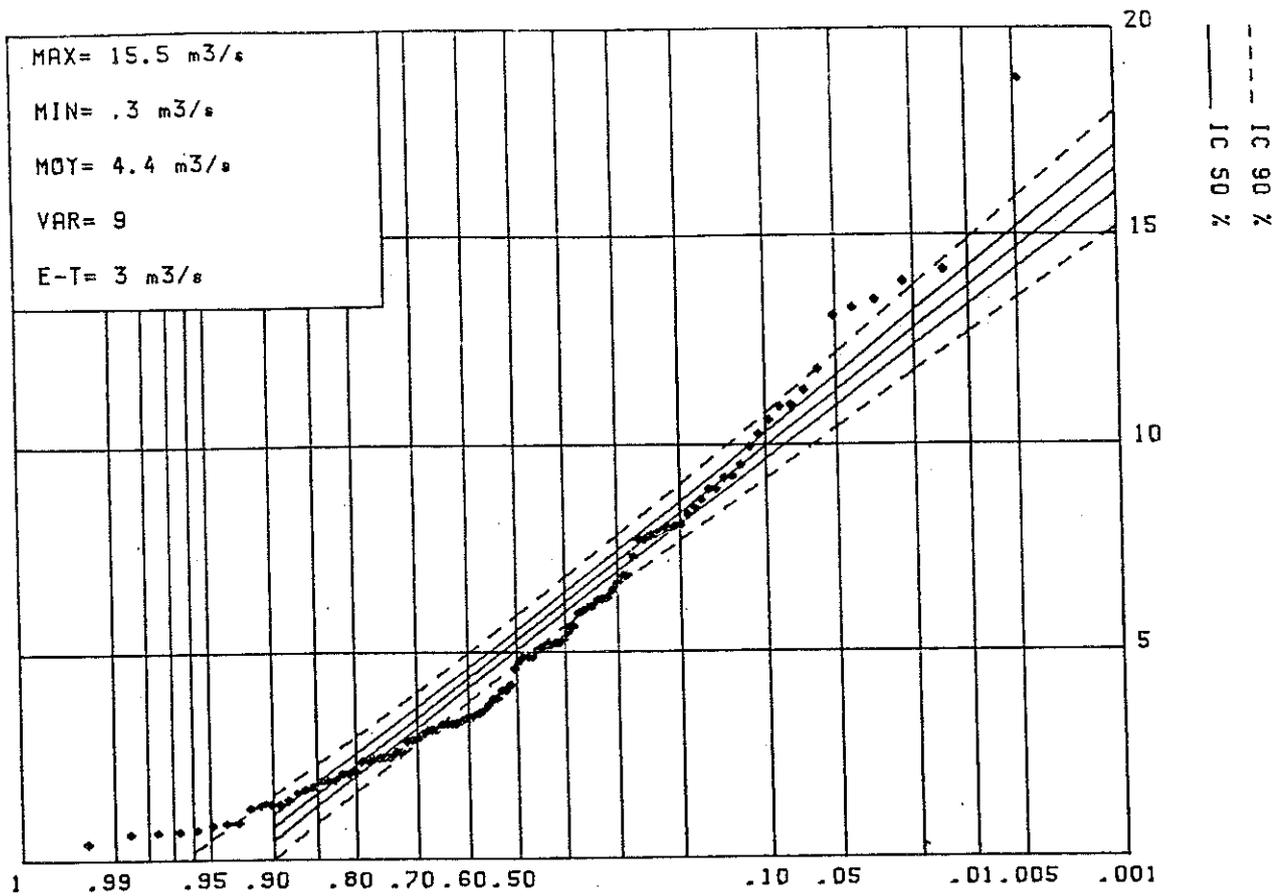


Figure 12 : Ajustement des modules mensuels du Doubs à Labergement à une loi de Gauss

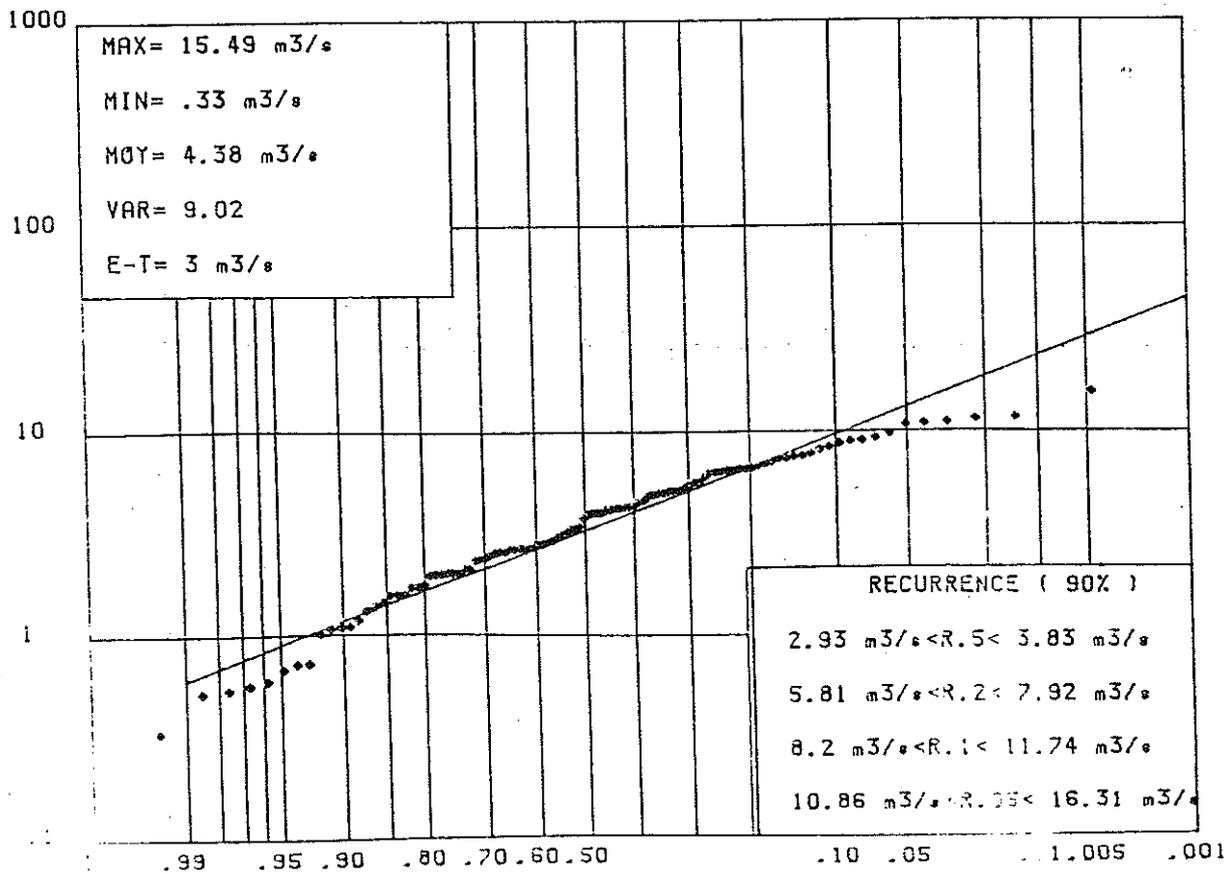


Figure 13 : Ajustement des modules mensuels du Doubs à Labergement à une loi de Gauss (repère à ordonnées logarithmiques)

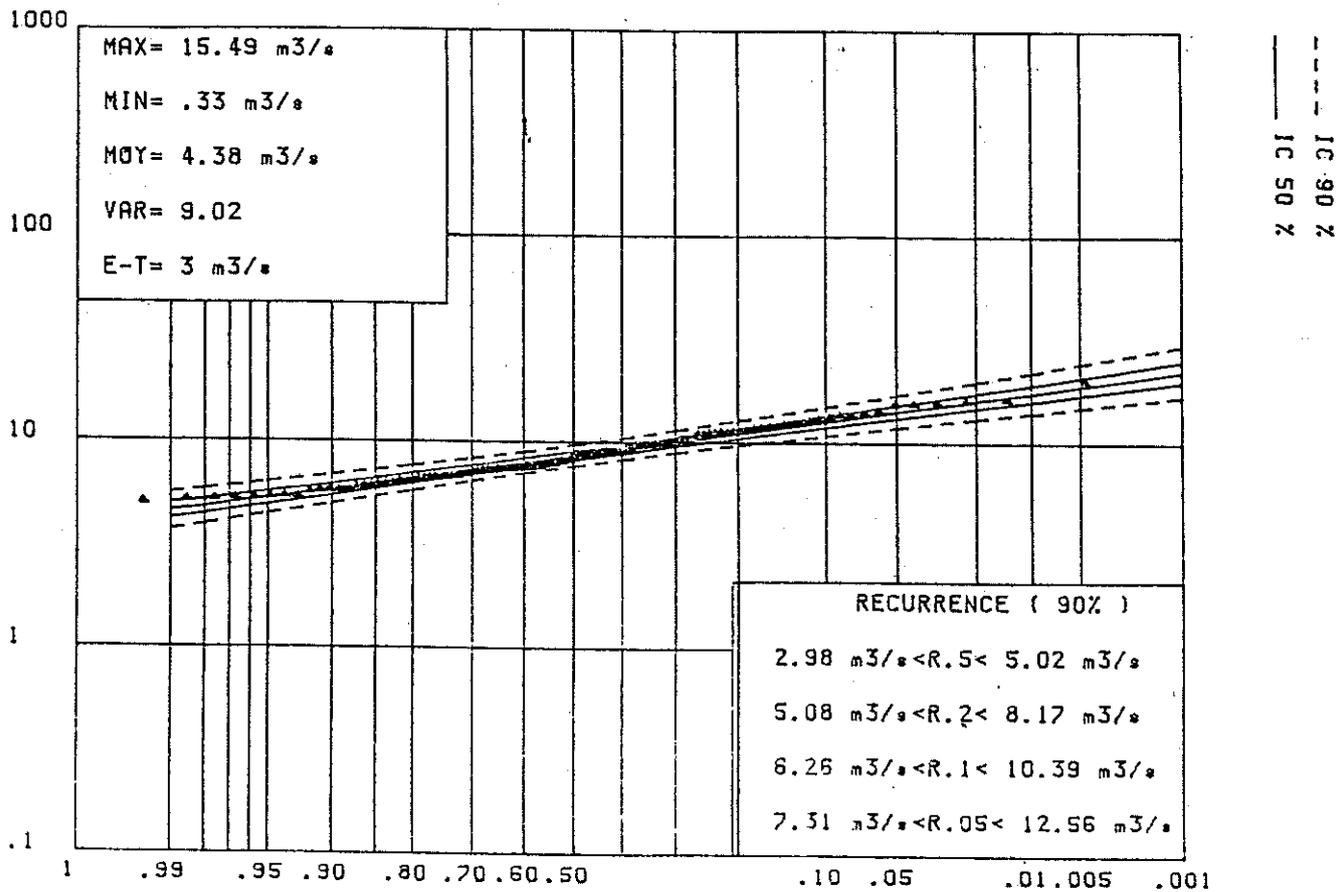


Figure 14 : Ajustement des modules mensuels du Doubs à Labergement à une loi de Galton
 $(Y = 7.42 \text{ Log } (X + 4.7) - 6.95)$

3 - AJUSTEMENT A UNE LOI DE GALTON DES DEBITS MOYENS MENSUELS

Les 108 modules mensuels calculés aux stations de Labergement, Pontarlier, Vuillecin et Mouthier sont reportés dans des diagrammes à échelle gaussienne en abscisse et logarithmique en ordonnée puis ajustés à une loi de Galton (fig. 14, 16, 17 et 18).

Chacune des figures renseigne sur la qualité des ajustements et contient la valeur des paramètres de dispersion et de fréquence.

a. Les ajustements

Les modules mensuels des quatre stations s'ajustent de façon satisfaisante avec la loi de Galton puisque l'ensemble des points appartient à l'intervalle de confiance à 90%. (Les modules mensuels de la Loue sont déjà tous rassemblés dans l'intervalle de confiance à 50%).

La valeur du paramètre "Qo" s'apparente avec l'importance des écoulements. Ainsi sa valeur la plus faible (1.9 m³/s) est estimée pour les débits du Drugeon à Vuillecin où la moyenne des écoulements est minimale (3.3 m³/s). (La remarque est aussi valable pour les coefficients a et b qui apparaissent dans l'équation de la droite).

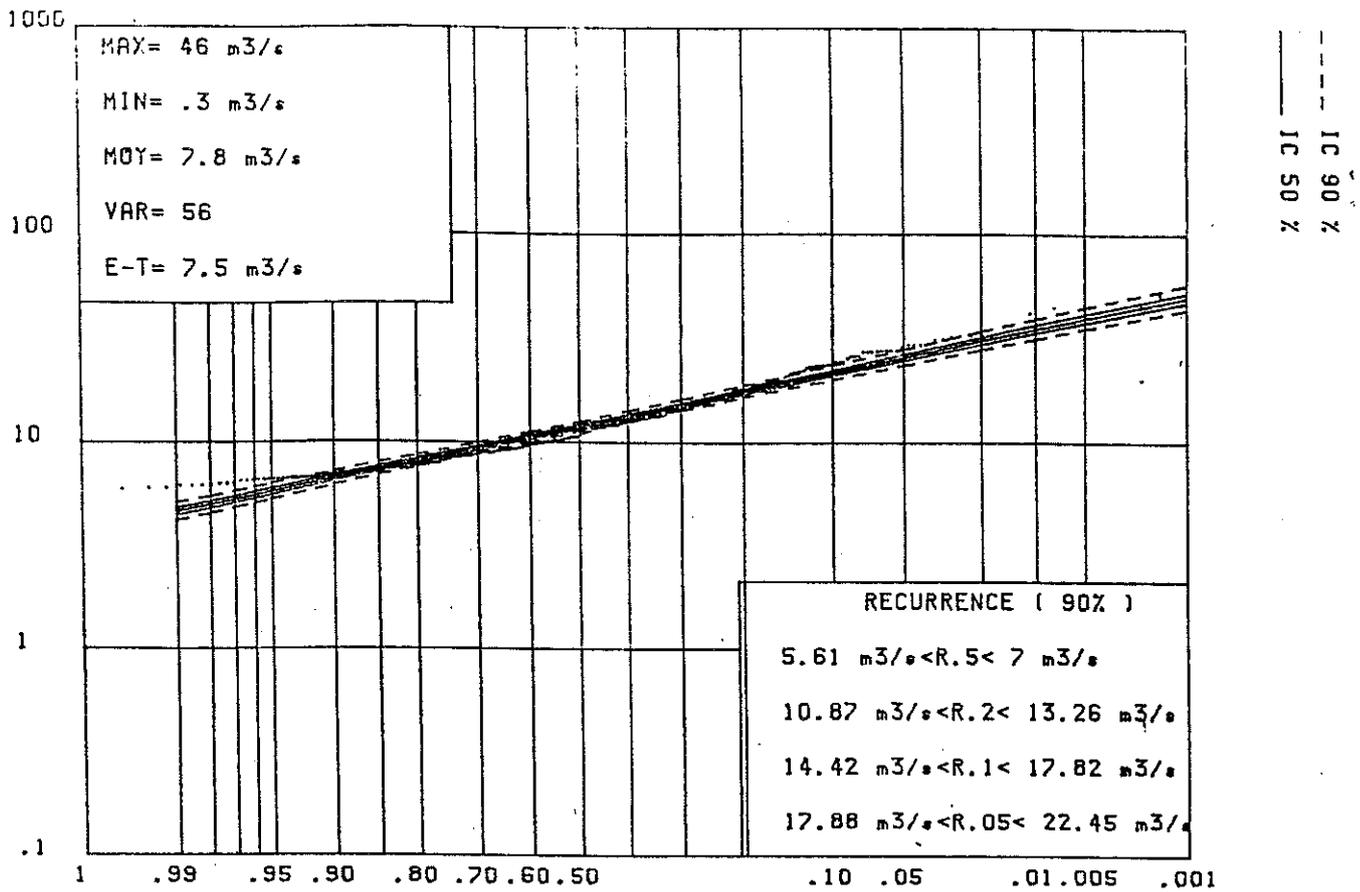


Figure 15 : Ajustement des modules décadaires du Doubs à Pontarlier à la loi de Galton ($Y=4.95 \text{ Log } (X + 5.7) -5.34$)

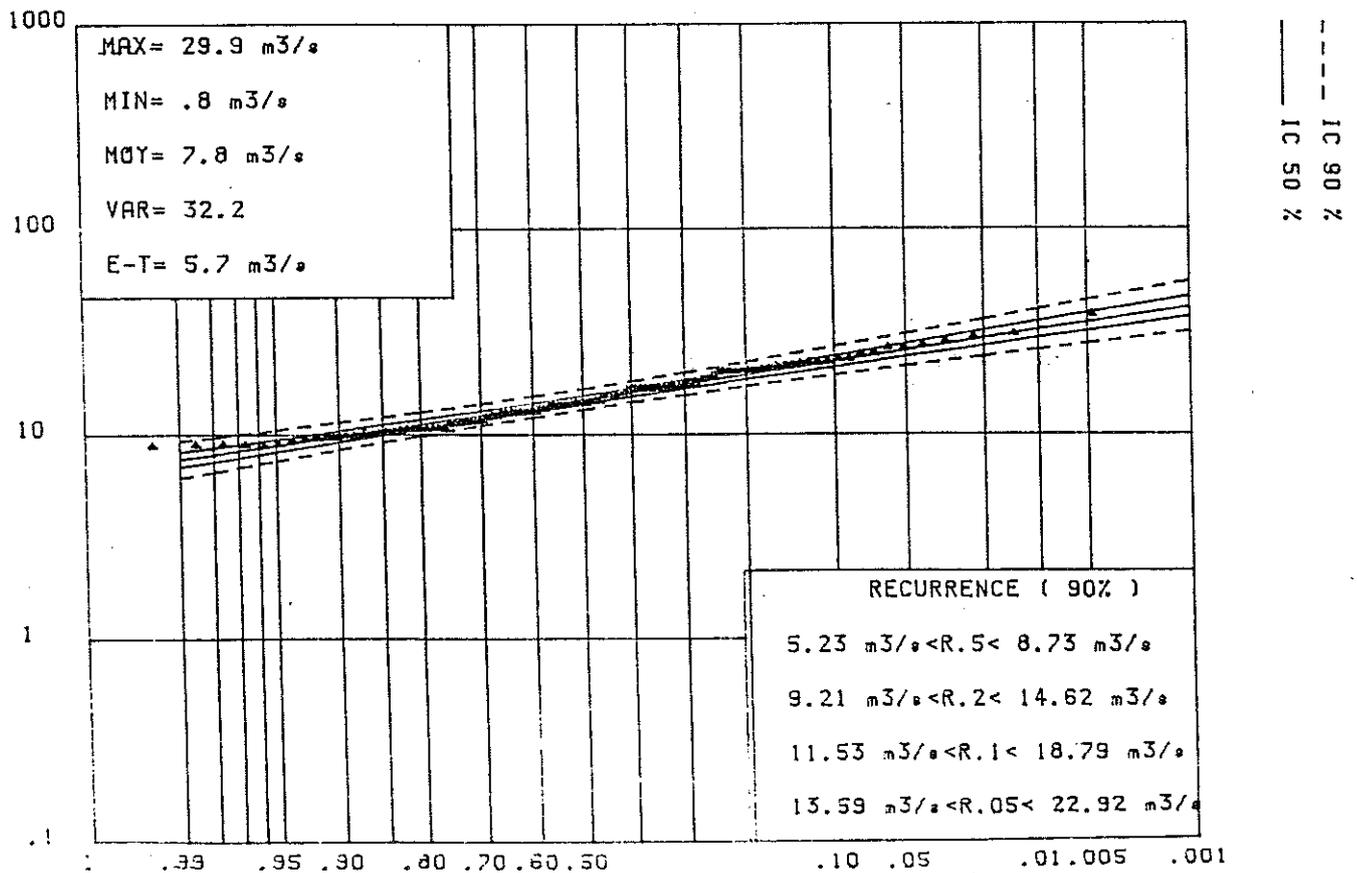


Figure 16 : Ajustement des modules mensuels du Doubs à Pontarlier à la loi de Galton ($Y=6.9 \text{ Log } (X+8.1) -8.11$)

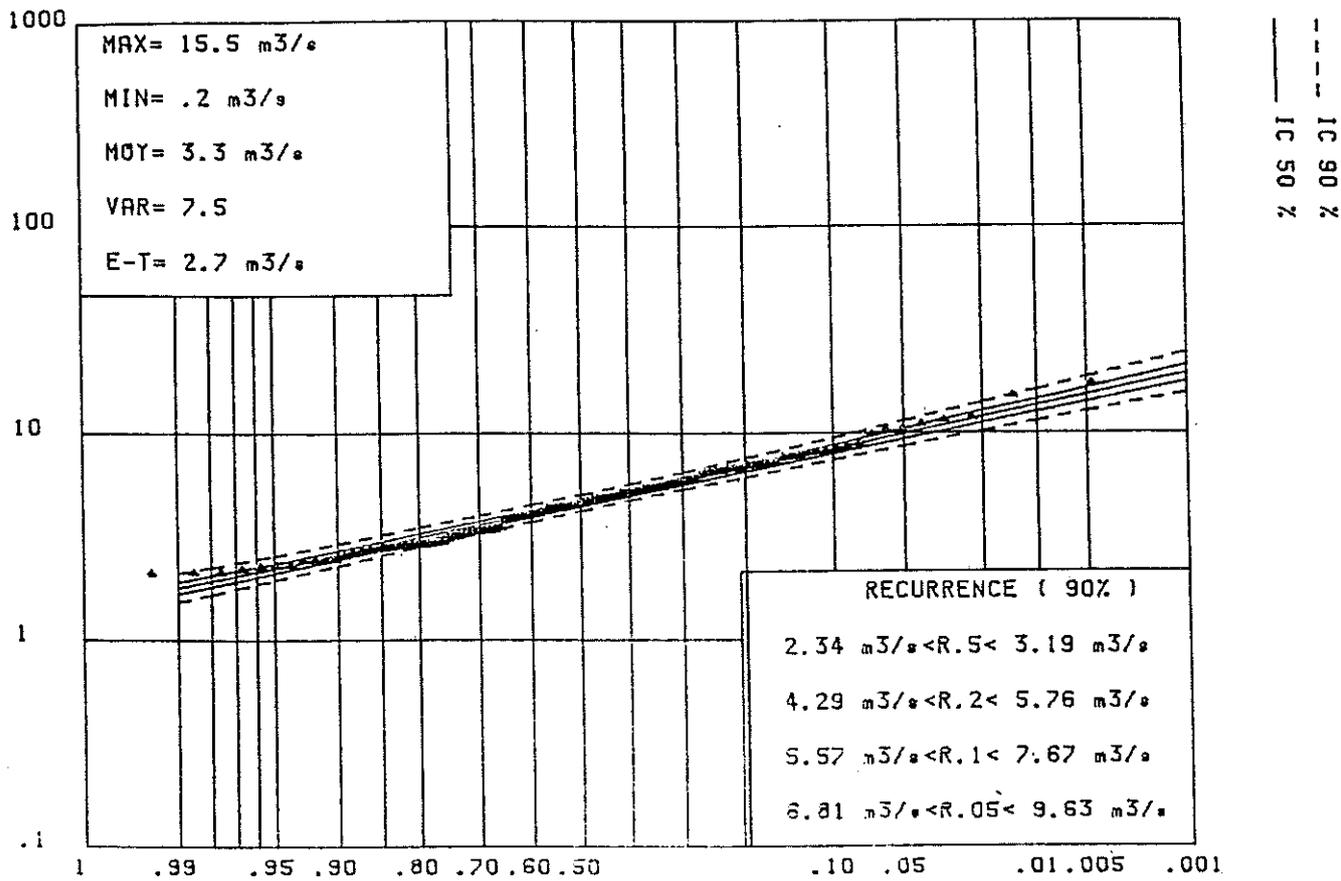


Figure 17 : Ajustement des modules mensuels du Drugeon à Vuillecin à la loi de Galton ($Y=4.93 \text{ Log } (X + 1.9) - 3.29$)

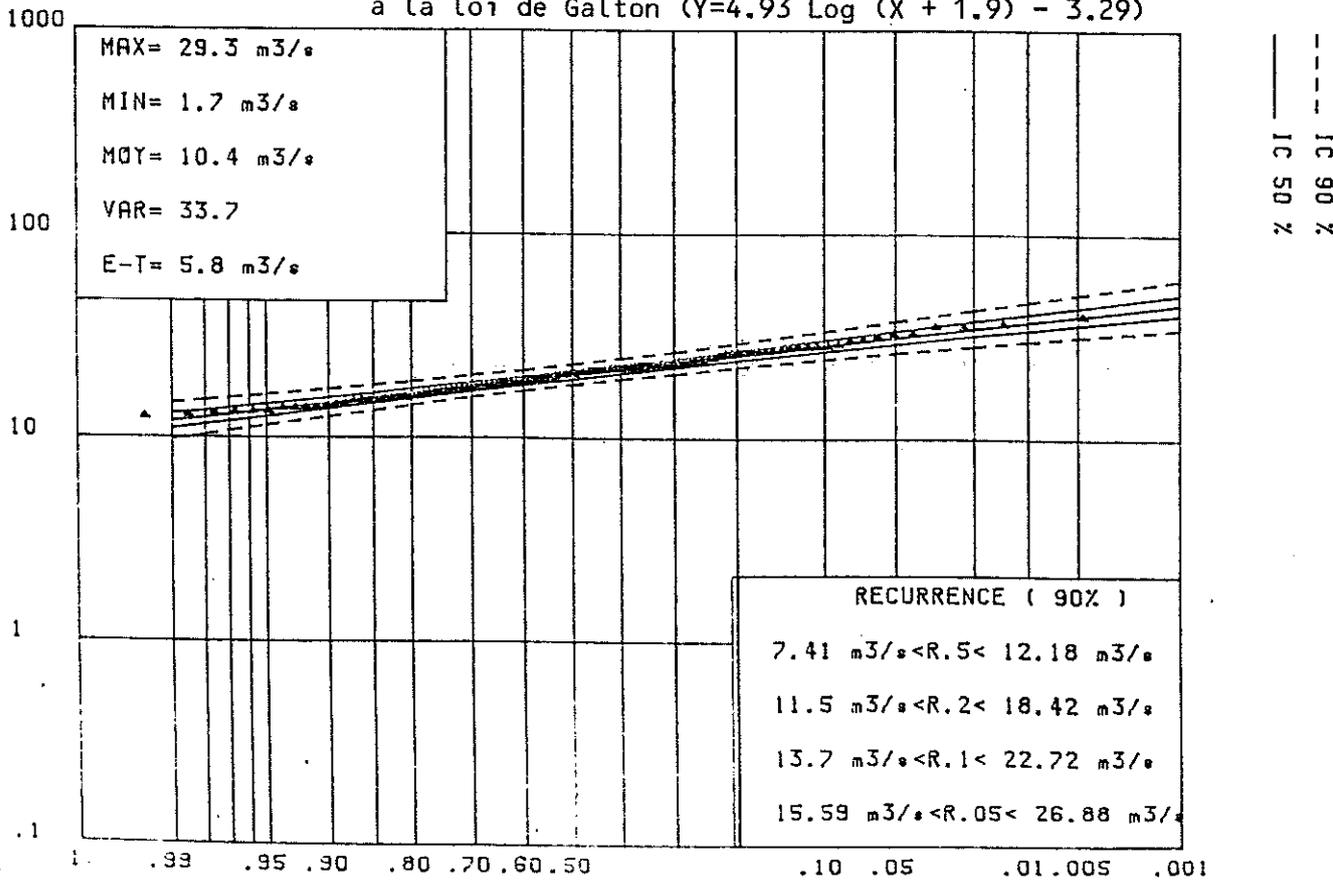


Figure 18 : Ajustement des modules mensuels de la Loue à sa source à une loi de Galton ($Y = 8.79 \text{ Log } (X + 10.9) - 11.55$)

b. La dispersion

La valeur de la variance ($\text{var}(S^2) = \text{Somme des écarts à la moyenne au carré}$) indique la dispersion des modules mensuels par rapport à leur moyenne. Il est cependant plus aisé de se référer pour l'analyse à la valeur de l'écart-type ($E-T=(\sigma)$) qui est exprimée dans la même unité que les données représentées.

La grandeur de ce paramètre indique où se situe la majorité des points par rapport à leur moyenne. On sait que 68.3% de la population étudiée se place entre la valeur de la moyenne diminuée de l'écart-type et celle de la moyenne augmentée par lui. (Par exemple, la valeur de 5.7 m³/s calculée à Pontarlier pour σ montre que 68.3% des modules mensuels du Doubs à cette station sont compris entre 2.1 m³/s ($\bar{Q} - \sigma$) et 13.5 m³/s ($\bar{Q} + \sigma$). En terme de probabilité 95% des observations se distribuent sur l'intervalle $\bar{Q} \pm 1.96 \sigma$ et 99% sur celui de $\bar{Q} \pm 2.6 \sigma$.

La dispersion la plus faible concerne les écoulements du Drugeon à Vuillecin ($\sigma = 2.7 \text{ m}^3/\text{s}$) mais elle est équivalente à celle des débits du Doubs à Labergement ($\sigma = 3 \text{ m}^3/\text{s}$). De la même façon on remarque que la dispersion des modules mensuels du Doubs à Pontarlier ($\sigma = 5.7 \text{ m}^3/\text{s}$) est semblable à celle des écoulements de la Loue à Mouthier ($\sigma = 5.8 \text{ m}^3/\text{s}$).

En référence à ce paramètre on calcule que les débits moyens mensuels sont :

- pour 68.3% compris entre :
 - . 1.4 et 7.3 m³/s à Labergement
 - . 2.1 et 13.5 m³/s à Pontarlier
 - . 0.6 et 6 m³/s à Vuillecin
 - . 5.6 et 16.2 m³/s à Mouthier
- pour 95% sont inférieurs à :
 - . 10.3 m³/s à Labergement
 - . 19 m³/s à Pontarlier
 - . 8.6 m³/s à Vuillecin
 - . 21.8 m³/s à Mouthier
- et pour 99% sont inférieurs à :
 - . 12.1 m³/s à Labergement
 - . 22.5 m³/s à Pontarlier
 - . 10.2 m³/s à Vuillecin
 - . 25.3 m³/s à Mouthier

Ces résultats confirment l'importance équivalente des bassins du Doubs à Labergement et du Drugeon à Vuillecin d'une part et de ceux du Doubs à Pontarlier et de la Loue à Mouthier d'autre part.

c. Les fréquences

La probabilité de réapparition d'un débit moyen mensuel fort (fréquence au dépassement) ou faible (fréquence au non dépassement) est calculée pour les récurrences 0.5, 0.2, 0.1 et 0.05 (ce qui signifie pour des événements (modules mensuels) qui ont respectivement 1 chance sur 2, 1 chance sur 5, 1 chance sur 10 et 1 chance sur 20, d'être observés lors du prochain mois).

L'estimation de ces valeurs est faite à partir de la droite moyenne ($y = a \log(Q+Q_0) - b$) dans un intervalle de confiance (quantile) à 90% (l'estimation peut être fautive dans 1 cas sur 10).

- . Remarque : Le choix d'un intervalle de confiance à 90% est largement suffisant pour caractériser les écoulements mais il serait trop optimisme dans l'éventualité d'une application pratique. (Par exemple le calcul d'un ouvrage d'art rend nécessaire, selon son importance, une connaissance des modules d'écoulements à 95%).

Le tableau XXIII montre la valeur des débits moyens mensuels susceptible d'être dépassée ou non aux quatre stations

Fréquences	LABERGEMENT			PONTARLIER			VUILLECIN			MOUTHIER		
	ND	D	m ³ /s	ND	D	m ³ /s	ND	D	m ³ /s	ND	D	m ³ /s
0.5		4	1		7	1.7		2.76	0.41		9.79	2.38
0.2	1.96	6.6	1.5	3.2	11.9	2.7	1.24	5	0.73	5.63	14.96	3.46
0.1	1.1	8.3	2	1.7	15.1	3.6	.66	6.6	1	3.83	18.21	4.51
0.05	.5	9.9	2.6	.6	18.2	4.6	.26	8.2	1.4	2.51	21.23	5.64

Tableau XXIII : Débits moyens mensuels de dépassement (D) et de non dépassement (ND) du Doubs, du Drugeon et des sources de la Loue (à 90%)

Les résultats obtenus montrent que les intervalles d'erreur qui accompagnent l'estimation sont d'autant plus étroits que la moyenne et l'écart-type sont faibles (Labergement et Vuillecin) et que la fréquence est forte.

- les différences sont très importantes entre les modules faibles (ND) et forts (D)
- les modules calculés pour la récurrence 0.5 sont voisins de la moyenne des débits.

Le calcul des fréquences correspondantes aux débits caractéristiques observés (Tableau XXIV) précise la valeur de ces paramètres.

Les débits moyens mensuels minimums sont de fréquence équivalente à Labergement (0.4 soit 1 chance sur 25) et à Vuillecin (0.44). Le minimum observé à Pontarlier a une période de retour plus faible (0.06 soit 1 chance sur 17). Au contraire le débit minimum enregistré à Mouthier est de fréquence 0.03 (soit 1 chance sur 33) ce qui confirme la faible probabilité d'observer un débit inférieur à 2 m³/s à cette station.

	LABERGEMENT		PONTARLIER		VUILLECIN		MOUTHIER	
	m ³ /s	fr						
MOY	4.38	.44	7.8	.43	3.3	.4	10.4	.45
MIN	.33	.04	.8	.06	.2	.044	1.7	.03
MAX	15.49	.0031	29.9	.0026	15.5	.0024	29.3	.0053

Tableau XXIV : Fréquences (fr) des débits caractéristiques sur les Hauts Bassins du Doubs et de la Loue

Les valeurs maximales observées correspondent à des fréquences ou de dépassement qui sont comprises entre 0.0024 et 0.031 sur le Haut Bassin du Doubs, (ce qui représente respectivement 1 chance sur 416 et 1 chance sur 322) et qui est de 0.0053 pour les sources de la Loue (soit 1 chance sur 188). On pourrait s'attendre (en fonction de la moyenne des écoulements) à des débits de crue à la Loue supérieurs à ceux enregistrés. (Par exemple en fonction de la moyenne de 10.4 m³/s une fréquence de 0.003 correspondrait à 31.34 m³/s).

4 - CONCLUSION

Sur les Hauts Bassins du Doubs et des débits est obtenu en considérant une giques sont indépendants au niveau mensue mais pas au niveau de la décade.

L'ajustement à cette loi des 108 mod stations (Labergement, Pontarlier, Vuillecin la moyenne des écoulements avec la borne in l'écart-type (σ).

L'étude des fréquences de réapparition le caractère exceptionnel des maximums enreg Le maximum observé aux sources de la Loue app

Les meilleurs modules hydro-
 (.870 < r < .992)

C. LES CORRELATIONS LINEAIRES

La matrice des corrélations croisées (Tableau XXV) indique la valeur du coefficient de corrélation (r) calculée entre la somme des débits annuels (9 cycles) mensuels (108 mois), décadaires (432 valeurs) et journaliers (3257 débits) enregistrés simultanément aux quatre stations hydrométriques.

Une station supplémentaire (Confluence) représente les débits théoriques du Doubs à sa confluence avec le Drugeon (Conf = Pon + Dvi).

- Remarque : La valeur du coefficient de corrélation test pour les 9 valeurs annuelles est de .898 avec un degré de certitude à 99%.

	LABERGEMENT (LAB)				PONTARLIER (PON)				VUILLECIN (DVI)				MOUTHIER (LOU)				CONFLUENCE (CONF)			
	Ann	Men	Dec	Jou	Ann	Men	Dec	Jou	Ann	Men	Dec	Jou	Ann	Men	Dec	Jou	Ann	Men	Dec	Jou
LAB	1	1	1	1	.984	.964	.956	.870	.902	.833	.830	.772	.977	.895	.877	.847	.974	.944	.943	.874
				PON	1	1	1	1	.924	.894	.864	.808	.987	.930	.910	.848	.992	.989	.985	.974
							DVI	1	1	1	1	.951	.912	.906	.832	.965	.950	.938	.921	
											LOU	1	1	1	1	.992	.947	.937	.883	
														CONF	1	1	1	1		

Tableau XXV : Matrices de corrélations croisées des écoulements

1 - ANALYSE

L'ensemble des coefficients est significatif avec des valeurs qui diminuent lorsque le nombre de valeurs augmente. Les valeurs de r sont comprises entre :

- . 902 et 992 au niveau annuel
- . 833 et 989 au niveau mensuel
- . 830 et 985 au niveau décadaire
- . 772 et 974 au niveau journalier

On note que les coefficients de corrélations décadaires ont une valeur proche de celle des coefficients mensuels.

Les coefficients minimaux s'observent tous entre les modules hydrologiques du Doubs à Labergement et du Drugeon à Vuillecin, les corrélations maximales sont calculées sur le Doubs entre Pontarlier et la confluence.

a. Le Doubs à Labergement

Les meilleurs coefficients sont normalement observés avec Pontarlier ($.870 < r < .984$) puis avec la confluence ($.874 < r < .974$).

Les liaisons calculées avec la Loue sont supérieures à celles qui concernent le Drugeon ($.772 < r < .902$).

b. Le Doubs à Pontarlier

Les valeurs obtenues avec la confluence sont toutes supérieures à 0.974. Les coefficients de corrélation avec la Loue ($.848 < r < .987$) et avec le Drugeon ($.808 < r < .924$) sont meilleurs que ceux calculés avec Labergement avec la même prépondérance de la liaison Doubs - Loue.

c. Le Drugeon à Vuillecin

Les corrélations sont bonnes avec la confluence théorique ($.921 < r < .965$) et celles obtenues avec la Loue ($.832 < r < .951$) sont les plus faibles.

d. Le Doubs à la Confluence

Les modules hydrologiques se corrént bien avec ceux enregistrés à Mouthier ($.883 < r < .992$).

2 - RESULTATS

L'ensemble des coefficients de corrélation linéaire calculés montre que :

- les débits du Doubs à Labergement se corrént bien avec ceux de l'aval,
- le régime du Drugeon est sensiblement différent de celui du Doubs,
- les débits de la Loue montrent des variations identiques à celles cumulées du Doubs et du Drugeon. La liaison avec Pontarlier est plus marquée que celle avec Vuillecin.

3 - CONCLUSION

Le système hydrologique des Hauts Bassins du Doubs et de la Loue se révèle un tout cohérent même si l'individualité de chaque bassin transparaît dans la qualité des liaisons. Les particularités météorologiques de chaque zone ne sont donc pas trop sensibles au niveau des écoulements.

Les très bonnes corrélations calculées entre la confluence théorique et Mouthier traduisent l'effet des pertes du Doubs au bénéfice des sources de la Loue.

II - DESCRIPTION DES ECOULEMENTS

La description du système d'écoulement est déduite au niveau régional de la résolution des bilans hydrologiques et au niveau du sous-bassin de la décomposition de l'hydrogramme de tarissement.

A. LE SYSTEME D'ECOULEMENT

L'étude des bilans hydrologiques et des relations entre les modules hydrologiques de chaque bassin souligne les éventuelles connexions hydrogéologiques et l'état d'équilibre du système d'écoulement.

1 - DESCRIPTION DES BASSINS HYDROLOGIQUES

a. Le bassin du Doubs à Labergement

Le Doubs émerge de l'anticlinal jurassique du Risoux - Mont d'Or (N60°) qu'il longe dans les formations crétacées du synclinal de Mouthe avant de rejoindre le synclinal de St Point par les gorges de Fourperet (N180°).

Il n'y a pas de pertes reconnues par traçage sur la région. Néanmoins, le percement du tunnel ferroviaire sous le Mt d'Or a entraîné le tarissement de sources voisines (sources du Bief Rouge) et d'autres situées dans d'autres synclinaux (sources de Fontaine Ronde et de Malbuisson). Le colmatage des fissures recoupées lors des travaux s'est traduit par une reprise générale des écoulements (E. FOURNIER, 1914-1919).

A. JEANBLANC et G. SCHNEIDER (1981) ont défini pour le Doubs à Labergement un impluvium de 143 km² (avec à l'affleurement 16.5 km² de Crétacé, 45 km² de formations glaciaires et 81.5 km² de Jurassique supérieur). Par ailleurs, ces auteurs estiment à 11% (0.5 m³/s) le déficit d'écoulement moyen du bassin qui s'opère au bénéfice du bassin de l'Orbe (0.15 m³/s drainé par le tunnel du Mt d'Or) et des sources de l'entaille du Mt d'Or (0.05 m³/s par l'accident de Pontarlier), de Fontaine Ronde et de Malbuisson (0.3 m³/s). En définitive, 60% du déficit d'écoulement rejoignent le sous-bassin du Doubs à Pontarlier.

b. Le bassin du Doubs à Pontarlier

Le bassin précédemment décrit s'agrandit de l'impluvium du synclinal de St Point et de celui du synclinal des Verrières (drainé par la Morte) situé à l'Est de l'accident de Pontarlier. La source de Fontaine Ronde émerge sur ce sous-bassin à proximité du tracé de l'accident de Pontarlier.

La surface topographique du sous-bassin de Pontarlier est de 179 km² (dont 63 km² occupés par des formations crétacées et glaciaires). Le bassin du Doubs à Pontarlier représente donc une surface de 322 km² où les affleurements jurassiques calcaires représentent 197.5 km² (61.3%).

c. Le bassin du Drugeon à Vuillecin

Le Drugeon draine la tourbière de fond de synclinal de la région de Vaux et Chantegrue (865 m). Il traverse l'anticlinal du Laveron puis il s'écoule dans le synclinal de Frasne-Bonnevaux où il reçoit le Lotaud émissaire de l'Etang de Frasne.

La surface topographique de ce bassin fermé à Vuillecin est de 190 km² avec 124 km² d'affleurements crétacés et glaciaires. De nombreuses pertes ont été recensées dans les formations glaciaires et elles sont en liaison (M. DURRAFOURG, P. PALACIO, 1981) avec l'aquifère valanginien dont l'exutoire est la source de l'Ain (qui sort au sommet du Jurassique supérieur).⁽¹⁾

(1) et peut être la source de la Papeterie près de Champagnole qui n'a pas été surveillée.

La coloration du puits de Jardelle (situé à la limite du plateau de Levier) atteste une liaison de ce bassin avec les sources de la Loue.

d. Le bassin des sources de la Loue

La surface topographique de ce bassin est de 268 km² (estimation de l'Institut de Géographie de Besançon) étendu sur les formations de Jurassique moyen et supérieur du plateau de Levier. Une partie des écoulements du Doubs rejoint directement ou indirectement ses résurgences (qui sont au nombre de trois).

e. Conclusion

Les Hauts Bassins du Doubs et de la Loue constituent une même unité hydrologique où affleurent en majorité les calcaires du Jurassique supérieur. Les circulations karstiques sont donc nombreuses et complexes. Les émergences de ces bassins sont :

- le Doubs en aval de Pontarlier
- les sources de la Loue à Mouthier
- les sources de l'Ain.

L'accident de Pontarlier joue un rôle important dans la circulation des écoulements puisque 40% (0.2 m³/s) du déficit d'écoulement du bassin du Doubs à Labergement rejoint l'Orbe (transit vers le Nord) alors que les 60% restant (0.3 m³/s) sont récupérés par le sous-bassin du Doubs à Pontarlier (transit vers le Sud).

2 - LES BILANS HYDROLOGIQUES

Le bilan hydrologique global nécessite la connaissance des débits du Doubs à Ville du Pont et à Pontarlier en même temps que ceux du Drugeon à Vuillecin et de la Loue et de l'Ain à leurs sources.

Le déficit d'écoulement du Doubs en aval de Pontarlier est examiné dans la seconde partie de ce travail et on se limitera à poser les bilans hydrologiques partiels aux stations de Labergement, Pontarlier, Vuillecin et Mouthier.

a. Remarques

La méthode des bilans hydrologiques compare les précipitations reçues par un bassin aux lames d'eau évacuées par la rivière drainante.

Logiquement les volumes écoulés (Q) rendent compte d'une hauteur de précipitations (P) interceptée par une surface donnée ($Q = S \times P$). La possibilité d'emménagement des diverses formations géologiques modifie cette conception en introduisant le terme ΔR (la variation des réserves) dans l'expression du bilan général. Ainsi :

$P - ETP = Q + \Delta R$ (avec le terme évapotranspiration (ETP) qui est calculée)

Les réserves sont difficiles à appréhender sur un bassin karstifié. De plus les stations météorologiques ont une représentativité régionale limitée alors que les stations limnimétriques enregistrent la totalité des écoulements du bassin même si les mesures du débit sont entachées d'une erreur plus grande que celles des paramètres météorologiques. Aussi les bilans hydrologiques posés ne donnent que des indications sur les éventuelles communications entre bassins.

Les stations retenues pour les calculs sont les suivantes :

Stations hydrologiques	Stations pluviométriques (correspondantes)	Stations thermométriques (utilisées pour le calcul de l'ETP)
Labergement Pontarlier Vuillecin Mouthier	Mouthe Labergement Pontarlier Ouhans	Mouthe Pontarlier Pontarlier Pontarlier

b. Analyse

Durant les 98 mois d'observation (du 1.9.71 au 31.8.80) il est tombé 14 450.21 mm à Mouthe, 12 838.83 mm à Labergement, 12 064.21 mm à Pontarlier et 13 109.29 mm à Ouhans. L'évapotranspiration potentielle calculée (selon Thornthwaite) pour la période est de 4 692.38 mm à Mouthe et de 5 031.28 à Pontarlier.

Le débit moyen interannuel du Doubs est de 4.35 m³/s à Labergement et de 8.05 m³/s à Pontarlier. Le régime moyen de la période 1971-1980 est de 3.3 m³/s pour le Drugeon à Vuillecin et de 10.35 m³/s pour la Loue à sa source.

Il y a donc un déficit d'écoulement pour les bassins du Doubs et du Drugeon dont la moyenne est de 2.08 m³/s à Pontarlier (dont 0.56 m³/s pour le bassin de Labergement) et de 1.68 m³/s à Vuillecin. Le bassin des sources de la Loue montre un excès d'écoulement moyen de 2.73 m³/s.

Reportés aux volumes écoulés à la station, ces débits moyens indiquent un déficit d'écoulement de 12.9% à Labergement, de 41.1% à Pontarlier et de 47.9% à Vuillecin. L'excès d'écoulement de la Loue représente 26.4% de la somme des débits.

Les bilans hydrologiques annuels (par cycle) montrent (Tableau XXVI) que le bassin du Doubs à Labergement (et dans une moindre mesure le sous-bassin de Pontarlier) possède des réserves importantes mises en évidence durant les cycles 1971-72 et 1972-73 (-10.01 et -11.02 × 10⁶ m³ représentent des débits supplémentaires annuels moyens respectifs qui sont de 0.32 et 0.35 m³/s, soit des réserves minimums de 11 × 10⁶ m³).

	Le DOUBS à LABERGEMENT (143km)				Le DOUBS à PONTARLIER (179km)				Le DRUGEON à VUILLECIN (190km)				La LOUE à MOUTHIER (268km)				BH Régional
	P	ETP	Q	BH	P	ETP	Q	BH	P	ETP	Q	BH	P	ETP	Q	BH	
	71-72	145.73	76.90	78.84	-10.01	164.86	100.60	69.38	-5.12	181.87	106.78	59.92	15.17	272.98	150.62	189.22	
72-73	187.26	75.29	122.99	-11.02	228.64	98.45	88.30	41.89	237.22	104.50	81.99	50.73	339.29	147.40	261.75	-69.86	11.74
73-74	214.23	79.09	110.38	24.76	230.55	102.98	85.15	42.42	211.36	109.31	78.84	23.21	326.58	154.18	252.29	-78.89	11.5
74-75	264.78	71.36	160.83	32.59	3000.04	98.16	145.07	56.81	301.49	104.20	116.68	80.61	459.57	146.97	394.20	-81.60	88.41
75-76	172.60	74.47	85.15	12.90	199.30	102.08	85.15	12.07	190.46	108.36	78.84	3.26	285.53	152.84	233.37	-100.68	-72.37
76-77	315.91	74.99	182.91	58.01	334.80	102.39	135.60	96.81	356.76	108.68	157.68	90.40	563.23	153.30	441.50	-31.57	213.65
77-78	275.79	72.96	192.37	10.46	299.00	98.50	129.30	71.20	307.78	104.56	122.99	80.23	436.52	147.48	419.43	-130.39	31.5
78-79	220.80	73.19	130.76	14.85	247.79	100.94	88.30	58.55	264.94	107.14	91.45	66.35	390.98	151.12	331.13	-91.27	48.48
79-80	263.28	72.76	163.99	26.53	293.17	96.50	138.76	57.91	286.35	102.43	145.07	38.85	438.61	144.48	416.27	-122.14	1.15
Totaux	2066.38	671.01	1236.22	159.15	2290.15	900.60	965.01	432.54	2338.22	955.95	933.46	448.81	3513.29	1348.39	2939.16	-174.26	266.24
Moyenne 106 m ³ /mm	229.60	74.56	137.36	17.68	255.34	100.06	107.22	48.06	259.81	106.21	104.07	49.53	390.37	149.81	327.97	-87.41	27.86
m ³ /s	1605.38	521.31			1426.54	559.03			1340.47	550.03			1456.59	559.03			
			4.35	56			3.7	1.52			3.3	1.58			10.35	2.73	88

Tableau XXVI : Bilans hydrologiques (BH) annuels des Hauts Bassins du Doubs et de la Loue (en 10⁶ m³).

Le déficit d'écoulement du Doubs varie entre $0.33 \text{ m}^3/\text{s}$ ($10.46 \times 10^6 \text{ m}^3$) en 1977-78 et $1.84 \text{ m}^3/\text{s}$ ($58.01 \times 10^6 \text{ m}^3$) en 1976-77 pour le bassin de Labergement et entre $0.38 \text{ m}^3/\text{s}$ ($12.07 \times 10^6 \text{ m}^3$) en 1975-76 et $3.07 \text{ m}^3/\text{s}$ ($96.81 \times 10^6 \text{ m}^3$) en 1976-77 pour le sous-bassin de Pontarlier (avec un excédent de $0.16 \text{ m}^3/\text{s}$ ($-5.12 \times 10^6 \text{ m}^3$) durant le cycle 1971-72).

Le bassin du Drugeon à Vuillecin présente un déficit d'écoulement qui est minimal en 1975-76 ($3.26 \times 10^6 \text{ m}^3$ ou $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$) et maximal en 1976-77 ($90.40 \times 10^6 \text{ m}^3$ ou $2.86 \text{ m}^3/\text{s}$).

Les bilans hydrologiques annuels des sources de la Loue sont tous excédentaires et le débit moyen annuel supplémentaire est compris entre $1 \text{ m}^3/\text{s}$ ($-31.57 \times 10^6 \text{ m}^3$) en 1976-77 et $4.1 \text{ m}^3/\text{s}$ ($-130.39 \times 10^6 \text{ m}^3$) en 1977-78.

Le déficit minimum calculé des Hauts Bassins du Doubs est celui du cycle 1975-76 (sauf pour le bassin de Labergement où le minimum correspond au cycle 1977-78 alors que le déficit de 1975-76 est de $0.41 \text{ m}^3/\text{s}$), alors que l'apport correspondant ($0.33 \text{ m}^3/\text{s}$) aux sources de la Loue est un des plus forts observé avec $-100.68 \times 10^6 \text{ m}^3$ ou $3.19 \text{ m}^3/\text{s}$ ($4.1 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1977-78 et $3.87 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1979-80).

Les résultats des bilans régionaux montrent un déficit d'écoulement global de $266.24 \times 10^6 \text{ m}^3$ (soit en moyenne $27.86 \times 10^6 \text{ m}^3$, ce qui correspond à $0.88 \text{ m}^3/\text{s}$). Au niveau annuel le bilan peut être excédentaire (en 1971-72 ($-66.8 \times 10^6 \text{ m}^3$) et en 1975-76 ($-72.37 \times 10^6 \text{ m}^3$) avec des débits apportés respectifs de $2.1 \text{ m}^3/\text{s}$ et de $2.29 \text{ m}^3/\text{s}$) ou déficitaire (dans des proportions qui varient entre $1.15 \times 10^6 \text{ m}^3$ ($0.04 \text{ m}^3/\text{s}$) en 1979-80 et $213.65 \times 10^6 \text{ m}^3$ ($6.77 \text{ m}^3/\text{s}$) en 1976-77).

Ces derniers résultats signifient à la fois que les Hauts Bassins du Doubs (à Labergement, Pontarlier et Vuillecin) ne sont pas les seuls susceptibles d'alimenter les sources de la Loue et que inversement d'autres bassins que celui de la Loue bénéficient d'apports en provenance de cette région.

Ainsi les bilans hydrologiques régionaux montrent un déficit global (du 1.9.71 au 31.8.80) de $266.24 \times 10^6 \text{ m}^3$ soit une moyenne annuelle de $27.86 \times 10^6 \text{ m}^3$ ($0.88 \text{ m}^3/\text{s}$). Comme précédemment les bilans annuels traduisent l'importance des réserves puisque le résultat est négatif en période sèche (il y a donc un déficit régional qui est de $2.1 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1971-72 et de $2.3 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1975-76) et il est positif en période pluvieuse (de $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1979-80 à $6.8 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1976-77).

Remarque : Une différence de surface de 10 km^2 représenterait, en considérant des termes moyens, des variations annuelles dans le calcul du bilan hydrologique qui seraient de

- $10.84 \times 10^6 \text{ m}^3$ à Labergement ($0.34 \text{ m}^3/\text{s}$)
- $8.67 \times 10^6 \text{ m}^3$ pour le sous-bassin de Pontarlier ($0.27 \text{ m}^3/\text{s}$)
- $8.08 \times 10^6 \text{ m}^3$ à Vuillecin ($0.25 \text{ m}^3/\text{s}$)
- $8.98 \times 10^6 \text{ m}^3$ aux sources de la Loue ($0.28 \text{ m}^3/\text{s}$)

c. Résultats

Le déficit d'écoulement moyen des bassins du Doubs et du Drugeon est :

- pour le Doubs de 12.9% à la station de Labergement ($159.15 \times 10^6 \text{ m}^3$ soit $0.56 \text{ m}^3/\text{s}$) et de 41.1% ($432.54 \times 10^6 \text{ m}^3$ ou $1.52 \text{ m}^3/\text{s}$) lorsque l'on considère uniquement le sous-bassin de Pontarlier
- pour le Drugeon de 47.9% ($448.81 \times 10^6 \text{ m}^3$ soit $1.58 \text{ m}^3/\text{s}$) à la station de Vuillecin.

Les sources de la Loue montrent un excès d'écoulement qui correspond à 26.4% de son régime ($774.26 \times 10^6 \text{ m}^3$ qui correspondent à $2.73 \text{ m}^3/\text{s}$).

Les déficits maximums sont observés en période pluvieuse (1976-77) et les minimums en période de sécheresse (1975-76).

On sait (voir 1a) qu'environ 60% du déficit d'écoulement du bassin de Labergement (soit $95.49 \times 10^6 \text{ m}^3$ ou $0.33 \text{ m}^3/\text{s}$) rejoignent le sous-bassin de Pontarlier. Le déficit global du bassin du Doubs en amont de Pontarlier atteint donc $528.03 \times 10^6 \text{ m}^3$ ($1.86 \text{ m}^3/\text{s}$), ce qui représente 68.2% des apports reconnus sur le bassin de la Loue, (le Drugeon en représente 58%). De plus, en aval de Pontarlier tout un système de pertes en relation directe avec les sources de la Loue augmente le déficit d'écoulement du Haut Bassin du Doubs (en 1980, P. CHAUVE et Coll. ont estimé à $2.4 \text{ m}^3/\text{s}$ le produit des pertes en aval de Pontarlier).

L'ensemble de ces remarques suggère que la totalité du déficit d'écoulement du Drugeon ($1.58 \text{ m}^3/\text{s}$) et une partie de celui du Doubs pris en amont de Pontarlier ($1.86 + 2.4 - 2.73 = 1.53 \text{ m}^3/\text{s}$) participent au régime d'écoulement de l'Ain ($3.11 \text{ m}^3/\text{s}$).

d. Conclusion

L'étude des bilans hydrologiques (pour la période du 1.9.71 au 31.8.80) révèle un fort déficit des bassins du Doubs à Pontarlier, (au total $1.86 \text{ m}^3/\text{s}$ soit 54.7% de son régime) et du Drugeon à Vuillecin (avec une perte moyenne de $1.58 \text{ m}^3/\text{s}$ soit 47.9% de ses débits).

Le bassin des sources de la Loue n'est pas le seul à bénéficier de ces apports puisque son excès d'écoulement se limite à $2.73 \text{ m}^3/\text{s}$ (26.4% de son régime).

3 - LES RELATIONS ENTRE DEBITS

La considération des débits moyens annuels et de leurs rapports par cycle (Tableau XXVII) montre qu'en moyenne les écoulements :

	LAB	PON	DVI	LOU	PON/ LAB	LAB/ DVI	PON/ DVI	LOU/ LAB	LOU/ PON	LOU/ DVI	LOU/ PON+DVI
71-72	2.5	4.5	1.9	6.1	1.8	1.3	2.4	2.4	1.4	3.2	.95
72-73	3.9	6.6	2.6	8.3	1.7	1.5	2.5	2.1	1.3	3.2	.9
73-74	3.5	6.2	2.5	8	1.8	1.4	2.5	2.3	1.3	3.2	.92
74-75	5.1	9.7	3.7	12.4	1.9	1.4	2.6	2.4	1.3	3.6	.92
75-76	2.7	5.4	2.5	7.5	2	1.1	2.2	2.8	1.4	3	.95
76-77	5.9	10.2	5.1	14.1	1.7	1.2	2	2.4	1.4	2.8	.92
77-78	6.1	10.3	3.9	13.4	1.7	1.6	2.6	2.2	1.3	3.4	.94
78-79	4.4	7.3	2.9	10.5	1.7	1.5	2.5	2.4	1.4	3.6	1.03
79-80	5.3	9.7	4.6	13.2	1.8	1.2	2.1	2.5	1.4	2.9	.92
Moy.	4.4	7.8	3.3	10.4	1.8	1.4	2.4	2.4	1.35	3.2	.94

Tableau XXVII : Les modules hydrologiques annuels et leur rapport par cycle

■ du Doubs à Pontarlier sont environ deux fois (1.8) plus importants que ceux enregistrés à Labergement

■ du Drugeon à Vuillecin sont une fois et demie (1.4) et deux fois et demie (2.4) plus petit que ceux du Doubs à Pontarlier et du Doubs à Labergement

■ de la Loue à Mouthier sont les plus importants. Ils représentent successivement deux fois et demie (2.4), une fois et demie (1.35) et trois fois (3.2) les débits enregistrés à Labergement, Pontarlier et Vuillecin.

On note par ailleurs que le rapport des débits moyens annuels de la Loue à Mouthier sur ceux du Doubs à Pontarlier et du Drugeon à Vuillecin sont proches de 1.

Tous ces rapports varient sensiblement d'un cycle à l'autre, seuls les rapports LOU/PON et LOU/(PON+DVI) sont peu différents selon l'année (l'intervalle de variation est de 0.1 dans le premier cas et de 0.13 dans l'autre). Les rapports qui intègrent les débits du Drugeon sont les plus variables (le domaine de variation minimal est de 0.5 avec les débits de Labergement et la maximal est de 0.8 avec ceux de la Loue). L'intervalle de variation du rapport PON/LAB est de 0.3.

En résumé les rapports entre les écoulements enregistrés aux différentes stations correspondent aux expressions suivantes :

- . Labergement = 0.55 Pontarlier = 1.4 Vuillecin = 0.4 Loue
- . Pontarlier = 1.8 Labergement = 2.4 Vuillecin = 0.74 Loue
- . Vuillecin = 0.71 Labergement = 0.42 Pontarlier = 0.31 Loue
- . Loue = 2.4 Labergement = 1.35 Pontarlier = 3.2 Vuillecin =
= 1.03 Pontarlier + Vuillecin

Ces proportions s'appliqueraient directement aux surfaces des différents bassins si d'une part l'indépendance hydrologique de chacun était établie et si d'autre part la pluviosité régionale était uniforme. Aucune de ces conditions n'est reconnue, aussi les faibles variations des rapports entre les débits traduisent un certain ajustement des écoulements régionaux aux contraintes météorologiques.

4 - CONCLUSION : LE SYSTEME D'ECOULEMENT DES HAUTS BASSINS DU DOUBS ET DE LA LOUE

a. Résultats

Les monographies consacrées aux Hauts Bassins du Doubs et de la Loue mentionnent des circulations hydrologiques complexes entre chacun des bassins.

Les bilans hydrologiques confirment les déficits et excès d'écoulements déjà reconnus et permettent leur estimation. Ceci montre que le Haut Bassin du Doubs (en amont de Pontarlier) participe (avec le bassin du Drugeon) au régime de l'Ain.

Les rapports entre les modules hydrologiques de chaque bassin indiquent une proportionalité entre les écoulements qui demeure voisine quelle que soit l'importance des précipitations.

b. Interprétation

L'ensemble des résultats suggère un système d'écoulements emboîtés qui s'adapte aux contraintes météorologiques analogue au schéma proposé par TOTH en 1963 (Figure 19).

Le système distingue des écoulements locaux qui correspondent à des zones de faible étendue drainées par une source, et des écoulements régionaux qui assurent la communication entre des points très éloignés.

Au niveau des Hauts Bassins du Doubs et de la Loue on peut dresser un schéma analogue en localisant la majorité des écoulements dans les formations jurassiques (calcaire) supra-argoviennes.

Les sources du Doubs (945 m) et du Bief Rouge (source de la Creuse 956 m, du Clos Bayet 953 m et de la Carrée 951 m) drainent des écoulements locaux (Figure 19) et se partagent pour partie les écoulements au sein du Massif du Risoux - Mont d'Or.

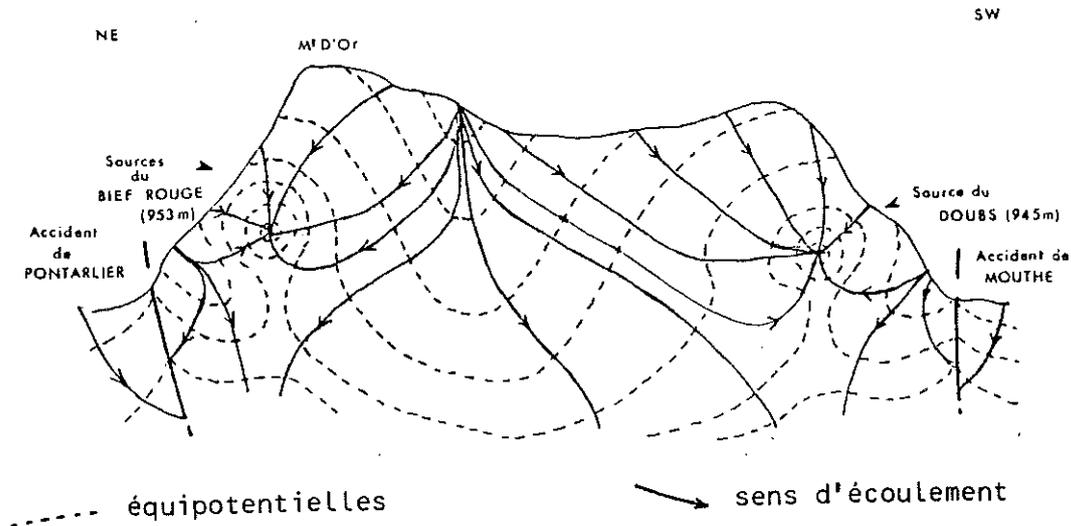


Figure 19 : Interprétation des écoulements au sein du Massif du Risoux - Mont d'Or

En profondeur les écoulements subissent l'influence de la tectonique. Le niveau des écoulements intermédiaires est atteint et on comprend comment le percement du tunnel du Mont d'Or (870 m) a perturbé les écoulements de ce type.

L'existence du tunnel induit une discontinuité hydrogéologique en augmentant localement le champ des perméabilités. Les circulations hydrologiques développées en-dessous du champ de capture des sources du Doubs et du Bief Rouge s'orientent vers ce drain préférentiel. (Le schéma suggère la forme des équipotentiellles dans l'état actuel, c'est-à-dire après colmatage des fissures traversées par l'ouvrage). Les sources de Fontaine Ronde (953 m) et de Malbuisson (900 m) ne constituent alors plus une voie d'écoulement privilégiée et tarissent. (Cette remarque s'adresse surtout à la source de Malbuisson car la source de Fontaine Ronde fonctionne par intermittence et elle serait certainement dépendante de l'importance des écoulements qui transitent par l'accident de Pontarlier).

Sous cette zone s'organisent des écoulements de type régional soumis à la tectonique et au gradient hydraulique (les sources de la Loue se situent à 535 m (Figure 20). L'atténuation vers le Sud de l'accident de Mouthe explique le débordement des bassins du Doubs et du Dugeon vers les sources de l'Ain.

Dans cette conception le terme d'unité hydrogéologique peut s'employer tant au niveau local que régional puisque chacune de ces zones correspond à un volume de roche dans lequel les équipotentiellles isolent une quantité d'eau qui se caractérise par un faciès physico-chimique particulier.

• Remarque :

Le schéma de Toth s'applique à un milieu homogène poreux et isotrope. Dans le cas particulier des Hauts Bassins du Doubs (et du Dugeon) et de la Loue, le milieu peut être considéré comme homogène (calcaires du Jurassique supérieur), mais son degré de fissuration induit une anisotropie importante. (Nous avons, dans une publication séparée (Ph. JACQUEMIN, Y. ROSSIER (1983)), entrepris de reconnaître la répartition de la fissuration sur cette région afin de définir la géométrie des écoulements karstiques).

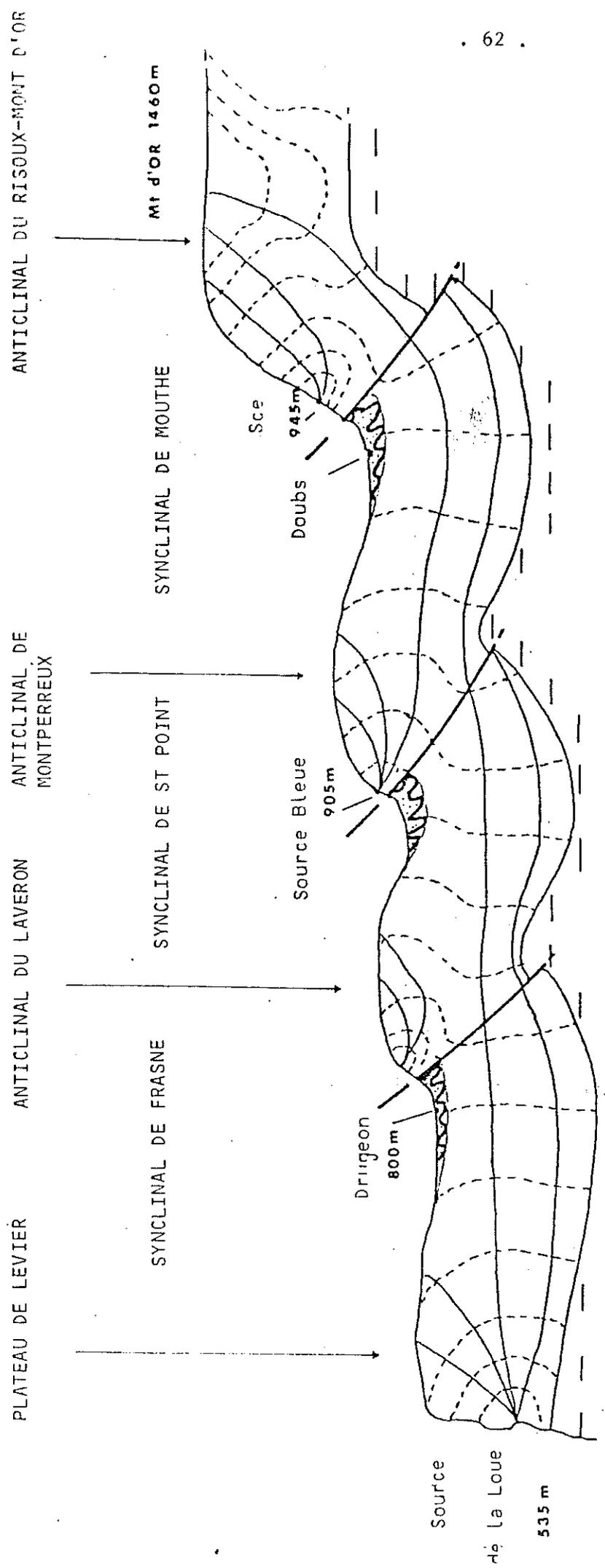


Figure 20 : Interprétation des écoulements dans les calcaires supraargoviens du Jurassique supérieur

B. LES COMPOSANTES DE L'HYDROGRAMME

La décomposition graphique des épisodes de décrue permet de reconnaître les différentes composantes de l'hydrogramme et leurs principales caractéristiques.

1 - RAPPELS

L'hydrogramme de décrue, tracé en échelle logarithmique, montre une décroissance du type :

$Q_t = Q_0 \exp(-t/t_0)$ où le débit à l'instant t (Q_t) est exprimé en fonction du débit de crue (Q_0) et du temps nécessaire à son évacuation ($t_0 =$ temps de tarissement = $1/\alpha$ avec $\alpha =$ coefficient de tarissement).

Les précipitations interceptées par un bassin rejoignent directement son exutoire par ruissellement ou en différé après infiltration.

Ces différents types d'écoulements obéissent à la même loi de décroissance exponentielle. Aussi la soustraction successive des coordonnées de l'asymptote à la courbe de décrue à celles de l'hydrogramme permet de déduire le nombre et le temps de tarissement des unités hydrologiques représentées (Figure 21).

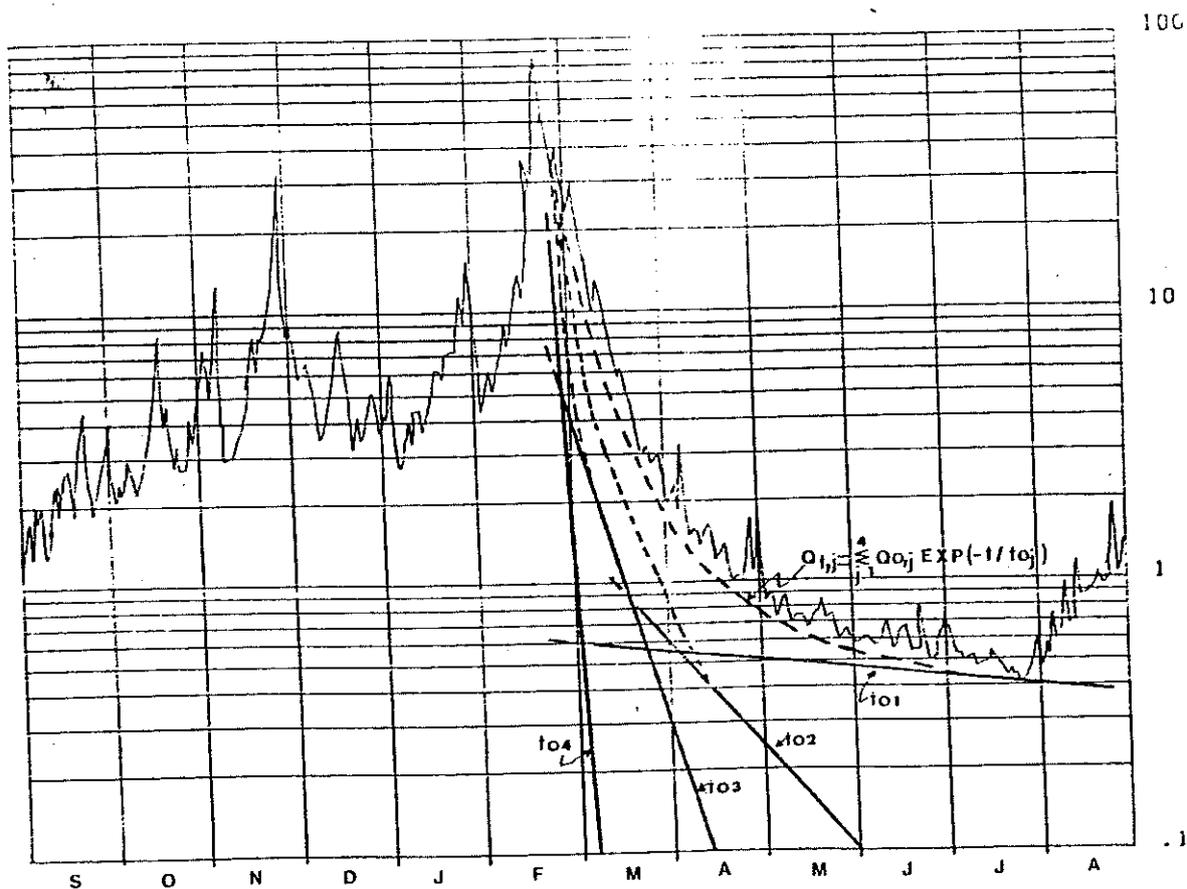


Figure 21 : Décomposition de l'hydrogramme de décrue.

Généralement, on reconnaît par cette méthode quatre familles de droites (donc quatre unités d'écoulement caractérisées par des temps de tarissement différents), qui correspondent :

- au ruissellement de surface (t_{04}) ou de subsurface ("hypodermique" t_{03}) ;
- aux écoulements de type fissural (t_{02}) et matriciel (t_{01}) issus des aquifères secondaire et principal. (Ces aquifères constituent le milieu saturé et ils sont alimentés par les infiltrations).

L'intégration de ces écoulements partiels sur la période de décrue représente la capacité de stockage du bassin considéré et l'équation générale de l'écoulement s'écrit :

$$Q_t = \sum_{j=1}^n Q_{0,j} \text{Exp}(-t/t_{0,j}) \text{ où } j \text{ caractérise le mode d'écoulement}$$

et n leur nombre.

Remarque : La vidange et la réalimentation des réservoirs superposés sert de concept de base aux modèles déterministes de simulation des écoulements dans un système hydrologique (MERO et GILBOA, 1974 ; BIRTLES, 1978). (Le modèle hydrométéorologique MERO est décrit dans le chapitre III : Essai de simulation des écoulements).

. Important .

L'application de ce schéma aux hydrogrammes enregistrés sur les Hauts Bassins du Doubs et de la Loue nécessite une redéfinition de la réalité hydrologique de leurs composantes. En effet, dans un environnement calcaire les différents types d'écoulements traduisent l'organisation générale du karst. Ainsi dans ce contexte (Figure 22) on reconnaît en plus du ruissellement de surface :

- le ruissellement à caractère hypodermique qui correspond à l'écoulement rapide dans des drains généralement secs (karst superficiel = épikarst = réseaux spéléologiques) alimentés par les pertes et avens ;
- l'aquifère secondaire qui est représenté par le karst "noyé" au niveau des gros conduits et des zones à forte perméabilité (drains) par l'ensemble des calcaires microfissurés en communication avec les drains (blocs ou systèmes annexes de A. MANGIN) ;
- l'aquifère principal est constitué par l'ensemble des fissures du massif ("karst microfissural") qui constitue une réserve non négligeable mais où les circulations sont lentes. (La faible porosité des calcaires (<5%) ne justifie pas l'appellation d'écoulement d'origine matricielle).

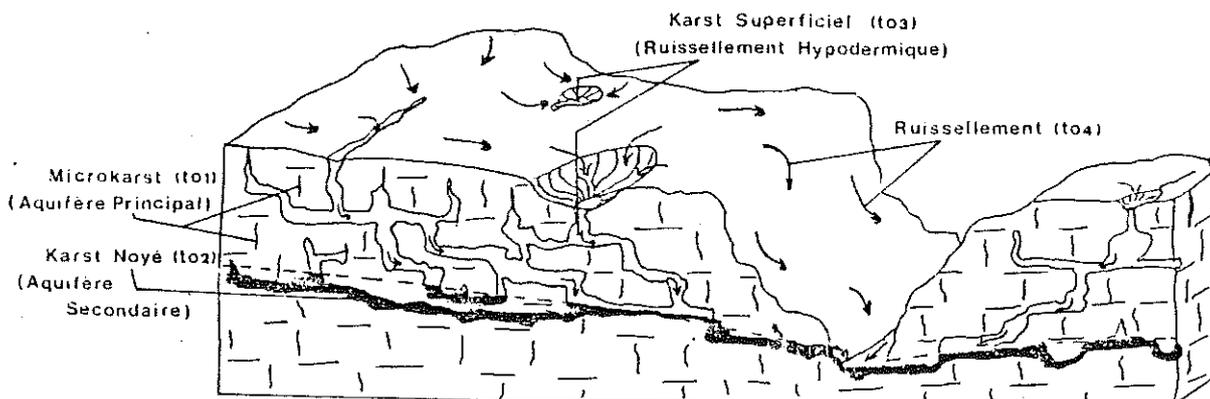


Figure 22 : Les unités d'écoulement dans le karst

. Remarques :

- L'utilisation de l'asymptote à la courbe de décrue est justifiée par le fait que l'écoulement est laminaire, donc qu'il est lié linéairement à la charge.
- Le temps est exprimé en jours et il correspond à la période nécessaire à la vidange des réservoirs d'alimentation sur la base des logarithmes népériens ($e = 2.718$).
- Les droites obtenues doivent être parallèles aux asymptotes tracées pour toutes les périodes d'assèchement observées à la station.

2 - LE TARISSEMENT DES HAUTS BASSINS DU DOUBS ET DE LA LOUE

Les temps de tarissement sont déduits des hydrogrammes enregistrés aux quatre stations durant le cycle 1975-1976. (Le cycle 1971-72 montre un module hydrologiquement plus faible mais l'écoulement du Doubs à Pontarlier a pu être influencé par des mouvements de vanne au niveau du barrage du lac de St-Point).

a. Analyse

L'ensemble des hydrogrammes fait intervenir quatre unités d'écoulement caractérisées par leur temps de tarissement (Tableau XXVIII).

	D O U B S		DRUGEON	LOUE
	Labergement	Pontarlier	Vuillecin	Mouthier
t_{01}	70	80	85	90
t_{02}	15	20	10	16
t_{03}	1	3	1	2.5
t_{04}	.25	1	.25	1

Tableau XXVIII : Les temps de tarissement des différentes unités d'écoulements sur les Hauts Bassins du Doubs et de la Loue (en jours).

Le paramètre t_{01} correspond à la vidange du réservoir principal qui entretient l'écoulement de base des rivières. Sa valeur est similaire aux quatre stations.

La durée du tarissement de l'unité secondaire (t_{02}) est comprise entre 10 jours (Drugeon) et 20 jours (Doubs à Pontarlier).

La vidange du réservoir hypodermique (t_{03}) est de 1 jour pour le bassin du Doubs à Labergement et elle est d'environ 3 jours pour les autres bassins.

Le temps de tarissement de l'unité de ruissellement (t_{04}) est de l'ordre de la journée à Pontarlier et à Mouthier. Ailleurs (à Labergement et à Vuillecin) nous l'avons estimé à un quart de jour (bien qu'il soit difficile de l'évaluer graphiquement).

b. Résultats

Les quatre bassins étudiés présentent une unité de ruissellement caractérisée par une vidange très rapide (t_{04} est inférieur ou égal à la journée)

qui s'explique par la surface des bassins et la rapidité des infiltrations en domaine karstique.

L'écoulement dans le karst superficiel (épi-karst) qui correspond au ruissellement retardé montre un temps de tarissement (t_{03}) identique pour les bassins du Doubs (à Pontarlier), du Dugeon et des sources de la Loue. (Le tarissement de cette unité pour le Doubs à Labergement est de 1 jour).

La vidange des réservoirs profonds (karst noyé (t_{02}) et microfissural (t_{01})) est nettement plus lente. Les circulations sont de l'ordre de la décade pour t_{02} pour les bassins du Doubs à Labergement et du Dugeon à Vuillecin ce qui traduit l'existence d'un karst bien développé sur ces secteurs (bien que le bassin du Dugeon ne mérite pas la dénomination de bassin karstique). Les valeurs de t_{01} indiquent un degré de fissuration qui paraît diminué du Sud (le Doubs à Labergement) vers le Nord (la Loue à Mouthier) puisque l'on passe d'une durée de tarissement de 70 jours (à Labergement) à celle de 90 jours (à Mouthier).

c. Conclusion

Les réponses hydrodynamiques au ruissellement sont très rapides sur chacun des bassins. L'unité hydrologique non saturée (karst superficiel) se vidange plus rapidement sur le Dugeon que sur les autres rivières. Cette remarque traduit le fait que ce type d'écoulement ("hypodermique") correspond à la restitution de l'eau libre par les formations tourbeuses, (et aussi par la nappe alluviale localisée dans le cône glaciaire de la plaine de Pontarlier), puisque les affleurements karstifiés sont très limités sur ce bassin.

La durée du tarissement (t_{01}) de l'unité principale (karst microfissural) fait apparaître une graduation entre le Sud et le Nord certainement liée au degré de fissuration des calcaires (bien que la surface du bassin intervienne aussi sur la valeur de ce paramètre).

3 - CONCLUSION

L'hydrogramme de décrue des bassins du Doubs (à Labergement et à Pontarlier), du Dugeon (à Vuillecin) et de la Loue (à Mouthier) englobe des écoulements issus de quatre réservoirs qui correspondent à des unités hydrogéologiques distinctes.

Les ruissellements rapide (en surface) et retardé (dans le karst superficiel) se caractérisent par des temps de tarissement très courts (environ 1 jour pour t_{04} et de 1 à 3 jours pour t_{03}).

Les infiltrations rejoignent le karst noyé marqué par un transit (t_{02}) compris entre une et deux décades ou le "microkarst" (karst microfissural) dont le temps de tarissement moyen est de 80 jours sur l'ensemble de la région (avec des nuances liées à la topographie et à l'intensité de fissuration des calcaires).

III - CONCLUSION

L'analyse statistique des débits moyens journaliers souligne les particularités hydrologiques de chacun des bassins. L'hydrogramme se révèle davantage marqué par des caractéristiques physiques propres aux bassins que par la variabilité spatiale de la pluviométrie.

Les modules hydrologiques perdent leur caractère indépendant pour une période inférieure au mois.

Les résultats des bilans hydrologiques confirment l'existence de connexions hydrogéologiques entre les bassins mitoyens et suggèrent la participation du sous-bassin du Doubs (à Pontarlier) à l'écoulement des sources de l'Ain (en plus de sa contribution au régime des sources de la Loue). L'ensemble des circulations s'intègre dans un système d'écoulements emboîtés d'amplitude locale (sources du Doubs et du Bief Rouge), intermédiaire (communication entre l'anticlinal du Risoux - Mt d'Or et les sources de Fontaine Ronde et de Malbuisson) et régional (écoulements influencés par la tectonique et dirigés vers les sources de la Loue et de l'Ain). Chacun des niveaux d'emboîtement constitue une unité hydrodynamique particulière.

* La décomposition des hydrogrammes de décrue montre pour chacun des bassins la participation de quatre réservoirs dont le temps de tarissement caractérise le bassin. Chaque réservoir correspond à une unité d'écoulement induite par l'organisation des aquifères karstiques. On reconnaît un ruissellement de surface à la vidange rapide ($t_0 = 1$ j), un ruissellement dans le karst superficiel alimenté par les pertes et avens ($t_{02} = 2-3$ j), et des écoulements plus lents issus du karst noyé ($t_{03} = 10-20$ j) et du micro karst ($t_{04} = 80$ j). (Pour le Dugeon l'interprétation hydrologique des réservoirs se rapporte à la conception classique des unités d'écoulement).

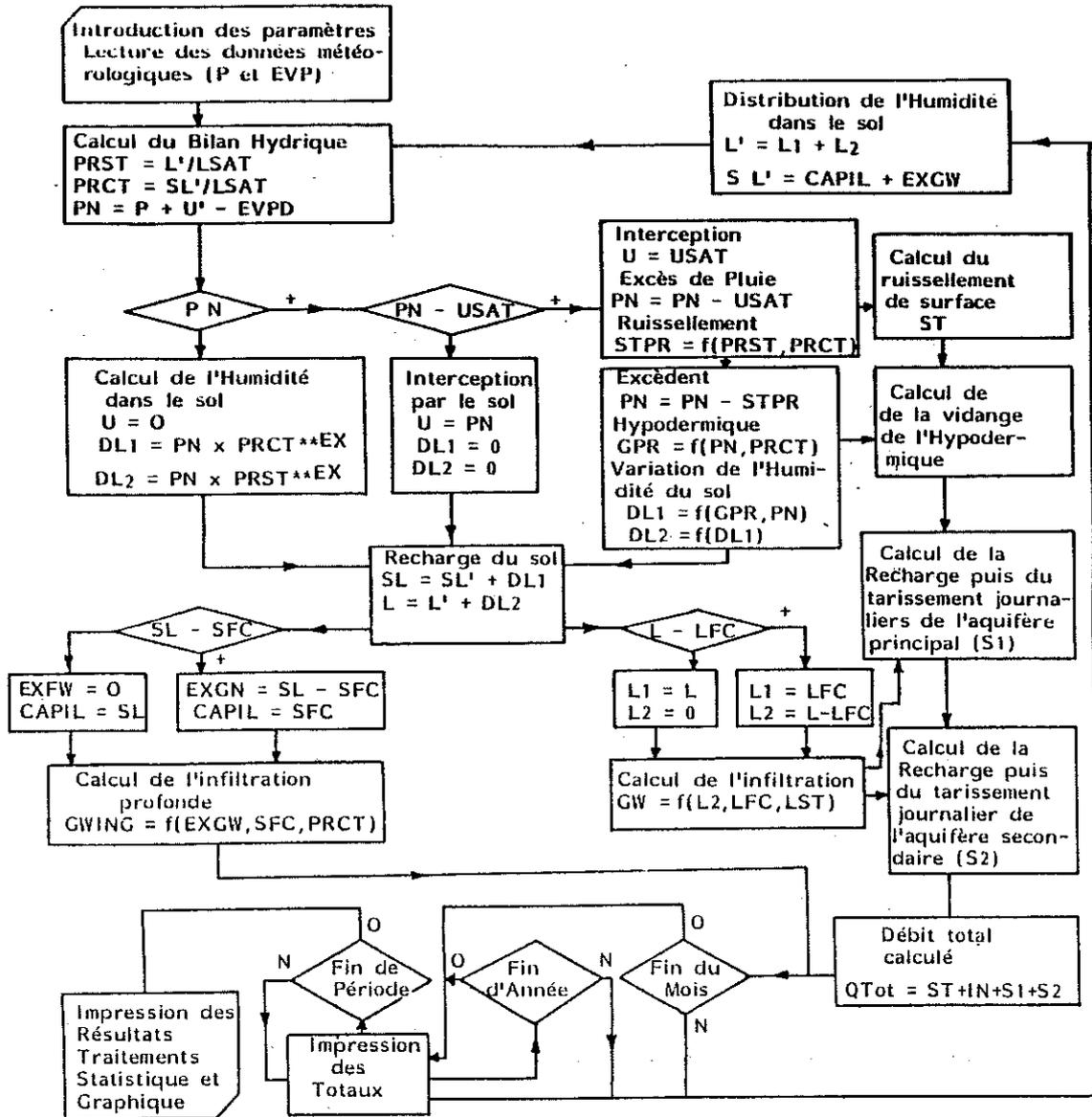
D'après le conception de Toth il est clair que le temps de tarissement des différentes unités intègre, au niveau du bassin hydrogéologique, la totalité des écoulements locaux et une partie des écoulements intermédiaires avec le paramètre t_{04} qui s'applique au réservoir saturé microfissuré.

La mise en place de ce schéma particulier s'explique par l'histoire géologique régionale qui a conditionné les directions d'écoulements préférentiels (par la tectonique) et leur dynamique (par la structure). En effet, les accidents tectoniques majeurs (accidents de Mouthe et de Pontarlier) sont orientés vers le Nord et un gradient hydraulique de 925 m est établi entre le sommet du Mt d'Or (1460 m) et les sources de la Loue (535 m). Le gradient est d'environ 670 m entre l'altitude maximale du sous-bassin du Doubs à Labergement et celle du lit du Doubs au niveau du synclinal d'Arçon (l'altitude moyenne est voisine de 790 m).

En résumé, les Hauts Bassins du Doubs et de la Loue constituent une même unité hydrogéologique drainée dans quatre directions. Ainsi vers :

- le Nord-Est les débits du Doubs, en aval de Ville du Pont, correspondent à l'ensemble des écoulements de subsurface (locaux et intermédiaires) diminués des pertes par fissure ;
- le Nord (NNW) la Loue évacue, en plus des infiltrations sur son propre bassin d'alimentation, la somme des écoulements d'amplitude régionale (plus le produit des pertes du Doubs en aval de Pontarlier) ;
- l'Ouest l'Ain récupère une partie de l'impluvium du Dugeon et l'ensemble des circulations drainées par l'accident de Mouthe ;
- le Sud-Est les sources de l'Orbe bénéficient partiellement du déficit d'écoulement du sous-bassin du Doubs à Labergement.

Figure 23 : Ordinoigramme du modèle MM08



P = précipitation journalière
 EVP = évapotranspiration potentielle
 USAT, U = interception maximale journalière
 LSAT = valeur maxi de l'humidité du sol
 LFC, SFC = capacité au champ des horizons pédologiques 1 et 2
 L1, L2 = humidité dans les 2 horizons
 CAPIL, EXGW = humidité dans le 2ème horizon
 PRST, PRCT = rapports de saturation dans le sol
 DL1, DL2 = variations d'humidité dans 1 et 2
 L, SL = humidité dans 1 et 2 en fin de journée

EX = fonction de régulation de l'humidité
 GW = recharge journalière de l'aquifère principal
 GWING = infiltration profonde journalière
 STPR, ST = variables sur le ruissellement de surface
 GPR, IN = variables sur l'hypodermique
 S1 = vidange de l'aquifère principal
 S2 = vidange de l'aquifère secondaire
 QTOT = débit total journalier
 EVPD = régulation de l'évapotranspiration réelle

ESSAI DE SIMULATION DES ECOULEMENTSIntroduction

Les modèles de simulation des écoulements suivent le cycle hydrologique qui commence avec l'entrée de l'eau dans le système par le biais des précipitations et sa répartition dans le massif par les infiltrations. Seule l'évapotranspiration diminue les entrées de l'eau dans le système. La répartition et la localisation des écoulements à l'intérieur du système sont liées au type de modèle choisi.

Le modèle MERO (MM08) qui est employé ici est un modèle déterministe où l'introduction de paramètres physiques permet de moduler la recharge et la vidange de réservoirs multiples (unités d'écoulements superposées) à chaque étape du cycle hydrologique.

Sur les Hauts Bassins du Doubs et de la Loue chaque système d'écoulement se divise en quatre sous-ensembles qui correspondent à l'unité de ruissellement de surface et aux trois unités karstiques : superficielle (épi-karst), noyée (drains) et microfissurale. Leur alimentation est soumise au ruissellement sur les marnes et calcaires et aux infiltrations au sein des calcaires (et dans une faible proportion au travers des marnes).

Dans une première étape, la conception et le fonctionnement du modèle MERO sont rappelés. Dans une deuxième étape, on aborde l'estimation des divers paramètres régulateurs sur les Hauts Bassins du Doubs et de la Loue, et la reconstitution des débits moyens journaliers (du cycle 1975-1976).

La comparaison entre la chronique reconstituée et les débits observés permet de juger de la qualité de la simulation, de la validité des hypothèses testées et de l'influence de phénomènes négligés par le modèle MERO.

1 - LE MODELE MERO : PRINCIPE ET ETAPES DU CALCUL

Le modèle MERO est un modèle hydrométéorologique conçu sur la base d'un système à stockage multiple. Le cumul des variations survenues dans leur état de remplissage conduit à cerner le débit qui sort du système considéré.

A. PRINCIPE**1 - EQUATION DE BASE**

D'une manière générale le débit naturel instantané (Q_t) d'une rivière peut s'écrire :

$$Q_t = \sum_{j=1}^n (V_{(t-1,j)} + R_{t,j}) \times (1 - \text{EXP}(-1/t_{0,j})) \times 1/86400$$

où j représente le numéro d'ordre de l'unité de stockage (réservoirs superficiels ou profonds : $n = 4$)

t_0 est le temps de tarissement de la $j^{\text{ème}}$ unité

t correspond au pas de temps utilisé

$V_{t-1,j}$ est le volume d'eau stocké dans la $j^{\text{ème}}$ unité au temps $t-1$

$R_{t,j}$ représente l'alimentation des divers réservoirs durant l'intervalle de temps t .

2 - LA RECHARGE DU SYSTEME

Pour quatre réservoirs, on a :

$$R_{t,4} = ST \times (A1 + A2) + ST' \times A3 = \text{Alimentation du Réservoir Principal}$$

$$R_{t,3} = IF \times A3 = \text{Alimentation du Réservoir Secondaire}$$

$R_{t,2} = GW \times A_2$ = Alimentation de l'Unité Hypodermique
 $R_{t,1} = GW \times A_1$ = Alimentation de l'Unité de Ruissellement

Le terme A représente la surface de recharge des différentes unités d'écoulement (la charge et la vidange sont conditionnées par la valeur du temps de tarissement). Ainsi :

- A₁ = surface de recharge de l'aquifère principal (associée à t₀₁)
- A₂ = surface de recharge de l'aquifère secondaire (associée à t₀₂)
- A₃ = surface des terrains semi-perméables qui n'ont pas de réelles capacités d'emménagement.
- A₄ = surface topographique du bassin.

Les termes ST, ST', IF et GW définissent les quantités d'eau qui participent aux divers types d'écoulement :

ST et ST' = ruissellement sur les formations perméables (ST × (A₁ + A₂)) et les moins perméables (ST' × A₃)

IF = recharge de l'unité hypodermique

GW = infiltration profonde au bénéfice des aquifères principal et secondaire.

■ Remarque :

Dans le contexte karstique des Hauts Bassins du Doubs et de la Loue on regroupe sous le terme

- d'unité hypodermique l'ensemble du karst superficiel (sec) emprunté par les eaux de ruissellement sur les affleurements calcaires qui sont rapidement concentrées vers les avens et pertes

- d'unité secondaire le réseau karstique constitué de gros drains et qui est généralement noyé

- d'unité principale la totalité des petites fissures connexes qui rejoignent l'unité précédente.

Chacune de ces unités s'assimile à un réservoir puisque la faible porosité matricielle des affleurements jurassiques ne permet pas l'utilisation du terme aquifère.

Les formations perméables sont sur la région représentées par les calcaires fissurés du Jurassique supérieur dont les affleurements englobent la surface de recharge des unités principale (A₁) et secondaire (A₂) (c'est-à-dire que A₁ reflète le degré de fissuration des calcaires et A₂ l'importance de la karstification).

Les formations semi-perméables correspondent aux affleurements marneux (du Jurassique supérieur) et à l'ensemble des affleurements crétacés et glaciaires que nous considérons en général indépendant du système hydrologique profond. La part des précipitations interceptée par leur surface (A₃) alimente le ruissellement de surface et l'unité d'écoulement hypodermique (karst superficiel).

B. ETAPES DU CALCUL

L'ordinogramme du modèle MERO (Figure 23) présente la succession des calculs relatifs aux mouvements d'eau dans le système. Le sol est divisé en deux horizons (L₁ et L₂) où la quantité d'eau retenue dépend des paramètres SL (limite à la rétention capillaire), LSAT (valeur maximale d'eau retenue dans le sol) et USAT (équivalent maximal de l'interception de l'eau de surface). Sur les formations les moins perméables la capacité au champ des sols (SFC = Soil Field Capacity) est plus forte que sur les autres terrains (ainsi WP (Wilting Point = point de flétrissure) < SL < SFC).

La pluviométrie efficace interceptée par le sol génère, selon son importance, une lame de ruissellement et la redistribution de l'humidité dans le sol. La recharge des aquifères (principal et secondaire) par le sol (GW) commence lorsque $L(L=L_1+L_2)$ est supérieure à LFC. (Une infiltration profonde (GWING) est calculée pour $SL>SF$, mais cette quantité n'est pas récupérable à l'intérieur du bassin (A4) considéré).

Le débit en fin de période est calculé à partir de l'état des réserves (R) dans chacune des unités (j) en fonction de son temps de tarissement ($t_{0,j}$).

II - SIMULATION DES ECOULEMENTS SUR LES HAUTS BASSINS DU DOUBS ET DE LA LOUE

L'essai de simulation procède en deux temps avec d'abord une étape consacrée au choix des paramètres régulateurs et à leur ajustement sur les trois premiers mois du cycle (du 1er Septembre au 30 Novembre), puis à l'analyse des résultats obtenus sur la totalité de la période.

A. CHOIX DES PARAMETRES (Tableau XXIX)

		LAB	PON	DVI	LOU
km ²	A4	143	170	190	268
	A1	5	2	20	30
	A2	15	18	30	80
	A3	100	150	80	158
jours	T1	70	80	80	85
	T2	15	40	10	10
	T3	2,5	6	1	2
	T4	.25	4	.75	.5
	CT	.9	.25	.75	1
mm	US	10	10	0	0
	LF	10	10	10	10
	LS	50	25	50	50
	PØ	100	100	60	100
	QØ	2	2	2	2
	RP	50	100	50	50
m ³ /s	QI	.4	.1	.6	5
	QII	.5	.3	1	4
	Qh	2.5	.6	.7	1
	Qr	1.2	1.5	.5	2

Les paramètres régulateurs intéressent les surfaces (paramètres de forme) l'infiltration (paramètres d'infiltration) et les écoulements eux-mêmes (paramètres hydrodynamiques). Le choix des valeurs accordées à ces divers paramètres est lié à l'interprétation donnée aux différents types d'écoulement (Chapitre II). L'ensemble des hypothèses de travail retenues sont contenues dans le tableau XXIX.

Tableau XXIX : Valeurs des paramètres régulateurs retenues pour la simulation des écoulements sur les Hauts Bassins du Doubs et de la Loue.

LAB = Labergement (Doubs)
 PON = Pontarlier (Doubs)
 DVI = Vuillecin (Drugeon)
 LOU = Mouthier (Loue)

1 - LES PARAMETRES DE FORME

a. Les surfaces topographiques

La surface totale des bassins (A4) est prise égale à celle utilisée pour les calculs des bilans hydrologiques (Chapitre II).

La superficie des terrains semi-perméables (A3) est choisie en regard des affleurements géologiques et de la topographie. (Les zones à forte pente sur calcaires fissurés, diminuent le temps de contact des eaux de ruissellement avec l'encaissant et corrélativement les quantités infiltrées).

Les valeurs avancées puis retenues après compilation (sur les trois premiers mois) sont 100 km² pour le bassin du Doubs à Labergement (70% de la surface totale), 150 km² pour celui du Doubs à Pontarlier (soit 88% du bassin puisque les formations superficielles alimentent directement les

lacs de St Point et de Remoray qui représentent l'unité de ruissellement), à 80 km² pour le bassin du Dugeon à Vuillecin (80% de la surface totale) et 158 km² pour l'alimentation des sources de la Loue (environ 60% du bassin versant topographique).

b. Les surfaces de recharge

Les réservoirs principal ("micro-karst") et secondaire ("karst noyé") ont des surfaces d'alimentation faibles en comparaison de l'importance des affleurements calcaires. En effet ce sont les fissures (petites et moyennes) qui assurent leur recharge.

Les valeurs supposées pour ces paramètres étaient d'environ 5% et 15% de la surface topographique des bassins. (Sauf pour le bassin du Dugeon où ces valeurs sont estimées à partir des affleurements géologiques). Les compléments successives nous ont conduit sur le bassin de la Loue à porter à 30 km² la surface de recharge de l'aquifère principal (10% du bassin) et à 80 km² celle de l'aquifère secondaire (30% de la surface totale). Cette modification montre, si l'hypothèse est valable, que l'excès d'écoulement de ce bassin est apporté (et aussi probablement détourné) par le biais de fissures d'extension faible à moyenne.

On remarque que la somme des surfaces de recharge (A1+A2+A3) est inférieure à A4 pour les bassins du Doubs à Labergement et du Dugeon à Vuillecin. Ce résultat pourrait être une expression du déficit d'écoulement observé sur ces deux bassins.

2 - LES PARAMETRES D'INFILTRATION

Les paramètres régulateurs de l'infiltration portent sur la capacité de rétention des sols. Normalement les formations pédologiques qui appartiennent au bassin du Dugeon (sols hydromorphes) doivent induire des valeurs plus importantes de LF et LS que pour les autres bassins.

En fait les valeurs ajustées sont équivalentes (LF = 10 mm et LS = 50 mm) sur l'ensemble de la région sauf pour le sous-bassin de Pontarlier où l'existence des lacs limite la répartition des sols (LF = 10 mm et LS = 25 mm).

L'infiltration n'est pas limitée au travers des formations perméables (calcaires) avec P ϕ = 100 mm sur les bassins karstiques (P ϕ = 60 mm pour le bassin du Dugeon). Elle est réduite sur les formations semi-perméables (avec Q ϕ = 2 mm).

L'efficacité maximale des précipitations (RP=Pluie-ETP) est fixée à 50 mm sur tous les bassins (sauf pour le sous-bassin du Doubs à Pontarlier où l'importance des précipitations n'est pas limitée (RP = 100 mm)).

Une diminution supplémentaire du signal pluie est obtenue par la prise en compte de l'interception des eaux de surface (US) dans le calcul du bilan hydrologique. (Cette interception se faisant en faveur de nappes alluviales ou même de l'alimentation domestique). La valeur de ce paramètre a été ajustée à 10 et 5 mm pour les bassins du Doubs et elle est nulle sur les deux autres bassins.

3 - LES PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES

L'introduction de ces paramètres concerne la vidange et la recharge des différentes unités d'écoulement (par la valeur attribuée à leur temps de tarissement) et aussi le temps de réponse (CT) de la rivière aux impulsions météorologiques.

La valeur du tarissement des unités secondaire et principale n'a pas été modifiée lors des ajustements, excepté pour le sous-bassin du Doubs

à Pontarlier où la valeur de t_{02} est portée à 40 jours. Les temps de tarissement des unités de ruissellement (à la surface du bassin et dans le karst superficiel) ont été affinés par les ajustements successifs. Les résultats obtenus sont d'environ 8 jours pour t_{03} , sauf à Pontarlier où l'inertie du lac semble occasionner une vidange de l'unité "hypodermique" proche de la semaine. La vidange de l'unité de ruissellement est très rapide ($t_{04}=6$ à 24 heures) sauf encore une fois à Pontarlier où elle atteint 4 jours.

Remarque : On a fixé par ailleurs un retard à la vidange des eaux souterraines (DM) égal à 2 jours.

4 - RESULTATS DE LA SIMULATION D'AUTOMNE

Les paramètres régulateurs retenus sont ceux qui conduisent à une estimation satisfaisante de la balance hydrologique et au calcul d'un coefficient de corrélation (r) significatif, pour les trois premiers mois du cycle hydrologique (du 1er Septembre au 30 Novembre). Les meilleurs résultats obtenus sont portés dans le tableau XXX.

B A S S I N S	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	TOTAL	
le DOUBS	16.49	7.26	14.27	38.02	Q obs.
à	12.35	6.8	13.99	32.55	Q calc.
LABERGEMENT	.888	.945	.891	.897	r
le DOUBS	20.44	8.07	18.88	47.39	Q obs.
à	21.13	9.72	16.3	47.15	Q calc.
PONTARLIER	.832	.946	.912	.895	r
le DRUGEON	22.01	6.6	15.34	43.96	Q obs.
à	11.6	6.67	15.19	33.47	Q calc.
VUILLECIN	.872	.933	.905	.844	r
la LOUE	32.45	18.98	39.79	91.23	Q obs.
à	41.52	22.79	38.23	102.53	Q calc.
MOUTHE	.89	.948	.947	.893	r

Tableau XXX : Résultats de la simulation d'automne avec les débits observés (Q_{obs} en $10^6 m^3$) et calculés (Q_{calc} en $10^6 m^3$) et la valeur du coefficient de corrélation r .

Les coefficients de corrélation linéaire sont tous très significatifs (le r saisonnier est compris entre .844 à Vuillecin et .897 à Labergement). La comparaison entre les volumes observés et calculés montre que la différence est nulle pour le Doubs à Pontarlier et qu'elle est maximale à Mouthier avec $11.53 \times 10^6 m^3$ (soit 12.6% du débit observé).

La différence est maximale en septembre (+30% du débit observé) et diminue ensuite (+18% en octobre et -4.5% en novembre).

Les écarts ($(Q_{obs} - Q_{calc}) \times 100 / (Q_{obs} + Q_{calc})$ en %) entre les valeurs observées et calculées sont les plus importants pour le bassin du Drugeon à Vuillecin (13.6%) et celui du Doubs à Labergement (7.75%). Ils sont de 5.5% pour le bassin de la Loue à Mouthier et de 0.25% pour celui du Doubs à Pontarlier qui se révèle être le système hydrologique le mieux représenté par le modèle.

Remarque : Pour un mois, une différence de $10^6 m^3$ représente un débit instantané de $0.38 m^3/s$.

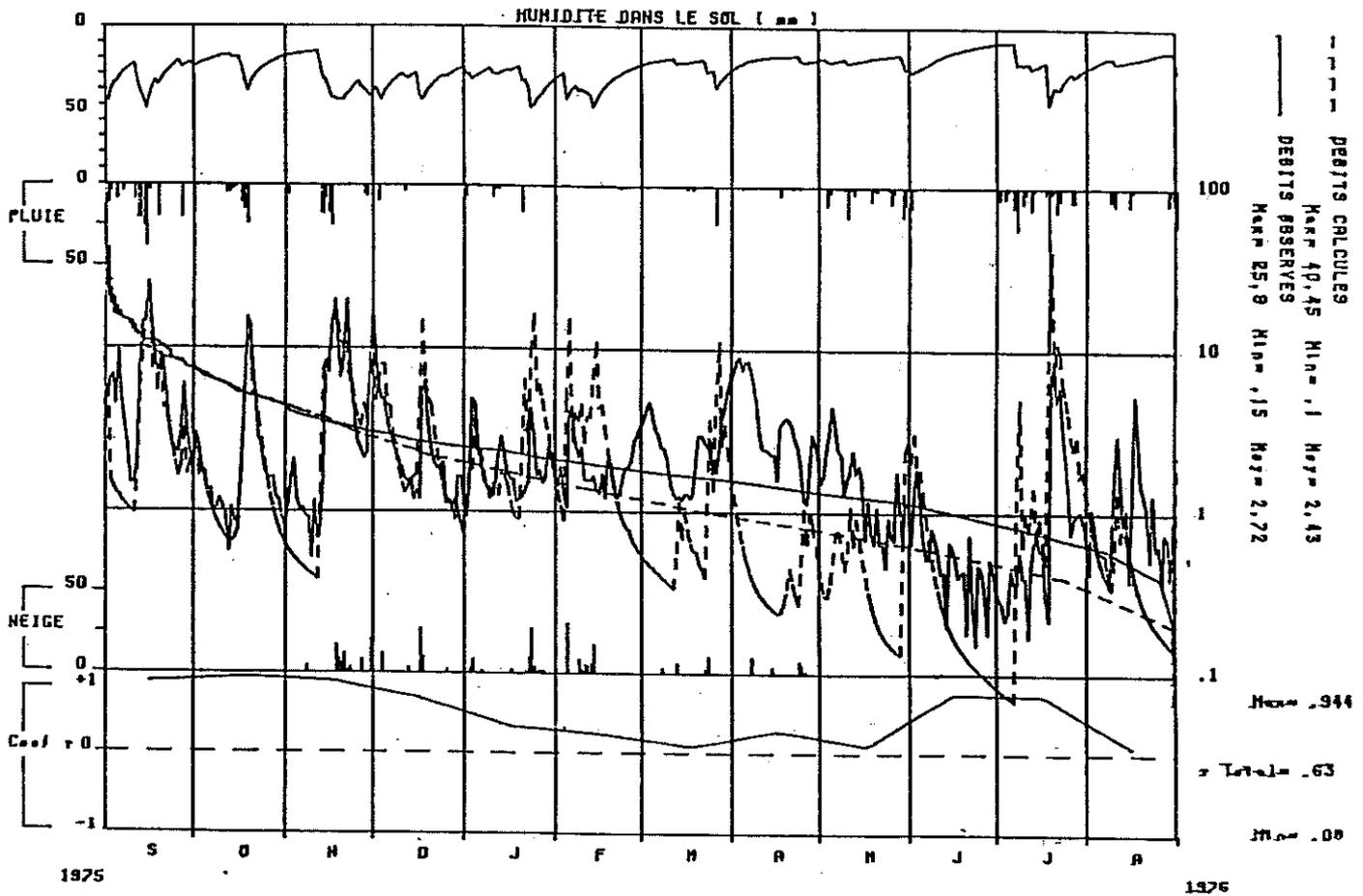


Figure 24 : Résultats de la simulation des débits du Doubs à Labergement

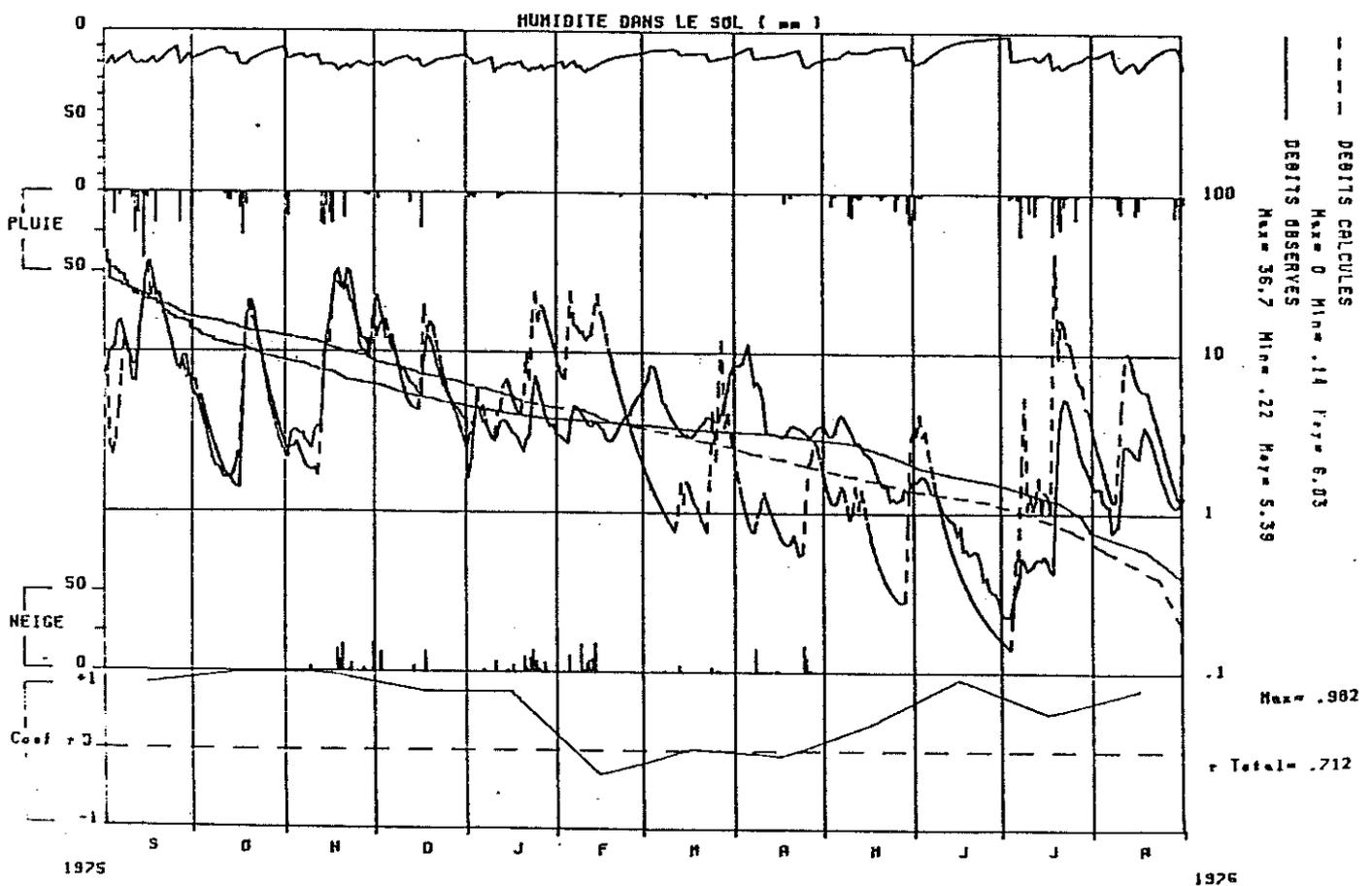


Figure 25 : Résultats de la simulation des débits du Doubs à Pontarlier

5 - CONCLUSION

Le choix des paramètres régulateurs puis leur correction par ajustements successifs précisent quelques particularités de l'hydrodynamisme régional. Ainsi, il apparaît probable que :

- le phénomène de capture du Doubs au profit de la Loue se traduit par une augmentation de la surface de recharge des aquifères principal (micro-karst) et secondaire (karst noyé)
- la présence des lacs de St Point et Remoray sur le sous-bassin du Doubs à Pontarlier accroissent le temps de tarissement de l'aquifère secondaire et des unités de ruissellement (sans que l'on puisse donner une réalité hydrologique à ces réservoirs autre qu'une stratification dynamique des eaux lacustres)
- le déficit d'écoulement des bassins du Doubs à Labergement et du Dugeon s'exprime par une somme des surfaces de recharge inférieure à la surface topographique des bassins.

Les résultats de la simulation des écoulements durant la période automnale sont satisfaisants dans le sens où ils montrent que le modèle MERO conserve aux systèmes hydrogéologiques leurs réactions propres (les coefficients r sont tous significatifs) et aussi dans la mesure où les différences entre débits observés et calculés demeurent équivalentes (à la Loue) ou inférieures à l'erreur faite sur la mesure des débits.

Ainsi les hypothèses avancées donnent une représentation satisfaisante des différents systèmes et la simulation peut être tentée sur la durée d'un cycle hydrologique.

B. SIMULATION DES ECOULEMENTS DURANT LE CYCLE 1975-1976

Les figures 24 à 27 regroupent l'ensemble des résultats obtenus par la simulation avec :

- la chronique des débits observés et calculés (avec leurs caractéristiques principales et leurs courbes de débits classés)
- la pluviométrie et la nivométrie journalière
- les valeurs du coefficient de corrélation linéaire (r) calculées entre les deux séries de débit pour le mois et l'année
- l'équivalent en eau de l'humidité dans le sol.

1 - ANALYSE QUALITATIVE

a. Commentaire des graphiques

Les similitudes observées entre chacune des figures autorisent leur analyse simultanée.

Les courbes des débits calculés suivent la chronique des débits enregistrés jusqu'à la fin du mois de décembre. A partir de cette date les débits calculés deviennent inférieurs aux débits "réels" tout en conservant en début de période (jusqu'à fin février) une correspondance entre les épisodes de crue reconstitués et enregistrés. Durant les mois de juin et juillet les résultats sont à nouveau significatifs (sauf en juillet aux sources de la Loue) mais ils sont très différents en août.

Le déphasage des courbes fait suite à d'abondantes chutes de neige observées durant les mois de Janvier et de Février.

Les courbes d'humidité dans le sol coïncident avec les pics de crue calculés, ce qui souligne l'importance de ce premier réservoir dans le calcul du bilan hydrologique par le modèle MERO.

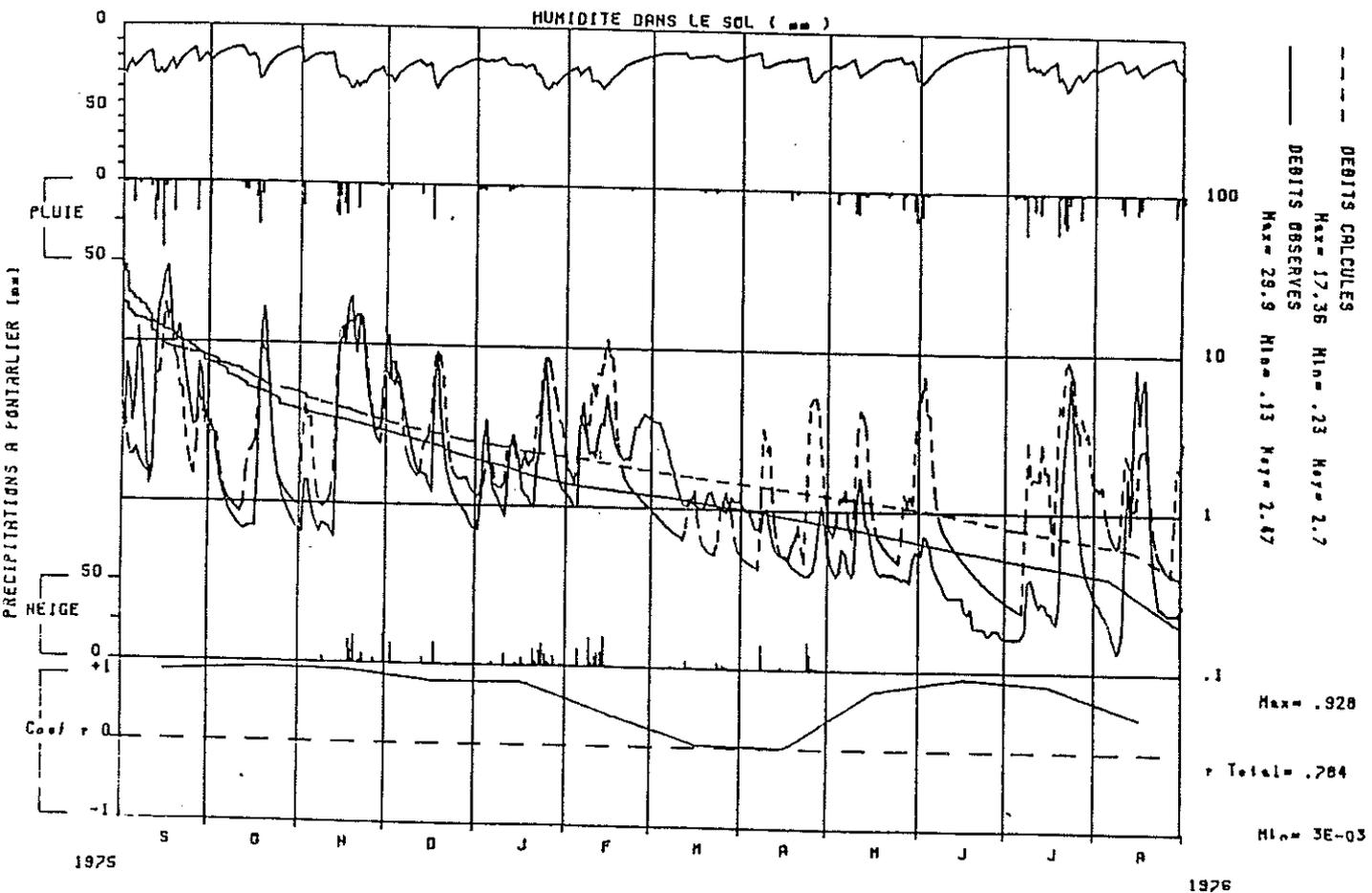


Figure 26 : Résultats de simulation des débits du Druegon à Vuillecin

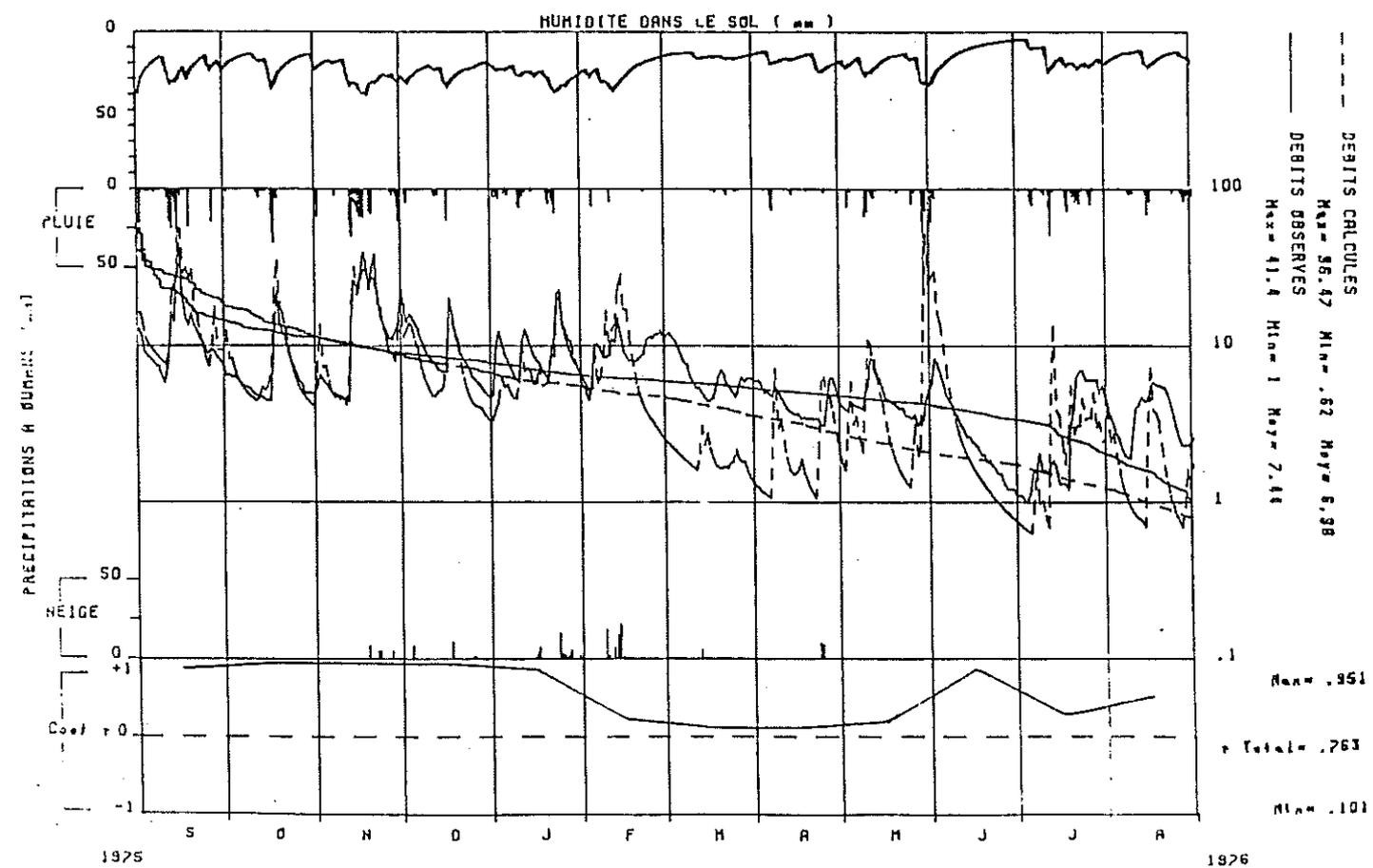


Figure 27 : Résultats de simulation des débits de la Loue à Mouthier

b. Les caractéristiques hydrologiques

Les caractéristiques hydrologiques des courbes observées et calculées sont pour l'ensemble des bassins rassemblées dans le tableau XXXI.

	LABERGEMENT		PONTARLIER		VUILLECIN		MOUTHIER	
	Obs	Calc	Obs	Calc	Obs	Calc	Obs	Calc
Max	25.8	40.45	36.7	42.8	29.9	17.36	41.4	56.47
Min	.15	.1	.22	.14	.13	.23	1	.62
Moy	2.72	2.43	5.39	6.03	2.47	2.7	7.44	6.88

Tableau XXXI : Caractéristiques des débits observés (Obs) et calculés (Calc) en m^3/s .

En règle générale les débits maximums sont nettement surestimés (sauf pour le Drugeon à Vuillecin) alors que les minimums sont sous-estimés (sauf à Vuillecin). La moyenne des écoulements simulés reste proche de celle des débits naturels.

Pour les courbes de débits classés (en échelle logarithmique) l'erreur maximale est commise sur les débits moyens, ceci correspond au fait que les débits calculés sont inférieurs aux débits observés de début Mars à fin Juin.

2 - ANALYSE QUANTITATIVE

a. Niveau annuel (Tableau XXXII)

Les liaisons statistiques calculées entre les débits moyens journaliers observés et calculés (366 valeurs) sont toutes significatives. (Le coefficient de corrélation r est compris entre 0.63 pour le Doubs à Labergement et 0.784 pour le Drugeon à Vuillecin).

La différence entre la somme des débits observés et calculés est de :

- . $-9.05 \times 10^6 m^3$ pour les débits calculés du Doubs à Labergement (10% des débits observés soit $0.28 m^3/s$).
- . $+28.99 \times 10^6 m^3$ pour les débits calculés du Doubs à Pontarlier (34% du total observé soit $0.91 m^3/s$).
- . $.7.15 \times 10^6 m^3$ pour les débits calculés du Drugeon à Vuillecin (9% des débits observés soit $0.23 m^3/s$).
- . $-14.98 \times 10^6 m^3$ pour les débits calculés des sources de la Loue (6.4% des débits observés soit $0.47 m^3/s$).

On note que seule la somme des débits calculés du Doubs à Pontarlier se situe en dehors de l'intervalle d'erreur minimale ($\pm 10\%$) qui encadre la valeur des débits observés. Il est donc possible d'envisager la participation de chacune des unités d'écoulement au débit total calculé (Tableau XXXIII). (D'autant que la moyenne des écoulements calculée est voisine de celle des débits observés).

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	TOTAL
L A.	204.4	68.7	186.3	69.5	95.2	77.3	49.8	35.4	96.3	13	230.2	80.9	1207
B	69	31	15	0	3.1	2.9	9.3	3	74.4	99	105.4	83.7	520.8
E	16.49	7.26	14.27	7.23	5.44	5.01	7.26	10.48	4.17	1.48	3.90	2.94	85.94
R	12.35	6.2	13.99	8.96	8.25	7.89	3.82	1.29	1.49	1.36	10.58	1.36	76.89
G	4.99	2.05	6.27	2.5	2.84	2.88	1.47	.08	.45	.12	5.35	.27	29.25
E	4.78	2.53	6.13	4.48	4.04	3.51	1.47	.57	.61	.87	4.59	.41	32.92
M	1.61	.88	1.02	1.40	.90	1.08	.54	.38	.22	.22	.5	.51	9.61
E	.96	.74	.57	.58	.47	.41	.35	.26	.2	.15	.15	.17	5.11
N	103.3	41.65	101.28	68.18	64.14	66	27.53	13.19	14.73	10.10	60.40	12.17	605.44
T	.888	.945	.891	.679	.328	.231	.08	.284	.08	.76	.737	.08	.63
P	201.5	62.1	163	63.6	119.3	91.8	23.5	41.3	60.1	9.5	154.5	123.2	1113.4
E	75	34.1	15	3.1	6.2	8.7	18	36	74.4	102	111.6	89.9	570.3
N	20.44	8.07	18.88	15.98	4.27	4.40	5.55	2.09	2.05	.75	.27	1.91	84.66
T	21.13	9.72	16.3	14.68	13.29	18.12	1.82	1.81	1.15	1.22	5.4	9.01	113.65
A	2.11	.88	1.80	1.23	1.36	1.61	.07	.19	.06	.1	.83	1	11.09
R	17.22	7.9	13.64	12.48	11.04	15.59	1.14	1.23	.78	.90	4.32	7.54	94.64
L	.87	.75	.72	.83	.77	.81	.52	.32	.26	.18	.21	.42	6.66
I	.24	.19	.15	.14	.12	.11	.09	.06	.05	.04	.03	.04	1.26
E	52.32	25.17	59.01	31.11	54.34	35.49	7.02	12.31	4.47	5.65	23.92	32.10	342.9
R	.832	.946	.912	.8	.554	-.322	.405	.34	.244	.589	.261	.252	.715
P	150.6	58.2	183.6	61.5	84.1	74.5	17.8	53.1	85.2	18.1	146.6	69.1	1002.4
Q	22.01	6.60	15.34	7.97	5.52	6.92	4.07	1.71	1.47	.78	2.37	3.46	78.23
I	11.6	6.67	15.19	9.41	8.09	8.95	2.13	3.88	3.87	3.03	7.17	3.52	85.38
L	2.98	1.23	4.19	2.02	1.8	2.21	.11	1.16	1.17	.55	2.64	.87	23.02
L	3.9	2.25	6.80	3.21	3.32	3.32	.39	1.4	1.01	1.08	2.88	1.09	31.46
E	3.04	1.64	2.70	2.55	1.55	2.06	.50	.49	.82	.71	1.03	.88	13.62
C	1.68	1.56	1.51	1.63	1.42	1.36	1.14	.84	.77	.68	.62	.67	17.27
I	94.13	45.94	116.14	62.76	61.32	56.4	7.44	23.41	25.79	16.37	51.14	17.69	555.63
N	.872	.933	.905	.774	.788	.388	.03	.0	.748	.918	.82	.425	.784
P	185.6	65.4	194.3	55.9	102.7	83.5	13.9	38.2	141.6	26.9	104.1	53.3	1065.4
Q	32.45	18.98	39.79	26.03	25.96	23.92	18.05	11.46	12.19	8.01	8.54	9.75	235.13
U	41.52	22.79	38.23	20.72	21.19	21.88	5.18	6.48	16.59	12.86	7.56	4.91	220.15
T	11.1	4.55	12.42	3.2	4.49	5.46	.20	1.56	8.28	1.6	2.71	1.14	56.68
H	8.84	4.81	11.82	5.73	7.51	7.30	.77	1.95	4.17	6.54	2.42	1.56	65.8
I	10.02	4.54	7.24	6.21	4.82	5.59	1.36	.95	2.43	3.15	1.22	1.21	50.68
E	11.56	8.88	6.69	5.58	4.37	4.37	2.86	2.03	1.72	1.57	1.22	1.01	46.95
R	105.03	42.63	118.93	54.57	73.28	56.17	7.45	15.26	41.42	22.14	20.52	10.74	546.88
r	.89	.948	.947	.932	.853	.221	.102	.116	.2	.874	.275	.533	.763

Tableau XXXII : Résultats de la simulation des écoulements sur les Hauts Bassins du Doubs et de la Loue durant le cycle 1975-76. (Les débits observés (Qobs), calculés (Qcalc), de ruissellement (Qr), hypodermique (Qh), des aquifères secondaire (QII) et principal (QI) sont exprimés en 10⁶m³. La pluie (P), l'évapotranspiration (ETP) et les infiltrations (Inf) sont données en mm).

b. Niveau mensuel (Tabl. XXXII)

Les coefficients de corrélation calculés mensuellement entre les débits observés et calculés ont des valeurs significatives à 99.9% durant :

- 6 mois à Labergement
- 5 mois à Pontarlier
- 8 mois à Vuillecin
- 5 mois à Mouthier

(ils sont non significatifs de Janvier à Mars (sauf à Vuillecin où le coefficient de Mars est supérieur à sa valeur test) et en Août avec en plus le mois de Juillet à Pontarlier et à Mouthier).

A 80% les coefficients de corrélation mensuelle sont significatifs durant 8 mois à Labergement et à Mouthier, 11 mois à Pontarlier et 10 mois à Vuillecin.

Remarque : Pour 31 valeurs le coefficient de corrélation test est de 0.562 à 99.9% et 0.237 à 80% (il est de 0.57 à 99.9% et de 0.21 à 80% pour 30 valeurs).

La détermination de la participation des différentes unités d'écoulement au cours des différentes étapes du cycle hydrologique ne serait pas parfaitement rigoureuse au vue des résultats mensuels.

L'analyse qualitative a montré que l'observation des perturbations dans la simulation suivait celle des précipitations neigeuses. En effet on note que : sur les sous-bassins du Doubs les précipitations enregistrées en Janvier (95.2mm à Mouthe et 119.3mm à Labergement) conduisent le modèle à une surestimation des débits ($8.25 \times 10^6 \text{m}^3$ ($3 \text{m}^3/\text{s}$) au lieu de $5.44 \times 10^6 \text{m}^3$ ($2 \text{m}^3/\text{s}$) à Labergement et $13.29 \times 10^6 \text{m}^3$ ($5 \text{m}^3/\text{s}$) au lieu de $4.27 \times 10^6 \text{m}^3$ ($1.6 \text{m}^3/\text{s}$) à Pontarlier). La même anomalie est calculée en Février où elle apparaît aussi pour le bassin du Drugeon avec :

- des précipitations égales à 77.3mm à Mouthe, 91.8mm à Labergement, et 74.5mm à Pontarlier
- des débits calculés exprimés en 10^6m^3 de 7.89 ($2.9 \text{m}^3/\text{s}$) à Labergement, de 18.12 ($6.8 \text{m}^3/\text{s}$) à Pontarlier, et de 8.95 ($3.3 \text{m}^3/\text{s}$) à Vuillecin
- des débits observés (en 10^6m^3) de 5.01 ($1.9 \text{m}^3/\text{s}$) à Labergement, de 4.4 ($1.6 \text{m}^3/\text{s}$) à Pontarlier et de 6.92 ($2.6 \text{m}^3/\text{s}$) à Vuillecin.

Durant les deux mois qui suivent (Mars, Avril) on observe pour le Doubs au contraire une sous-estimation des débits par le modèle même si comme en Mars les précipitations sont importantes (96.3mm à Mouthe et 60.1mm à Labergement). Les débits calculés pour ce mois sont (en 10^6m^3) de 1.49 ($0.5 \text{m}^3/\text{s}$) à Labergement et de 1.15 ($0.4 \text{m}^3/\text{s}$) à Pontarlier et les débits observés atteignent respectivement $4.17 \times 10^6 \text{m}^3$ et $2.05 \times 10^6 \text{m}^3$ (1.5 et $0.8 \text{m}^3/\text{s}$).

Le bassin des sources de la Loue ne semble pas nettement influencé par l'enneigement puisque toute la période qui va de Février à Avril montre des débits calculés nettement sous-estimés. (Les débits observés (en 10^6m^3) sont respectivement pour Février, Mars, Avril de 23.92 ($8.9 \text{m}^3/\text{s}$), de 18.05 ($6.7 \text{m}^3/\text{s}$) et de 11.46 ($4.3 \text{m}^3/\text{s}$) alors que les débits calculés sont, pour les mêmes mois (et en 10^6m^3), de 21.88 ($8.1 \text{m}^3/\text{s}$), de 5.18 ($1.9 \text{m}^3/\text{s}$) et de 6.48 ($2.4 \text{m}^3/\text{s}$). L'explication de cette contradiction serait à recherche dans des variations quantitatives des pertes du Doubs (entre Pontarlier et Ville du Pont).

Les débits calculés (en 10^6m^3) durant le mois de Juin sont supérieurs aux débits observés (en 10^6m^3) sur tous les bassins excepté à Labergement (1.22 , ($0.4 \text{m}^3/\text{s}$) à Pontarlier, 3.03 ($1.1 \text{m}^3/\text{s}$) à Vuillecin et 12.86 ($4.8 \text{m}^3/\text{s}$) à Mouthier pour des quantités écoulées (en 10^6m^3) aux mêmes points de .75 ($0.3 \text{m}^3/\text{s}$), .78 ($0.3 \text{m}^3/\text{s}$) et 8.0 ($3 \text{m}^3/\text{s}$). Le même résultat s'observe en Juillet (et aussi à Labergement $10.58 \times 10^6 \text{m}^3$ ($3.9 \text{m}^3/\text{s}$) calculés pour $3.9 \times 10^6 \text{m}^3$ ($1.45 \text{m}^3/\text{s}$) observés, mais à Mouthier les résultats sont conformes aux observations).

Les résultats de la simulation des débits d'Août sont très différents d'un bassin à l'autre.

	D O U B S						D R U G E O N				L O U E		
	Labergement			Pontarlier			Vuillecin				Mouthier		
	%	$\times 10^6 m^3$	m^3/s	%	$\times 10^6 m^3$	m^3/s	%	$\times 10^6 m^3$	m^3/s	%	$\times 10^6 m^3$	m^3/s	
Ruissellement	38.40	29.25	0.93	9.76	11.09	0.35	26.97	23.02	0.73	25.75	56.68	1.80	
Hypodermique (karst superficiel)	42.81	32.92	1.04	83.27	94.64	3	36.85	31.46	1.	29.89	65.8	2.09	
Aquifère secondaire (karst noyé)	12.50	9.61	0.30	5.86	6.66	0.21	20.23	17.27	0.55	21.33	49.95	1.58	
Aquifère principal (microkarst)	6.65	5.11	0.16	1.11	1.26	0.04	15.95	13.62	0.43	23.03	50.68	1.60	

Tableau XXXIII : Participation annuelle des différentes unités d'écoulements (obtenue par simulation)

Sur l'ensemble des bassins, l'essentiel des écoulements est fourni par la part des précipitations rapidement concentrée vers les grandes fissures. Elle représente une fraction du débit total calculé égale à :

- 43% du Doubs à Labergement ($32.9 \times 10^6 m^3$ ou $1.04 m^3/s$)
- 84% du Doubs alimenté par le sous-bassin de Pontarlier ($94.6 \times 10^6 m^3$ ou $3 m^3/s$)
- 37% du Drugeon à Vuillecin ($31.46 \times 10^6 m^3$ ou $0.99 m^3/s$)
- 30% de la Loue à sa source ($65.8 \times 10^6 m^3$ ou $2 m^3/s$).

L'unité de ruissellement apporte au débit total un débit moyen de :
 . $0.93 m^3/s$ à Labergement, $0.35 m^3/s$ à Pontarlier, $0.73 m^3/s$ à Vuillecin et $1.8 m^3/s$ à Mouthier qui correspondent respectivement à une participation de 38%, 10%, 27% et 26%.

- Le karst noyé (aquifère secondaire) contribue à :
- 12.5% des débits du Doubs à Labergement (soit $0.3 m^3/s$) et à 6% (ou $0.2 m^3/s$) de ceux fournis par le sous-bassin de Pontarlier
 - 20% des écoulements du Drugeon ($0.55 m^3/s$)
 - et 21% de ceux de la Loue ($1.6 m^3/s$).

L'aquifère principal (microkarst) correspond à l'écoulement de base des rivières étudiées. Il est en moyenne égal à :

- $0.16 m^3/s$ et $0.04 m^3/s$ pour le Doubs sur les sous-bassins de Labergement (6.6% des débits) et de Pontarlier (1.1% des débits)
- $0.43 m^3/s$ (soit 16% du total) à Vuillecin
- $1.6 m^3/s$ (23% des écoulements) à Mouthier.

En résumé il existe un ordre d'importance entre les différents types d'écoulement qui est identique pour les quatre bassins, mais dont leur participation à l'écoulement global varie de façon importante d'un point à un autre.

Ainsi la réunion des écoulements des aquifères primaire (microkarst) et secondaire (karst noyé) correspond à une fraction des débits annuels qui est de :

19% à Labergement ($0.46 m^3/s$), 7% à Pontarlier ($0.25 m^3/s$), 36.3% à Vuillecin ($0.98 m^3/s$) et 44.4% à Mouthier ($3.2 m^3/s$).

Les quantités d'eau infiltrées dans le système correspondent à :

- * 605.44 mm sur le bassin du Doubs à Labergement (soit 88% de la pluviométrie enregistrée à Mouthe (1207 mm) diminuée de l'ETP calculée en ce point (520.8 mm))
- * 342.9 mm sur le sous-bassin de Pontarlier (63% de la pluviométrie de Labergement (1113.4 mm) sans l'ETP de Pontarlier (570.3 mm))
- * 555.63 mm sur le bassin du Drugeon (soit la totalité des précipitations enregistrées à Pontarlier (1002.4 mm) diminuée de l'ETP calculée à cette station)
- * 546.88 mm sur le bassin de la Loue (soit la totalité des pluies efficaces calculées à Ouhans (1065.4 mm - 518.5 mm)).

A Labergement, on note un volume calculé ($1.34 \times 10^6 \text{m}^3$ ou $0.5 \text{m}^3/\text{s}$) inférieur de $0.58 \times 10^6 \text{m}^3$ ($0.2 \text{m}^3/\text{s}$) au volume observé. Cette différence est de $4.84 \times 10^6 \text{m}^3$ ($1.8 \text{m}^3/\text{s}$) à Mouthier ($4.91 \times 10^6 \text{m}^3$ au lieu de $9.75 \times 10^6 \text{m}^3$).

Les débits calculés à Pontarlier sont par contre nettement supérieurs à ceux qui y sont observés (le volume calculé est de $9.01 \times 10^6 \text{m}^3$ ($3.36 \text{m}^3/\text{s}$) pour une quantité écoulée de $1.91 \times 10^6 \text{m}^3$ ($0.7 \text{m}^3/\text{s}$)).

Le volume calculé à Vuillecin ($3.52 \times 10^6 \text{m}^3$ ou $1.21 \text{m}^3/\text{s}$) est très proche du volume observé ($3.46 \times 10^6 \text{m}^3$ ou $1.29 \text{m}^3/\text{s}$).

Les excès calculés durant ces mois d'été sont induits par de fortes infiltrations. (En Juin, la lame infiltrée est de 60.4mm à Labergement, de 23.92mm à Pontarlier et 51.14mm à Vuillecin. L'erreur provient donc d'une surestimation de la pluie efficace, c'est-à-dire d'une minimisation de la valeur de l'ETP. (Les précipitations de ce mois ont été de 230.2mm à Mouthe, 154.5mm à Labergement et de 154.5mm à Pontarlier et l'ETP calculée (selon Thornthwaite) est de 105.4mm à Mouthe et 111.6mm à Pontarlier). Inversement un déficit d'écoulement prononcé résulterait d'une infiltration trop faible donc d'une ETP trop forte (en Août il est tombé 53.3mm à Ouhans pour une ETP de 89.9mm à Pontarlier et la lame infiltrée est de 10.74mm (elle est de 17.7mm à Vuillecin où le bilan est équilibré)).

3 - RESULTATS

Les hydrogrammes de simulation présentent tous une anomalie de même type sur les mois de Février, Mars et Avril, précédée en Janvier d'abondantes précipitations neigeuses. Les corrélations linéaires, qui intègrent les 366 valeurs journalières du cycle (1975-76) sont néanmoins significatives. (Le minimum est de 0.63 pour les débits du Doubs à Labergement). De plus l'écart entre la moyenne des écoulements observés et celle des débits calculés (ainsi que celui entre les minimums) est faible. (Par contre, il est très important entre les maximums calculés et observés). Les courbes de débits classés montrent une différence sensible, (entre les deux chroniques) dans la distribution des moyens débits.

L'analyse quantitative confirme la validité globale du modèle de simulation et permet d'estimer la participation des quatre unités hydrologiques au volume d'écoulement total. La prépondérance revient au ruissellement de surface et surtout à celui de caractère hypodermique (43% ($1 \text{m}^3/\text{s}$) des volumes écoulés à Labergement, 84% ($0.2 \text{m}^3/\text{s}$) à Pontarlier, 37% ($0.5 \text{m}^3/\text{s}$) à Vuillecin et 30% ($1.8 \text{m}^3/\text{s}$) à Mouthier). Cependant la contribution des unités principale (microkarst) et secondaire (karst noyé) varie d'un bassin à l'autre. (Leur somme représente 19% du volume écoulé à Labergement ($0.5 \text{m}^3/\text{s}$), 7% à Pontarlier ($0.2 \text{m}^3/\text{s}$), 36% à Vuillecin ($1 \text{m}^3/\text{s}$) et 44% à Mouthier ($3.2 \text{m}^3/\text{s}$)).

Les infiltrations annuelles sur les sous-bassins du Doubs correspondent respectivement à 63% (à Labergement) et 88% (à Pontarlier) de la pluviosité efficace (donc $\text{ETR} = \text{ETP}$), par contre la lame d'eau infiltrée est supérieure à la pluie efficace sur les deux autres bassins ($\text{ETR} < \text{ETP}$).

L'étude des bilans mensuels précise chacun des points évoqués et suggère que les anomalies observés entre la chronique observée et reconstituée sont imputables :

- à l'enneigement à la fin de l'hiver et au printemps avec pour cette période une différence importante sur les sous-bassins du Doubs. (En Janvier on note une surestimation des écoulements de $0.8 \text{m}^3/\text{s}$ à Labergement et de $3.4 \text{m}^3/\text{s}$ à Pontarlier qui se poursuit en Février avec $1 \text{m}^3/\text{s}$ à Labergement et $5.2 \text{m}^3/\text{s}$ à Pontarlier. Les écoulements calculés en Mars sont au contraire sous-estimés de $1.3 \text{m}^3/\text{s}$ à Labergement et de $1.4 \text{m}^3/\text{s}$ à Pontarlier, ainsi qu'en Avril avec une différence de $3.4 \text{m}^3/\text{s}$ à Labergement et de $0.5 \text{m}^3/\text{s}$ à Pontarlier (en Avril et Mai),

- au calcul de lame d'infiltration trop importante (en Juin et Juillet) ou trop faible (en Août) qui résulterait d'une mauvaise estimation de l'évapotranspiration pour les mois d'été (ou à une modification de la capacité de rétention des sols),

- au phénomène de capture d'une partie de l'écoulement (libre) du Doubs par le bassin de la Loue puisque la comparaison des débits calculés et observés montre des anomalies qui ne vont pas dans le même sens que celles relevées sur les autres bassins. Cette interprétation suppose que les volumes perdus (par le Doubs) ne sont pas constants.

4 - CONCLUSION

La corrélation des débits observés et calculés sur l'ensemble du cycle 1975-76 est significative sur chacun des bassins étudiés. La participation des différentes unités hydrologiques à l'hydrogramme global peut donc être abordée à partir des valeurs cumulées sur l'année.

Pour l'ensemble des bassins la majorité des écoulements annuels provient de l'unité (hypodermique) karstique superficielle qui fournit 30% des débits à Mouthier (2 m³/s), 37% à Vuillecin (1 m³/s), 43% à Labergement (1 m³/s) et 83% à Pontarlier (3 m³/s).

Le reste des débits est fourni par les autres unités qui sont par ordre décroissant d'importance :

. l'unité de ruissellement (10% des débits apportés au Doubs par le sous-bassin de Pontarlier (0.35m³/s), 26% à Mouthier (1.8m³/s), 27% à Vuillecin (0.7m³/s) et 38% à Labergement (0.9m³/s)

. l'unité d'écoulement secondaire qui correspond au karst noyé des bassins calcaires (6% des débits à Pontarlier (0.2m³/s), 12.5% à Labergement (0.3m³/s), 20% à Vuillecin (0.5m³/s) et 21% à Mouthier (1.6m³/s))

. l'unité d'écoulement principal ou microkarstique (1% du volume écoulé à Pontarlier (0.40m³/s), 6.6% à Labergement (0.2m³/s), 16% à Vuillecin (0.4m³/s) et 23% à Mouthier (1.6m³/s).

Ces résultats schématisent l'hydrodynamisme des Hauts Bassins du Doubs et de la Loue et l'analyse des valeurs mensuelles souligne l'influence :

. printanière de l'enneigement sur les sous-bassins du Doubs
. estivale d'une mauvaise estimation de l'évapotranspiration potentielle (au pas journalier) sur l'ensemble de la région

. constante du phénomène de capture de l'écoulement libre du Doubs sur le régime de la Loue qui s'accroît lorsque les débits du Doubs sont perturbés par des phénomènes de surface (enneigement, bilans hydriques).

C. CONCLUSION

L'essai de simulation des écoulements sur les Hauts Bassins du Doubs et de la Loue, au cours du cycle 1975-76, permet :

- de choisir en se limitant à la période automnale des paramètres capables de conserver aux différents systèmes leurs réactions propres ;
- de quantifier à partir des résultats annuels la participation des diverses unités hydrologiques aux régimes d'écoulement globaux.

Le rapprochement de la conception de base (division en quatre réservoirs superposés), des hypothèses testées et des résultats numériques donne une représentation schématique des bassins étudiés à partir des paramètres contenus dans le tableau XXXIV.

		UNITE PRINCIPALE Microkarst			UNITE SECONDAIRE Karst noyé			HYPODERMIQUE Karst superficiel			RUISSELLEMENT		
		Sr(%)	to(j)	Pr(%)	Sr(%)	to(j)	Pr(%)	Sr(%)	to(j)	Pr(%)	Sr(%)	to(j)	Pr(%)
DOUBS	LABERGEMENT	3.5	70	6.7	10.5	15	12.5	70	2.5	42.8	70	.25	38
	PONTARLIER	1.8	80	1	10.6	40	5.9	87.6	6	83.3	87.6	4	9.8
	DRUGEON à VUILLECIN	10.5	80	16	15.8	10	20.2	42.1	1	36.8	42.1	.75	27
	LOUÉ à MOUTHIER	11.2	85	23	29.9	10	21.3	58.9	2	29.9	58.9	.5	25.8

Tableau XXXIV : Paramètres dynamiques (surface relative $Sr=(\text{surface Topo/Sunité}) \times 100$ et temps de tarissement to) et numérique (participation relative des unités $Pr=(\text{Volume total/Volume de l'unité}) \times 100$) des systèmes hydrologiques

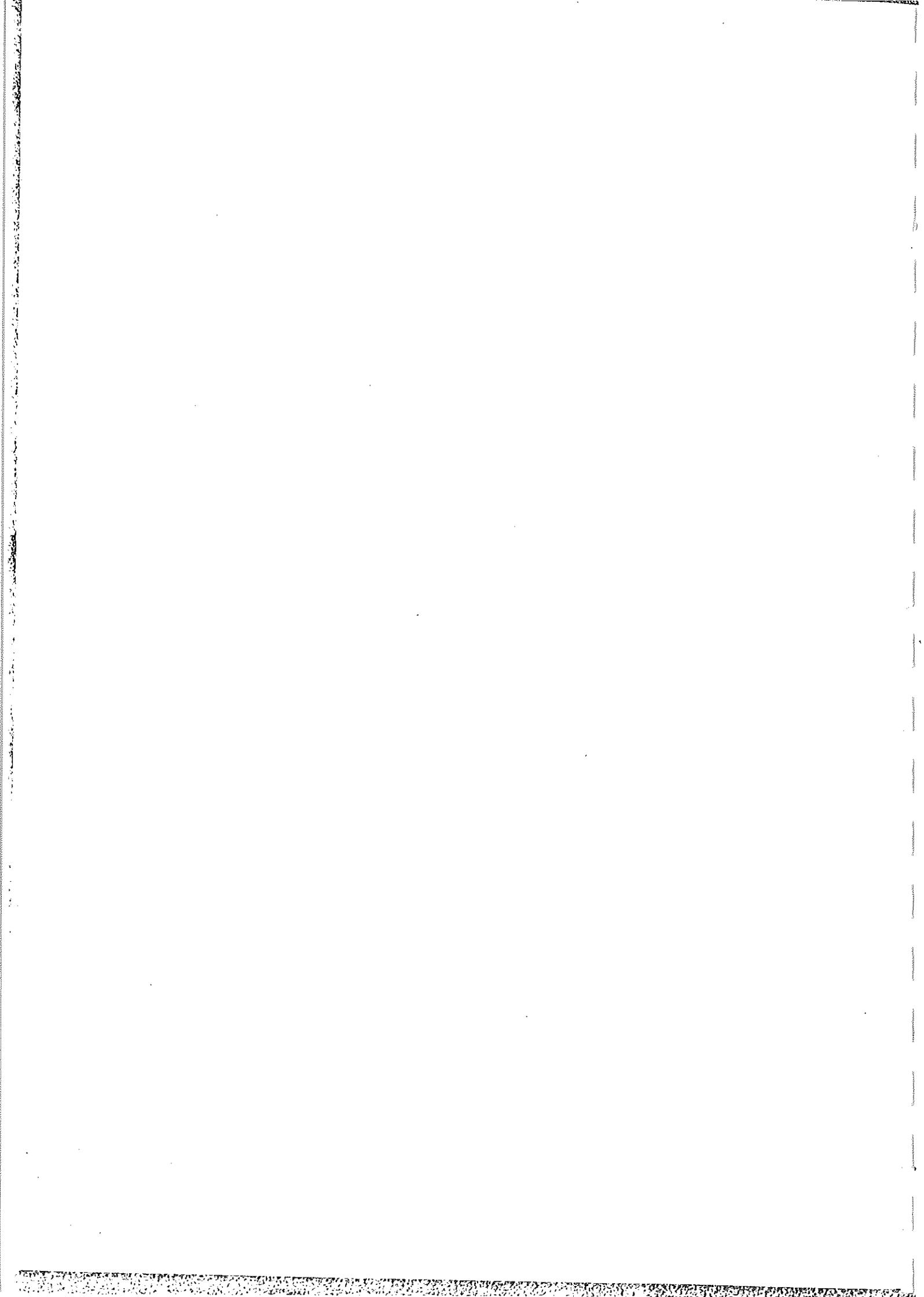
Le bassin du Doubs à Labergement s'affirme comme un bassin karstique typique où toutes les unités participent à l'écoulement total avec une prépondérance des écoulements à transit rapide.

Le sous-bassin de Pontarlier présente des particularités hydrodynamiques conditionnées par la présence des lacs de St Point et Remoray. Le ruissellement retardé est très important ce qui s'accorde à l'idée que l'on peut se faire de l'effet régulateur de l'inertie du lac sur la propagation des crues. Les unités principale et secondaire, du fait de l'existence de la retenue, représente les "couches" profondes du lac et ne sont sollicitées qu'en période de très basses eaux.

Le bassin du Drugeon n'est pas typiquement un bassin karstique et sa dynamique correspond au schéma d'interprétation classique.

Le bassin des sources de la Loue est karstique mais la surface des aquifères principal (microkarst) et secondaire (karst noyé) ainsi que leur participation au régime total traduisent l'importance du phénomène de capture (du lit du Doubs) sur l'hydrodynamisme des sources.

En résumé chacun des bassins possède des caractéristiques dynamiques propres que perturbent des phénomènes hydrologiques de surface tels que l'enneigement, l'inertie des lacs et l'apport par fissures. L'influence de ces phénomènes ajoutée aux imprécisions du modèle employé complexifie, dans un contexte karstique, les tentatives de simulation des écoulements. De plus, la conception du modèle ne permet pas de reproduire la connexité des différents systèmes mis en évidence par le calcul des bilans hydrologiques (Chapitre II).



. C O N C L U S I O N S .

Les Hauts Bassins du Doubs et de la Loue se caractérisent météorologiquement par une pluviosité annuelle moyenne importante qui est comprise entre 1253.5 mm à Pontarlier et 1686.1 mm à Mouthe. La variabilité annuelle est importante (1190.1 mm à Mouthe, 945.5 mm à Labergement, 973.1 mm à Pontarlier et 1083 mm à Ouhans). La nivosité annuelle représente en moyenne une fraction des précipitations totales de 31.5% à Mouthe (531.1 mm) de 34% à Labergement (462.9 mm), de 32.9% à Pontarlier (478 mm) et de 22.8% à Ouhans (349.1 mm). De fait il pleut en moyenne un jour sur deux et pendant un tiers de ces jours on observe des chutes de neige. (Les jours pluvieux sont en moyenne au nombre de 163 à Mouthe, 190 à Labergement, 186 à Pontarlier et 178 à Ouhans qui englobe respectivement 54, 59, 60 et 40 jours de neige). L'évapotranspiration potentielle calculée selon Thornthwaite représente (en moyenne) 526.2 mm à Mouthe (pour une température de 5.9°C) et 558.4 mm à Pontarlier (pour 7.3°C), soit respectivement 31 et 39% de la pluviosité annuelle moyenne enregistrée en ces points. (L'ETP représente 36% de la pluviosité de Labergement et 36% de celle de Ouhans en considérant respectivement les valeurs calculées à Mouthe et à Pontarlier). Ainsi la pluviométrie efficace moyenne est de 1160 mm à Mouthe, 948 mm à Labergement, 695 mm à Pontarlier et de 973 mm à Ouhans. (On estime la part de l'évaporation (ETP_I) à 199.7 mm à Mouthe, 216.9 mm à Labergement, 221.5 mm à Pontarlier et 204.2 mm à Ouhans (ce qui représente respectivement 14%, 17.3%, 17.5% et 16.3% des précipitations annuelles moyennes). La variabilité des paramètres météorologiques étudiés est importante en chacun des points d'observation (mais les différents relevés ne sont ni synchrones, ni quantitativement identiques). Les liaisons statistiques sont très significatives lorsque l'on considère les modules pluviométriques enregistrés et efficaces. Elles indiquent des particularités locales lorsque l'on s'intéresse à la nature des précipitations, à leur fréquence d'observation et à leur intensité. Ainsi les régions de Mouthe, de Labergement et de Ouhans sont de forte pluviosité par rapport au secteur de Pontarlier. On reconnaît trois zones nivométriques sur la région (les précipitations neigeuses sont : très abondantes sur la zone de Mouthe, importantes sur la zone de Labergement - Pontarlier, et faibles sur la zone de Ouhans).

Les débits moyens journaliers sont de 4.4 m³/s pour le Doubs à Labergement, 7.8 m³/s pour le Doubs à Pontarlier, 3.3 m³/s pour le Drugeon à Vuillecin et 10.4 m³/s pour la Loue à sa source. La distribution des débits du Doubs à Labergement sont pour 75% > 1m³/s, 50% > 2m³/s, 25% > 5m³/s et 10% > 10m³/s. Pour les mêmes pourcentages les débits dépassés sont successivement de 2.5 m³/s, 4.5 m³/s, 9 m³/s et 19.5 m³/s à Pontarlier ; ils sont de 0.5 m³/s, 1.5 m³/s, 3.5 m³/s et 6.8 m³/s pour le Drugeon à Vuillecin et de 4.5 m³/s, 8 m³/s, 2.5 m³/s et 19.5 m³/s pour la Loue à sa source.

Les modules hydrométriques s'ajustent à une loi de Galton (log normale) si on considère un pas de temps supérieur à la décade. (En deçà de cette limite le débit moyen d'une période est déterminé par celui de la période précédente). Les résultats des bilans hydrologiques permettent d'envisager, au niveau régional, un schéma d'écoulement qui reconnaît trois niveaux de circulation (local, intermédiaire et régional). Ainsi l'unité hydrogéologique des Hauts Bassins du Doubs et de la Loue participerait aux écoulements du Doubs (en aval de Ville du Pont) et des sources : de la Loue, de l'Ain et de l'Orbe. La décomposition des hydrogrammes de décrue montre que chacun des systèmes étudiés résulte de la juxtaposition de quatre unités hydrologiques (unités primaire = microkarst ; secondaire = karst noyé ; hypodermique = karst superficiel et de ruissellement). Un essai de reconstitution des débits peut être tenté avec un modèle de même conception.

Le modèle hydrométéorologique MERO donne des résultats satisfaisants sur une partie de l'année ce qui justifie statistiquement la détermination de la participation des différents aquifères à l'écoulement total du système. L'ensemble des résultats donne une représentation schématique de chaque bassin qui s'exprime par la surface équivalente, le temps de tarissement et la participation à l'écoulement de chacune des quatre unités reconnues.

Le bassin du Doubs à Labergement est un exemple de bassin karstique marqué par des réponses rapides et quantitativement importantes aux impulsions météorologiques. Ses réserves sont par contre limitées ($A_1 = 5 \text{ km}^2$ et $A_2 = 15 \text{ km}^2$).

Le sous-bassin du Doubs à Pontarlier révèle un hydrodynamisme particulier (participation de 83% de l'unité d'écoulement hypodermique et de 1% de l'unité principale) qui semble déterminé par la présence des lacs de St Point et de Remoray. Ces plans d'eau perturberaient, par inertie, la propagation des crues du Doubs entre Labergement et Pontarlier.

Le bassin du Drugeon à Vuillecin n'est pas karstique, ses réponses hydrodynamiques sont donc moins brutales et influencées par la capacité de rétention des formations superficielles.

Le bassin des sources de la Loue montre dans le système de référence utilisé, des surfaces de recharge importante pour le microkarst et le karst noyé accompagnées de leur participation accrue à l'écoulement global. Ces hypothèses seraient une expression des débits détournés par fissures du lit du Doubs au bénéfice de la Loue (mais ce phénomène de capture ne fonctionnerait pas à volume constant).

Par ailleurs, les résultats de la simulation illustrent l'influence de l'enneigement sur l'hydrogramme qui :

- limite l'alimentation des différentes unités d'écoulement du mois de Décembre au mois de Février (bien que les modules pluviométriques (nivométriques) soient importants) ;

- provoque les crues observées en Avril (qui s'est révélé comme un des mois les plus pluvieux).

En résumé la représentation des systèmes karstiques par quatre réservoirs superposés permet une simulation satisfaisante des écoulements en automne. Cette conception se justifie hydrologiquement si l'on considère une unité de ruissellement et trois unités d'écoulement karstique (unités : superficielle, noyée et microfissurale). Néanmoins, la description des différents systèmes (par la fréquence et l'intensité des pluies, et par leur géologie, leur fissuration ...) trouve son expression dans la valeur des paramètres de forme (surface de recharge et temps de concentration) et d'hydrodynamisme (temps de tarissement) utilisés par le modèle. Aussi, l'amélioration des résultats de la simulation rend nécessaire la maîtrise : de la variabilité des paramètres météorologiques ; des phénomènes hydrologiques induits par la constitution puis la fonte d'une couverture de neige ; des bilans hydrologiques au niveau du sol ; des perturbations hydrodynamiques générées par la traversée d'un plan d'eau Par ailleurs, il est indispensable d'intégrer les communications possibles entre les différents systèmes en se référant aux degrés de fissuration et de karstification des masses calcaires.

D E U X I E M E P A R T I E

I N F L U E N C E D E S P H E N O M E N E S D E S U R F A C E S U R L ' H Y D R O G R A M M E

Les Hauts Bassins du Doubs et de la Loue constituent une unité hydrogéologique particulière où coexistent (voir première partie) : un réseau d'écoulements superficiels drainés par le Doubs à l'extérieur du système et un ensemble de circulations profondes (au sein de la masse des calcaires du Jurassique supérieur) qui subissent l'attraction des bassins de l'Orbe (sur la limite méridionale du secteur (Massif du Risoux-Mt d'Or)), de l'Ain (au voisinage de l'accident de Mouthe pour le bassin amont du Doubs et dans la région de Frasné pour les formations superficielles et crétacées du bassin du Dugeon), et des sources de la Loue (sur le reste du bassin).

Le régime d'écoulement du réseau hydrographique traduit l'influence de phénomènes hydrologiques particuliers qui modifient localement ses réponses hydrodynamiques ou leur transmission. Il s'agit de :

- l'enneigement qui perturbe temporairement (de Février à fin Avril) l'importance et la fréquence des infiltrations (notamment sur le bassin du Doubs en amont de Pontarlier qui intègre les plus hauts reliefs régionaux) ;

- la présence des lacs de Remoray mais surtout de St Point qui constitue un élargissement du lit du Doubs sur (et dans) des formations glaciaires ;

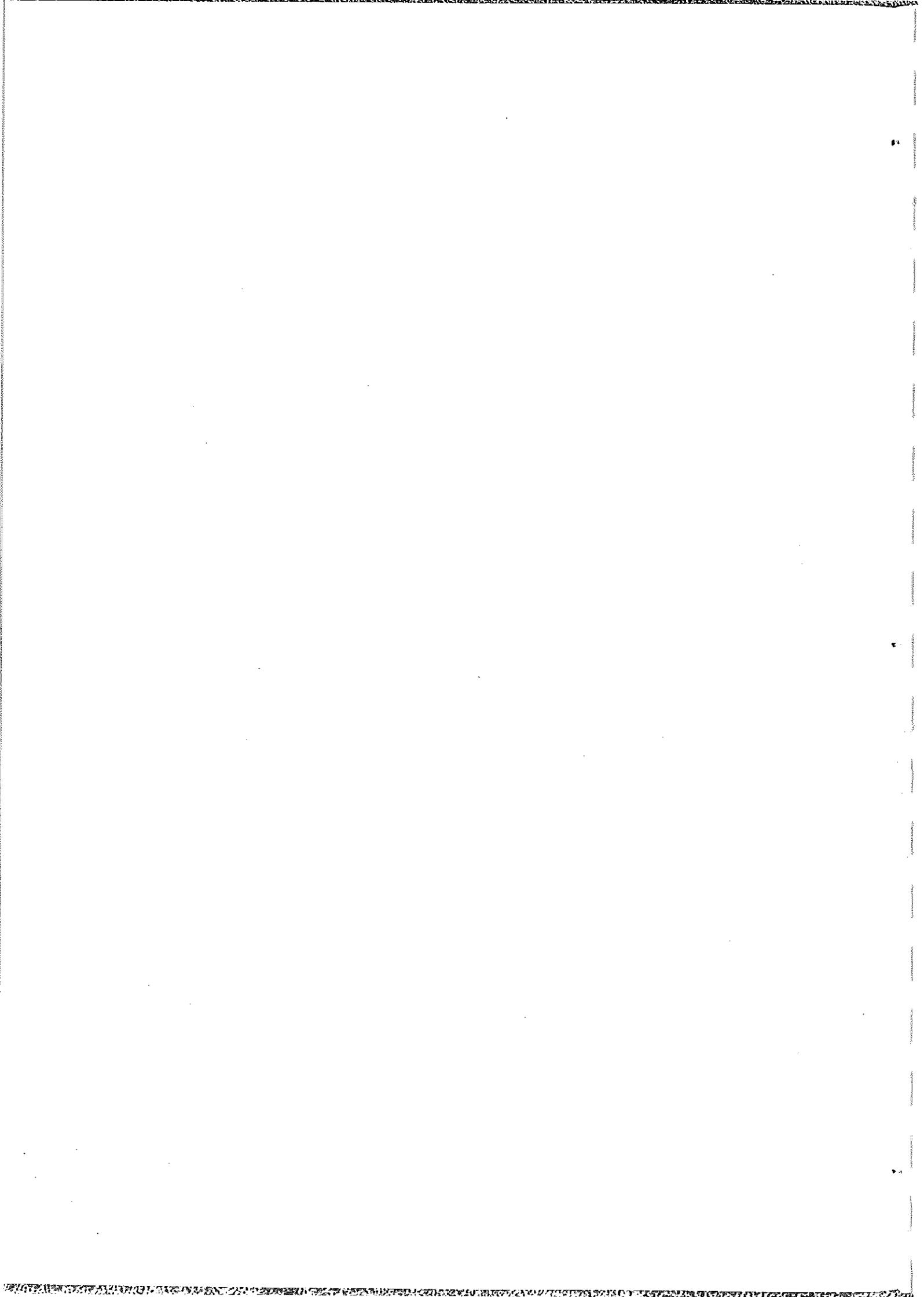
- le détournement par fissures ouvertes dans son lit, d'une partie des débits du Doubs (en aval de Pontarlier) vers les sources de la Loue.

Cette deuxième partie propose successivement :

. une réflexion par simulation des modalités et la représentation régionale de la fusion nivale ;

. une description qualitative de la transmission des impulsions hydrodynamiques au travers du lac de St Point ;

. une approche quantitative sur l'importance des volumes du Doubs détournés par pertes au profit des sources de la Loue.



ESSAI DE SIMULATION DE LA FUSION NIVALE

. Introduction .

Les précipitations neigeuses apparaissent comme perturbatrices de l'alimentation des aquifères puisque l'enneigement conduit à l'immobilisation temporaire de masses d'eau plus ou moins importantes. De fait les infiltrations rapportées à une période hivernale (j), inférieure à la saison, ne représentent qu'une fraction du bilan hydrique (Somme des précipitations de j - ETR de j).

Les données météorologiques et nivométriques nécessaires à l'approche quantitative du phénomène (albédo, vents, état du ciel, stratification physique et thermique de la couche de neige ...) ne sont que rarement enregistrées. (En France de telles chroniques sont établies dans le massif de la Chartreuse à la station météorologique du Col de Porte). Cependant la fusion est déclenchée par des échanges thermiques qui s'opèrent entre l'atmosphère et la couche de neige et à l'intérieur de celle-ci. Le phénomène est donc pour l'essentiel régi par les lois de la thermodynamique et il peut s'appréhender comme un problème de calorimétrie.

Le modèle HELIOS se propose de suivre la dynamique de fusion de la neige (c'est-à-dire l'évolution de l'équilibre H_2O solide \rightleftharpoons H_2O liquide) à partir de paramètres météorologiques communément observés. Cette approche thermodynamique de la fusion nivale doit permettre d'introduire un retard dans la libération des eaux d'infiltration, qui justifie les réponses hydrodynamiques enregistrées sous l'influence de ce phénomène.

Ainsi l'essai d'intégration de l'influence de l'enneigement au schéma hydrologique classique nécessite :

- la description théorique de la nature, de la localisation et de l'importance des échanges thermiques pour élaborer un modèle de fusion -
- la justification critique des modifications apportées au modèle pour porter la simulation à l'échelle du bassin hydrogéologique -
- la mise en parallèle des précipitations corrigées avec les hydrogrammes pour juger de la qualité des résultats et des hypothèses de base -
- un essai de simulation des écoulements en période hivernale pour définir quantitativement les modifications apportées au signal pluie.

Remarque : Une note de travail de l'Etablissement d'Etudes et de Recherches Météorologiques (J.P. NAVARRE, 1983) développe un type de modèle déterministe de fonte nivale (Modèle Génépi) qui nécessite pour son utilisation des profils de température, de densité et de teneur en eau liquide. Les données nécessaires à son fonctionnement sont la température et l'humidité, le rayonnement solaire global et réfléchi (plus les hauteurs de précipitations). Les résultats obtenus après calages sur deux épisodes de fonte (du 14 au 19.4.1981 et du 22 au 26.4.1982) rendent compte des difficultés qu'il reste à résoudre pour représenter le phénomène de fusion.

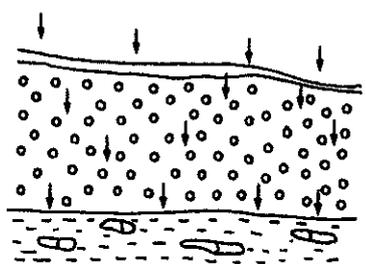
I - SIMULATION DE LA FUSION NIVALE : LE MODELE HELIOS

A. FONDEMENTS DU MODELE

L'approche thermodynamique de la fusion nivale revient à localiser les échanges thermiques et les transferts d'énergie résultants pour poser un bilan énergétique qui sert de base à la résolution du problème.

1 - LOCALISATION DES ECHANGES THERMIQUES

A l'intérieur d'une couche de neige les échanges thermiques sont essentiellement verticaux et ils se manifestent :



- au contact neige-atmosphère
- à l'intérieur du manteau neigeux
- à l'interface sol-neige.

La neige est un bon isolant thermique aussi les déperditions calorifiques vers le sol peuvent-elles être négligées.

Ainsi décrite la couche de neige s'assimile à un système bicouche (fig. 28) composé :

- d'un cortex de faible épaisseur (nH_2O_s) et d'inertie thermique nulle (il ne peut donc pas fixer les frigories)
- d'un manteau (mH_2O_s) où s'accumulent les "frigories" (calories négatives) immobilisées par capacité calorifique ($-Q''_{cal}$).

Les "frigories" du manteau ne peuvent pas être transmises vers la surface et la dynamique de fusion suit l'évolution de l'équilibre $H_2O_s \rightleftharpoons H_2O_l$ dans le cortex puis dans le manteau neigeux.

Le réchauffement du cortex fournit une lame de fusion qui percole vers le manteau (en restant à $0^\circ C$) où elle règle en consommant tout ou partie des "frigories". L'excédent, s'il existe, constitue l'unique alimentation des différentes unités d'écoulement.

Remarque : Un phénomène de sublimation s'observe à la surface de la neige aussi les lames de fusion estimées à partir du modèle HELIOS doivent subir, pour le calcul des bilans hydrologiques, les effets de l'ETP correspondant à la période considérée.

2 - LES TRANSFERTS D'ENERGIE (fig. 28)

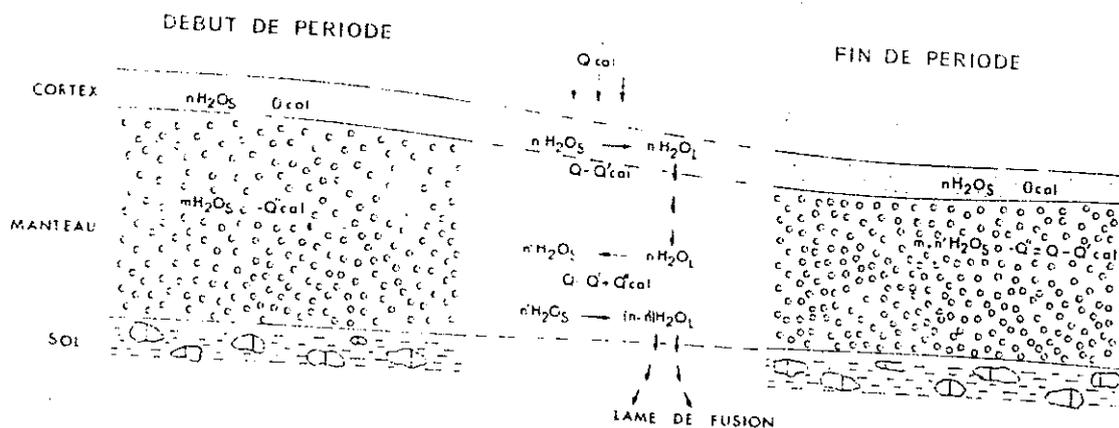


Figure 28 : Localisation des échanges thermiques et transferts d'énergie

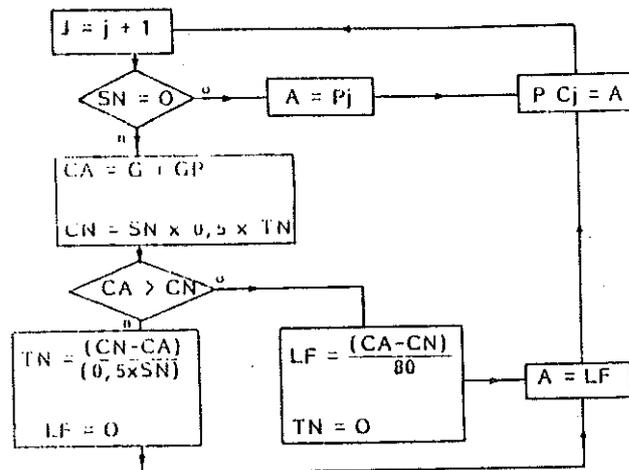
Les Q calories atmosphériques provoquent l'apparition de n g H_2O_l ($n = Q/80$ où $80 cal/g$ ($334.4 J/g$) correspond à la chaleur latente de la glace à $0^\circ C$). La quantité d'eau qui se transforme en neige ($n'H_2O_s$) dépendra du stock de frigories ($-Q''_{cal}$) accumulées dans le manteau ($n'=Q'/80$). Le reste ($n-n'H_2O_l$) s'infiltré.

3 - CONCLUSION : LE MODELE HELIOS

En résumé les apports énergétiques de l'atmosphère génèrent l'apparition d'une lame de fusion lorsque leur quantité est suffisante pour neutraliser la totalité des "frigories" contenues dans le manteau.

Le modèle de simulation HELIOS (fig. 29) calcule une lame de fusion (LF) au cours d'une période j en posant le bilan thermique de la période après estimation :

- des apports calorifiques (CA) solaires (G) et atmosphériques (GP) liés à la pluie
- du stock des "frigories" (Calories Négatives : CN) fixées dans le manteau.



- SN : Stock de Neige
- CA : Calories Apportées par le soleil (G) et les pluies (GP)
- CN : Calories Négatives contenues dans le manteau
(TN = Température de la Neige)
- LF : Lame de Fusion
- PCj : Pluie Corrigée pour la période considérée (j)

Figure 29 : Ordinogramme simplifié du Modèle HELIOS

B. ARTICULATIONS DU MODELE

1 - ESTIMATION DES APPORTS ENERGETIQUES

L'énergie (CA) fournie au système à l'interface atmosphère-neige possède deux origines : l'une solaire (G), l'autre atmosphérique (GP).

a. L'énergie solaire (G)

La quantité d'énergie solaire reçue par une surface plane durant une période j s'exprime par la formule classique (in ROCHE, 1963) :

$$G = G_0 \times a \times ((S_j/S_0) + b)$$

avec G = rayonnement solaire

G_0 = radiation extra-terrestre

S_0 = durée théorique de la période

S_j = durée d'insolation enregistrée pendant cette période

a et b = coefficients de latitude.

Les paramètres G_0 et S_0 sont calculés à partir des expressions de DOGNAUX réactualisées par BEDEL, JAN et PERARNAUD (1980). Ces auteurs ont par ailleurs déterminé les paramètres de latitude a et b . Ils estiment la valeur de a comprise entre 0.5 et 0.537 et celle de b entre 0.193 et 0.232 (J.A. BEDEL, J. JAN, V. PERARNAUD (1980) : Le gisement solaire en France. L'irradiation solaire globale reçue par une surface horizontale).

Remarque : Le détail du calcul des paramètres astronomiques est donné en annexe (Annexe IV).

b. L'énergie atmosphérique (GP)

Les précipitations pluvieuses observées à température positive apportent une quantité d'énergie fonction de la masse d'eau qui s'évalue par la formule :

$$GP = P_j \times T_j \times 1000 \text{ g}$$

avec P = Précipitation
 T = Température moyenne de l'air

Remarque : Si la température est négative ou nulle on admet que le produit des pluies va grossir le stock neigeux (SN)

2 - ESTIMATION DES FRIGORIES DANS LE MANTEAU (CN)

La quantité de "frigories" (CN) accumulées dans le manteau est estimée en fonction de la plus basse température (T_M) observée au cours de la période considérée et "enregistrée" par la neige ($T_N = T_M$).

Ainsi $CN = - T_N j \times 0.5 \times SN$ où 0.5 représente la capacité calorifique

3 - CALCUL DE LA LAME DE FUSION (LF)

La lame de fusion résultante (LF) s'exprime en grammes d'eau et elle correspond au rapport de l'énergie excédentaire ($CF - CN$) par la chaleur latente de fusion de la neige à 0°C (puisque les "frigories" sont "neutralisées") que nous avons considérée égale à celle de la glace (soit 80cal/g).

4 - REMARQUES

A ce calcul fondamental s'ajoutent des opérations annexes destinées à :

- calculer la température du manteau neigeux en fin de période lorsque la totalité des frigories n'a pas été neutralisée
- corriger (avec le coefficient cc) les valeurs héliométriques en fonction de la distance qui sépare le point de simulation de la station d'enregistrement
- décider de l'apparition ou de l'augmentation de la couche de neige en fonction de la température du sol (TS) ou de celle de l'air (T).

C. EXEMPLE D'APPLICATION

1 - PRESENTATION

La simulation porte sur les données enregistrées à la station thermo-pluviométrique de Mouthe (935m) durant l'hiver 1969-70. L'analyse météorologique

(1ère partie, chapitre I) révèle qu'à cette station les précipitations neigeuses représentent au moins 50% de la pluviosité mensuelle du mois de Novembre au mois d'Avril. La proportion interannuelle (du 1.9.69 au 31.8.83) est de 31.5% soit 531.1 mm. Ce rapport atteint 37% (732.6 mm) durant le cycle 1969-70.

2 - RESULTATS

La figure 30 montre sur huit mois l'évolution journalière du stock de neige. Trois cycles de durée et d'intensité croissantes se succèdent de Novembre à Avril.

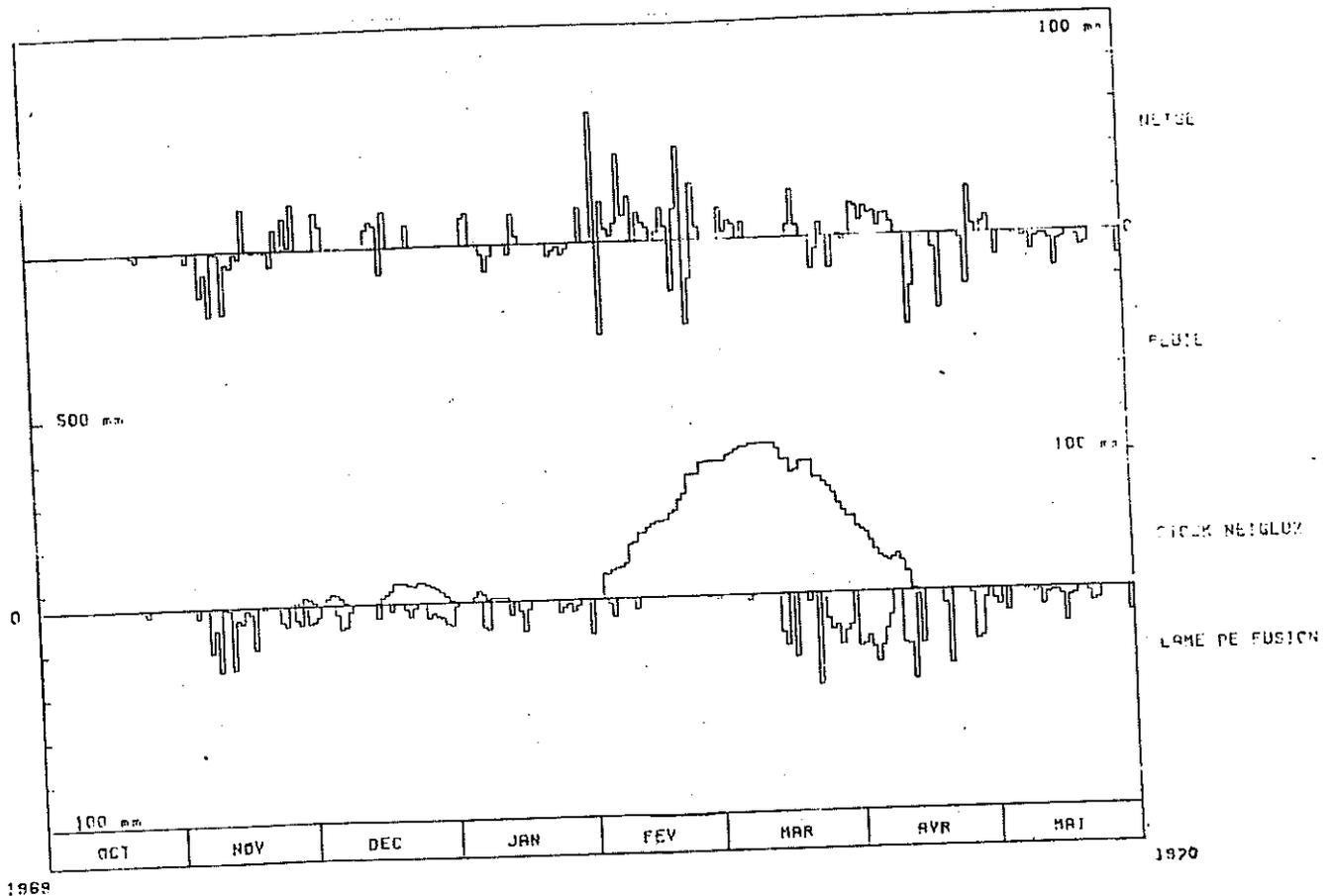


Figure 30 : Exemple de simulation de la fusion nivale à Mouthe

Leur durée respective est de 13 jours (du 26.11 au 8.12.1969), 36 jours (du 14.12.69 au 19.1.70) et 74 jours (du 2.2 au 16.4.1970). Les épaisseurs maximales calculées des couches de neige successives sont relevées le 4.12 (27.7mm) et le 20.12.1969 (47.9mm), puis sur la période du 8 au 12.3.1970 (355.8mm).

Pour l'exemple, les paramètres météorologiques (P, T et S) et les résultats de la simulation (Ray, SN, LF), sur le premier cycle neigeux, sont reportés dans le tableau XXXV. (Le signe "moins" associé à la valeur des précipitations signifie qu'elles se sont produites sous forme de neige).

Remarque : Les données héliométriques sont celles observées à la station de Pontarlier et limitées à 90% de leur valeur ($cc = 0.9$).

	J	Pmm	T°C	TM°C	S h/10	Ray. cal/m ²	Stock cm	Lame de fusion mm
XI	26	-14.6	.6	-4.2	.6	532885.3	7.9	6.7
	27	-1	4.1	-4.8	4.1	962149.5	0	8.9
	28	-21	0	-12.4	0	0	21	0
	29	0	2.7	-9.2	2.7	771707.7	12.6	8.4
	30	0	2.4	-20.4	2.4	727752.8	5.1	7.5
XII	1	0	4.8	-6	4.8	1000000	0	5.1
	2	0	6.9	-19.6	6.9	1300000	0	0
	3	-17	0	-13.6	0	0	17	0
	4	-10.7	0	.6	0	0	27.7	0
	5	0	.2	-7	.2	440094.6	23.4	4.3
	6	-.6	6.6	-22.2	6.6	1200000	12.6	11.4
	7	0	4.6	-19.2	4.6	930408.1	2.4	10.2
	8	-.5	6.3	-18.6	6.3	1100000	0	2.9

Tableau XXXV : Exemple d'une simulation de la fusion de la première neige à Mouthe en 1969. Résultats journaliers.

Légende : P = précipitation journalière (négative si neige)
 T = température moyenne ; TM = température minimale
 S = durée d'ensoleillement en dixième d'heure
 Ray = rayonnement.

3 - CONCLUSION

Les résultats de la simulation de la fusion nivale à Mouthe au cours d'une période particulièrement neigeuse correspondent aux observations faites dans les régions de moyenne altitude. A une première neige fugace, succèdent une couche d'hiver conservée par les basses températures, puis une couche de printemps entretenue par d'abondantes chutes de neige.

D. CONCLUSION

Bien que soumise à l'influence de nombreux paramètres, la fusion d'une couche de neige peut être simulée en se basant sur le changement de phase de l'eau par consommation d'énergie.

Le modèle HELIOS évalue les apports énergétiques solaire et atmosphérique puis déduit les lames de fusion équivalentes après neutralisation des "frigories" accumulées dans le manteau neigeux.

L'application aux données enregistrées à Mouthe, où les précipitations neigeuses sont abondantes, durant un cycle particulièrement neigeux (1969-70) donne des résultats cohérents avec les observations régionales. Il convient néanmoins de s'interroger sur la validité du modèle HELIOS à l'échelle du bassin versant.

II - SIMULATION DE LA FUSION NIVALE A L'ECHELLE DU BASSIN VERSANT

De part son principe thermodynamique le modèle HELIOS tel qu'il est décrit intéresse une couche de neige plane et uniformément répartie. La simulation à l'échelle du bassin versant rend en outre nécessaire l'emploi de nouveaux paramètres destinés à intégrer la variabilité régionale des phénomènes météorologiques.

A. PRINCIPE : LES ZONES NIVOMETRIQUES

1 - CRITIQUE DES DONNEES METEOROLOGIQUES

Les stations météorologiques sont implantées à des altitudes très variables mais peu de données sont enregistrées sur les plus hauts sommets. De ce fait, la pluviométrie et la thermométrie relevées en un point ne constituent pas la référence moyenne d'un bassin versant. (De même l'héliométrie mesurée à une station ne représente pas le standard régional).

En résumé il est délicat de rendre compte exactement de l'importance de la couverture neigeuse sur une région et à fortiori de quantifier les lames de fusion à partir d'enregistrements ponctuels. Dès lors, tout essai d'estimation des infiltrations d'origine nivale à l'échelle du bassin fait nécessairement appel à des hypothèses simplificatrices.

2 - HYPOTHESES

Un bassin versant pourvu d'une station météorologique englobe deux domaines qui correspondent :

- l'un au champ de représentation de la station
 - l'autre à tous les points où les paramètres météorologiques diffèrent.
- L'extension du premier est donc très réduite.

Dans cette optique le modèle HELIOS calcule une lame de fusion équivalente pour la totalité d'un bassin en considérant deux zones nivométriques définies par l'altitude.

3 - LES ZONES NIVOMETRIQUES

On distingue une zone basse et une zone haute (Figure 31).

a. La zone basse (ZB)

Cette zone regroupe l'ensemble des points qui se situent à des altitudes voisines (à plus ou moins 100 à 150 m) de celles de la station météorologique. En pratique, c'est surtout la structure locale qui conditionne l'importance accordée à ce domaine.

Sur ce domaine le modèle HELIOS s'applique sans modification du principe de base. La constitution d'une couche de neige puis sa fonte sont déduites des données météorologiques enregistrées (P_j, T_j, S_j). Un coefficient (CB) minore la durée d'insolation (S_j) et par conséquent l'apport d'énergie solaire. La valeur de ce paramètre est fonction :

- de la distance qui sépare la région de simulation de la station héliométrique
- du relief et de l'orientation des structures. En effet la fonte sur les pentes enneigées dépend beaucoup de leur exposition.

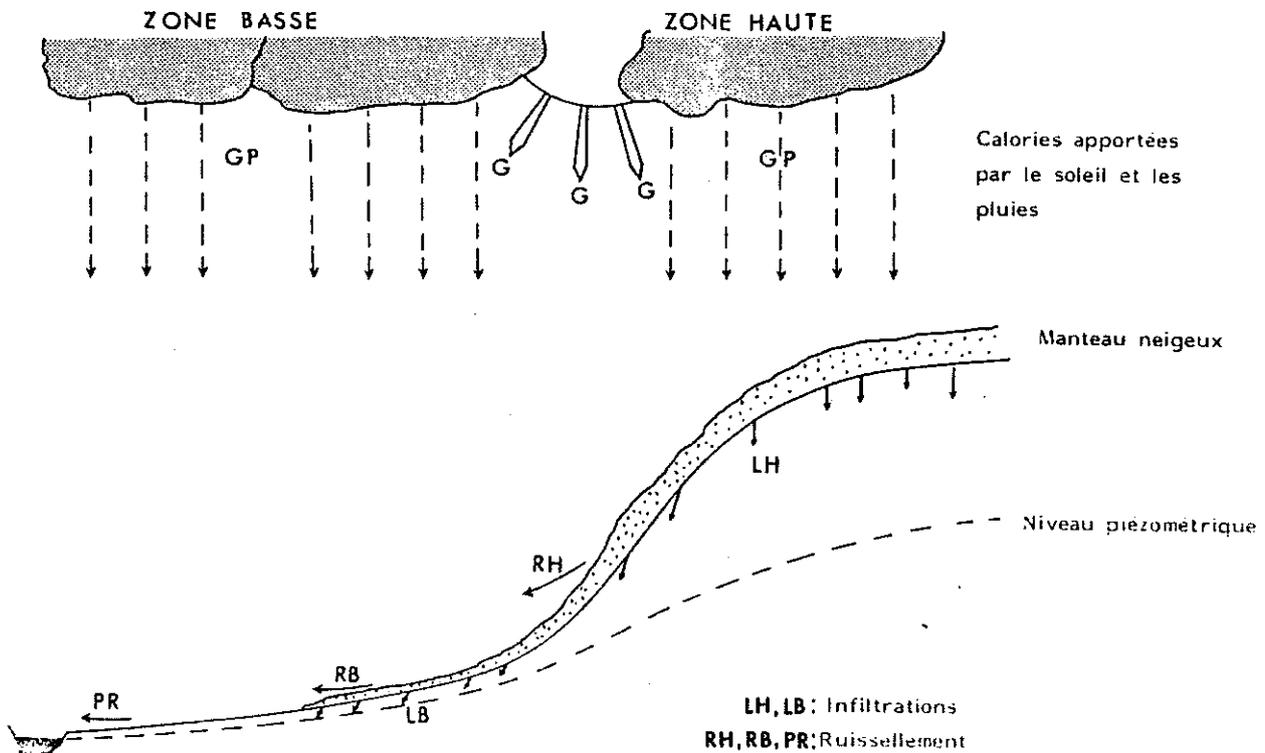


Figure 31 : Répartition des zones nivométriques en fonction de l'altitude. Apports calorifiques atmosphériques.

b. La zone haute (ZH)

Sur cette partie du bassin les précipitations et les écarts thermiques sont amplifiés par rapport à ceux observés sur la zone basse. Mais aucune estimation précise de leurs valeurs ne peut être tentée. Aussi le modèle HELIOS ne modifie pas le signal entrée (P_j) mais s'attache à prolonger l'existence du manteau neigeux par ralentissement de la fusion. Ce résultat s'obtient par la prise en considération des températures minimales enregistrées (TM_j) et en régulant comme précédemment (par un coefficient CH) les données héliométriques. L'introduction des températures minimales augmente la quantité des "frigories" mantellaires et le coefficient CH diminue les apports calorifiques reçus par le système.

c. Remarques

Dans l'ordinogramme complet (figure 32) il est convenu que les précipitations pluvieuses grossissent le stock neigeux de l'une et l'autre zone lorsque :

- les calories apportées ne suffisent pas à amorcer la fusion (dans le cas où une couche de neige existe)
- la température de la période (T_j ou TM_j) ou celle du sol (TS) est négative (dans le cas où un stock neigeux n'a pas été constitué).

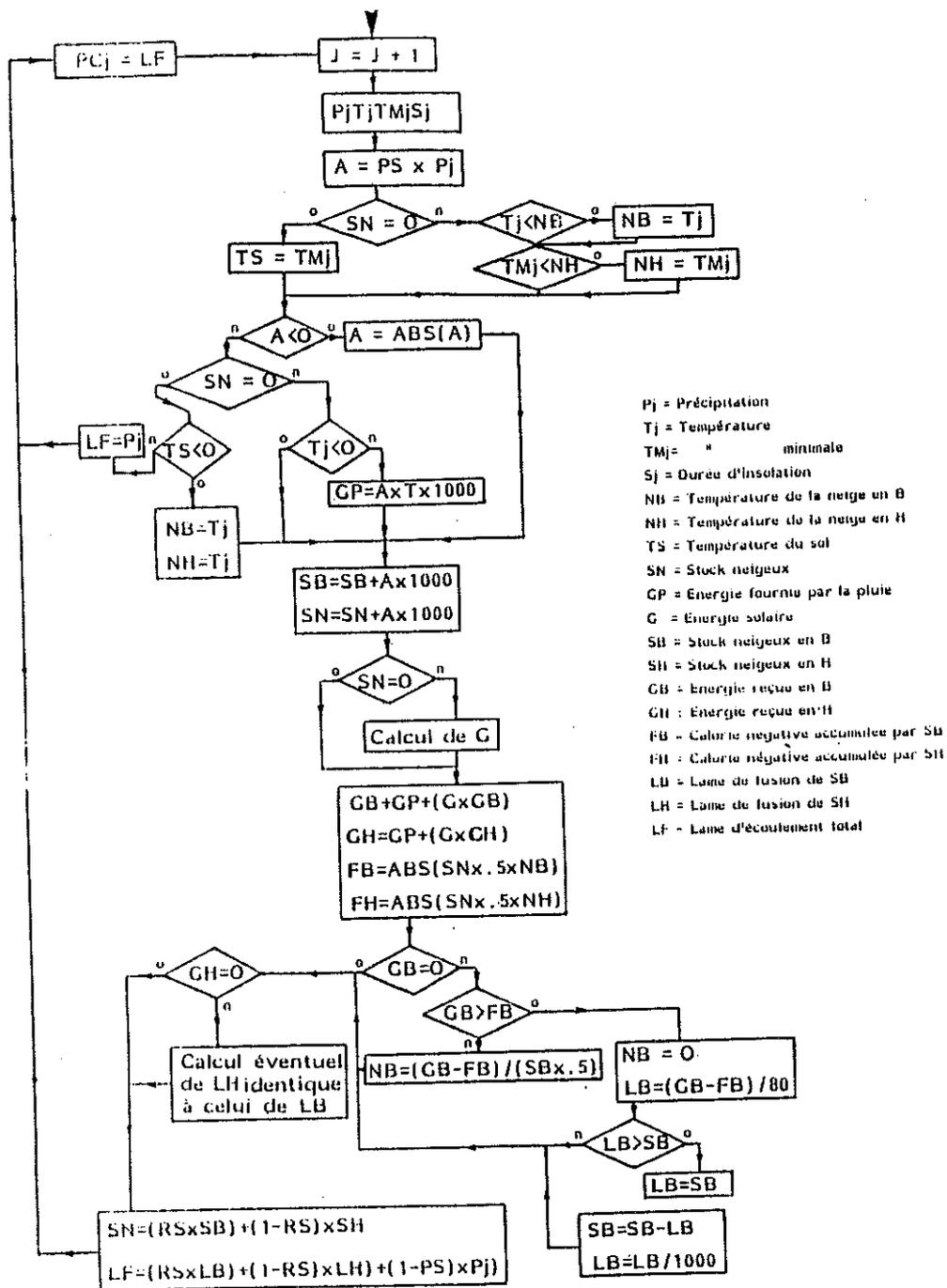


Figure 32 : Ordinogramme du modèle HELIOS

A.N Les précipitations neigeuses sont entrées sous forme négative.

La distinction entre les deux zones est introduite par la valeur de RS qui correspond au rapport de leurs surfaces.

Il faut noter par ailleurs qu'une partie des précipitations (sous forme de neige) participe directement au ruissellement et par conséquent s'ajoute à la lame d'écoulement (LF) calculée sur la période. (Le coefficient PS fixe l'importance du ruissellement).

La description précédente intéresse un bassin pourvu d'une seule station météorologique mais il est possible d'utiliser, sans modification du concept de base, des données provenant de plusieurs points d'observation.

4 - CONCLUSION

L'évaluation d'une lame de fusion équivalente à l'échelle d'un bassin hydrologique ne peut être que qualitative. Aucun des paramètres météorologiques nécessaires n'est régulièrement observé sur les secteurs les plus influencés par le phénomène. Aussi l'extrapolation régionale des données enregistrées en un point ne peut s'envisager que qualitativement.

Dans sa forme définitive le modèle HELIOS distingue :

- une zone basse qui s'assimile au champ de représentation de la (ou des) station(s) météorologique(s)
- une zone haute où la valeur des précipitations n'est pas modifiée, (donc elle est certainement sous-estimée), mais où la fusion est ralentie par modification des données énergétiques (températures et durées d'insolation).

Les deux domaines se caractérisent alors par des vitesses de fusion différentes et leur délimitation est pour l'essentiel soumise à un contrôle topographique et structural (par les paramètres d'échelle RS et PS et les paramètres de forme CB et CH).

B. CONCLUSION

L'estimation d'une lame de fusion équivalente sur la totalité d'un bassin ne peut être abordée directement par suite de la faible représentativité spatiale des observations météorologiques.

A cette échelle le modèle HELIOS évalue une lame de fusion moyenne en posant le bilan thermique sur deux zones où les vitesses de fusion diffèrent. A partir de ces hypothèses il est possible de comparer à l'hydrogramme les pluies corrigées sur la période hivernale.

III - APPLICATION AU HAUT BASSIN DU DOUBS

L'application du modèle HELIOS au Haut Bassin du Doubs est organisée en deux étapes destinées, en dernière analyse, à juger de la qualité de la simulation et de la validité des hypothèses posées.

La correction des précipitations durant un cycle exceptionnellement neigeux (1969-70) et leur comparaison avec la chronique des débits doit permettre de préciser les répercussions hydrodynamiques de l'enneigement. Puis les résultats obtenus par le modèle de simulation des écoulements MERO avant et après correction du signal entrée montre les améliorations apportées durant la période hivernale.

A. INFLUENCE DE L'ENNEIGEMENT SUR L'HYDRODYNAMISME DU DOUBS

L'essai de simulation porte sur le bassin du Doubs à Labergement où l'importance de la nivométrie doit transparaître sur l'hydrodynamisme de la rivière.

1 - RAPPELS

Le bassin du Doubs à Labergement correspond à la plus petite subdivision amont qu'il est actuellement possible de faire sur le Haut Bassin du Doubs (un limnigraphe est entré en fonction à la source même le 28.10.1979). Le bassin couvre 142 km² d'affleurements du Jurassique supérieur et du Crétacé masqués localement par des dépôts glaciaires. Les altitudes sont comprises entre 852 m (seuil de la station limnigraphique de Labergement) et 1460 m (sommet du Mt d'Or). Les stations météorologiques de Mouthe (935 m) et de Labergement (851 m) révèlent respectivement une nivométrie moyenne de 531.1 mm et 462.9 mm (soit 31.5% et 31.4% de la pluviométrie annuelle moyenne). Les températures moyennes

annuelles sont de 5.9°C à Mouthe et de 7.3°C à Pontarlier (ce paramètre n'est pas enregistré à Labergement). Le Doubs passe à Labergement après avoir quitté le synclinal de Mouthe (N60°) par les Gorges de Fourperet (N180°) en amont desquelles il reçoit les débits du Bief Rouge. Il rejoint ensuite le synclinal occupé par le lac de St Point.

2 - ESTIMATION DES PARAMETRES D'ECHELLE

La position des stations météorologiques à l'intérieur du bassin suppose une représentativité plus grande de la station de Mouthe d'autant que l'on se situe dans un domaine de moyenne montagne (50% de la surface du bassin est supérieure à 1200 m).

Ainsi pour évaluer le stock neigeux moyen et les lames d'écoulement qu'il libère, on suppose que :

- la station météorologique de Mouthe définit environ 80% de la pluviométrie du bassin
- la zone basse englobe les flancs d'anticlinaux limités aux altitudes inférieures à 1150 m. Elle correspond ainsi à 40% de la région de Mouthe et à 90% de celle de Labergement
- la zone haute se limite aux sommets de l'anticlinal du Risoux-Mt d'Or (60% de la surface pour Mouthe et 10% pour Labergement)
- la participation des précipitations au ruissellement est estimée sur les deux secteurs à 30% des valeurs enregistrées (que les précipitations soient pluvieuses ou neigeuses)
- l'héliométrie des deux secteurs est prise équivalente à 90% de celle mesurée à Pontarlier (station héliométrique la plus proche sur le versant français) pour la zone basse et elle est limitée à 80% pour la zone haute (où l'ensoleillement est certainement plus important en altitude, mais les structures sont orientées N60° ce qui limite la surface totale ensoleillée).

3 - RESULTATS

a. Partiels

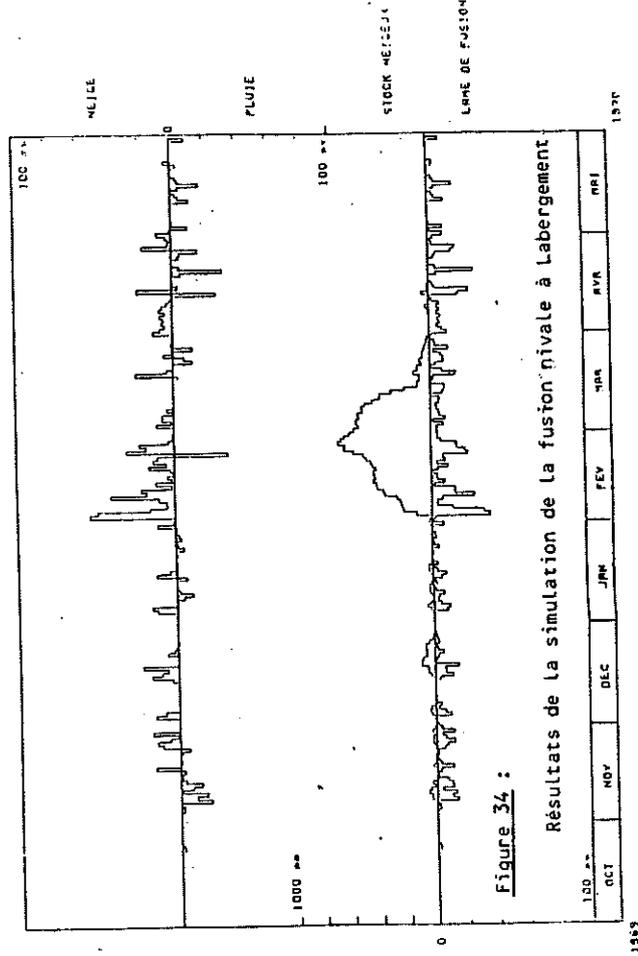
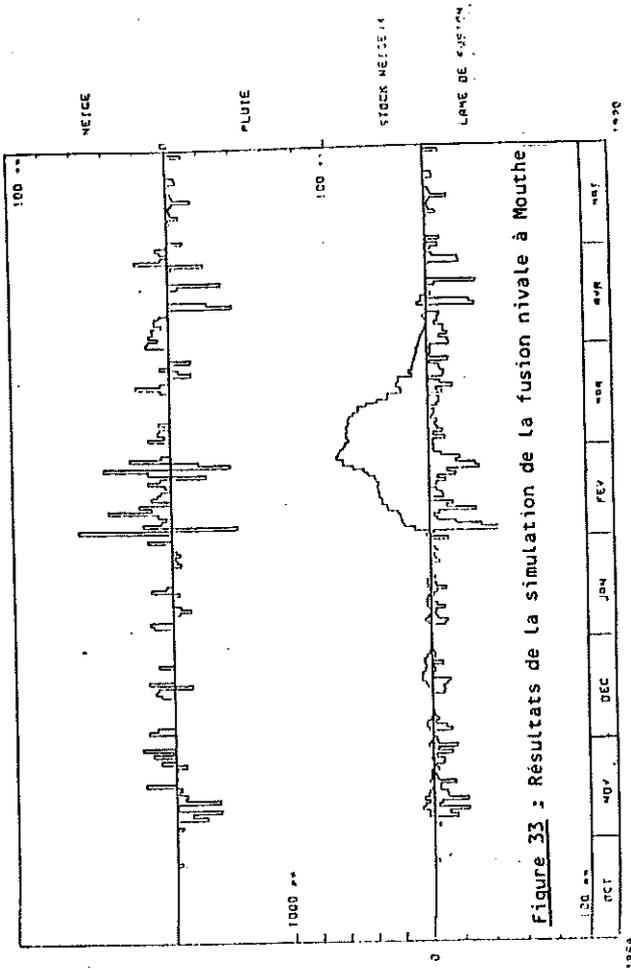
Les résultats obtenus sur chacun des secteurs météorologiques sont résumés par les figures 33 et 34.

La distribution des précipitations neigeuses montre la succession de quatre cycles neigeux. Les trois premiers sont de courtes durées (30 jours sur Novembre et Décembre pour le 1er, 15 jours à la fin Décembre pour le suivant et les 20 premiers jours de Janvier pour le troisième) et de faibles amplitudes (< 100 mm). La dernière couche de neige s'installe au début de Février et disparaît à la fin Mars ; le maximum d'épaisseur s'observe à la fin Février (700 mm). Les lames d'écoulement apparaissent presque ininterrompues sous les couvertures neigeuses successives.

b. Cumulés (figure 35)

Les modules d'écoulement journaliers (lames de fusion et d'écoulement direct) sont additionnés dans la proportion avancée (80% des écoulements de la région de Mouthe et 20% de ceux de Labergement) puis comparés aux débits moyens journaliers du Doubs à Labergement.

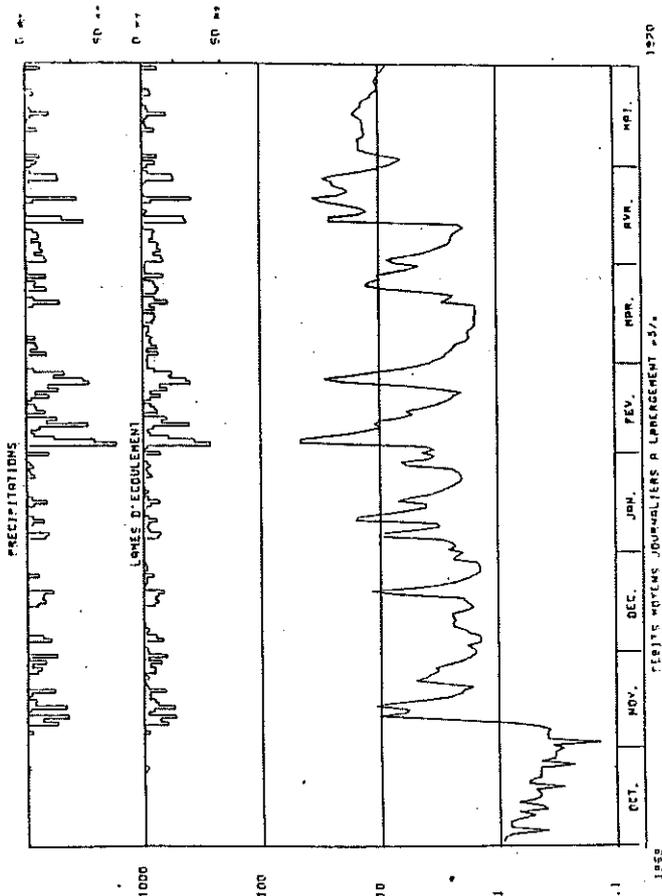
La chronique des débits montre des variations rapides et de fortes amplitudes au-dessus d'un seuil voisin de 2 m³/s. Seule la première quinzaine de Mars est marquée par une période de tarissement qui coïncide avec une séquence à pluviosité nulle et à faibles lames de fusion. La proportionnalité marquée qui lie l'amplitude des épisodes de crues aux modules pluviométriques est conservée. La diminution quantitative de ces derniers, observée après la simulation, s'opère au profit d'un étalement des écoulements.



4 - CONCLUSION

L'application du modèle HELIOS au secteur le plus amont du Haut Bassin du Doubs et aux données enregistrées durant un cycle particulièrement neigeux illustre l'alimentation des aquifères sous une couverture de neige. La fusion des couches neigeuses successives occasionne des infiltrations quasi continues qui entretiennent la saturation du milieu. Ainsi, la chronique des débits se distribue au-dessus d'une valeur de 2 m³/s et toutes les crues paraissent imputables au ruissellement (puisque leur observation n'entraîne pas une élévation du niveau de base de la rivière).

Figure 35 : Comparaison graphique sur le bassin du Doubs à Labergement entre les précipitations, les résultats de la simulation de la fusion nivale et des débits moyens journaliers.



B. ANALYSE QUANTITATIVE

L'analyse précédente montre que les infiltrations sont importantes sous la couverture de neige et qu'elles sont susceptibles d'entretenir l'état de saturation des réservoirs profonds. L'essai de reconstitution des écoulements, par le modèle hydrométéorologique MERO, à partir des précipitations corrigées, par le modèle HELIOS, est comparé, durant la période hivernale, à celui décrit précédemment. (Première Partie : Chapitre III), sur le Haut Bassin du Doubs (le sous-bassin du Doubs à Labergement).

1 - ANALYSE

Le tableau XXXVI permet de comparer les résultats de la simulation des écoulements obtenus durant le cycle 1975-76 avec et sans correction du signal pluie.

	N	D	J	F	M	A	M	J	Totaux Annuels
Pluie en mm	186.3	69.5	95.2	77.3	49.8	35.4	96.3	13	1207
Q observé $\times 10^6 m^3$	14.27	7.23	5.44	5.01	7.26	10.48	4.17	1.48	85.94
Q calculé $\times 10^6 m^3$	13.94	8.96	8.25	7.89	3.82	1.29	1.99	1.36	76.89
Ecart en %	1.27	10.7	20.5	22.35	3.14	78.7	47.3	4.2	5.6
Lame infiltrée mm	98.93	68.18	64.14	66	27.53	13.19	14.73	10.10	605.44
r	.891	.679	.328	.231	.08	.284	.08	.76	.63
Pluie corrigée mm	177.2	78.6	95.2	77.3	49.8	35.4	96.3	13	1207
Q calculé $\times 10^6 m^3$	13.26	9.	6.53	9.16	3.94	1.22	1.57	1.37	77.63
Ecart en %	3.7	10.94	9.1	23.3	29.6	79.1	45.3	3.8	5.1
Lame infiltrée mm	98.12	76.19	58.75	81.17	29.04	11.71	15.25	9.72	587.82
r	.82	.533	.1	.1	.09	.17	.133	.76	.6132

Tableau XXXVI : Résultats de la simulation des écoulements du Doubs à Labergement sans et avec correction des précipitations (de Novembre 1975 à Juin 1976).

D'une manière générale la valeur du coefficient de corrélation calculée entre les débits observés et reconstitués par le modèle, est plus faible lorsque l'on prend en compte les précipitations corrigées ($r = 0.63$ pour les 366 valeurs journalières dans le premier cas et $r = 0.613$ dans le second). Néanmoins la valeur des corrélations mensuelles n'est pas moins significative lorsqu'on intègre les pluies corrigées (sauf en Décembre où l'on obtient 0.533 alors que l'on avait 0.679 sans correction). (Pour 30 valeurs r test à 99.9% = 0.57 et il est de 0.562 pour 31 valeurs).

En quantité la répartition des précipitations par le modèle HELIOS n'est effective qu'entre les mois de Novembre et Décembre. (Sans correction on a des modules de 186.3 mm en Novembre et 69.5 mm en Décembre. Après correction, on obtient respectivement 177.2 mm et 78.6 mm). Les modules pluviométriques des autres mois sont identiques dans les deux cas.

Les lames d'infiltration sont diminuées en Janvier (58.7 mm au lieu de 64.1 mm) et augmentées en Décembre, Février et Mars. (On obtient respectivement 76.2 mm, 81.2 mm et 29 mm au lieu de 68.2 mm, 66 mm et 27.5 mm calculés précédemment pour les mêmes mois). Les infiltrations ne sont pas ou peu modifiées pour les autres mois.

Les écarts entre les volumes observés (Qobservé) et calculés (Qcalculé) sont moins importants au niveau annuel en utilisant les pluies corrigées (5.1% au lieu des 5.6% trouvés sans correction). (L'écart est calculé comme précédemment (Première Partie, Chapitre III) :

$$\text{écart en \%} = \frac{(Q_{\text{obs}} - Q_{\text{calc}}) \times 100}{(Q_{\text{obs}} + Q_{\text{calc}})}$$

Par contre ces écarts sont nettement plus prononcés en Novembre et Février, où ils sont respectivement de 3.7% et de 29.3% avec les pluies corrigées alors qu'ils étaient de 1.2% et de 22.3% dans le premier cas. En Janvier l'écart calculé après correction des pluies est de 9.1% et il était de 20.5% sans correction.

2 - RESULTATS

La correction des précipitations par le modèle HELIOS puis leur utilisation par le modèle hydrométéorologique MERO modifient :

- sur deux mois (Novembre et Décembre) la valeur des modules pluviométriques
- les lames d'infiltration qui sont diminuées en Janvier et augmentées en Décembre, Février et Mars
- les écarts entre les débits observés et calculés qui sont globalement moins importants. (Ce résultat est principalement dû au faible écart obtenu en Janvier entre Qobs et Qcalc après correction des précipitations).

3 - CONCLUSION

La correction des précipitations par le modèle HELIOS permet de diminuer les écarts entre les deux séries de débits en Janvier, mais trop d'eau participe à l'écoulement de Novembre à Février inclus.

En définitive, il apparait que quantitativement le modèle HELIOS d'une part ne retarde pas suffisamment l'entrée de l'eau dans le système hydrologique (puisque l'écart entre les débits observés et calculés en Avril est voisin de 80%) et d'autre part que les précipitations libérées sur cette période ne justifient pas les réponses hydrodynamiques du système étudié (puisque les coefficients de corrélation linéaires ne sont pas significatifs de Décembre à Mai).

D'autres hypothèses doivent être testées pour donner une représentation satisfaisante des écoulements durant la période hivernale.

C. AJUSTEMENT DU MODELE HELIOS

Les résultats précédents montrent que les lames de fusion participent dès Janvier à l'écoulement alors que leurs effets sur l'hydrogramme s'observent en Avril. Il convient donc de ralentir la fonte en faisant varier les paramètres d'échelle et de forme. (Les rapports de surfaces et les corrections héliométriques). Le tableau XXXVII donne les meilleurs résultats obtenus après compilation pour :

	N	D	J	F	M	A	M	J	Totaux Annuels
Pluie corrigée mm	147	38.99	39.93	33.53	98.70	156.25	96.3	13	1207
Q calculé en 10 ⁶ m ³	10.77	4.88	2.91	3.09	5.33	14.46	2.1	1.5	76.94
Écart en %	4	19.4	30.3	23.7	15.3	15.9	33	0.7	5.5
Lame infiltrée	88.44	47.19	28.94	32.84	54.28	115.92	16.51	9.78	601.84
r	.754	.759	.195	.09	.507	.537	.242	.761	.672

Tableau XXXVII : Résultats de la simulation des écoulements du Doubs à Labergement après ajustement du modèle HELIOS (de Novembre 75 à Juin 76).

- une représentativité de la zone basse égale à 10% (90% pour la zone haute)
- une diminution de l'énergie solaire calculée fixée à 50% sur la zone basse et à 75% sur la zone haute.

1 - ANALYSE

Les corrections apportées au signal pluie par le modèle HELIOS sont :

- une diminution globale de Novembre à Février avec des hauteurs de pluie corrigée égales respectivement à 147mm, 39mm, 39mm, 33.5mm pour une pluviométrie mensuelle observée de 186.3mm, 69.5mm, 96mm et 77mm
- une forte augmentation des précipitations en Mars et Avril avec des valeurs observées de 50mm en Mars et 35mm en Avril qui passent à 99mm le 1er mois et 156mm le second.

Les répercussions sur la simulation des écoulements par le modèle HELIOS sont (fig. 36) :

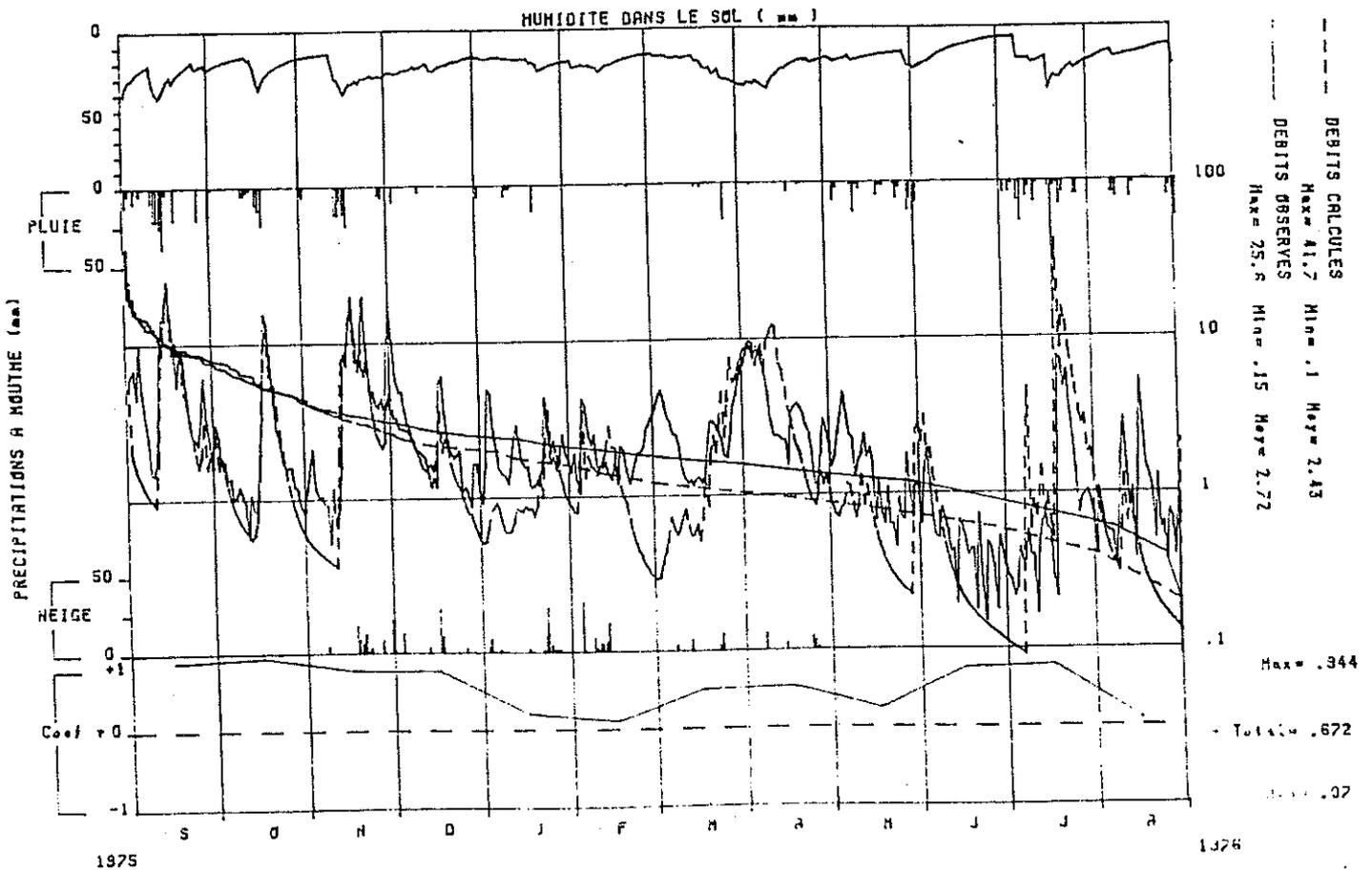


Figure 36 : Résultats de la simulation des débits du Doubs à Labergement après correction des précipitations.

- des variations identiques à celles relevées pour la pluviosité en ce qui concerne les lames infiltrées
- des écarts en débits observés et calculés qui sont plus importants de Novembre à Février lorsque l'on considère les précipitations corrigées. (Sans correction, on avait 1.2% en Novembre, 10.7% en Décembre, 20.5% en

Janvier et 22.3% en Février et avec correction, on trouve des écarts respectifs de 14%, 19.4%, 30.3% et 23.7%). Les observations inverses se font pour les mois de Mars à Juin puisque sans corrections les écarts atteignaient respectivement 31%, 78.1%, 47.3% et 4.2% et qu'ils se limitent à (dans le même ordre) 15.3%, 15.9%, 33% et 0.7% après correction. Annuellement l'écart calculé entre les deux séries de débits est équivalent dans les deux cas

- des valeurs du coefficient de corrélation qui sont globalement augmentées (0.672 pour l'année alors que l'on obtenait 0.63 sans correction). Les différences les plus significatives sont relevées en Décembre (0.759 avec corrections pour 0.679 sans), en Mars (0.507 au lieu de 0.08) et en Avril (0.537 au lieu de 0.284).

2 - RESULTATS

L'ajustement des paramètres d'échelle et de forme utilisés par le modèle HELIOS permettent de diminuer l'importance des précipitations de Novembre à Février puis de les augmenter en Mars et en Avril.

La simulation des écoulements à partir des précipitations corrigées se traduit par :

- une modification des lames infiltrées (diminuées en début de période et augmentées ultérieurement)
- une augmentation des écarts entre les débits observés et calculés durant les mois de Novembre à Février, suivie pour le reste de la période par une forte diminution de leur valeur (par rapport à celles obtenues sans correction des précipitations)
- une meilleure corrélation entre les débits observés et calculés pour les mois de Décembre, Mars et Avril.

3 - CONCLUSION

Le modèle HELIOS améliore les résultats obtenus par le modèle MERO lorsque l'on diminue la quantité d'énergie solaire qui pénètre dans le manteau neigeux. Cet effet est obtenu en augmentant la représentation de la zone haute et la valeur des coefficients correcteurs de l'héliométrie.

Néanmoins les résultats de la simulation des écoulements montrent que pour obtenir une justification de l'hydrogramme en Mars et Avril les conditions imposées (notamment les coefficients héliométriques) sont trop sévères en début de période (les écarts entre les débits observés et calculés sont plus importants lorsque les précipitations sont modifiées). Cette remarque traduit des transformations au sein de la masse neigeuse (de texture) qui, pour sa fusion, nécessite de plus gros apports énergétiques. (Nous avons testé cette hypothèse en partant d'une héliométrie de 90% diminuée progressivement (de 1% par jour de neige jusqu'à 25%). La figure portée en Annexe V montre que les résultats obtenus sont équivalents aux précédents).

D. CONCLUSION

L'utilisation du modèle HELIOS à l'échelle du bassin passe par la reconnaissance de deux zones nivométriques qui se caractérisent par des vitesses de fusion différentes.

L'application de ce schéma aux données enregistrées à Mouthe et à Labergement, durant un cycle particulièrement neigeux (1969-70), puis la comparaison des précipitations corrigées obtenues avec l'hydrogramme du Doubs à Labergement permet une hypothèse sur le fonctionnement hydrodynamique du bassin. Le ruissellement direct occasionnerait la majorité des crues alors que les lames de fusion s'infiltreraient pour entretenir l'état de saturation du réservoir.

Ce jugement qualitatif n'est pas directement confirmé par les résultats de la simulation des écoulements obtenus avec ou sans correction nivométrique. L'analyse quantitative montre que le modèle HELIOS doit être ajusté pour permettre une transformation du signal pluie capable de reconstituer la crue de printemps et les réponses hydrodynamiques du système durant la période hivernale. Les débits reconstitués durant les mois de Janvier et Février ne montrent cependant pas de liaison significative avec les débits observés.

En résumé les modifications apportées au signal pluie par le modèle HELIOS améliorent les résultats de la simulation des écoulements mais elles ne permettent pas de justifier la totalité des réponses hydrodynamiques observées.

IV - CONCLUSIONS

L'enneigement pose un problème dans les régions où il conduit à une immobilisation temporaire d'importantes masses d'eau.

Le modèle thermodynamique HELIOS aborde la dynamique de fusion de la neige à partir des températures et de la durée d'insolation. Le bilan énergétique de la couche de neige, calculé à un pas de temps réduit, conduit à l'estimation d'une lame de fusion résultante. Les précipitations corrigées correspondent à la somme de la lame de fusion sous le manteau et de la part des précipitations qui ruisselle directement à sa surface.

Le calcul d'une lame d'écoulement moyenne à l'échelle du bassin hydrogéologique s'appuie sur des données météorologiques ponctuelles et la prise en considération de deux zones où la vitesse de fusion est différente.

L'analyse des résultats fournis par le modèle HELIOS généralisé sur le Haut Bassin du Doubs montre que :

- qualitativement les corrections apportées du signal pluie s'accordent aux conceptions hydrologiques du phénomène (puisque d'une part on reproduit la succession de trois couches de neige dont celle de printemps est la plus importante (en durée et en quantité), et que d'autre part l'introduction du paramètre PR (part du ruissellement) donne des pics pluviométriques qui coïncident avec l'observation des crues hivernales) ;

- quantitativement la modification de la chronique pluviométrique puis son introduction dans un modèle hydrométéorologique de simulation des écoulements apportent des résultats significatifs après une forte réduction de la vitesse de fusion. Les améliorations sont d'importance inégale suivant le mois considéré, ce qui traduit une évolution du phénomène au cours du temps. De plus il est probable que les modalités de l'infiltration varient saisonnièrement (car même si la température du sol sous une couverture de neige est légèrement positive, ses qualités d'absorption doivent être modifiées).

En définitive, le modèle de simulation de la fusion nivale HELIOS est facilement utilisable (car il rétablit la dynamique de fonte à partir de données largement disponibles), mais son utilisation en hydrologie quantitative nécessite un recalage basé sur :

- la compréhension des phénomènes liés à la répartition de l'enneigement (et à la variabilité des paramètres météorologiques employés (température et durée d'insolation)) ;

- la connaissance des modalités de l'infiltration sous une couverture de neige.

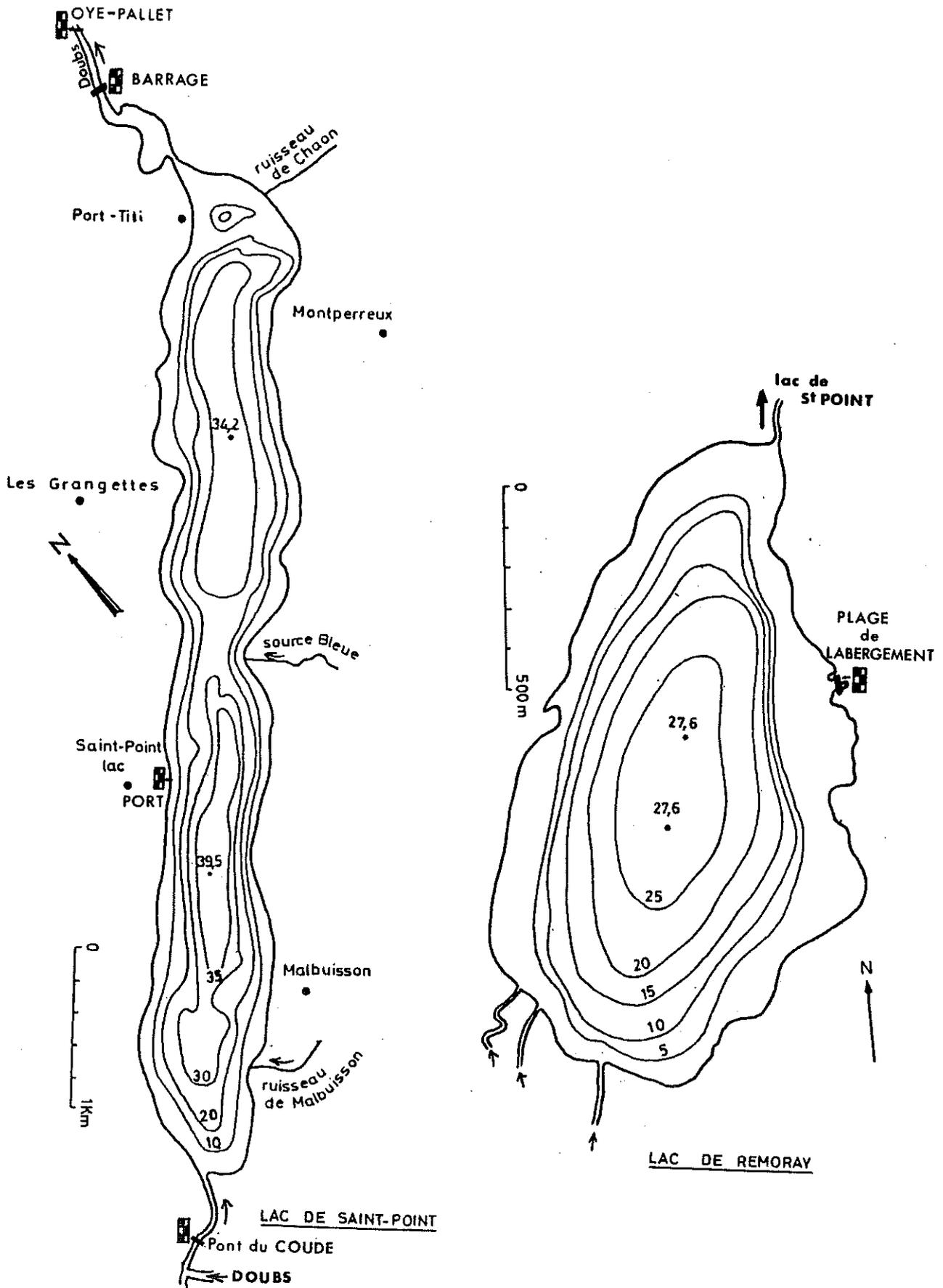


Figure 37 : Implantation des échelles limnimétriques sur les lacs de St Point et Remoray. Tracé des courbes bathymétriques (d'après MAGNIN, 1904).

C _ H _ A _ P _ I _ T _ R _ E _ V _

COMPORTEMENT DYNAMIQUE DU LAC DE ST POINT

Introduction

Le Doubs, entre son passage à Labergement et son arrivée à la station hydrométrique de Pontarlier, subit :

- d'une part une augmentation de ses débits proportionnelle à l'accroissement de son bassin versant ;
- et d'autre part les effets régulateurs du lac de St Point qu'il traverse totalement.

Le comportement dynamique de ce lac est abordé à partir des :

- . variations de niveau du plan d'eau relevées entre le 3.11.82 et le 31.8.83 ;
- . chroniques limnimétriques enregistrées en continu au barrage de St Point (du 28.11.82 au 31.8.83) et au pont de Oye et Pallet (du 9.11.82 au 31.8.83) ;
- . observations météorologiques faites simultanément à la station de Labergement.

I - CARACTERES GENERAUX

Les lacs de St Point et de Remoray occupent une cuvette cénomaniennne d'orientation N60° tapissée de dépôts glaciaires qui est fermée par une moraine à son extrémité Nord.

Le lac de Remoray s'est individualisé au sein d'un plan d'eau unique par suite de l'abandon, par le Doubs, de la cluse du ruisseau de Lhaut. Le passage actuel de la rivière entre les synclinaux de Mouthe et de St Point s'effectue au travers des Gorges de Fourperet (fig. 6). (C'est l'action combinée de la tectonique et des glaciations qui est responsable du détournement du Doubs).

La bathymétrie évoque (fig. 37) pour le lac de St Point la morphologie d'un sillon profond (maximum 43 m) démarqué en deux fosses au niveau de l'affluence de la Source Bleue. Le lac de Remoray de forme ovale montre une succession de courbes concentriques autour d'un maximum de 27.6 m.

Les deux lacs s'étalent à une altitude voisine de 850 m et leur surface est gelée de trois à quatre mois par an (de Décembre à Mars). Leurs caractéristiques principales sont :

	<u>St POINT</u>	<u>REMORAY</u>
longueur (km)	7.2	1.6
largeur max (km)	1	.9
surface (km ²)	4.19	.95
volume (10 ⁶ m ³)	81.6	9.6

Les rives sont constituées de marais et de tourbières.

Le Doubs (gros du Cagnard et du Bief Rouge), débouche au niveau de Labergement après avoir reçu la Taverne issue du lac de Remoray (alimenté par la Dresine et les ruisseaux du Lhaut et de Remoray).

Le lac de St Point reçoit lui-même une quinzaine de ruisseaux (dont le plus constant est la Source Bleue) puis s'écoule par le lit du Doubs au-delà du barrage de régulation établi 200 m en amont du pont de Oye et Pallet. L'ouvrage n'est plus exploité depuis quelques années. Il est composé :

- d'un déversoir de crue en gabions dont l'arase est calée à la cote 849.81m (l'eau circule au travers des galets au-dessus de 849.40m) ;
- deux déversoirs latéraux équipés de batardeaux (la cote de la lame déversante est de 849.46m en rive droite et de 849.55m en rive gauche) ;
- deux vannes de vidange (à la cote moyenne de 847.80m).

II - PROPAGATION DES SIGNAUX HYDRODYNAMIQUES A TRAVERS LE LAC

A. COMPORTEMENT DE LA SURFACE DU LAC

1 - SITUATION DES ECHELLES (fig. 37)

Une échelle limnimétrique nivelée est intégrée au barrage de St Point. Le Laboratoire de Géologie Appliquée a procédé à l'installation d'un limni-
graphe en ce point (le 28.10.1982) et de trois autres échelles implantées
(depuis le 3.11.1982) dans le port du village de St Point, sous le pont
du Coude et sous un ponton de la plage du lac de Remoray. Un appareil du
SRAE Franche-Comté enregistre (depuis le 9.11.1982) les variations limni-
métriques du Doubs à son passage sous le pont de Oye et Pallet.

- . Remarque : Les échelles limnimétriques ne sont pas calées
topographiquement aussi l'analyse qui suit considère
les variations observées par référence aux hauteurs de
la tranche d'eau observées le 3.11.1982 (849.54m au Bar-
rage, 0.46m au Port de St Point, 0.675m au Pont du Coude
et 0.22m au Lac de Remoray).

2 - CORRELATIONS

Au total, 54 relevés ont été réalisés, mais seules 50 séries de mesures
sont complètes.

La demi-matrice des corrélations croisées (Tableau XXXVIII) montre la
qualité (statistique) des liaisons calculées entre chacun des points d'obser-
vation :

	Barrage	Port	coude	plage
Barrage	1	.989	.988	.964
Port		1	.994	.979
Coude			1	.985
Plage				1

Tableau XXXVIII :

Matrice de corrélations croisées
des hauteurs limnimétriques le
long du lac St Point

Tous les coefficients obtenus sont hautement significatifs (pour 50
valeurs le coefficient "r" est significatif à 99.9% s'il est supérieur à
0.5) et la figure 38 donne une image de la dispersion des points pour le
plus faible coefficient r (r = 0.964) entre les hauteurs de la tranche d'eau
lues au barrage et celles observées sur la plage de Labergement (sur le
lac de Remoray).

On remarque un effet de la distance sur la valeur de r. Ainsi les
corrélations établies entre le barrage et les autres points diminuent de
l'aval vers l'amont (le meilleur coefficient est obtenu entre le port de
St Point et le pont du Coude).

Les équations données en référence aux valeurs observées au barrage
de St Point (X) sont (à partir de hauteurs données en m) pour :

- . le port de St Point = 1.14X - .17
- . le pont du Coude = 1.15X + .05
- . la plage de Labergement = 1.18X - .38

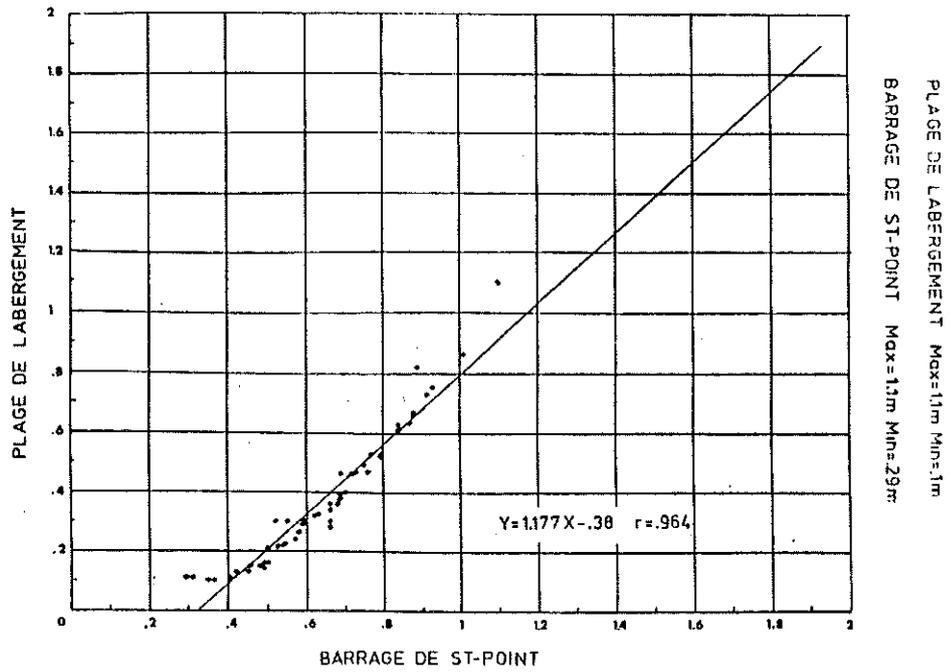


Figure 38 : Diagramme de dispersion des hauteurs d'eau (54 couples)

La figure 39 confirme graphiquement les corrélations calculées.

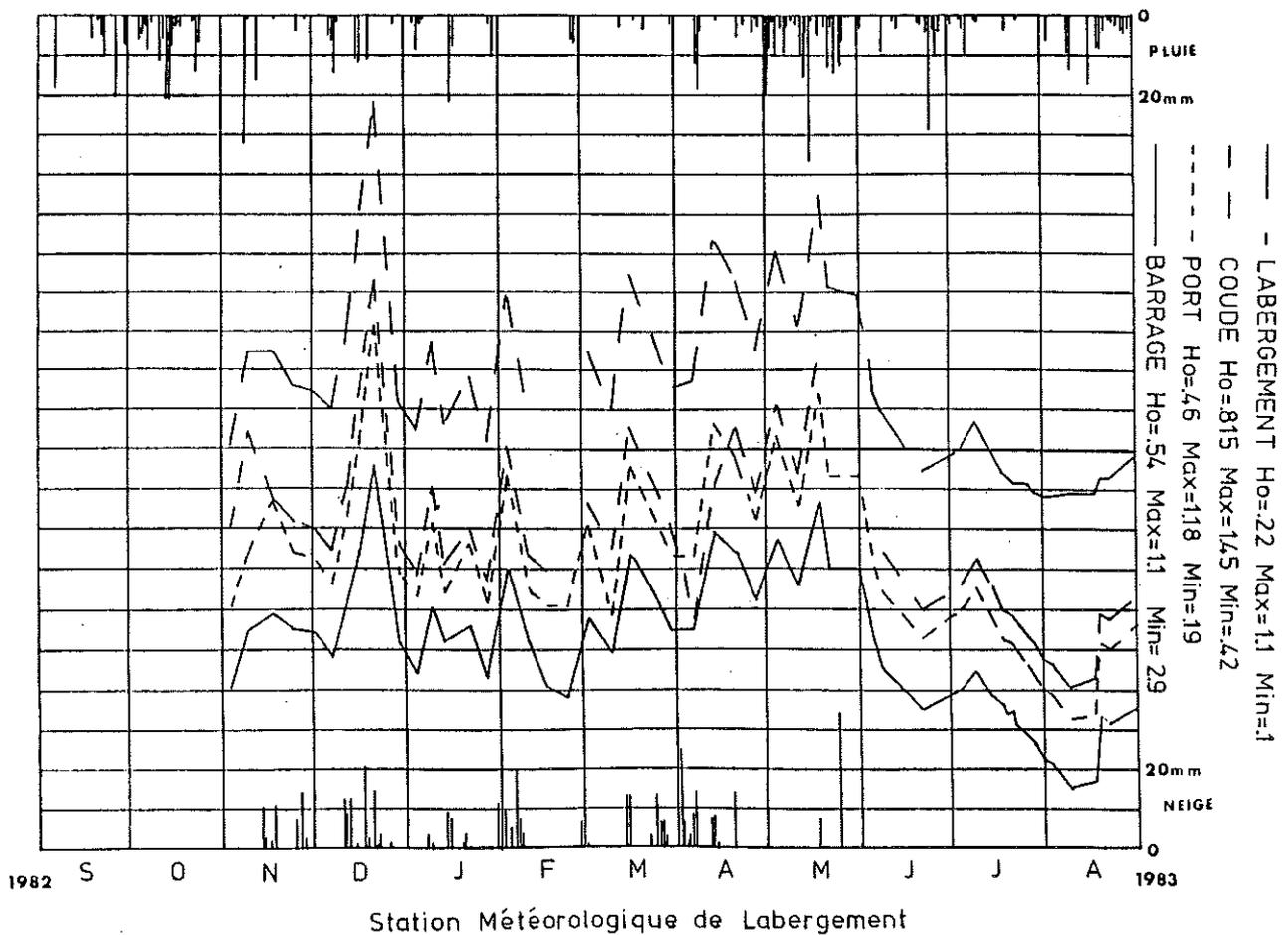


Figure 39 : Variations de la tranche d'eau le long du lac St Point

3 - VARIATIONS LIMNIMÉTRIQUES

a. Hauteurs caractéristiques

Le tableau XXXIX donne les valeurs caractéristiques observées aux différentes échelles (HO = hauteurs lues le 3.11.82 et Δ = Max - Min).

	HO	Max	Min	Δ
Barrage	849.54	850.1	849.29	.81
Port	.46	1.18	.19	.99
Coude	.675	1.45	.42	1.03
Plage	.22	≈ 1.1	.1	≈ 1

Remarque :

Les maximums ont tous été observés le 21.12.82 et les minimums le 9.8.83.

La valeur de 1.1m de la plage a été approximée car l'échelle était totalement immergée le 21.12.82.

Tableau XXXIX : Hauteurs limnimétriques caractéristiques (en m)

L'intervalle de variation (Δ) croît de l'aval vers l'amont (de même que l'intervalle qui correspond à Max-HO), et inversement l'intervalle HO-Min est minimum sur la plage de Labergement (0.12m) et maximum au port (0.27m). (Cet intervalle est de 0.25m au barrage mais il correspond au seuil du barrage).

Ces remarques laissent supposer que la surface du plan d'eau possède une pente qui s'inverse entre les épisodes de crue et d'étiage.

- Remarque : On a considéré une surface au repos le 3.11.82 mais si la surface était déjà inclinée vers l'aval, la pente du schéma serait à accentuer en période de crue (et tendrait vers l'horizontale en étiage) et les modifications inverses seraient à apporter si la surface de départ était inclinée vers l'amont. Le hyétogramme des mois de Septembre et Octobre (figure 39) montre que les observations débutent après de fortes pluies.

b. Variations limnimétriques

Le tableau XXXX montre les variations limnimétriques relevées aux quatre échelles entre deux séries d'observations.

- Remarque : L'analyse repose sur des variations observées sur un intervalle de temps moyen voisin de la semaine aussi toutes les réactions du lac ne sont-elles pas enregistrées et les résultats n'indiqueront qu'une tendance générale.

L'examen des périodes de montée des eaux indique que :

- pour certains épisodes (du 4 au 9.1, du 27.4 au 4.5, du 11 au 18.5) les variations sont conformes au schéma précédent avec une augmentation de la tranche d'eau qui est plus importante en amont qu'en aval (avec des écarts entre les points d'observation qui ne sont pas constants) (figure 40a).
- pour d'autres les variations les plus importantes s'observent au niveau des échelles intermédiaires (par exemple entre le 16 et le 21.12.82 ou entre le 10 et le 16.3.83). (figure 40 b₁ et b₂).

Date	Δj	Barrage	Port	Coude	Plage	Pmm	Date	Δj	Barrage	Port	Coude	Plage	Pmm
2 XI							21 VI	1	-1	-2.5	-1.5	-2.5	3.6
9	6	+15	+14	+17.5	+24.5	47.1	27	6	-12	-13.5	-15.5	-16.5	13.2
17	8	+4	+13	+4	+ .5	62	4V	7	+14.5	+21	+23	+26	73.3
24	7	-4	-13	-6	-9	11.2	11	7	-12	-18	-18	-20	32.5
1 XII	7	-1	-2	-2	-2	30.9	18	7	-21.5	+29	+30.5	+33.5	112.5
7	6	-6	-6	-5	-4	16.2	21	3	-17	-21	22	-23.5	16.6
12	5	-15	+18	+17	+21	71.5	31	10	0	0		-2	111.3
16	4	+12	+3	+23	+29	33.4	5VI	5	-12	-22.5	28	-25	4.8
21	5	+21	+31	+30	+28	71.4	8	3	-7	-6.5		-5.5	7
29	8	-44	-63	-65	-76	11.1	21	13	-10	-11	-14	-14.5	19.1
4 I	6	-8	-6	-8	-7.5	10.1	4VII	13	+5.5	+7	+6.5	+6.5	88.2
9	5	+17	+19	+22	+23	24.1	9	5	+4.5	+5	+6	+6.5	19.8
13	4	-9	-18	-19	-21.5	6.4	14	5	-6.5	-7.5	-6.5	-7.5	2.7
21	8	+4	+12.5	+9	+12	67	18	4	-2.5	-6.5	-6.5	-5.5	0
27	6	-13	-15	-11.5	-16	1	19	1	-2	0	-.5	-1	2.6
3 II	7	+27.5	+22	+33.5	+37.5	58.1	21	2	+1	-1	-1	-1	2.6
10	7	-18.5	-18.5	-35.5	-31.5	49.8	22	1	-4	-1	-1	-1	0
16	6	-11	-4	-3.5		1.2	26	4	-3	-4	-4	0	1.3
23	7	-3				0	28	2	-1.5	-2	-1.5	-2	0
2 XII	7	+20				36.2	31	3	-4	-4	-4	-1	0
10	8	-9	-22.5	-11.5	-14	0	3VIII	3	-1.5	-1.5	-1.5	0	9.5
16	6	+25	+37.	+30.5	+34.5	41.3	9	6	-6	-5.5	-5.5	+1	6.9
23	7	-9.5	-11	-12.5	-15	13.3	10	1	+0.5	0	+ .5	0	16.3
30	7	-11	-11.5	-13.5	-14.5	42.3	17	7	+0.5	+1.5	+2	0	34.7
6 I	7	0	0	+ .5	+2	75.6	19	2	+17	+17.5	+16	+4	6.1
13	7	+24.5	+23	+24.5	+36	82.5	22	3	-2.5	-2	-1.5	0	22.8
20	7	-5	-8	+1	-9.5	23	31	9	+4.5	+6	+6	+6	25.7

Tableau XXXX : Variations limnimétriques sur le lac de St Point

- pour d'autres encore les variations sont identiques en deux points d'observation (par exemple entre le 3 et le 9.11.82 et entre le 9 et le 17.11, entre le 6 et le 13.4.83 et entre le 22.6 et le 4.7.83). (fig. 40c).

Les épisodes de diminution de la tranche d'eau mènent à des constatations analogues (mais en sens contraire). Ainsi pour les épisodes :

- du 21 au 29.12.82, du 9 au 13.1.83, du 18 au 21.5.83 l'abaissement de niveau est plus important à l'amont qu'à l'aval (figure 40d) comme l'indiquait déjà l'examen des hauteurs caractéristiques.

- du 9 au 17.11.82, du 21 au 27.1.83, du 2 au 10.3.83, du 19 au 22.8.83... les valeurs les plus fortes s'observent au niveau des échelles intermédiaires (fig. 40e).

- du 24.11 au 1.12.82, du 29.12 au 4.1.83, du 3 au 10.2.83, du 31.7 au 9.8.83 ... les mêmes variations sont enregistrées au droit de plusieurs échelles. (figure 40f).

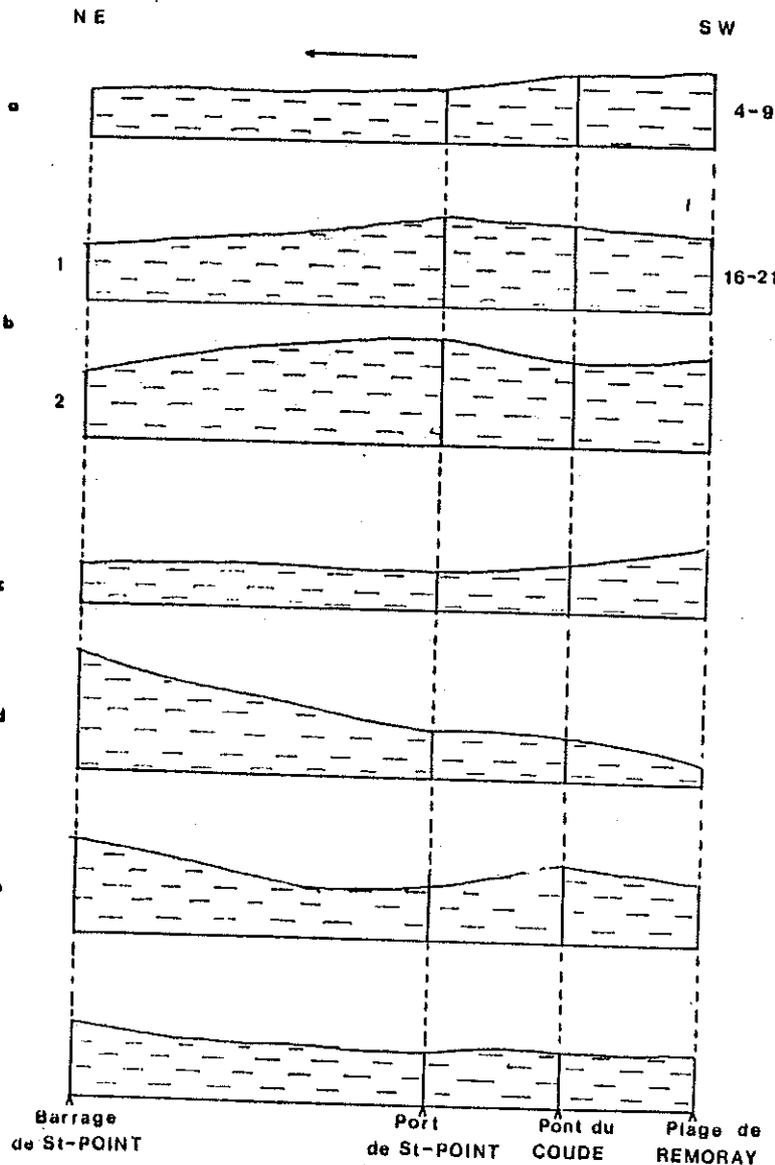


Figure 40 :
(a, b1, b2, c, d, e, f)

Exemples de variations
limnimétriques.

c. Influence de la pluviométrie

En considérant les quantités d'eau tombées à Labergement entre deux relevés consécutifs on remarque que :

- les variations sont généralement positives (inclinaison de la surface vers l'aval) après de fortes pluies et inversement (inclinaison vers l'amont) en l'absence de précipitations

- la distribution des écarts limnimétriques est "normale" (c'est-à-dire conforme au schéma énoncé plus haut) lorsque, suivant le cas, le plus fort des précipitations précède de peu la lecture des échelles (comme entre les 16 et 21.12.82 où il est tombé 15.6mm le 19 et 20.6mm le 20.12) ou bien qu'il succède au jour de la lecture précédente (comme entre le 3 et le 10.2.83 où il est tombé 20mm le 5.2 et 10.3mm le 6.2)

- les modifications de la distribution des écarts observés aux différentes échelles révèlent les effets d'une averse passée ou les effets conjugués d'averses successives. (Par exemple entre les 16 et 21.12.82 les maximums sont relevés au port (+31cm) et au pont du Coude (+30cm) et il est tombé

30mm le 17.12, 15mm le 19 et 20.6mm le 20.12). De même l'épisode du 27.1 au 3.3.83 dénote l'effet d'une crue qui s'achève au barrage (31.3mm tombés entre les 29 et 30.1) et la propagation d'une autre en amont (20mm tombés entre le 1 et le 3.2).

Toutes ces remarques indiquent que les variations de la surface du lac de St Point sont liées étroitement à la pluviométrie.

4 - RESULTATS

Les hauteurs caractéristiques relevées au cours de la période d'observations montrent d'une part que la surface du plan d'eau n'est pas horizontale et que d'autre part les variations de la tranche d'eau sont plus importantes à l'aval qu'à l'amont.

L'analyse des différentes phases d'abaissement et de remontée du niveau du lac et de la pluviométrie locale indique que :

. pour les variations positives (crues) les maximums s'observent à l'amont si le relevé suit de très près (1 à 2 jours) l'observation des fortes pluies. Après plusieurs jours l'écart le plus important est enregistré au niveau des échelles intermédiaire sinon au barrage. (Un épisode très pluvieux comme par exemple celui du 21 au 31.5.83 (durant lequel il est tombé 112.5mm) peut passer totalement inaperçu si le relevé est fait cinq jours après la fin des averses (dans cet exemple il a plu du 21 au 25.5 inclus)) ;

. pour les variations négatives (étiages) la surface du lac s'incline vers l'amont (avec donc des écarts de plus en plus importants dans cette direction). La distribution générale des écarts peut être modifiée en fonction de l'intervalle de temps qui sépare la lecture des échelles de la dernière pluie.

5 - CONCLUSION

Les variations limnimétriques observées s'expliquent par l'analyse des données pluviométriques, et la lecture des différentes échelles donne l'état de la surface du plan d'eau après ou pendant le passage de la dernière crue.

Ainsi l'arrivée d'une crue (apportée simultanément par le Doubs et les ruisseaux débouchant dans le lac de Remoray) provoque l'apparition d'une onde de crue qui se propage d'amont en aval. (figure 41). La rencontre des masses d'eau dynamique (crue) et statique (lac) déclenche le phénomène. La vitesse de propagation et l'amplitude sont directement liées à l'importance de la crue donc à la durée et à l'intensité du dernier épisode pluvieux.

B. INFLUENCE DU LAC SUR L'HYDRODYNAMISME DU DOUBS

Les données limnimétriques enregistrées en continu au niveau du barrage du lac de St Point sont comparées à celles enregistrées 200 m en aval dans le lit du Doubs (au pont de Oye et Pallet).

1 - CORRELATIONS

La période commune d'observation va du 9.11.82 au 31.8.83 (289 couples de valeurs).

Le coefficient de corrélation linéaire calculé entre les deux séries est de 0.965 avec (en m) :

$$\text{Hauteur Doubs} = 1.51 \text{ Hauteur du lac} - 0.41$$

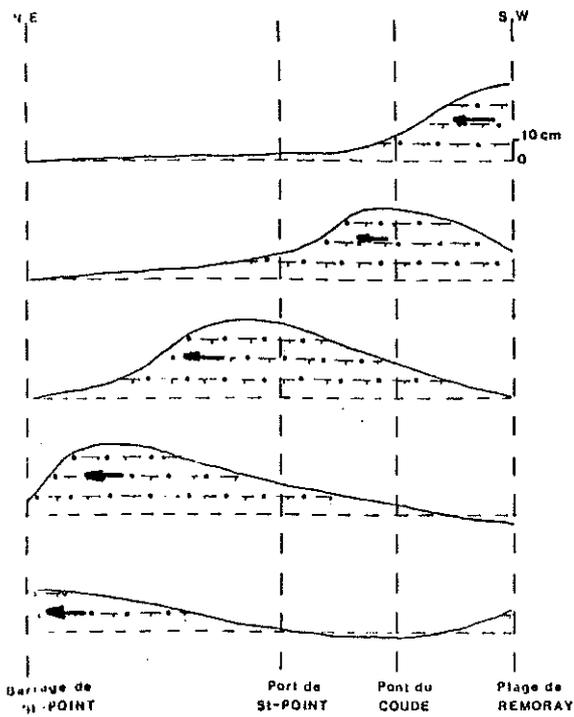


Figure 41 :

Schéma interprétatif de la propagation d'une onde de crue à la surface du lac de St Point

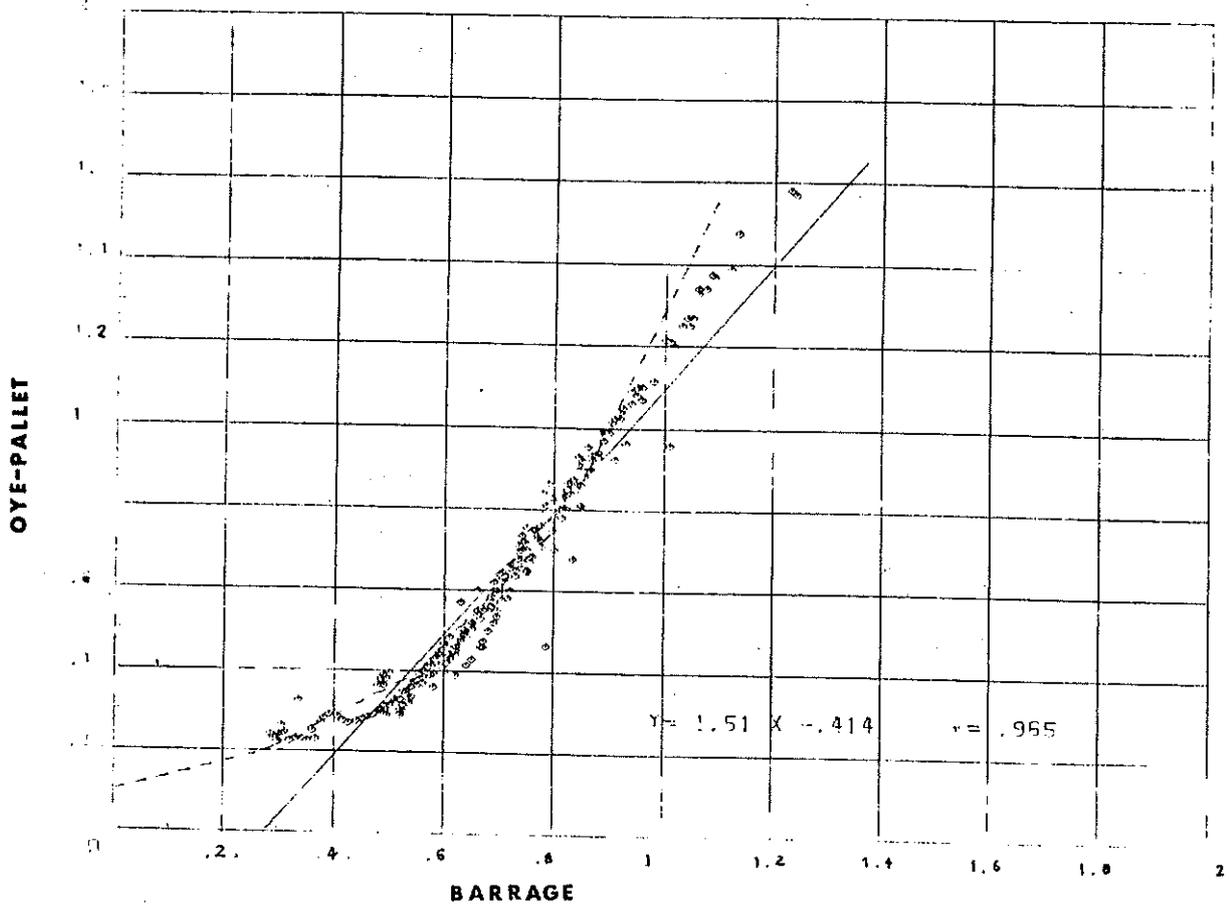


Figure 42 : Diagramme de dispersion des hauteurs limnimétriques du Doubs

Il y a donc une très bonne liaison statistique entre les deux points selon une droite à tendance exponentielle à l'origine (figure 42).

2 - LES VARIATIONS

La représentation (Figure 43) des deux chroniques confirme la simultanéité de leurs réactions. La courbe du barrage est simplement moins découpée que celle de la rivière et elle évolue dans un intervalle plus étroit (0.955m au lieu de 1.36m pour le Doubs).

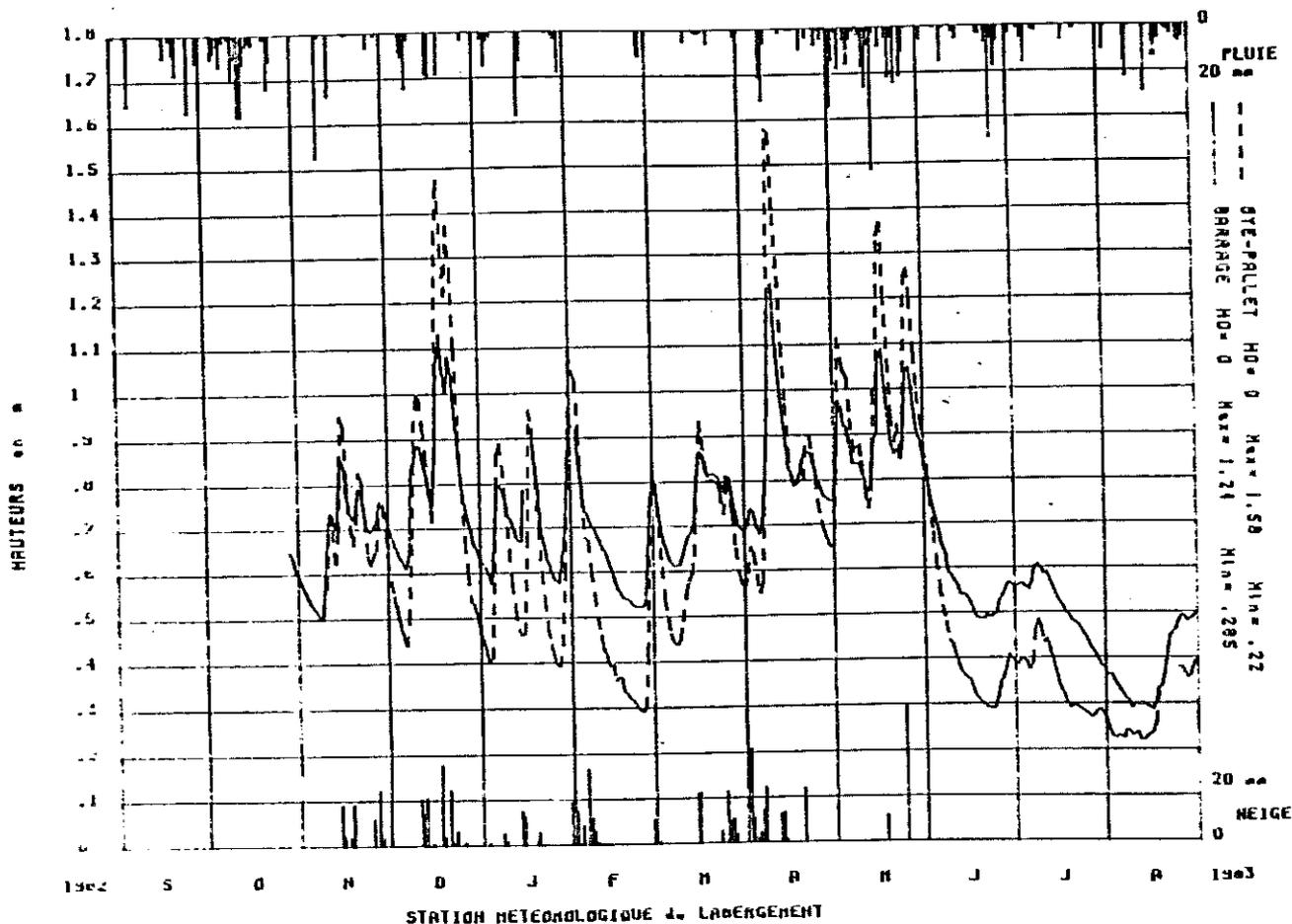


Figure 43 :

3 - CONCLUSION

Les impulsions hydrodynamiques atteignant la rivière sont parfaitement synchrones et proportionnelles à celles qui arrivent au barrage. Seule la traversée du lac de St Point peut entraîner une modification des débits (autre que celles due à l'accroissement du bassin versant) du Doubs entre Labergement et Pontarlier mais nous ne disposons pas de données enregistrées simultanément en tous ces points.

C. CONCLUSION

Le lac de St Point montre au cours de la période d'observations, des modifications de sa profondeur plus importantes en amont (supérieures à 1m à la plage de Labergement) qu'en aval (0.81m au barrage).

Néanmoins la surface du plan d'eau ne présente pas une inclinaison constante. Elle s'inverse en chaque point selon que l'observation coïncide avec l'arrivée ou l'éloignement d'une onde de crue. En effet le débouché du Doubs dans le lac de St Point conditionne en hautes eaux l'apparition (par conservation d'énergie) d'une onde de crue qui se propage à la surface du plan d'eau, en s'atténuant de l'amont vers l'aval.

Cette onde se régénère lorsqu'elle atteint le milieu libre que constitue le lit du Doubs en aval du barrage (ce qui entraîne des réponses très marquées de la rivière en ce point).

Ainsi la traversée du lac de St Point par le Doubs entraîne un retard dans la propagation des impulsions hydrodynamiques qui est fonction de la durée et de l'intensité du signal hydrologique d'entrée.

C H A P I T R E V I

L E S P E R T E S D U D O U B S .

. Introduction

Entre Pontarlier et Ville-du-Pont le Doubs est affecté par des pertes en communication avec les sources de la Loue (Fig.44). Le déficit d'écoulement résultant exprime l'existence d'un phénomène de capture du Haut Bassin du Doubs par le Haut Bassin de la Loue qui conduit occasionnellement à un assèchement temporaire de la rivière au travers de la zone des pertes.

Dans cette région, le Doubs quitte le synclinal créacé du lac St Point (N60°) pour rejoindre celui d'Arçon (N60°). Le passage de l'un à l'autre s'effectue au travers de la plaine de Pontarlier selon un tracé superposé à un décrochement senestre ("Accident de Pontarlier" : N180°). Le Drugeon, qui draine les tourbières du synclinal de Frasné-Bonnevaux, conflue avec le Doubs à proximité d'Arçon, et l'écoulement reprend la direction des axes structuraux.

La présence de l'"Accident de Pontarlier" au niveau de la zone de pertes laisse présumer de l'importance de la tectonique dans la genèse et l'évolution du phénomène.

La communication entre les Hauts Bassins du Doubs et de la Loue a été établie en 1901 par le passage aux sources de la Loue d'absinthe déversée accidentellement dans le Doubs à Pontarlier. (Cette "coloration" a été confirmée à la fluorescéine d'abord par FOURNIER (1910) puis par P. CHAUVE, R. MATAILLET et J.P. METTETAL (1974)).

Depuis cette date plusieurs estimations des pertes ont été avancées :

- E. FOURNIER (1913) propose les chiffres de 0,13 et 0,2 m³/s lorsqu'en étiage le débit du Doubs est inférieur à 1 m³/s.

- M. DREYFUSS, J.P. VANÇON (1965) évaluent un volume perdu inférieur à 4 m³/s durant les étiages, compris entre 4 et 5 m³/s en période de moyennes eaux et pouvant dépasser 6 à 7 m³/s lors des crues.

- O. DELARÓZIERES (1968) pose le bilan hydrologique de la période 1961-1965, et estime à 40% (soit 5.15 m³/s) la contribution du Doubs au régime de la Loue. (L'auteur fait référence à des pertes qui se situeraient en amont de Pontarlier).

- P. CHAUVE, G. CHARLES, A. LEONETTI (1980) calculent pour l'année 1977 une perte moyenne égale à 2,4 m³/s. Ils rapportent par ailleurs l'observation en 1979 de pertes instantanées comprises entre 1,5 et 4 m³/s.

- P. CHAUVE, Ph. JACQUEMIN, J. MANIA, R. REYLE (1983) dégagent une perte globale équivalente à 2,3 m³/s (soit 19% de l'écoulement de la Loue) de l'analyse des variations de débits du Doubs, enregistrées simultanément (du 1/9/78 au 31/5/81) de part et d'autre de la zone de pertes (avec 0,6 m³/s perdu entre Pontarlier Amont et Pontarlier Ville).

L'étude du déficit d'écoulement du Doubs s'appuie sur l'analyse d'une chronique longue de 52 mois (du 1/9/78 au 31/12/82) et sur les résultats d'une série de jaugeages ponctuels pour tenter de :

- caractériser les écoulements au niveau de chacun des points d'observation des pertes
- quantifier les débits détournés
- définir la variabilité du phénomène de capture
- évaluer la contribution du Doubs à l'écoulement de la Loue
- localiser les zones d'infiltration maximale
- proposer une interprétation du phénomène
- envisager les solutions susceptibles de régulariser les débits d'étiage du Doubs à Ville-du-Pont et leurs répercussions sur l'écoulement de la Loue.

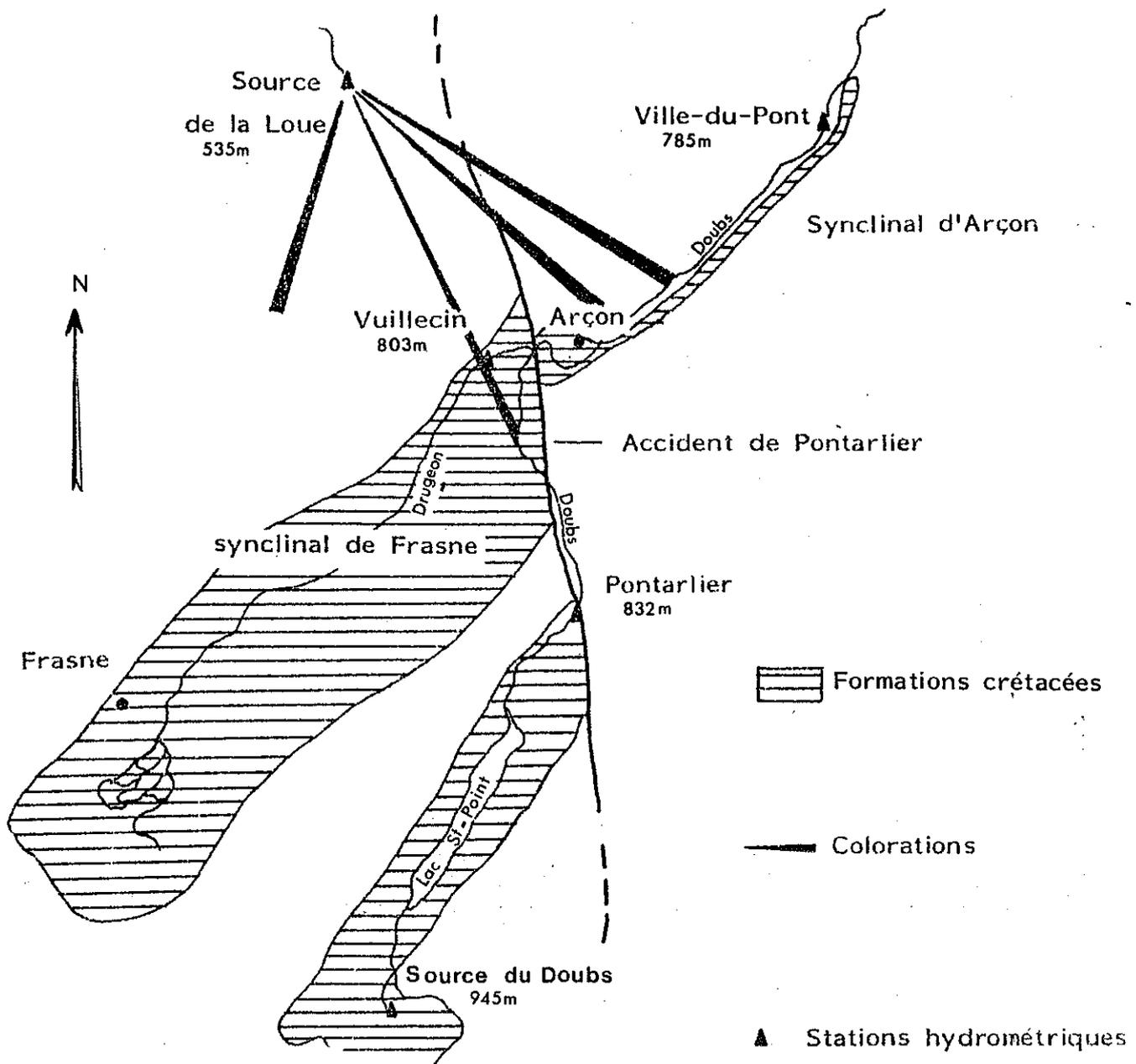


Figure 44 : Localisation de la zone de pertes et des stations hydrométriques.

I - ESTIMATION DU DEFICIT D'ECOULEMENT

L'implantation des stations hydrométriques de Vuillecin (Drugeon), Pontarlier et Ville-du-Pont (Doubs) permet une estimation du déficit d'écoulement basée sur l'expression :

$$\text{Déficit} = \text{SQ.PONTARLIER} + \text{SQ.VUILLECIN} - \text{SQ.VILLE DU PONT}$$

La somme des débits (SQ) du Doubs à Pontarlier cumulée à celle du Drugeon à Vuillecin constitue une évaluation satisfaisante des débits du Doubs à la confluence. La comparaison de ces débits théoriques avec les valeurs enregistrées à Ville-du-Pont doit permettre de juger de l'importance et de la variabilité du déficit d'écoulement.

Une sous-estimation du bilan résulte de la non intégration des apports inhérents au bassin délimité par les trois stations concernées. (Il est en fait difficile et hasardeux de définir ces apports aussi nous sommes nous limités à l'utilisation de la formule précédente).

L'analyse statistique puis la mise en parallèle des chroniques relevées aux différentes stations hydrologiques du système (1573 jours d'observation entre le 1/9/78 et le 31/12/82) permettent la caractérisation des écoulements et l'évaluation des pertes.

A. CARACTERISATION DES ECOULEMENTS

Le contexte hydrologique des pertes englobe :

- les rivières Doubs et Drugeon en amont de leur confluence
- les sources de la Loue,

dont les caractéristiques sont regroupées dans le tableau ci-après (Tabl.XXXXI)

STATION.	1	2	3	4	5	6	7
	PON	DRU	CON	VPON	PERT.	LOUE	LOUE-PERT.
m^3/s %							
5	100	100	100	97.3	84.9	100	99.55
1	98.4	93.1	99.5	84.6	76.8	100	99.5
2	88.8	59.2	92.9	76.7	47.5	99.9	96.7
5	56.8	21.2	68.6	57.6	2.5	89.4	74.3
10	26.2	7.3	39.5	31.3	0.6	51.4	36.9
20	11.8	2.7	16.3	14.8	0.06	12.6	11.6
30	5.6	0.8	9.4	9.1	0.06	6.4	6.0
40	2.5	0.4	6.3	6.7	-	3.6	3.5
50	0.9	0.2	3.9	5.9	-	1.1	1.
60	-	-	0.7	1.9	-	-	-
100	-	-	0.25	0.8	-	-	-
Max m^3/s	67.5	68.5	131.5	151.	30.1	67.9	67.9
Min m^3/s	0.3	0.2	0.5	0	0	0.7	0
Moy m^3/s	8.7	3.7	12.3	11.6	1.8	12.3	10.4

Tableau XXXXI : Caractéristiques des débits et des pertes sur le Haut Bassin du Doubs

PON	=	PONTARLIER	VPON	=	VILLE DU PONT
DRU	=	DRUGEON à VUILLECIN	PERT.	=	PERTES
CONF	=	CONFLUENCE (PON + DRU)	LOUE	=	SOURCE DE LA LOUE

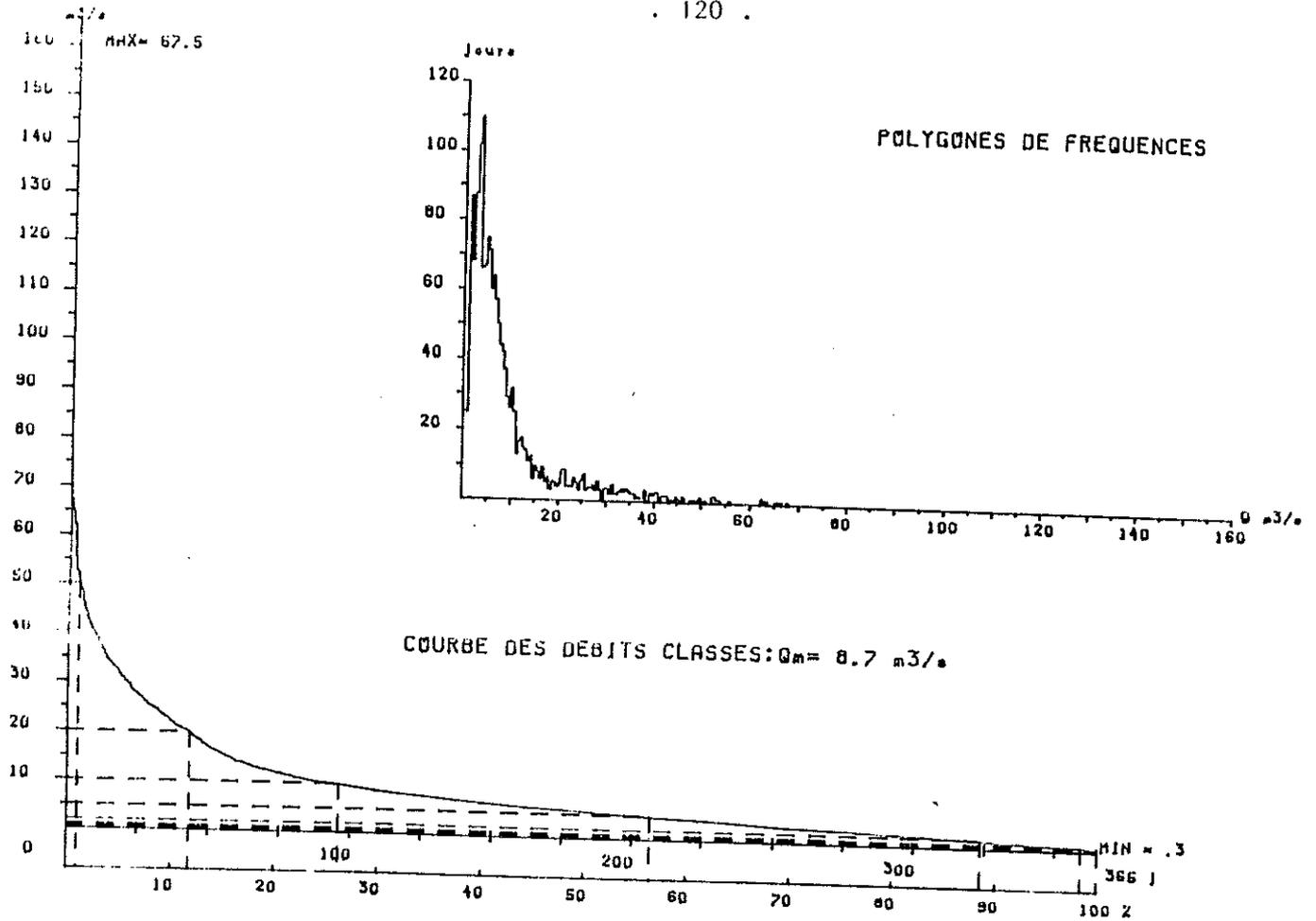


Figure 45 : Distribution des débits du Doubs à Pontarlier (1573 valeurs)

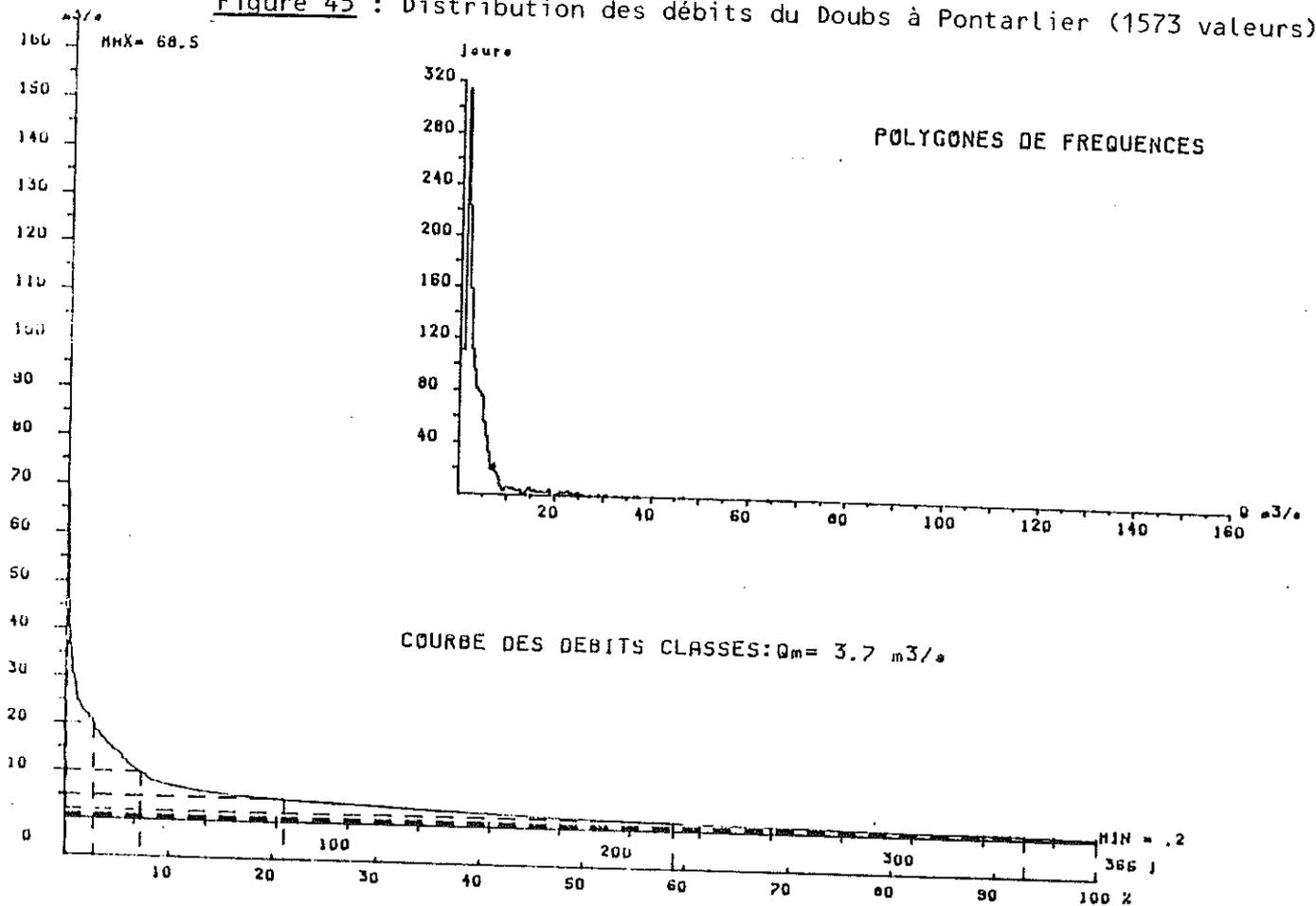


Figure 46 : Distribution des débits du Drueon à Vuillecin (1573 valeurs)

1 - LE DOUBS A PONTARLIER (Fig. 45)

Les valeurs de la courbe des débits classés oscillent entre 0,3 et 67,5 m³/s avec une moyenne de 8,7 m³/s. Cependant l'essentiel de l'écoulement appartient à l'intervalle compris entre 0,5 et 40 m³/s. (Tableau XXXXI, colonne 1) avec :

75%	des observations	< 10 m ³ /s
50%		< 5,5 m ³ /s
25%		< 3 m ³ /s
10%		< 1,5 m ³ /s

Le mode principal des fréquences se situe entre 1,5 et 3 m³/s et 28% des valeurs sont supérieures à la moyenne.

2 - LE DRUGEON A VUILLECIN (Fig. 46)

La courbe tracée se caractérise par trois tronçons de pente différente :

- le plus important correspond à l'intervalle compris entre 0,3 et 8 m³/s et il représente environ 98% des observations ;
- le second est borné à 8 et 25 m³/s et il regroupe 7% des valeurs ;
- le dernier complète la distribution (1%) et rejoint le maximum observé (68,5 m³/s).

L'ensemble de la distribution évolue dans un très faible intervalle (Tableau XXXXI, colonne 2), puisque :

75%	des écoulements sont	< 4.5 m ³ /s
50%		< 2 m ³ /s
25%		< 1.5 m ³ /s
10%		< 1 m ³ /s

Le mode principal des fréquences couvre l'intervalle 0.5-1.5 m³/s et 36% des débits enregistrés sont supérieurs à la moyenne (3.7 m³/s).

3 - LA LOUE A MOUTHIER (Fig. 47)

Les valeurs de débits considérées sont celles communiquées par l'Usine Hydroélectrique de Mouthier qui exploite les sources de la Loue.

a. Remarque

Les débits calculés par EDF sont les débits turbinés lorsque l'écoulement est inférieur à 18.6 m³/s (avec une restitution à la rivière de 0.25 m³/s). Au-dessus de cette valeur le débit non turbinable est évalué d'après la hauteur d'eau déversée. Les services intéressés d'EDF estiment à 5% l'erreur qui affecte les débits inférieurs à 18 m³/s et à 20% celle qui concerne les débits de la résurgence supérieurs à 30 m³/s.

Le Laboratoire de Géologie Appliquée a entrepris de jauger le déversoir de l'Usine Hydroélectrique. Les résultats des mesures (réalisées avec un saumon de 25 kg) sont :

Date	LGA m ³ /s	EDF m ³ /s	Δ m ³ /s	Δ %
25.3.82	10.5	11.8	-1.3	11
2.4.82	13.8	15.5	-1.7	11
22.4.82	5.9	6.9	-1.5	14.5
28.4.82	4.6	5	-0.4	8.
30.4.82	5	6	-0.1	16.6
19.5.82	3.9	4	-0.1	2.5
2.3.83	18.5	18.8	-0.3	1.6

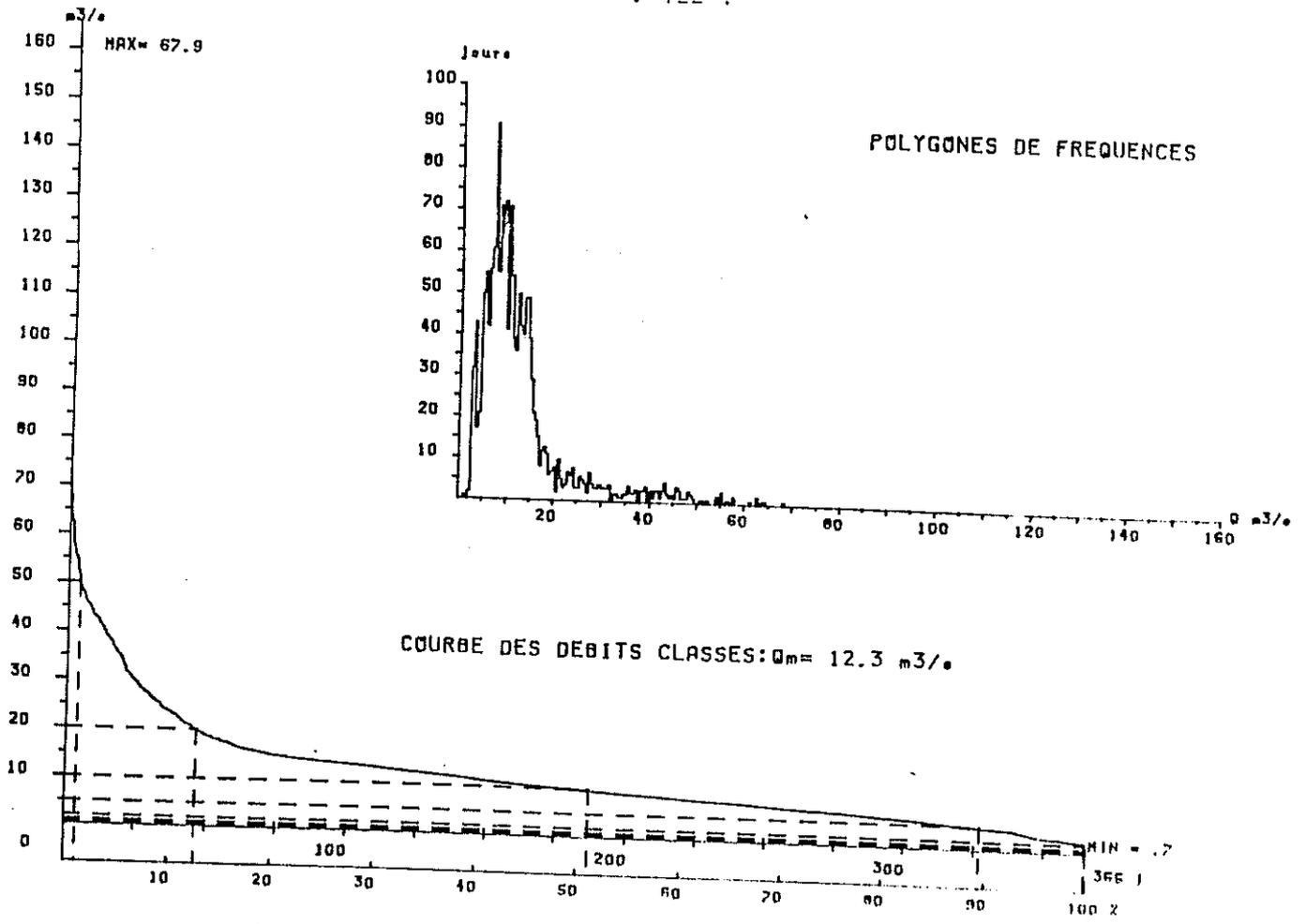


Figure 47 : Distribution des débits de la Loue à sa source (1573 valeurs)

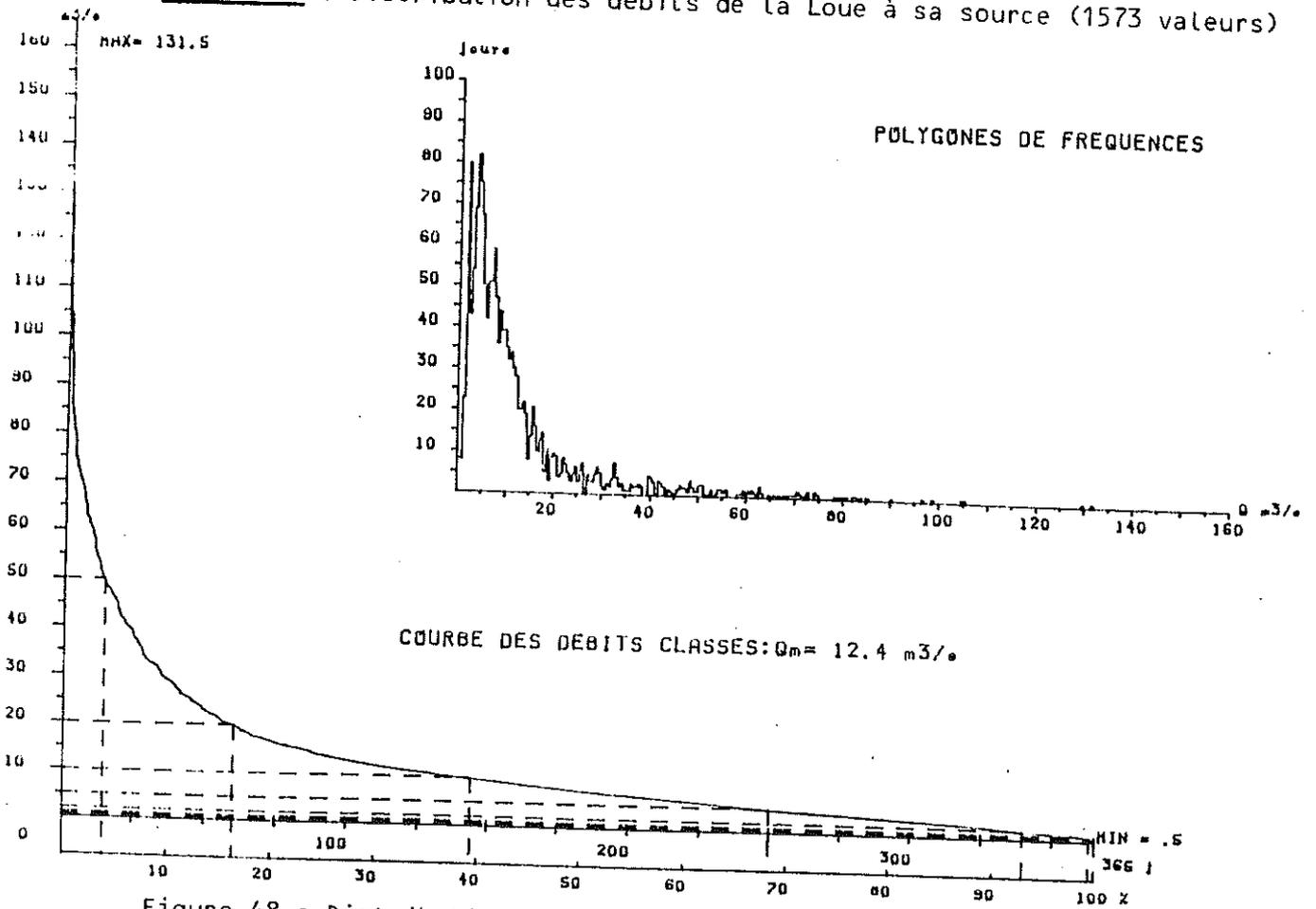


Figure 48 : Distribution des débits théoriques du Doubs à sa confluence

Les différences ne sont pas significatives si l'on admet une erreur minimale de 10% pour les mesures de jaugeages.

Le débit de restitution à la rivière mesuré aux mêmes dates est de $0.17 \text{ m}^3/\text{s}$, c'est-à-dire une différence de 32%. La constance de cette valeur indique que tous les résultats obtenus par l'analyse statistique des données sont exprimés par excès ($+0.08 \text{ m}^3/\text{s}$).

b. Analyse

Parmi les 1573 valeurs classées, trois sont inférieures à $2 \text{ m}^3/\text{s}$ (le Mini = $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$ et 2 débits compris entre 1.5 et $2 \text{ m}^3/\text{s}$). La distribution globale montre (Tableau XXXXI, colonne 6) que :

75%	des débits journaliers	< $14 \text{ m}^3/\text{s}$
50%		< $10 \text{ m}^3/\text{s}$
25%		< $7 \text{ m}^3/\text{s}$
10%		< $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$

Le tracé des polygones de fréquences confirme le fait que la grande majorité des écoulements journaliers s'observe en-dessous de $20 \text{ m}^3/\text{s}$. Sur cet intervalle la distribution apparaît symétrique avec un mode situé entre 7 et $10 \text{ m}^3/\text{s}$. Le débit moyen journalier de $12.3 \text{ m}^3/\text{s}$ a été dépassé 516 fois durant la période (soit 32.8%).

4 - RESULTATS

Les trois stations considérées révèlent des paramètres hydrologiques (Mini et Maxi) équivalents mais la distribution globale de leurs écoulements traduit leurs particularités.

On remarque que :

- la quasi-totalité des débits moyens journaliers sont $>0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ sur le Doubs et le Drugeon alors qu'ils sont $>2 \text{ m}^3/\text{s}$ aux Sources de la Loue ;
- la moitié des écoulements apparaissent entre 3 et $10 \text{ m}^3/\text{s}$ à Pontarlier, entre 1.5 et $4.5 \text{ m}^3/\text{s}$ à Vuillecin et entre 7 et $14 \text{ m}^3/\text{s}$ à Mouthier ;
- les crues se distribuent de 15 à $67.5 \text{ m}^3/\text{s}$ à Pontarlier, de 10 à $68.5 \text{ m}^3/\text{s}$ à Vuillecin et de 18 à $67.9 \text{ m}^3/\text{s}$ à Mouthier.

Ces résultats montrent que le régime :

. du Doubs à Pontarlier bénéficie d'un vaste bassin d'alimentation ($Q_m = 8.7 \text{ m}^3/\text{s}$ avec 50% des débits $> 3 \text{ m}^3/\text{s}$ et $< 10 \text{ m}^3/\text{s}$) dont les capacités de mise en réserve sont limitées puisque un quart des débits sont $< 3 \text{ m}^3/\text{s}$ et que les crues constituent une large classe de distribution (ce qui signifie que les épisodes de fortes pluies modifient immédiatement le régime de la rivière) ;

. du Drugeon à Vuillecin est alimenté par un petit impluvium ($Q_m = 3.7 \text{ m}^3/\text{s}$). Le faible domaine de variation moyen (50% des écoulements compris entre 1.5 et $4.5 \text{ m}^3/\text{s}$) indique que le bassin passe très rapidement d'un état de tarissement à un stade de sursaturation. (L'écoulement apparaît comme intimement dépendant de la teneur en eau des formations superficielles qui abondent sur le secteur). ;

. de la Loue à sa source est en moyenne comparable aux écoulements du Doubs et du Drugeon réunis ($Q_m = 12.3 \text{ m}^3/\text{s}$). Les capacités d'emmagasinement du réservoir drainé apparaissent importantes si l'on considère le peu de valeurs observées $< 2 \text{ m}^3/\text{s}$. Il est par contre étonnant de constater que l'étalement des pics de crues est comparable à celui observé à Pontarlier alors qu'ici la station enregistre les variations de débits directement à l'exutoire. Cette remarque suggère d'attribuer aux sources de la Loue un système drainant où le transit est rapide donc un réseau karstique bien développé.

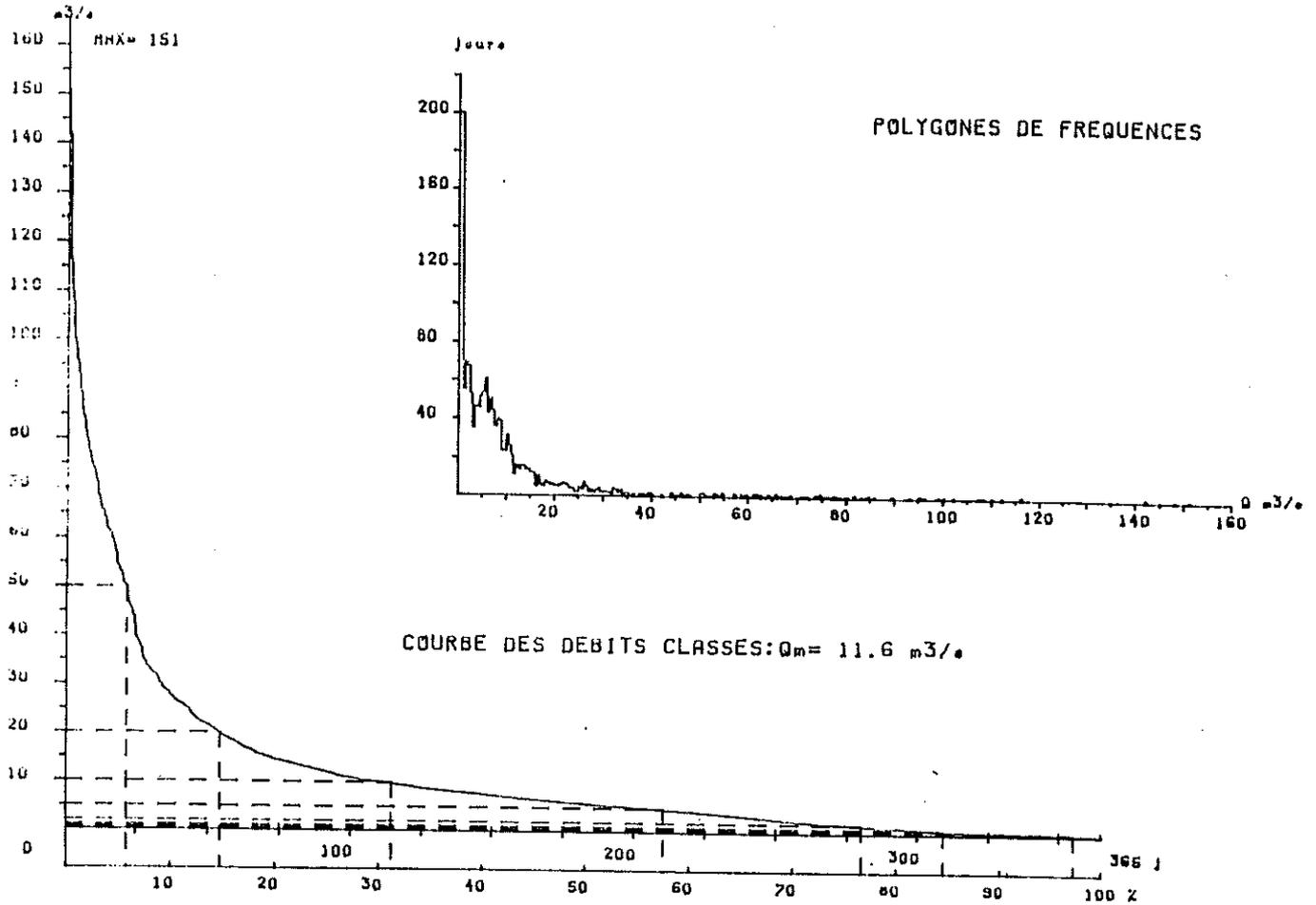


Figure 49 : Distribution des débits du Doubs à Ville du Pont (1573 valeurs)

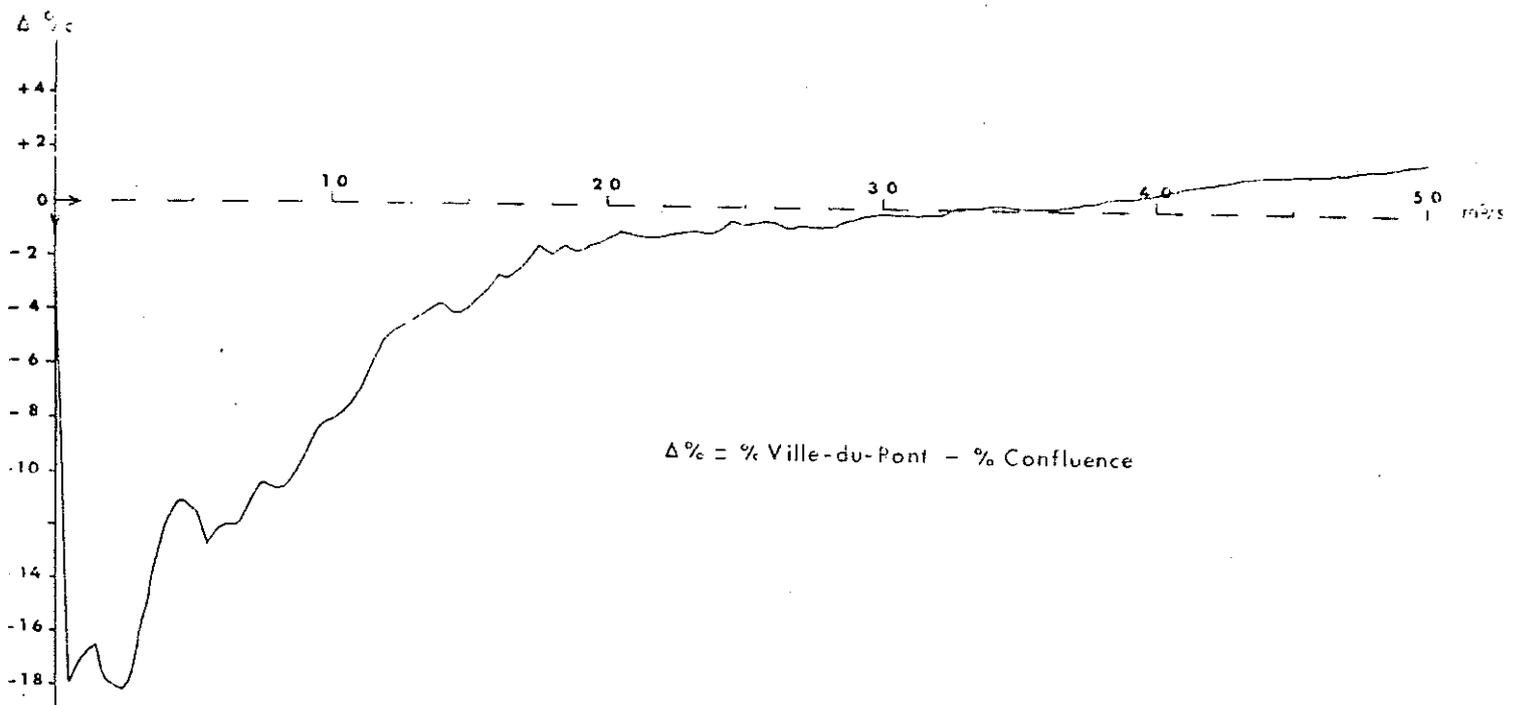


Figure 50 : Schéma de variation des écarts de distribution entre la confluence et Ville du Pont

5 - REMARQUES

Durant toute la période d'observation (du 1/9/78 au 31/12/82) il est tombé 6720.3 mm à Labergement et 7176.6 mm à Ouhans soit, déduction faite de l'évapotranspiration (potentielle calculée selon la formule de Thornthwaite), une pluviosité utile de 4527.5 mm à Labergement et 4887.3 mm à Ouhans.

Ces hauteurs d'eau rapportées aux volumes écoulés aux stations hydrométriques conduisent à estimer des surfaces de bassins d'alimentation (surface = volumes écoulés/hauteur d'eau) équivalentes à :

- 261.15 km² pour le Doubs à Pontarlier
- 111.07 km² pour le Drugeon à Vuillecin
- 342.04 km² pour les sources de la Loue.

Rappelons que : - les bassins versants topographiques publiés par les organismes gestionnaires sont :

- 350 km² pour la station de Pontarlier (CE)
- 191 km² pour celle de Vuillecin (SRAE)
- et 100 km² pour les sources de la Loue à Mouthier (CE)

- les différences relevées entre les deux séries d'estimations s'expliquent par les caractéristiques structurales de la région (voir Ière Partie : Chapitre II).

L'étude de O. DELAROZIERES (1968) reconnaît un bassin versant de 350 km² à Pontarlier (dont 171 km² pour le bassin de Labergement) et de 160 km² à Mouthier, mais elle évalue une surface d'alimentation moyenne de 204 km² (dont 105 km² pour Labergement) pour le Doubs à Pontarlier et de 892 km² pour la Loue à ses sources. Ainsi 232 km² (dont 146 km² situés en amont de Pontarlier) de la surface du Haut Bassin du Doubs contribueraient à l'alimentation des sources de la Loue.

B. ANALYSE QUANTITATIVE DU DEFICIT D'ECOULEMENT

L'importance des quantités détournées est estimée :

- globalement en comparant la distribution des débits théoriques du Doubs à la confluence, à celle des valeurs enregistrées à Ville-du-Pont ;
- puis journallement en regard des résultats fournis par l'analyse des 1573 bilans hydrologiques établis selon l'expression :

$$\text{Perte } j = Q_j \text{ Pontarlier} + Q_j \text{ Drugeon} - Q_j \text{ Ville-du-Pont}$$

1 - ESTIMATION GLOBALE

a. Les débits théoriques du Doubs à la confluence (Fig. 48)

La courbe rend compte de la distribution des débits théoriques journaliers du Doubs après sa confluence avec le Drugeon

$$(Q_j \text{ Th} = Q_j \text{ Pontarlier} + Q_j \text{ Drugeon})$$

Les paramètres hydrologiques correspondent à la somme de ceux de chacune des stations ($Q_m = 12.3 \text{ m}^3/\text{s}$) et la distribution est comparable à celle des débits du Doubs à Pontarlier augmentée de celle des valeurs observées du Drugeon à Vuillecin (75% des débits théoriques moyens journaliers $< 14 \text{ m}^3/\text{s}$ - 50% $< 7.5 \text{ m}^3/\text{s}$ - 25% $< 4 \text{ m}^3/\text{s}$ et 10% $< 2.5 \text{ m}^3/\text{s}$) (Tableau XXXX1, colonne 3).

b. Les débits du Doubs à Ville-du-Pont (Fig. 49)

En dépit d'un intervalle de variations plus important que le précédent (de 0 à 151 m³/s au lieu de 0.5 à 131.5 m³/s), la représentation graphique montre l'importance statistique des faibles débits (242 valeurs observées sont $< 0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ au lieu de 8 à la confluence).

Figure 51 : Comparaison entre les distributions du Doubs à la confluence et à Ville du Pont

--- Confluence
— Ville du Pont

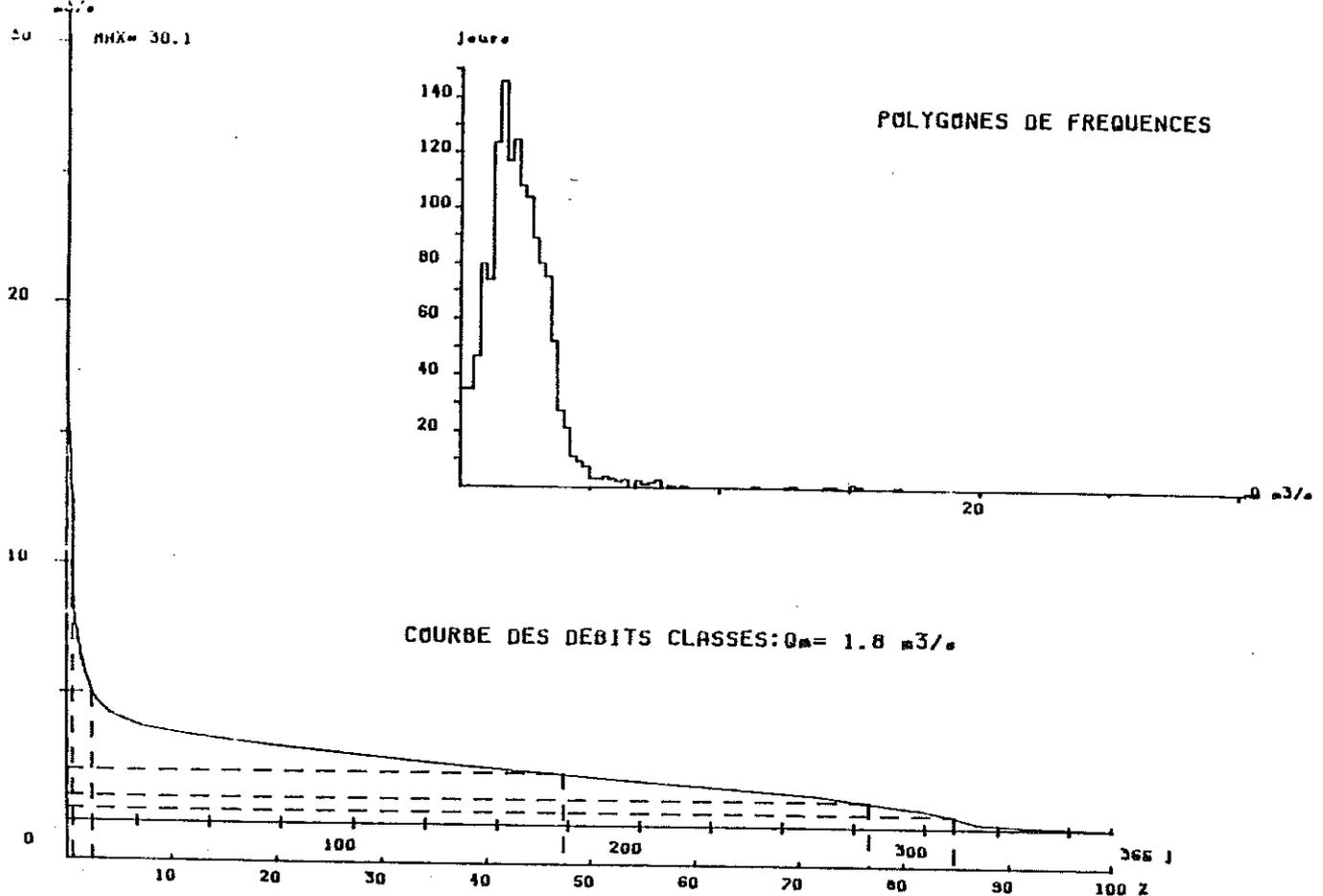
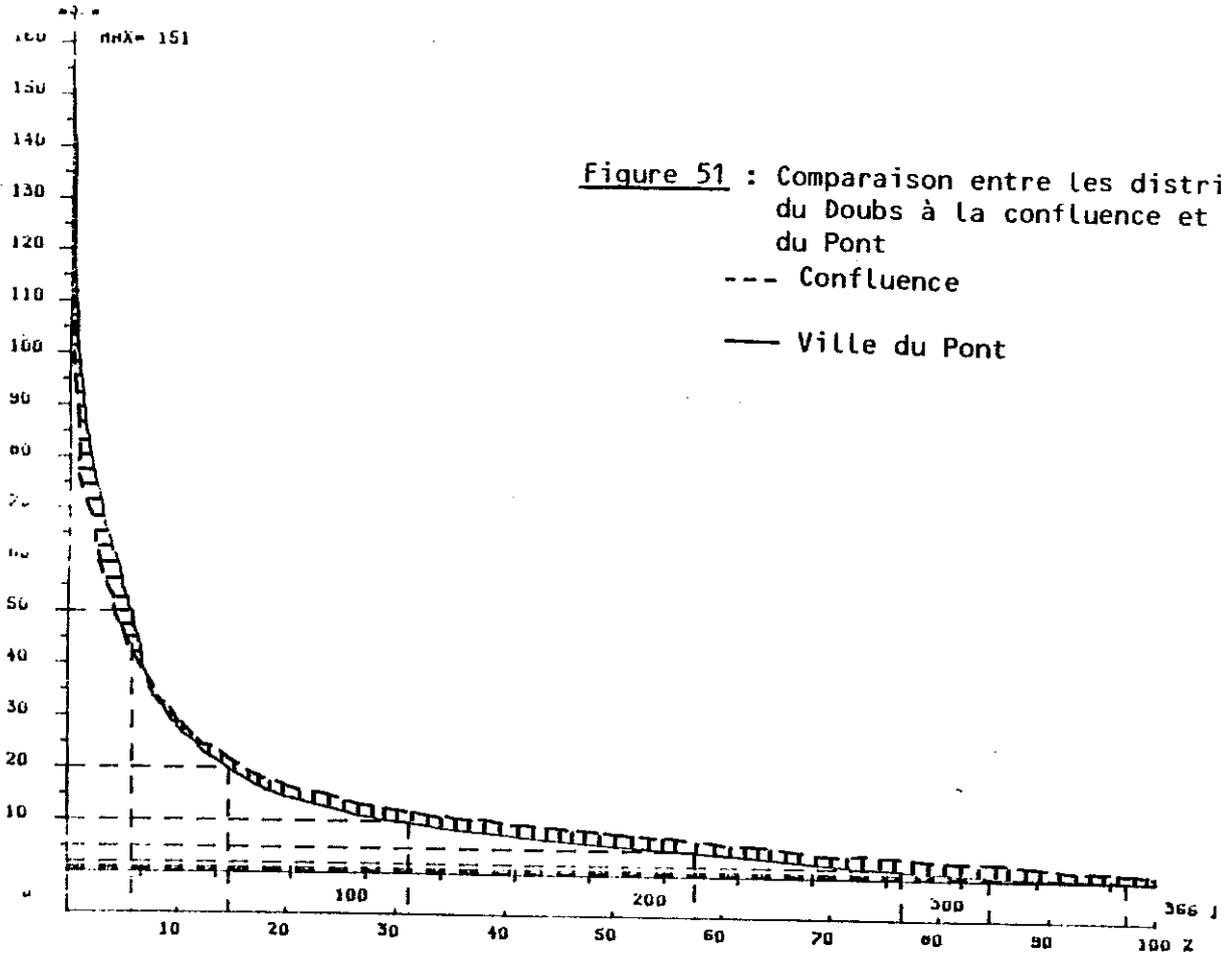


Figure 52 : Caractéristiques des pertes du Doubs (1573 valeurs)

La colonne 4 (Tabl.XXXXI) rend compte des modifications apportées par le phénomène de capture dans la distribution théorique. Les écarts sont d'abord importants (Fig. 50, puis vont s'amenuisant pour disparaître à partir de 32.5 m³/s.

Le régime du Doubs en ce point d'observation se caractérise par :

- 75% des débits moyens journaliers < 12 m³/s
- 50% < 6 m³/s
- 25% < 2 m³/s
- 10% = 0 m³/s

L'examen des polygones de fréquences associe aux pertes l'apparition d'une importante classe entre 0 et 0.5 m³/s (242 observations dont 42 nulles, soit 12.7% au lieu de 0.5% à la confluence) qui passe par une atténuation des modes principaux qui caractérisent les débits théoriques.

c. Résultats

La moyenne des écoulements du Doubs après sa confluence avec le Drugeon est de 12.3 m³/s et elle est de 11.6 m³/s à Ville-du-Pont. La différence atteste une perte moyenne globale de 0.7 m³/s soit 22.1 x 10⁶ m³/an.

Les courbes de distribution des écoulements établies en ces deux points (Fig.51) montrent une inversion des tendances à 32.5 m³/s. La répartition des débits supérieurs à cette valeur est normale avec des pourcentages d'observations plus importants à l'aval qu'à l'amont. Les apports du bassin qui borde la zone de capture compensent alors le débit perdu (s'il existe encore pour des débits aussi élevés).

En dessous de 32.5 m³/s les écarts graphiques montrent que le déficit d'écoulement entre les deux stations est le plus significatif pour des débits théoriques à la confluence < 15 m³/s.

d. Conclusion

Le régime d'écoulement du Doubs montre un déficit d'écoulement moyen de 0.7 m³/s au travers de la zone de capture.

Les pertes affectent la distribution des débits de l'amont inférieurs à 32.5 m³/s (au-delà de ce seuil, les apports du bassin limité par les stations hydrologiques de Pontarlier, Vuillecin et Ville-du-Pont compensent les éventuelles infiltrations). Leur effet est particulièrement sensible pour des débits à la confluence < 15 m³/s.

En résumé le phénomène de capture se manifeste davantage sur les faibles débits que sur les forts et n'apparaît donc ni constant, ni proportionnel à la charge hydraulique de la rivière.

2 - LES PERTES MOYENNES JOURNALIERES (Fig. 52)

La courbe établie à partir des 1573 bilans journaliers définit trois domaines de variation différents :

- l'un dont la pente est nulle de 100% aux environs de 90% ;
- le suivant de faible pente se poursuit jusqu'en deçà de 10% en un point qui, projeté sur l'axe des abscisses, équivaut à 5 m³/s ;
- le dernier rejoint le maximum calculé (30.1 m³/s) au travers de l'intervalle restant.

La distribution globale (Tableau XXXXI, colonne 5) se caractérise par :

- 75% des pertes moyennes journalières < 2.75 m³/s
- 50% < 1.75 m³/s
- 25% < 1 m³/s
- 10% = 0 m³/s

La moyenne journalière est de 1.8 m³/s avec cependant 203 bilans nuls, qui correspondent à une fréquence de 47 jours/an soit 12.9%. (Une perte est considérée comme nulle chaque jour où le débit à Ville-du-Pont est au moins égal à celui qui est sensé s'y écouler en regard des observations de l'amont). La perte effectuée est donc de 2.1 m³/s, 318 jours/an.

Le mode de fréquence maximale se situe entre 1 et 2 m³/s.

Il faut noter que si un quart des pertes est > 2.5 seuls 5.5% sont > 4 m³/s et 2.5% > 5 m³/s (soit respectivement 87 et 39 des 1573 pertes journalières). Ainsi il n'y a que trois valeurs > 15 m³/s (2>15.5m³/s et 1>16.75m³/s).

Les dates d'observation de ces fortes valeurs sont :

le 24 Janvier 1980	une perte de 12.5m ³ /s	pour 11.1m ³ /s à Pontarlier,	22.5m ³ /s à Vuillecin	et 21.1m ³ /s à Ville-du-Pont
25	30.1	29.6	60	59.5
26	14.1	31.6	36.5	54
30 Mars	13.9	32.9	7.5	26.5
31	16.6	30.7	6.7	20.8
1 Avril	14.9	25	5.9	16
2	11.15	21.3	5.35	15.5
3	15.2	21.5	5	10.8
4	14.8	20.2	4.6	12.5

L'existence de pertes aussi importantes sur des périodes aussi courtes devrait naturellement se traduire par des variations subites du régime de la Loue à sa source. Or aucune manifestation de cet ordre n'a été enregistrée à l'usine de Mouthier.

La validité de ces valeurs (et particulièrement la valeur invraisemblable de 31.7 m³/s) est fortement remise en cause. Le fait que ces anomalies sont à la fois ponctuelles et observées exclusivement au cours de l'hiver 1980 nous conduit à les rattacher aux opérations de déneigement. (Il est en effet de pratique courante de décharger les camions de neige dans la rivière. L'augmentation brutale de la tranche d'eau induirait une surestimation des débits).

3 - CONCLUSION

Par l'analyse qui précède, on peut :

- individualiser chacun des sous-bassins du système des pertes
- et préciser l'importance du déficit d'écoulement sur le Doubs et le Drugeon entre les stations hydrométriques de Pontarlier et Vuillecin et celle de Ville-du-Pont.

Le régime du Doubs à Pontarlier est tributaire à la fois de l'état de remplissage d'un réservoir karstique et de l'abondance des lames de ruissellement collectées par la rivière.

La distribution des écoulements du Drugeon à Vuillecin est caractéristique d'un bassin à substrat imperméable.

Les écoulements enregistrés aux sources de la Loue sont entretenus par un important réservoir et ils sont amplifiés par les apports d'un réseau karstique à transit rapide.

Le bilan hydrologique global calculé du 1/9/78 au 31/12/82 entre la somme des écoulements du Doubs à Pontarlier et du Drugeon à Vuillecin et les débits du Doubs à Ville-du-Pont rend compte d'un déficit d'écoulement de 95,1 millions de m³ (0.7 m³/s) soit 22.1 x 10⁶ m³/an.

L'analyse des pertes moyennes journalières montre que pendant 47 jours/an les débits du Doubs à Ville-du-Pont sont > à ceux provenant de l'amont. Le débit moyen détourné le reste de l'année est de 2.1 m³/s soit une perte moyenne journalière de 1.8 m³/s équivalent à 56.8 x 10⁶ m³/an.

Ainsi les apports annuels provenant du bassin délimité par les trois stations d'enregistrement du Haut Bassin du Doubs (Pontarlier, Vuillecin et Ville-du-Pont) compensent en 47 j/an 39% du volume perdu.

Les débits minimums effectivement détournés représentent 14.9% des écoulements annuels du Doubs à la confluence et de la Loue à sa source (puisque ces deux points se caractérisent par une moyenne identique).

A ce stade il apparaît que le déficit d'écoulement du Haut Bassin du Doubs au bénéfice de celui de la Loue dépasse 1.8 m³/s (puisque une partie des apports de la zone de pertes rejoint nécessairement la Loue). Le phénomène responsable du déficit fonctionne :

- soit à effet constant et dans ce cas les apports inhérents au bassin fermé à Ville-du-Pont compenseraient une partie des écoulements perdus et masqueraient ainsi l'effet réel des pertes ;
- soit de façon discontinue et les pertes peuvent disparaître ou s'amplifier au cours du temps.

II - VARIATIONS DU PHENOMENE DE CAPTURE : INTERPRETATION

Les modalités du phénomène de capture sont abordées au travers des variations du déficit d'écoulement. L'apparition des pertes et leur répercussion sur les régimes du Doubs et de la Loue sont envisagées à partir de :

- l'ensemble des liaisons statistiques calculées entre les éléments du système hydrologique des pertes
- l'évolution des volumes détournés.

A. LES LIAISONS STATISTIQUES

Il s'agit de calculs de régressions linéaires portant sur les 1573 observations. Le coefficient de corrélation r qualifie la liaison et les coefficients de régression caractérisent son évolution par une droite de la forme $Y=aX+b$.

Les résultats consignés dans la matrice de corrélations croisées (Tableau XXXXII) sont analysés pour :

- rechercher les correspondances entre les écoulements du Doubs, du Drugeon, de la Loue et des pertes ;
- étudier la restitution des débits de part et d'autre de la zone de capture ;
- et définir les facteurs déterminants des pertes.

	VPON	PON	DRU	LOUE	PERT.	CONF.
VPON	1	.967	.889	.885	-.227	.979
PON		1	.825	.854	-.129	.977
DRU			1	.839	-.017	.925
LOUE				1	-.164	.886
PERT.					1	-.093
CONF.						1

Tableau XXXXII : Matrice de corrélations croisées

1 - LE SYSTEME HYDROLOGIQUE DES PERTES

Les débits du Doubs à Pontarlier se corrélaient mal avec ceux du Drugeon ($r = 0.825$) et de la Loue ($r = 0.854$) ce qui confirme l'individualité des bassins. Néanmoins la valeur de 0.8 montre qu'ils possèdent quelques réactions communes certainement provoquées par des impulsions météorologiques voisines.

Les corrélations calculées avec les débits théoriques du Doubs à la confluence montrent le poids (statistique) des écoulements de l'amont sur son régime aval ($r = 0.977$). Ainsi la station de Ville-du-Pont enregistre des variations de débits à la fois dépendante de celles observées à la confluence et à Pontarlier ($r = 0.979$ et 0.967).

Les débits relevés aux sources de la Loue peuvent être rapprochés de ceux de la confluence ($r = 0.886$) et de Ville-du-Pont ($r = 0.885$).

PERTES

100

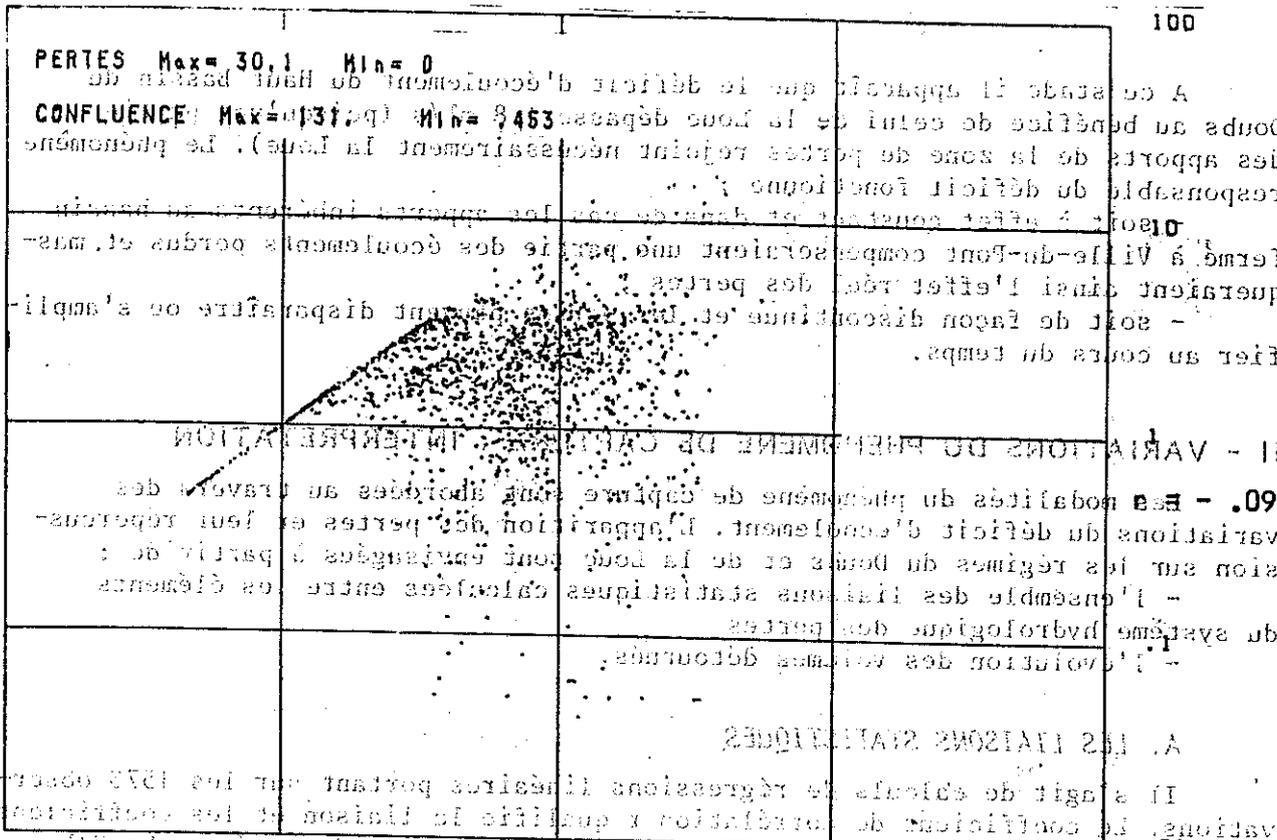


Figure 53 : Evolution des pertes avec les débits du Doubs (1573 couples)

VILLE-DU-PONT

VILLE-DU-PONT Max = 131.5 Min = 0
 CONFLUENCE Max = 131.5 Min = 0.553

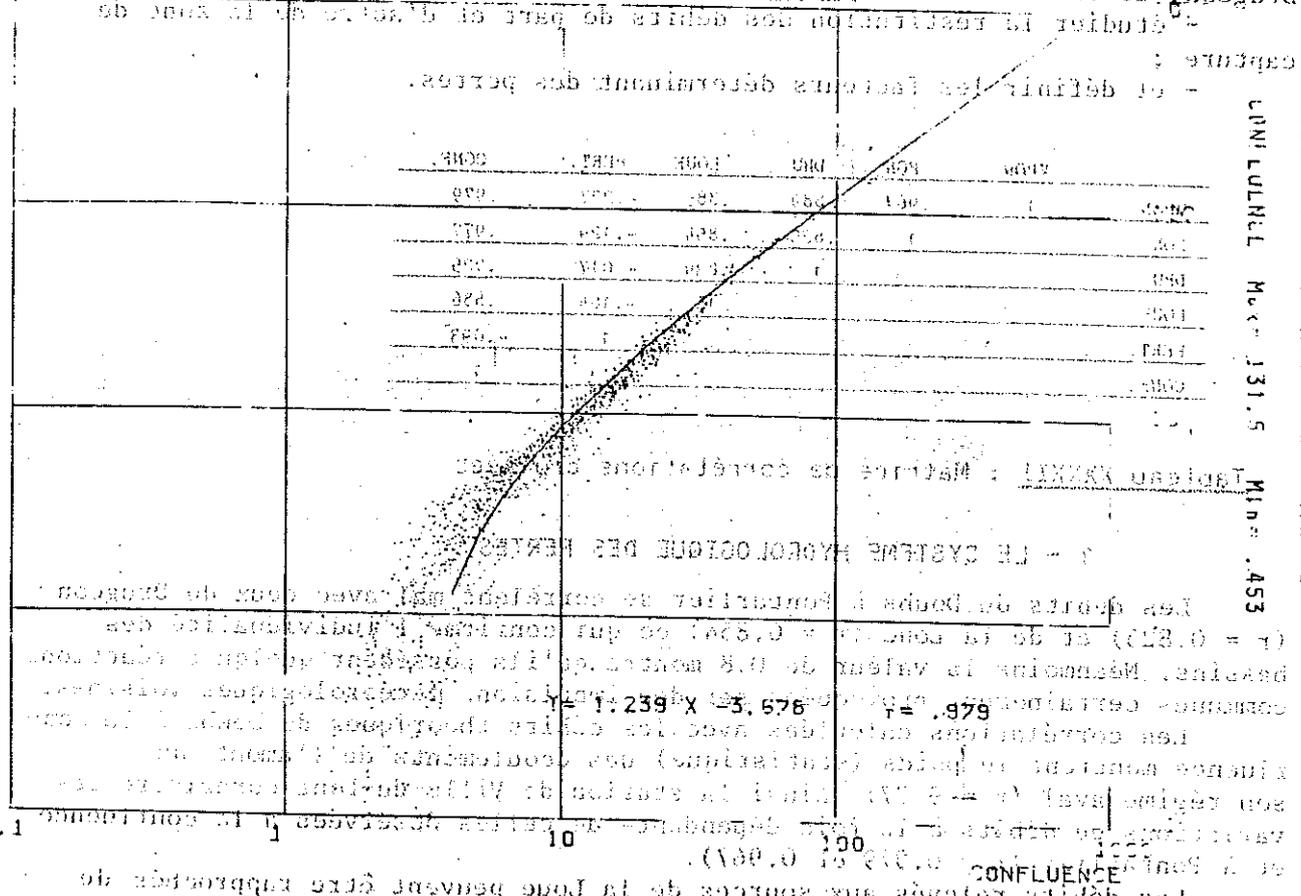


Figure 54 : Diagramme de dispersion des débits du Doubs (1573 couples)

2 - LES PERTES

Les coefficients de corrélation (r) calculés avec les pertes moyennes journalières soulignent l'absence de liaison statistique entre leur produit et les diverses chroniques de débits moyens journaliers. L'évolution et les variations des pertes sont donc totalement indépendantes de celles des écoulements de rivières. La Figure 53 illustre ce résultat en présentant l'évolution du produit des pertes avec les débits du Doubs à la confluence. Le seul alignement remarquable des points correspond aux périodes d'assèchement (Perte = Débit à la confluence).

3 - EFFET DE LA ZONE DE CAPTURE

Les débits observés à Ville-du-Pont se corrélaient très bien avec ceux qui sont reconstitués à la confluence ($r = 0.979$). Le diagramme de dispersion (Fig. 54) montre que la droite de régression résultante (Débit Ville-du-Pont = $1.24 \times Q$ Confluence - 3.07) n'est cependant pas adaptée à la reconstitution des faibles débits. (La suppression pour le calcul des 42 observations où le débit est nul à Ville-du-Pont n'améliore pas la corrélation). Des essais de corrélation triple n'améliorent pas ce résultat :

$$r^2 = .96 \text{ pour } Q \text{ Ville-du-Pont} = - 4.51 + 1.15 \times Q \text{ Confluence} + .16 \times Q \text{ Loue.}$$

$$r^2 = .96 \text{ pour } Q \text{ Ville-du-Pont} = - 3.9 + 1.38 \times Q \text{ Pontarlier} + .97 \times Q \text{ Vuillecin.}$$

La prise en compte des coefficients mensuels (Tabl. XXXXIII) montre que la liaison n'est pas constante entre l'amont et l'aval. En effet, durant :

- 45 mois la liaison est $>.9$ (dont 27 valeurs de $r > 0.99$)
- 4 mois le coefficient est moyen ($r = 0.87$)
- 2 mois la corrélation est médiocre ($r = 0.6$ et 0.68)
- 1 mois les écoulements sont totalement indépendants.

Les corrélations de valeur inférieure à $r = 0.9$ correspondent à des mois marqués par des modules mensuels faibles (exception faite en Mars et Avril 1980) ainsi la moyenne des écoulements est de $5.3 \text{ m}^3/\text{s}$ à la confluence et de $2.0 \text{ m}^3/\text{s}$ à Ville-du-Pont (avec durant 4 des 7 mois des modules mensuels à Ville-du-Pont $< 1 \text{ m}^3/\text{s}$ pour des modules en amont $< 3 \text{ m}^3/\text{s}$). (Tableau XXXXIV).

Sur l'ensemble de la période (52 mois) une période de 10 mois est marquée par un module d'écoulement mensuel plus important à Ville-du-Pont qu'à la confluence. Le coefficient de régression moyen est égal à 0.992 (les 10 coefficients mensuels sont compris entre $.978$ et $.999$) pour des écoulements moyens de $22.8 \text{ m}^3/\text{s}$ à la confluence et de $26.1 \text{ m}^3/\text{s}$ à Ville-du-Pont (le gain = $3.3 \text{ m}^3/\text{s}$). (Les 42 autres mois ont un coefficient moyen de $.937$ avec un module amont de $9.8 \text{ m}^3/\text{s}$ et un module aval de $8.15 \text{ m}^3/\text{s}$ donc avec une perte moyenne de $1.65 \text{ m}^3/\text{s}$).

4 - CONCLUSION

Les liaisons statistiques calculées sur l'ensemble de la période montrent :

- la forte influence des débits observés à Pontarlier sur ceux de la confluence ($r = 0.977$ au lieu de 0.925 avec le Drugeon)
- l'absence de corrélation entre les pertes moyennes journalières et les écoulements du système
- la correspondance des débits théoriques du Doubs à la confluence avec ceux enregistrés à Ville-du-Pont ($r = .979$) selon l'ajustement suivant:

$$Q \text{ Ville-du-Pont} = 1.24 \times Q \text{ Confluence} - 3.07$$

L'analyse mensuelle de ce dernier résultat révèle une dépendance à caractère variable entre les deux stations.

Le débit du Doubs à Ville-du-Pont apparaît généralement inférieur (9,5 mois par an) et proportionnel à celui de la confluence (pour des modules mensuels moyens de l'ordre de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ à la confluence) avec des épisodes de courte durée

a) coefficients r

	SEPT.	OCT.	NOV.	DEC.	JAN.	FEV.	MARS	AVR.	MAI	JUIN	JUI.	AOUT
78 - 79	.868	.873	.16	.995	.991	.995	.993	.991	.991	.985	.68	.964
79 - 80	.971	.934	.998	.994	.99	.996	.885	.869	.995	.978	.987	.972
80 - 81	.957	.99	.992	.994	.998	.97	.999	.984	.988	.987	.966	.938
81 - 82	.991	.981	.999	.994	.994	.998	.99	.997	.988	.994	.983	.992
82 - 83	.607	.991	.986	.992								

total r = .98 (1573 valeurs) Q aval = 1.24 x Q amont -3.7

b) coefficients a et b

	SEPT.	OCT.	NOV.	DEC.	JAN.	FEV.	MARS	AVR.	MAI	JUIN	JUI.	AOUT	
78 - 79	.35	.8	.003	1.2	1.2	1.26	1.16	.96	1.14	1.29	.11	.65	a
	-.7	-1.3	+.01	-2.8	-3.8	-4	-3.66	-1.7	-3.16	-4.48	-.02	-.75	b
79 - 80	.63	.56	1.15	1.22	.72	1.12	.70	.40	1.1	1.61	1.48	.60	a
	-.6	-.82	-3.8	-4.5	-.32	-4.46	-.14	-3.12	-3.73	-10.7	-9	-1.57	b
80 - 81	.61	.91	.89	.98	1.18	.93	1.46	1.1	1.27	1.4	1.	.74	a
	-1.89	-2.27	-1.48	-1.039	-1.85	-1.7	-4.44	-3.73	-3.34	-4.12	-2.51	-1.28	b
81 - 82	.93	1.38	1.03	1.44	1.4	1.08	.99	.84	.9	1.	1.04	1.3	a
	-1.98	-6.87	-1.7	-7.25	-6.9	-2.	-1.	.29	-.2	-1	-1.38	-2.7	b
82 - 83	.4	1.4	1.03	1.47									a
	1	-6.8	-1.6	-6.4									b

a min = 0.003
 a max = 1.61
 Somme des a = 37.513
 a moyen = .89

b min. = -6.87
 b max. = + 3.12
 somme des b = -78.03
 b moyen = - 1.86

Négatifs (42 mois)

a max. = 1.61
 b min. = 1.18
 somme des a = 13.7
 a moyen = 1.37

b min. = - 10.7
 b max. = - 1.57
 somme des b = -60.04
 b moyen = - 6

Positifs (10 mois)

Tableau XXXXIII: Les coefficients des corrélations mensuels (a,b et r) des débits du Doubs entre l'amont et l'aval de la zone des pertes

		SEPT.	OCT.	NOV.	DEC.	JAN.	FEV.	MARS	AVR.	MAI	JUIN	JUI.	AOUT
78 - 79	Conf.	2.82	2.71	1.24	9.23	14.86	29.01	21.54	12.48	11.60	12.04	1.31	4.18
	VPON	.29	.87	.02	8.40	14.08	32.19	21.45	10.24	10.07	11.06	.12	1.97
79 - 80	Conf.	2.81	4.01	20.11	20.46	14.91	31.67	12.17	12.22	11.15	17.92	20.83	3.34
	VPON	1.17	1.47	19.27	20.4	10.49	31.2	8.42	8.07	8.57	18.14	21.76	.45
80 - 81	Conf.	3.88	11.84	3.83	10.59	11.18	5.66	39.17	15.56	9.1	5.39	9.48	2.77
	VPON	.49	8.57	1.92	9.3	11.35	5.12	52.96	13.4	8.25	3.43	7	.76
81 - 82	Conf.	7.33	18.19	7.49	27.68	34.31	7.06	8.93	13.23	6.84	11.77	6.42	12.34
	VPON	4.8	18.17	5.98	32.7	27.24	5.66	7.82	11.34	5.93	10.92	5.32	13.35
82 - 83	Conf.	4.51	17.87	15.33	27.5								
	VPON	2.8	18.6	14.1	33.88								

Tableau XXXXIV : Modules hydrologiques du Doubs à la confluence et à Ville du Pont

et d'apparition brutale (caractérisés par des modules mensuels élevés (23 m³/s à la confluence) durant lesquels cette contingence disparaît (1 mois 1/2 par an).

B. LA CONTRIBUTION DU DOUBS A L'ÉCOULEMENT DE LA LOUE

La participation du Doubs à l'écoulement de la Loue est abordée par comparaison entre l'écoulement des sources et les volumes écoulés et perdus pour différentes classes de débits du Doubs à la confluence.

Les répercussions hydrodynamiques des volumes détournés sont envisagées en considérant la part prise par les débits de pertes dans le régime de la rivière bénéficiaire.

1 - LA PARTICIPATION DU DOUBS A L'ÉCOULEMENT DE LA LOUE

(Tableau XXXV)

Débit à la Confluence	Nbre d'observation du 1/9/78 au 31/12/82		Nbre d'observation du 1/9/78 au 31/12/82		Vol. écoulé à la confi. 10 ⁶ m ³ & débit moy. équivalent	Vol. perdus > 10 ⁶ m ³ & débit moy. équivalent	Perte % par classe	cumulée	Écoulement Loue x 10 ⁶ m ³ & débit moy. équivalent	Participation %	
	J/an	J/an	J/an	J/an						des sources	Total
0	8	1.8	8	1.8	.33(=.5m ³ /s)	.33(=.5m ³ /s)	100	100	1.9(=2.74m ³ /s)	15.4	17.4
.5	23	5.4	31	72	1.38(=.69m ³ /s)	1.37(=.7m ³ /s)	99.3	99.4	6.03(=3.03 m ³ /s)	22.7	17
1	119	27.6	150	34.8	14.62(=1.4m ³ /s)	13.86(=1.35m ³ /s)	94.8	95.3	36.84(=3.6 m ³ /s)	37.6	35
2	392	91	542	125.8	118.57(=7.5m ³ /s)	65.73(=1.9m ³ /s)	55.4	60.3	230.15(=6.8 m ³ /s)	28.5	24
5	443	103	985	228.8	281.75(=7.4m ³ /s)	73.82(=1.9m ³ /s)	26.2	37.2	367.19(=9.6 m ³ /s)	19.3	23.7
10	340	79	1325	307.8	403.12(=13.7m ³ /s)	64.22(=2.2m ³ /s)	15.9	26.8	421.61(=14.3m ³ /s)	15.2	20.3
20	189	43.8	1514	351.6	511.02(=31.3m ³ /s)	25.46(=1.56m ³ /s)	5	18.4	390.41(=23.9m ³ /s)	6.5	16
50	54	12.5	1568	364.1	305.02(=65.4m ³ /s)	4.49(=.96m ³ /s)	1.5	15.2	192.58(=41.3m ³ /s)	2.3	15
100	5	.9	1573	365	40.37(=93.5m ³ /s)	0	0	14.9	21.0(=60.7m ³ /s)	0	14.9
					4676.18(=12.3m ³ /s)	249.28(=1.8m ³ /s)			1667.71(=12.3m ³ /s)		

Tableau XXXV : Participation des débits du Doubs à l'écoulement de la Loue

a. Analyse

En moyenne les écoulements du Doubs participent pour 15% (57x10⁶ m³/an) à ceux des sources de la Loue. L'importance de cette participation varie selon la classe de débit considérée.

La proportion maximale (37,6%) s'observe pour des débits à la confluence qui oscillent entre 1 et 2 m³/s (119 observations soit 27,6 j/an). La perte cumulée de 95,3% indique que l'essentiel des écoulements < 2 m³/s (150 valeurs observées ou 35 j/an) rejoint le bassin des sources de la Loue. (Il compte pour 35% des volumes enregistrés simultanément).

Les débits de perte équivalents se cantonnent (lorsque les écoulements en amont le permettent), à une valeur de 2 m³/s pour des débits à la confluence qui n'excèdent pas 20 m³/s (leur moyenne est de 13.7 m³/s et est peu différente de celle des débits de la Loue (14.3 m³/s)). L'importance du débit détourné

diminue puis disparaît pour des débits supérieurs ($1.6 \text{ m}^3/\text{s}$ de 20 à $50 \text{ m}^3/\text{s}$, $1 \text{ m}^3/\text{s}$ de 50 à $100 \text{ m}^3/\text{s}$, puis $0 \text{ m}^3/\text{s}$ au-delà de $100 \text{ m}^3/\text{s}$). Il apparaît par ailleurs que le produit des pertes diminue dès que les débits moyens équivalents à la confluence et à la Loue sont voisins. (Tableau XXXXVI).

Classes	Loue	Confluence	Loue	Confluence - Loue
0	.5	.5	2.74	- 2.24
1	.7	.69	3.03	- 2.34
1	1.35	1.4	3.6	- 2.2
2	1.9	3.5	6.8	- 3.3
5	1.9	7.4	9.6	- 2.2
10	2.2	13.7	14.3	- 0.6
20	1.5	31.3	23.9	+ 7.4
50	.96	65.4	41.3	24.1
100	0	93.5	60.7	32.8

Tableau XXXXVI : Débits équivalents en m^3/s

La comparaison entre la distribution des débits de la Loue enregistrés et les mêmes débits privés des apports du Doubs (Tabl. XXXXI, colonne 7) montre le soutien apporté par les pertes aux écoulements de la source compris entre 2 et $20 \text{ m}^3/\text{s}$. L'importance des variations (Fig. 55) est maximale entre 6 et $7 \text{ m}^3/\text{s}$ avec 19.4% (71 j/an) puis s'atténue rapidement de part et d'autre de cet intervalle (elle est de 2% soit 7 j/an pour les débits $< 2 \text{ m}^3/\text{s}$ et $> 16 \text{ m}^3/\text{s}$). (Les distributions seraient identiques au-delà de $58 \text{ m}^3/\text{s}$).

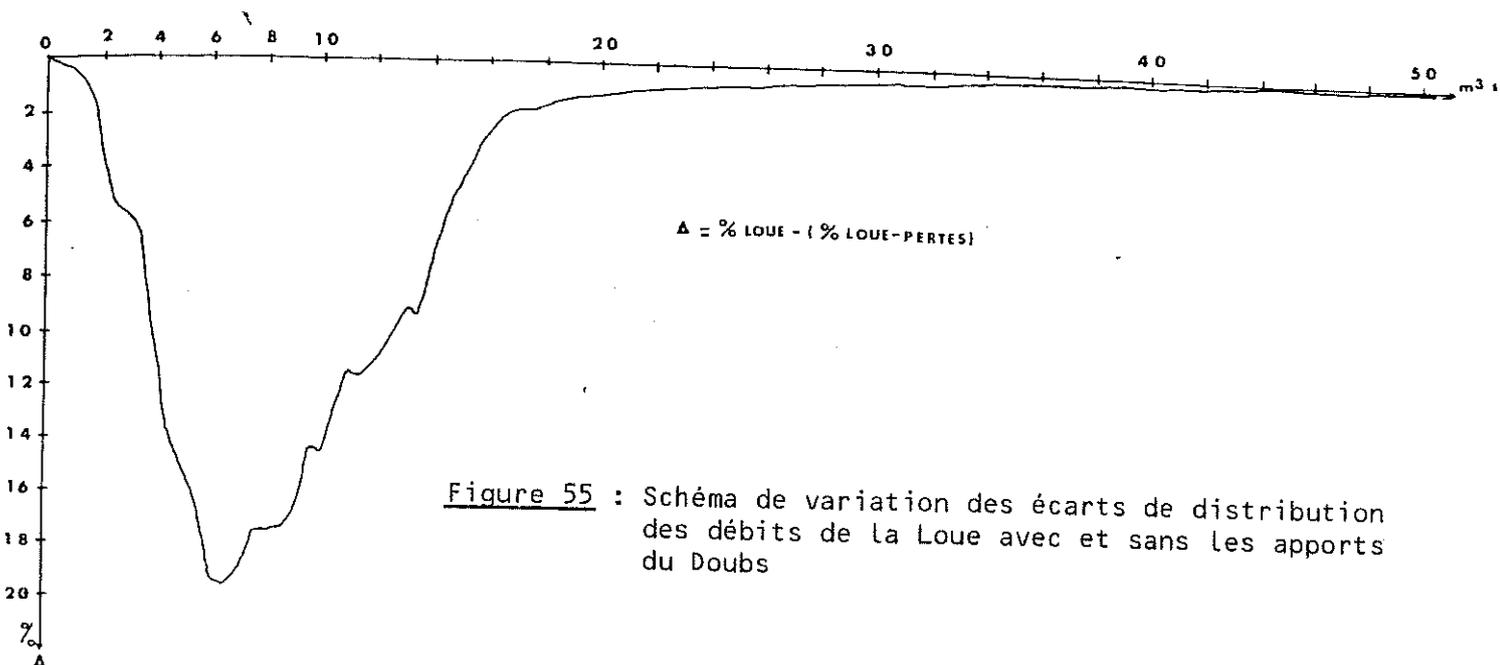


Figure 55 : Schéma de variation des écarts de distribution des débits de la Loue avec et sans les apports du Doubs

b. Résultats

L'ensemble de ces remarques suggère que, statistiquement la zone de capture a en moyenne la possibilité d'absorber 2 m³/s des écoulements du Doubs. Néanmoins, lorsque ces apports, augmentés de ceux du bassin des sources, dépassent un débit d'exhaure de 14 m³/s (soit 12 m³/s d'apports propres à la Loue), la fraction détournée s'atténue puis disparaît (pour des apports >40 m³/s).

2 - CONCLUSION

Les débits du Doubs à Ville-du-Pont sont liés (r=.979) à ceux de la confluence selon l'expression :

$$Q_j \text{ Ville-du-Pont} = 1.24 \times Q_j \text{ Confluence} - 3.07$$

Les corrélations mensuelles rendent compte d'épisodes de courte durée durant lesquels la proportionnalité disparaît entre l'amont et l'aval (1 mois sur 6). Au niveau mensuel, le phénomène de capture se manifesterait donc généralement par des pertes dont le produit serait conditionné par la charge hydraulique du Doubs, sauf durant quelques mois où le déficit serait déterminé différemment.

L'étude de la contribution du Doubs au régime d'écoulement des sources de la Loue confirme ces résultats en précisant que statistiquement le débit absorbé est :

- de l'ordre de 2 m³/s durant 300 j/an pour des débits du Doubs à la confluence qui varient entre 2 et 20 m³/s mais dont la moyenne ne dépasse pas 12 m³/s ;

- inférieur à 2 m³/s le reste de l'année. Cette diminution est liée 58 j/an à des apports équivalents (environ 12 m³/s) sur les bassins du Doubs et de la Loue et elle est d'une semaine par année due au fait que les écoulements du Doubs ne peuvent pas compenser le volume perdu.

Le détournement d'une partie de l'écoulement du Doubs assure aux sources de la Loue un débit de base important (2 m³/s).

C. CONCLUSION : INTERPRETATION HYDROGÉOLOGIQUE DU PHÉNOMÈNE

1 - RESULTATS

Le Doubs subit un phénomène de capture au bénéfice des sources de la Loue particulièrement sensible entre Pontarlier et Ville-du-Pont.

Le système hydrologique des pertes se compose :

- du Doubs enregistré à Pontarlier et à Ville-du-Pont
- du Drugeon observé à Vuillecin
- des sources de la Loue exploitées à Mouthier.

L'analyse des chroniques de débits constituées en chacun de ces points du 1/9/78 au 31/12/82 (1573 valeurs) traduit un déficit global de 0.7 m³/s estimé par l'expression :

$$\text{Déficit} = \text{Débit du Doubs (Pontarlier-Ville-du-Pont)} + \text{Débit du Drugeon} + \text{Apports.}$$

Les apports inhérents au bassin délimité par les trois stations du Haut Bassin du Doubs (Pontarlier, Vuillecin et Ville-du-Pont) ne sont pas pris en compte dans l'analyse (du fait des difficultés liées à leur évaluation). Les valeurs de déficit calculées sont donc exprimées par défaut.

La distribution des pertes moyennes journalières révèle un déficit moyen journalier de 1.8 m³/s (équivalent à 15% des débits du Doubs et de la Loue) qui traduit :

- 47 j/an de perte nulle (le débit à Ville-du-Pont étant au moins égal à celui de la confluence) ;

- un détournement de $2.1 \text{ m}^3/\text{s}$ le reste de l'année (le Doubs participant pour 17% à l'écoulement de la Loue).

L'analyse des variations observées du déficit d'écoulement du Doubs définit le phénomène de capture comme généralement constant. Il prélèverait en moyenne $2 \text{ m}^3/\text{s}$ des écoulements du Doubs pour les débits à la confluence $< 20 \text{ m}^3/\text{s}$ (et il absorberait la totalité des débits $< 2 \text{ m}^3/\text{s}$). Mais le débit de perte diminuerait avec l'augmentation des apports directement soumis à la Loue (notamment lorsque ces apports dépassent $12 \text{ m}^3/\text{s}$).

La surface équivalente de 342.04 km^2 calculée pour l'alimentation des sources de la Loue n'engloberait plus que 290.7 km^2 puisque les apports extérieurs au bassin estimés à 15% représentent 51.3 km^2 . Le Doubs à Ville-du-Pont devrait avoir, au minimum, un module de $13.4 \text{ m}^3/\text{s}$ ($11.6 + 1.8 \text{ m}^3/\text{s}$) au lieu des $11.6 \text{ m}^3/\text{s}$ observés. La surface du bassin équivalent serait de 402.2 km^2 d'où un bassin hydrologique équivalent de 30 km^2 pour la zone délimitée par les trois stations de Pontarlier, Vuillecin et Ville-du-Pont (les surfaces équivalentes du Doubs à Pontarlier et du Dugeon à Vuillecin ont été respectivement estimées à 261.15 et 111.07 km^2).

2 - INTERPRETATION DU PHENOMENE DE CAPTURE

Le produit des pertes n'apparaît pas comme dépendant de la charge hydraulique du Doubs à la confluence puisqu'il se limite le plus fréquemment à $1 \text{ m}^3/\text{s}$. De plus le phénomène responsable est temporaire.

L'ensemble des résultats indique que c'est la capacité d'absorption des calcaires, sur lesquels s'écoule le Doubs, qui évolue au cours du temps.

Le degré de fissuration des calcaires jurassiques conditionne les infiltrations et l'ouverture des vides n'évolue que très lentement au cours du temps. Aussi les diminutions et augmentations des pertes sont à rattacher à un phénomène capable de faire varier la perméabilité de fissure du massif traversé.

La variation de ce paramètre peut s'interpréter comme soumise aux fluctuations du niveau piézométrique de la nappe karstique drainée par les sources de la Loue (Fig. 56). Un abaissement du niveau piézométrique suivi d'un dénoyage partiel du réseau karstique favorise l'infiltration des eaux d'écoulement du Doubs par le biais des fissures ouvertes dans son lit.

Inversement le remplissage de l'aquifère se marquerait, suivant son importance et sa vitesse, par une diminution ou une disparition des pertes.

Ainsi quel que soit l'état de saturation du massif, une période d'étiage occasionne un rabattement plus ou moins important de la nappe karstique. Les écoulements absorbés tendent vers un maximum et les corrélations entre la confluence et Ville-du-Pont sont très mauvaises ou moyennes.

Durant un épisode pluvieux les drains fissuraux sont empruntés par les lames de ruissellement (provenant de la zone de capture et de l'impluvium des sources). Les infiltrations rapides résultantes entraînent une remontée du niveau piézométrique qui se traduit par :

- soit une diminution progressive du produit des pertes si cette période succède à un étiage,
- soit un arrêt du phénomène de détournement par saturation de l'aquifère.

(Les corrélations calculées sur le Doubs pendant des pluies sont donc bonnes avec parfois l'observation d'une prédominance des écoulements en aval de la zone des pertes).

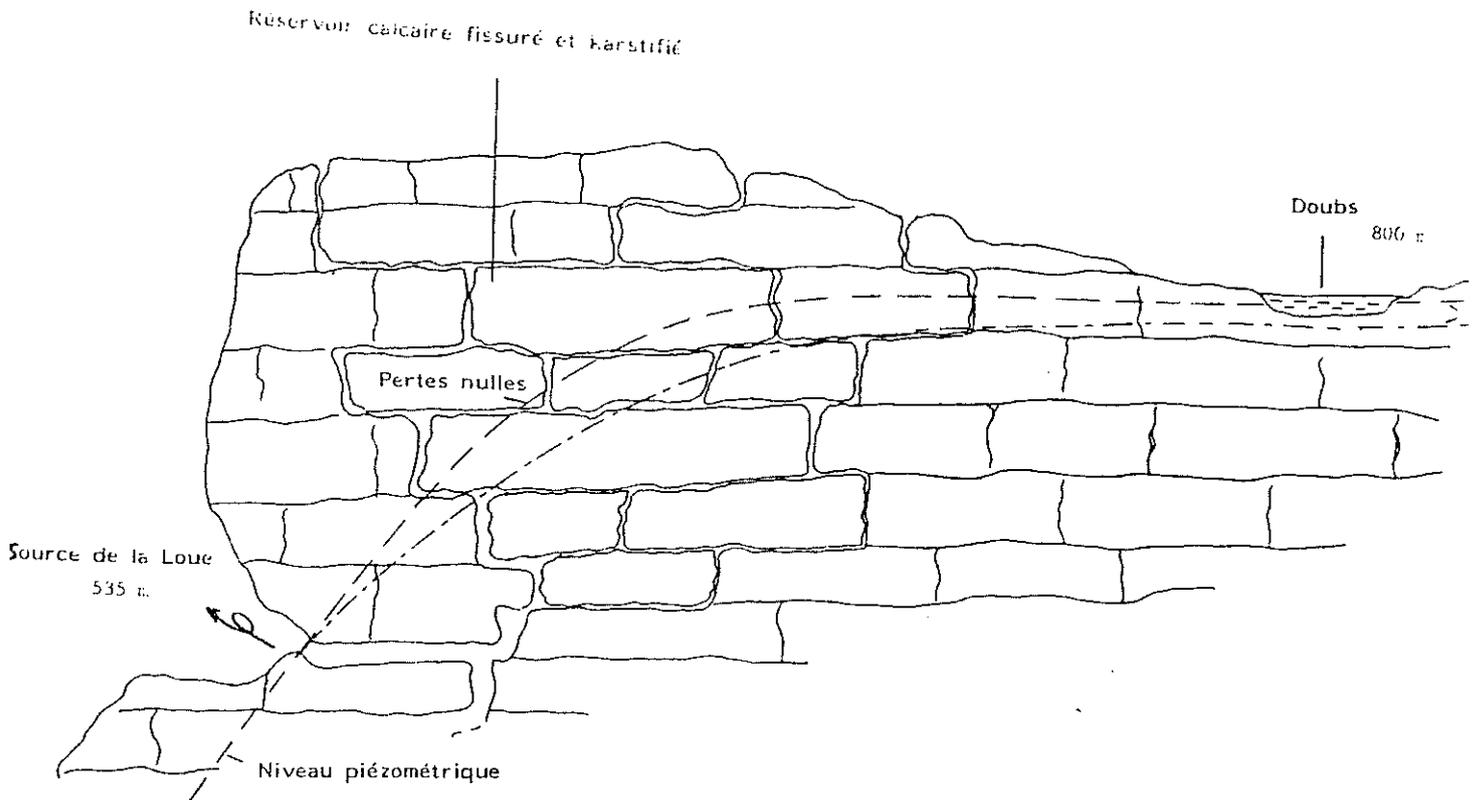


Figure 56 : Interprétation hydrogéologique du déficit d'écoulement

3 - CONCLUSION

L'interprétation du phénomène de capture par des fluctuations piézométriques permet :

- de caractériser la capacité d'absorption des calcaires à $2 \text{ m}^3/\text{s}$;
- d'expliquer l'existence de pertes nettement inférieures à ce seuil alors que les débits à la confluence le dépassent largement ;
- d'envisager la possibilité de débits de pertes supérieurs à $5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Le bassin d'alimentation des sources de la Loue possède une superficie variable et se caractérise par la juxtaposition d'un bassin de détournement (équivalent à 51.3 km^2) à son propre bassin d'alimentation (qui n'excéderait alors pas 290.7 km^2). Le bassin résultant tend à entretenir une saturation maximale du réservoir karstique ce qui explique le débit de base relativement élevé enregistré aux sources de la Loue ($2 \text{ m}^3/\text{s}$ qui se limiterait à $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ sans les apports du Doubs).

III - LOCALISATION DES ZONES D'INFILTRATION

Une perte moyenne de $1.8 \text{ m}^3/\text{s}$ est déduite de l'analyse comparative des écoulements du Doubs à Ville-du-Pont et de ceux observés à Pontarlier et à Vuillecin.

Le débit du Doubs s'accroît normalement de la station de Oye-et-Pallet à celle du Pont des Rosiers (Pontarlier Amont). Le soutirage vers la Loue peut se manifester de façon :

- homogène sur la totalité du lit de la rivière,
- ou différente en s'accroissant sur certaines zones.

Les résultats de 9 séries de jaugeages ponctuels et la chronique des débits moyens journaliers enregistrée à Pontarlier (du 1/9/78 au 31/5/81) nous permettent d'aborder le déficit d'écoulement :

- de Pontarlier Amont à la confluence (sur le Doubs)
- de Vuillecin à la confluence (sur le Drugeon)
- au niveau de la confluence
- de la confluence à Ville-du-Pont.

A. LE DOUBS DE PONTARLIER AMONT A LA CONFLUENCE

1 - LES JAUGEAGES

Les mesures effectuées parallèlement au Pont des Rosiers et à Doubs témoignent d'un déficit pouvant atteindre 100% du débit amont (1.1 m³/s le 2.X.1979). Le produit des pertes est néanmoins très variable (26% le 6.XII.1978 et 39% le 2.VIII.1983) avec une partie des écoulements (0.5 m³/s le 2.X.1979 et .3 m³/s le 6.XII.1979) qui disparaît entre Pontarlier Amont et Pontarlier Ville. Entre Pontarlier Ville et Doubs le débit perdu est nul le 2.XI et 3.XII.1979, de l'ordre de 0.5 m³/s le 2.X et le 6.XII.1979 et égal à 2.2 m³/s le 14.II.1979.

2 - LES CHRONIQUES DE DEBITS

L'implantation temporaire d'une station hydrologique à Pontarlier (dite "Ville") permet de juger de l'importance des pertes en amont et en aval de ce point à partir des chroniques établies entre le 1/9/78 et le 31/5/81 (970 valeurs).

Les deux stations pontissaliennes (Tabl. XXXXVII) ont la même moyenne d'écoulement avec cependant un volume de 50.2 x 10⁶ m³/an perdu durant 254 j/an qui est compensé par les 111 j/an durant lesquels le débit est supérieur à l'aval qu'à l'amont. La perte moyenne est donc 0.6 m³/s alors qu'elle est de 2.05 m³/s entre Pontarlier Amont et Ville-du-Pont. Il disparaît donc 1.45 m³/s (soit 70% du débit perdu) entre Pontarlier, Ville-du-Pont. (La participation du Doubs à l'écoulement de la Loue a été de 16% durant cette période).

	Volumes écoulés en 10 ⁶ m ³		Moyenne m ³ /s	Pertes m ³ /s
	du 1/9/78- 31/5/81	par an		
1. Pontarlier Amont	743.02	279.59	8.87	1-2 = 0.6
2. Pontarlier Ville	743.41	279.73	8.87	
3. Vuillecin (Drugeon)	310.64	116.89	3.71	
4. Confluence Amont	1053.66	394.48	12.57	
5. Confluence Avale	1054.05	396.63	12.58	
6. Ville-du-Pont	971.71	365.64	11.59	5-6 = 1.68
7. Mouthier (Loue)	1014.56	381.77	12.11	4-6 = 2.05

Tableau XXXXVII : Volumes écoulés entre le 1.9.78 et le 31.5.81

On remarquera qu'une partie des écoulements perdus au niveau de Pontarlier réapparaît en aval puisqu'il y a 111 j/an de perte entre Pontarlier Amont et Pontarlier Ville alors qu'il n'y en a que 43 si l'on considère à la fois Pontarlier Amont, Vuillecin et Ville-du-Pont. Ainsi le volume perdu entre Pontarlier Ville et Ville-du-Pont serait de $53.08 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ ou de $1.68 \text{ m}^3/\text{s}$, c'est-à-dire une perte globale de $2.28 \text{ m}^3/\text{s}$ (au lieu de $2.05 \text{ m}^3/\text{s}$) entre Pontarlier Amont et Ville-du-Pont.

En résumé il se perd $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ entre Pontarlier Amont et Pontarlier Ville et $1.68 \text{ m}^3/\text{s}$ entre Pontarlier Ville et Ville-du-Pont avec une restitution de 34% ($0.23 \text{ m}^3/\text{s}$) des pertes pontissaliennes sur ce tronçon de rivière. La perte globale est de $2.05 \text{ m}^3/\text{s}$ ($50.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$). En définitive 70% du produit des pertes disparaît entre Pontarlier et Ville-du-Pont sans que l'on puisse évaluer la perméabilité de la zone qui se situe entre Pontarlier et la confluence.

B. LE DRUGEON

Les mesures de débits effectuées sur le Drugeon le 29 Janvier 1980 n'ont pas révélé de pertes entre Bonnevaux et la confluence.

Bonnevaux	0.6 m ³ /s	Dommartin	3.5 m ³ /s
Bouverans	2	Vuillecin	4.2
La Rivière Drugeon	2.4	Pont Rouge	4.3
Bannans	3	Confluence	4.5
Houtaud	3.6		

Les jaugeages sériés du 3 Mars 1983 concentrés entre la station de Vuillecin et la confluence (5 mesures en amont du Pont Rouge et 6 en aval) montrent (Annexe V) pour un état hydrologique équivalent au précédent (moyennes eaux) :

- une différence de $.41 \text{ m}^3/\text{s}$ entre le jaugeage de la Passerelle et celui situé 100 m en aval ;
- un déficit de $.66 \text{ m}^3/\text{s}$ entre la mesure effectuée 400 m en aval du Pont Rouge et celle réalisée 50 m avant la confluence.

Le bilan global dénote un gain de $.31 \text{ m}^3/\text{s}$ le long du tronçon étudié.

C. LA ZONE DE CONFLUENCE

Une étude hydrologique particulière des débits pouvant être absorbés au niveau de la confluence a été entreprise le 10 Mars 1980 et complétée le 23 Juin 1983. Les jaugeages effectués le 10 Mars révèlent des débits de :

- . $3.45 \text{ m}^3/\text{s}$ et $4.35 \text{ m}^3/\text{s}$ pour le Drugeon (respectivement à 500 et 100 m en amont de la confluence).
- . 5.5 et $5.55 \text{ m}^3/\text{s}$ sur le Doubs (à 300 et 50 m avant la confluence).
- . $9.35 \text{ m}^3/\text{s}$ à 100 m en aval de la confluence.

Le déficit serait de $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ au travers de la zone de confluence des deux rivières. (Le résultat n'est pas significatif si l'on admet une erreur de mesure au minimum de 10%).

Les résultats obtenus pour des basses eaux (23 Juin 1983) ne confirment pas la première observation puisque le débit du Doubs amont était de $.92 \text{ m}^3/\text{s}$ et celui du Drugeon de $.64 \text{ m}^3/\text{s}$ alors que $1.6 \text{ m}^3/\text{s}$ s'écoulaient à la confluence (perte potentielle de $.06 \text{ m}^3/\text{s}$).

Figure 57 : Evolution des infiltrations entre la confluence et le Défilé d'Entreroche

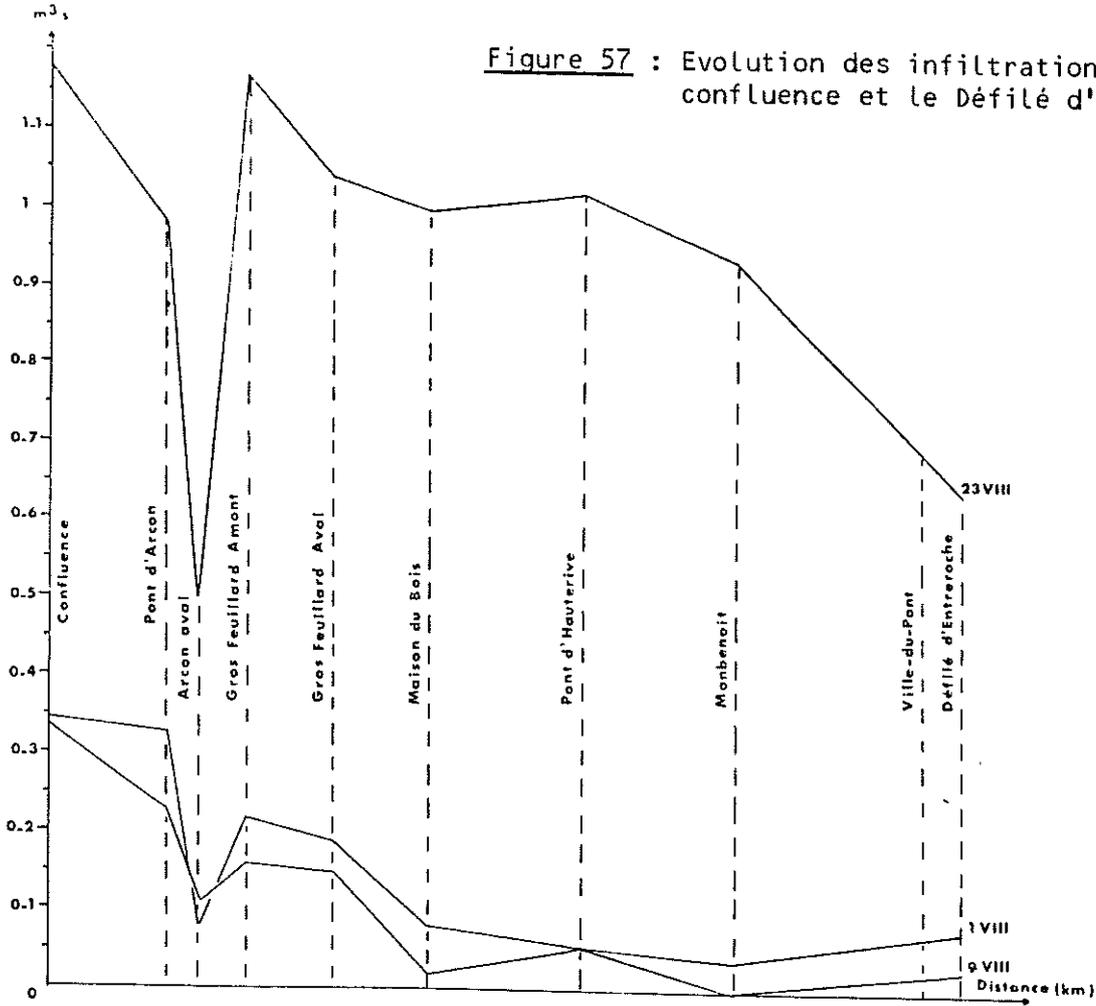
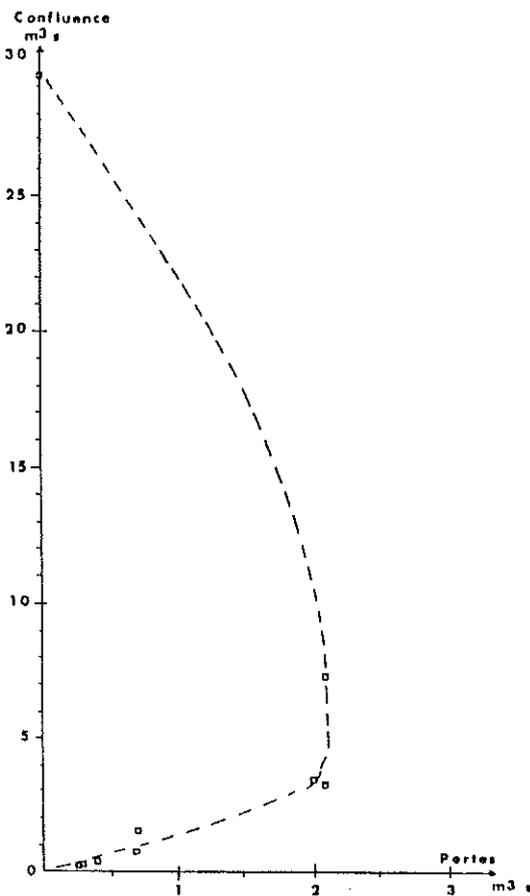


Figure 58 : Dispersion des pertes avec les débits à la confluence



D. LE DOUBS DE LA CONFLUENCE AU DEFILE D'ENTREROCHE

1 - LE DEFICIT D'ECOULEMENT GLOBAL

En se référant aux neuf séries de jaugeages (Tabl. XXXXVIII) réalisées sur cette partie de la rivière, il apparaît :

. un débit de perte qui varie de 0 à 2.1 m³/s pour des écoulements à la confluence mesurés entre 0.33 et 29.5 m³/s.

Distance entre les stations en km	STATIONS	DEBITS MESURES en m ³ /s								
		1979+					Aout 1983			
		14 II	2 X	2 XI	3 XII	6 XII	1	2	9	23
	Oye et Pallet		1	4.7	2.9	2.5		.81		
	Pontarlier Amont		1.1			3		.85		
	Pontarlier Ville	25.6	0.6	4.5	2.6	2.7				
	Doubs	23.4	0	4.7	2.5	2.2		.52		
	Drugeon	6.1	0.4	2.4	1	1		.36		.48
1,5	Confluence (500m en aval)	29.5	0.4	7.1	3.5	3.2	.34	.93	.33	1.33
4	Pont d'Arcon		0		3.2		.33	.4	.23	.98
6	Arcon Aval		0				.08		.11	.5
1.1	Gros feuillard amont			6.2	3.1		.22		.16	1.34
1.2	Gros feuillard aval						.19		.15	1.04
1.9	Maison du Bois (Moulin)			5.5	2	2	.08		.02	1
2	Pont d'Auterive	32.5	0	5.7	1.4	1.5	.06		.06	1.2
2.2	Montbenoit				1.3		.04		0	.89
.7	Ville du Pont	30.7	0	5	1.5	.9				
	Entrée d'Entreroche						.08	.22	.03	.64
Pertes entre la confluence & Ville-du-Pont	m ³ /s	0	.4	2.1	2	2.1	.26	.71	.30	.69
	%	0	100	29.6	57.1	65.6	76.5	76.3	90.9	51.9
Pertes totales en aval de Pontarlier	m ³ /s	0	1.5			3.1		.99		
	%	0	100			77.5		81.8		

in *P. CHAUVE, G. CHARLES, A. LEONETTI (1980) : Les pertes du Doubs

* * jaugeages réalisés par le S.R.A.E. de Franche-Comté

Tableau XXXXVIII : Résultats des jaugeages ponctuels

Les résultats reportés sur un graphique de régression (Fig. 58) montrent trois étapes dans la relation des débits perdus avec ceux qui s'écoulent à la confluence.

Pour un débit qui varie de 0 à 3.5 m³/s à la confluence, la perte observée serait proportionnelle à ces écoulements selon l'expression :

$$\text{Perte} = .57 \times \text{Débit Confluence}$$

Au-delà de 3.5 m³/s et jusqu'à une valeur qui sur le graphe correspondrait à 9 m³/s, le débit détourné est de l'ordre de 2 m³/s.

Le prolongement de la droite de dispersion traduirait une diminution constante des pertes jusqu'à la valeur mesurée le 14.II.1979 à la confluence (29.5 m³/s).

2 - LES ZONES D'INFILTRATION

- Les jaugeages du 2.X.1979 montrent que pour un débit nul du Doubs (à Doubs), les écoulements du Drugeon disparaissent entre la confluence et le Pont d'Arçon. L'existence de cette zone d'infiltration se confirme par les résultats obtenus ultérieurement (avec un volume absorbé qui oscille entre 0.01 et .53 m³/s).

- Les trois séries de mesures réalisées en Août 1983 révèlent la même anomalie hydrologique entre le Pont d'Arçon et l'amont de la perte de Gros Feuillard. Le débit du Doubs en aval du Pont d'Arçon est de 24, 47.8 ou 51% (les 1, 9 et 23 Août) de son écoulement amont alors qu'au niveau du Gros Feuillard il en représente 66.6, 69.5 ou 136.7%. Il y a donc infiltration partielle du débit qui réapparaît pour toute ou partie à l'aval.

- Les observations faites le 2.XI.1979 à Maison-du-Bois et au Pont d'Hauterive laissent supposer une réalimentation de la rivière entre ces deux points. Le même résultat est obtenu les 9 et 23.VII.1983 alors que le bilan est négatif les 3 et 6.XII.1979 et le 1.VIII.1983.

- La mise en parallèle des séries de jaugeages faites aux mêmes points en Août 1983 (Fig. 57) montre, en plus des remarques déjà formulées, que l'infiltration dans le lit du Doubs est maximale entre la station située en amont de la perte du Gros Feuillard et Maison-du-Bois. On remarque que l'écoulement dans le secteur du Gros Feuillard est plus nettement déficitaire lorsque le débit amont est supérieur à 1 m³/s.

3 - RESULTATS

Pour un déficit d'écoulement entre la confluence et Ville-du-Pont inférieur ou égal à 2 m³/s, il apparaît que les zones d'infiltration préférentielle se situent :

- en amont du Pont d'Arçon
- entre l'aval de la perte du Gros Feuillard et Maison-du-Bois.

Les deux anomalies reconnues sur ce secteur (entre le Pont d'Arçon et l'aval d'une part et entre Maison-du-Bois et le Pont d'Hauterive d'autre part) suggèrent l'éventualité d'une circulation d'eau en-dessous du lit de la rivière puisque :

- il n'existe pas d'arrivées d'eau notables entre la confluence et Ville-du-Pont ;

- le débit observé au Pont d'Arçon peut être diminué de moitié et réapparaître plus important en aval.

E. CONCLUSION

L'analyse des résultats des neuf séries de jaugeages et la comparaison de la chronique de débit enregistrée à Pontarlier avec celles des stations permanentes montre que :

- 30% du déficit d'écoulement est effectif entre les deux stations pontissaliennes,
- le Drugeon ne semble pas directement affecté par le phénomène de capture,
- le passage de la rivière au travers la zone de confluence n'entraîne pas de perte notable,
- de Pontarlier Ville à Ville-du-Pont l'infiltration est manifeste :
 - . entre Pontarlier Ville et Doubs
 - . de la confluence à Arçon
 - . au niveau de la perte du Gros Feuillard avec un déficit plus important entre la station située en aval de ce point et Maison-du-Bois.

- des anomalies positives suggèrent sur certains secteurs la possibilité d'écoulement sous le lit de la rivière.

La présence de l'accident de Pontarlier conditionne la localisation des pertes puisque l'essentiel des débits perdus disparaissent à sa proximité immédiate.

IV - REGULATION DES ETIAGES A VILLE-DU-PONT

Les périodes d'assèchement du lit du Doubs entre Pontarlier et Ville-du-Pont nuisent au développement du tourisme dans la vallée.

Les solutions déjà envisagées pour entretenir un débit limite de 0.5 m³/s à Ville-du-Pont sont discutées à la suite de l'étude des caractéristiques et de la réapparition des étiages inférieurs à cette valeur.

A. ANALYSES DES ETIAGES OBSERVES

La chronique des débits moyens journaliers du Doubs à Ville-du-Pont témoigne de la succession de quinze épisodes d'étiages < 0.5 m³/s durant les 52 mois d'enregistrement (du 1/9/78 au 31/12/82). L'ensemble des résultats qui intéressent ces périodes apparaissent dans le Tableau XXXXIX).

Durée/j	Etiages		Volumes écoulés en 10 ⁶ m ³		Débits Equivalents		Pertes		Complément à .5m ³ /s		Pluie	
	Début	fin	Confluence	Ville-du-Pont	Confluence	Ville-du-Pont	10 ⁶ m ³	m ³ /s	10 ⁶ m ³	m ³ /s	Totale	Moyenne mm/j
3	9.9.78	11.9.78	.74	.025	3.85	.1	.71	2.75	.1	.40	24.5	6.
14	17.9.78	30.9.78	2.72	.106	2.25	.09	2.6	2.16	.5	.41	42.9	3
6	13.10.78	18.10.78	1.1	.121	2.14	.23	.99	1.9	.14	.27	14.7	2.4
50	20.10.78	8.12.78	5.7	.195	1.33	.05	5.55	1.28	1.96	.45	45.9	.9
47	3.7.79	18.8.79	3.99	.254	.98	.06	3.74	.92	1.78	.44	263	4.3
30	16.9.79	15.10.79	3.84	.099	1.48	.04	3.74	1.44	1.20	.46	226.8	7.5
12	4.8.80	15.8.80	3.20	.20	3.09	.19	3.	2.89	.31	.30	46.9	3.9
23	21.8.80	12.9.80	6.17	.28	3.1	.14	5.89	2.97	.72	.36	102.5	4.4
4	18.9.80	21.9.80	1.18	.075	3.42	.22	1.1	3.2	.097	.28	8.4	2.1
11	27.9.80	7.10.80	2.5	.059	2.64	.06	2.45	2.57	.416	.44	2	.2
11	18.6.81	28.6.81	2.72	.203	2.86	.21	2.51	2.64	.27	.28	46.5	4.2
1	2.7.81		.31	.031	3.63	.36	.28	3.27	.01	.14	6.4	6.4
18	16.8.81	2.9.81	3.01	.23	1.94	.15	2.78	1.79	.54	.35	120.2	6.7
16	4.9.81	13.9.81	1.71	.12	1.98	.14	1.59	1.84	.31	.36	67.6	6.8
2	21.9.82	22.9.82	.43	.074	2.5	.42	.34	2.08	.01	.07	21.4	10.7
Total 242			39.14	2.07	1.87	.1	37.07	1.78	8.36	.39	979.7	4
Moy. 16.1			2.6	.14	1.88	.1	2.47	1.77	.56	.4	65.2	4.

Tableau XXXXIX : Caractéristiques des écoulements durant les étiages du Doubs à Ville du Pont < 0.5 m³/s

LE DOUBS A VILLE-DU-PONT (1/9/78-31/12/82)

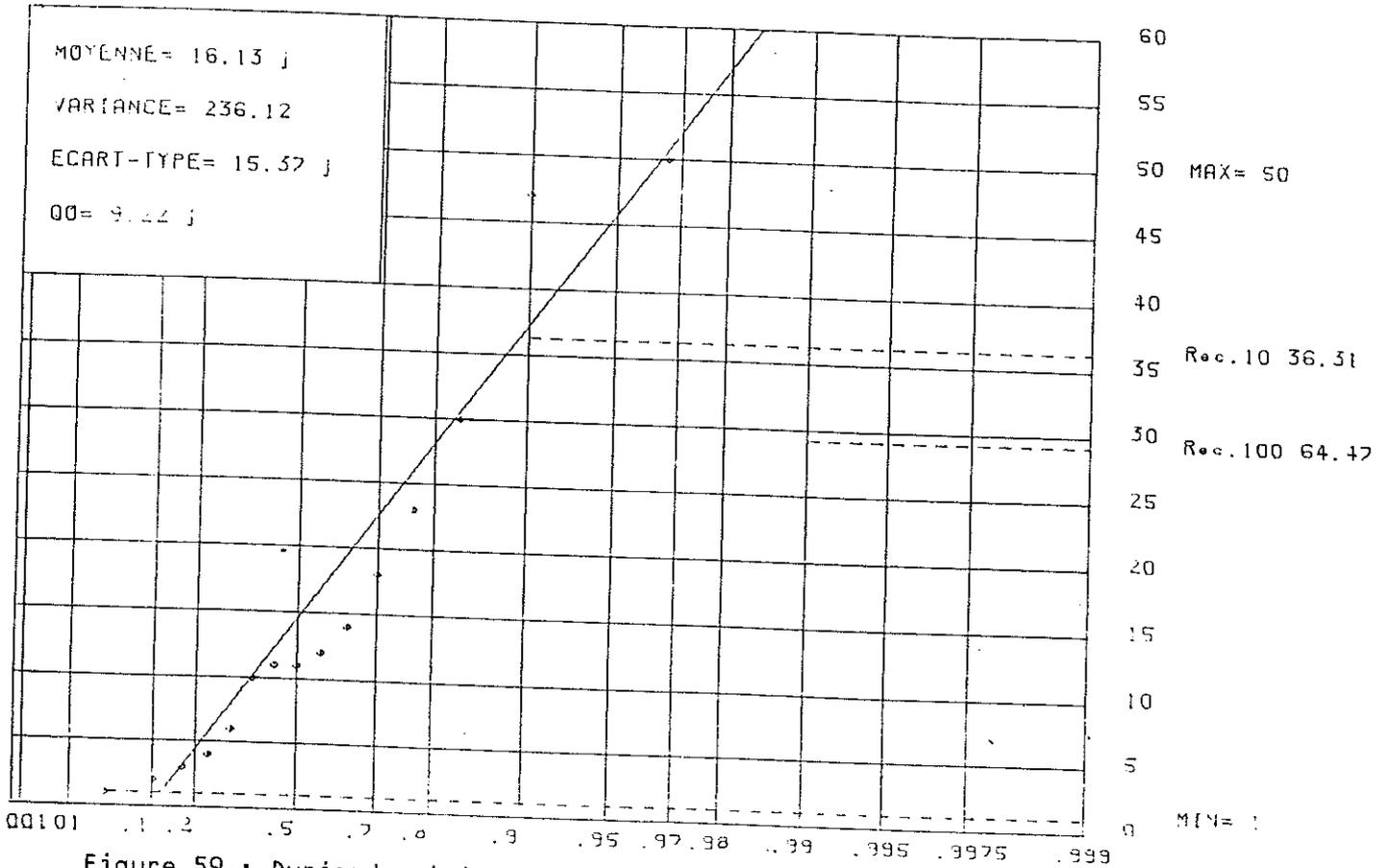


Figure 59 : Durées des étiages inférieures à 0.5 m³/s (Ajustement Gumbel)

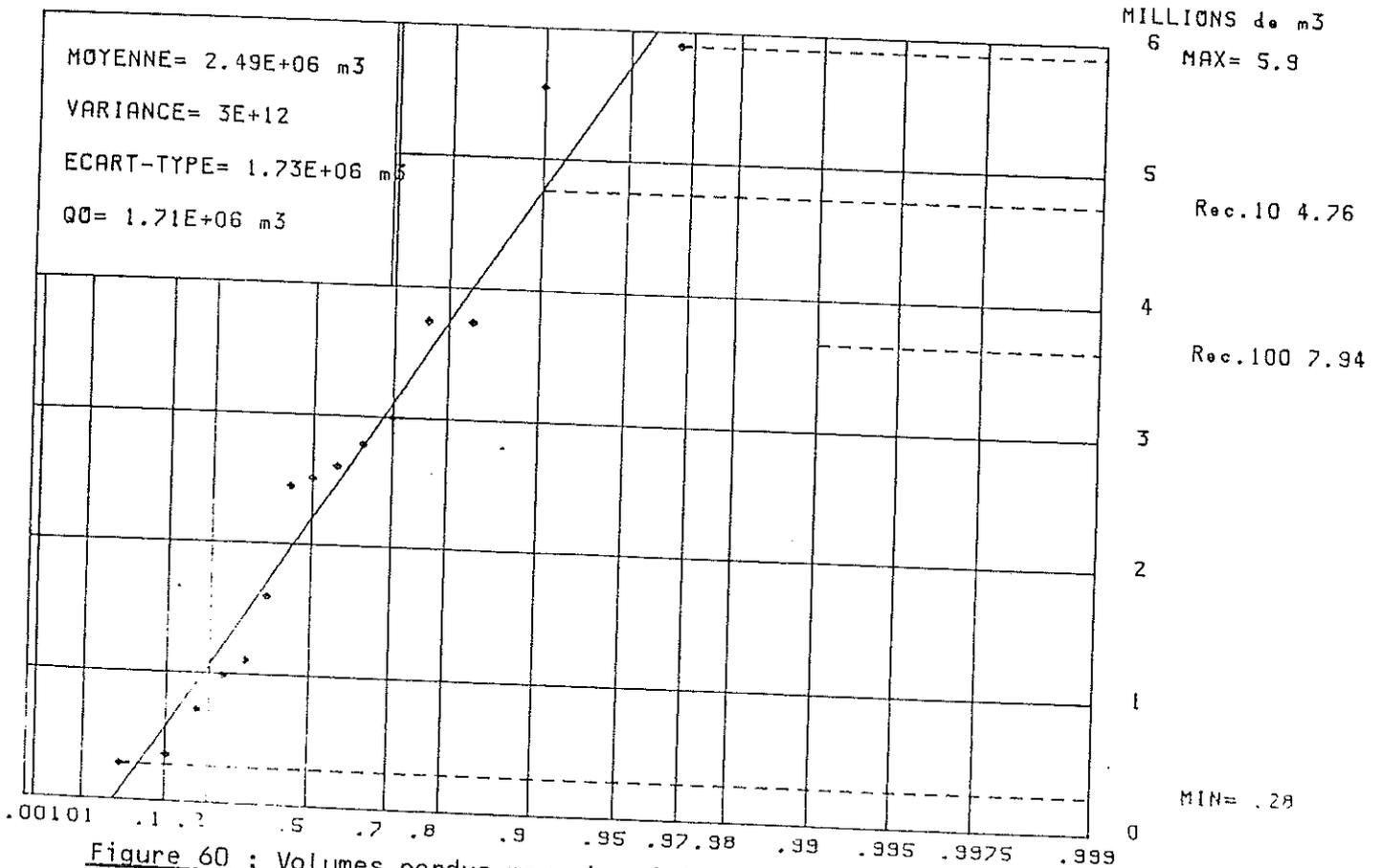


Figure 60 : Volumes perdus pour les étiages du Doubs à Ville du Pont inférieurs à 0.5 m³/s (Ajustement Gumbel)

1 - LA DUREE

Les débits inférieurs à 0.5 m³/s représentent au total 242 jours (soit 15.4% des valeurs ou 56 j/an) dont 42 sont marqués par un écoulement nul (10 j/an).

La durée de l'étiage moyen est de 16 jours et l'ajustement des 15 observations (voir Dubreuil : Initiation à l'analyse en hydrologie) à une loi de Gumbel (Fig. 59) donne une récurrence d'apparition de :

- 36.3 j pour la fréquence 0.1 (étiage "décennal")
- 64.5 j pour la fréquence 0.01 (étiage "centennal")
- (et aussi 46, 57 et 130 j pour les fréquences 0.05, 0.02 et 0.001).

Ainsi l'étiage de l'automne 1978, si l'on excepte le débit du 19/10, était la fréquence 0.02 (étiage "cinquantennal"). Un tel étiage possède une chance sur 50 d'apparaître dans les 12 mois, alors que l'on a une chance sur deux d'observer une étiage de 18 jours dans la même période.

2 - LES ECOULEMENTS

Le débit moyen du Doubs est de 1.88 m³/s à la confluence (avec 1.3 m³/s à Pontarlier et 0.58 m³/s pour le Drugeon à Vuillecin), et de 0.1 m³/s à Ville-du-Pont. (En 1980 : P. CHAUVE, G. CHARLES, A. LEONETTI prévoient un assèchement du Doubs en aval de Maison-du-Bois pour un débit de 1.2 m³/s à Pontarlier). Le déficit moyen est donc de 1.78 m³/s. (La moyenne des débits de la Loue est de 4.5 m³/s).

Le Tabl. XXXIX montre dans le détail des variations de :

- 0.98 à 3.63 m³/s à la confluence
- 0.04 à 0.42 m³/s à Ville-du-Pont
- 0.92 à 3.27 m³/s pour les pertes.

L'ajustement à la loi de Gumbel des volumes perdus (Fig. 60) lors des étiages indique des pertes équivalentes à :

- 4.76 x 10⁶ m³ pour la fréquence 0.1
- 7.94 x 10⁶ m³ pour la fréquence 0.01

Pour les quinze épisodes de basses eaux le volume total détourné a été de 37.07 x 10⁶ m³ soit 94,7% des écoulements de la confluence et 39.5% de ceux des sources de la Loue.

3 - LES VOLUMES COMPLEMENTAIRES

Les volumes nécessaires au maintien à 0.5 m³/s du débit du Doubs à Ville-du-Pont représentent une quantité de 8.36 x 10⁶ m³ soit 22.5% des volumes détournés.

Le débit de soutien moyen est de 0.4 m³/s (minimum 0.07 m³/s pendant 2 jours et maximum 0.46 m³/s durant 30 jours).

L'ajustement Gumbel des volumes complémentaires (Fig. 61) révèle un apport de :

- 1.37 x 10⁶ m³ pour la fréquence 0.1
- 2.5 x 10⁶ m³ pour la fréquence 0.01

4 - LA PLUVIOMETRIE

L'examen des modules pluviométriques journaliers enregistrés à Labergement durant les 15 étiages infirme la dépendance de leur durée avec une anomalie météorologique. La valeur de 4 mm/j calculée pour les 242 jours d'étiage est voisine des modules journaliers qui caractérisent les mois de Juin, Juillet, Août, Septembre, Octobre et Novembre à la station de Labergement. (Les modules moyens calculés de Septembre 1969 à Août 1983 sont, pour les mois cités, respectivement de 4.8, 3.5, 4.2, 3.6, 3.5 et 4.9 mm/j).

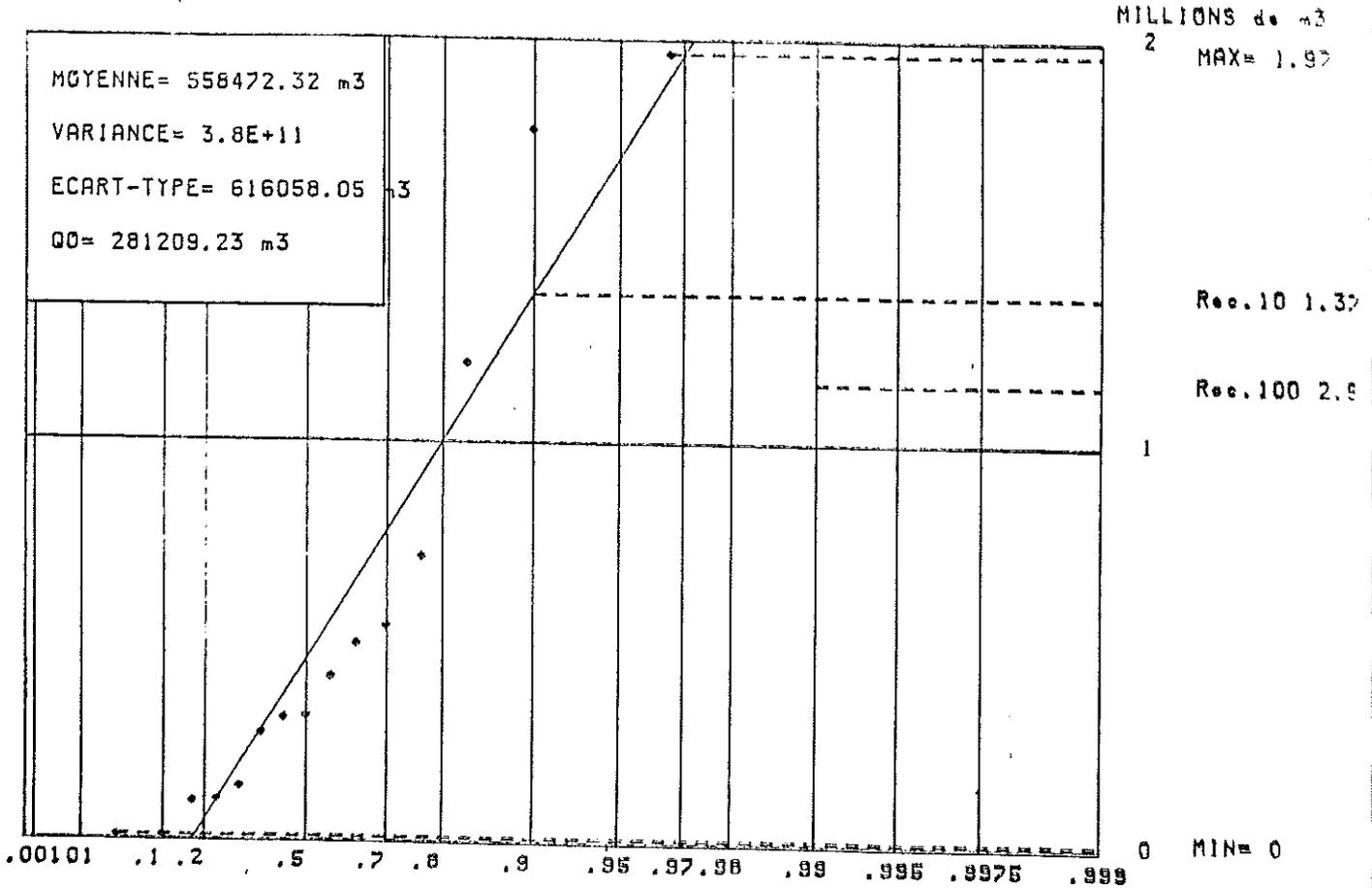


Figure 61 : Volumes complémentaires pour les étiages = 0.5 m³/s (Ajustement Gumbel)

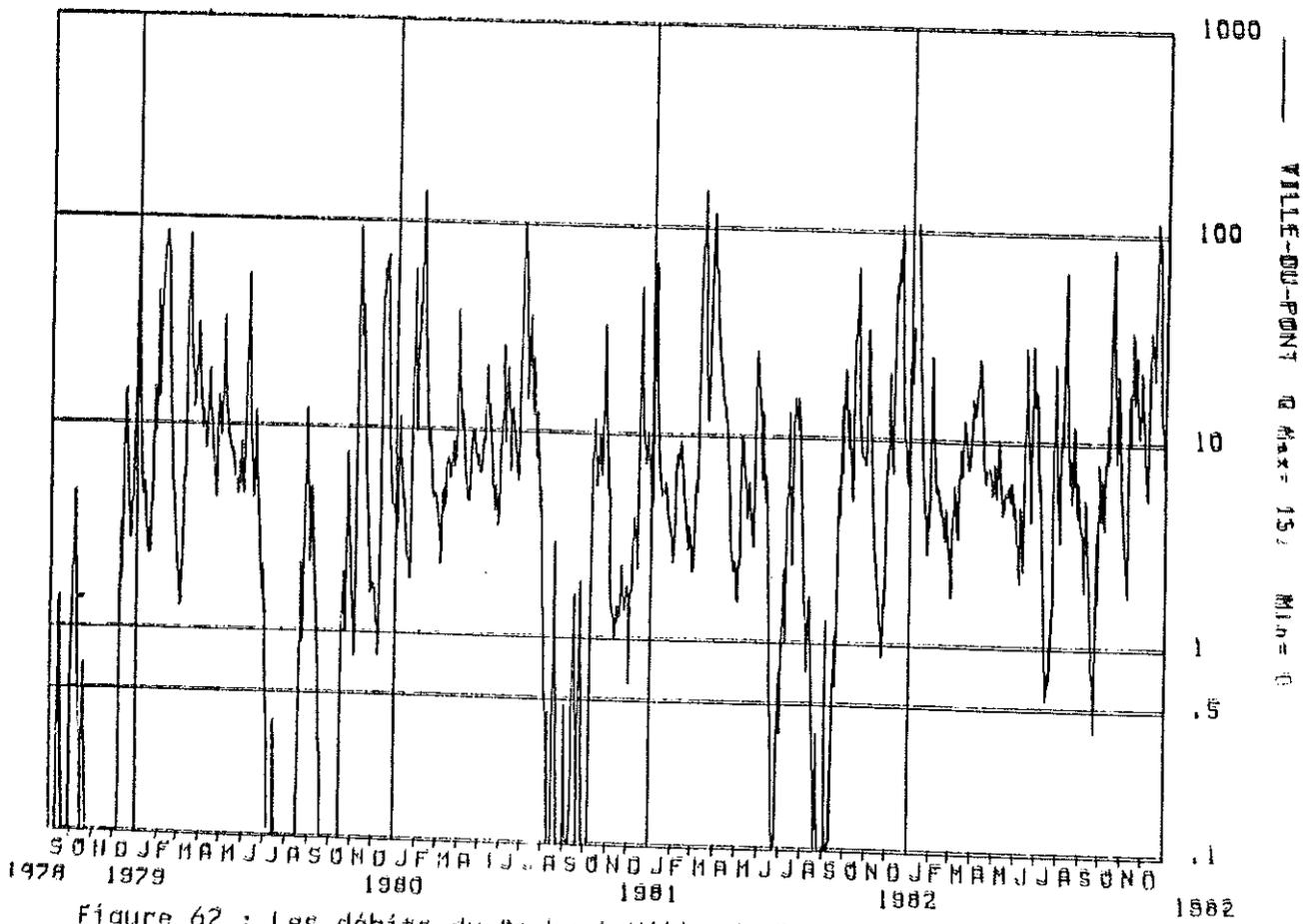


Figure 62 : Les débits du Doubs à Ville du Pont du 1.8.78 au 31.12.82

Sur les 52 mois d'observation des pertes, seuls les cycles 78-79 et 80-81 sont inférieurs à la moyenne interannuelle de 1474.1 mm/an (avec 1384.3 mm en 78-79 et 1347.1 mm en 80-81 alors que les étiages ont été plus sévères en 1978-1979).

5 - CONCLUSION

Les débits du Doubs à Ville-du-Pont sont en moyenne inférieurs à 0.5 m³/s durant 56 j/an. Ces débits d'étiages coïncident avec une perte de 8.6 x 10⁶ m³/an et nécessiteraient un apport de 1.94 x 10⁶ m³/an (soit 22.5% de la quantité détournée qui elle-même représente 39.5% du régime de la Loue pendant ces périodes).

Néanmoins la moyenne interannuelle des étiages est de 16 jours et elle correspond à un déficit de 2.47 x 10⁶ m³ et un soutien éventuel de .56 x 10⁶ m³ (0.4 m³/s).

L'ajustement de ces paramètres à la loi de Gumbel conduit à linéariser leur répartition théorique puis à caractériser les étiages de fréquence :

. 0.1 pour une durée de 36.3 j avec 4.76x10⁶ m³ détournés et un soutien éventuel de 1.37x10⁶ m³ (soit 0.44 m³/s).

. 0.01 pour une durée de 64.5 j avec 64.5x10⁶ m³ détournés et un apport éventuel de 2.5x10⁶ m³ (soit 0.45 m³/s).

(L'étiage "millénaire" (de fréquence 0.001) correspondrait à une durée de 130 jours durant lesquels il se perdrait 11x10⁶ m³ et qu'il conviendrait d'apporter 3.6x10⁶ m³ (0.32 m³/s) pour soutenir le débit du Doubs à Ville-du-Pont).

B. LA REGULATION DES DEBITS D'ETIAGE

Les moyens susceptibles de contrarier l'assèchement du Doubs entre Pontarlier et Ville-du-Pont consistent :

- soit à diminuer l'importance des pertes en limitant les infiltrations
- soit à compenser leur effet en augmentant le débit du Doubs à l'amont de la zone de capture.

(P. CHAUVE, G. CHARLES, A. LEONETTI (1980) ont proposé une solution mixte à ce problème (intervention sur le lit du Doubs et apports complémentaires en étiage)).

1 - LIMITATION DES INFILTRATIONS

Les interventions consisteraient à modifier la perméabilité des zones d'infiltration préférentielles par divers moyens (colmatage, construction de margelle au droit des principales pertes ...). On peut s'attendre dans ce contexte de pertes fissurales à une reprise rapide du transit vers la Loue. Néanmoins la conséquence directe de cette entreprise serait une diminution du débit de base des sources de la Loue qui pourrait correspondre au 2/5^{ème} de sa valeur actuelle (c'est-à-dire que le débit de base serait voisin de 0.8 m³/s dans l'éventualité d'un colmatage total du lit du Doubs. Mais cette solution extrême n'est économiquement pas justifiable et pratiquement non réalisable).

2 - SOUTIEN DES DEBITS D'ETIAGE

Parmi les propositions avancées pour soutenir les débits d'étiage du Doubs celle qui en réfère à l'utilisation du lac de St Point comme lieu de stockage est la plus facilement envisageable (puisqu'un barrage existe déjà à son exutoire et que le Doubs en est l'émissaire).

La mise en réserve des volumes complémentaires des étiages de fréquence 0.1 et 0.01 sur les 420 ha du plan d'eau conditionne une élévation de 0.33 à 0.60 m de son niveau actuel (et 0.86 m pour la fréquence 0.001).

La compensation totale du produit des pertes nécessiterait, pour les mêmes fréquences, une remontée de 1.13 à 1.54 m du niveau du lac.

3 - RESULTATS

La régulation des étiages par action directe sur le lit du Doubs (colmatage ...) est à la fois peu fiable et préjudiciable à l'écoulement des sources de la Loue.

L'éventualité d'un stockage des volumes de soutien au niveau du lac de St Point est possible et sa mise en oeuvre accessible. (Un rapport du cabinet MERLIN (1983) fait état de l'incidence sur les installations bordières et du coût d'un relèvement de 0.40 m de la surface du plan d'eau). Il convient dans ce cas de chercher un repère dont le dépassement conditionnerait les lâchers.

La surveillance du niveau piézométrique dans le réseau de soutirage permettrait d'assurer son remplissage minimal avant désamorçage et accentuation des infiltrations compensatrices du Doubs. (Cette entreprise suppose l'installation d'un piézomètre et son observation sur plusieurs cycles hydrologiques).

Dans l'état actuel il convient de trouver un repère hydrométrique (puisque l'étude météorologique n'a pas révélé l'existence de constante climatique durant les étiages) pour présider aux mouvements des vannes.

4 - OPTIMISATION DES LACHERS

L'installation d'un étiage n'est jamais brutale, elle fait suite à une période de tarissement plus moins longue qui révèle la désaturation progressive du (des) réservoir(s) d'alimentation. La forme extrême du tarissement est l'assèchement du réseau hydrographique.

L'examen de la chronique des débits moyens journaliers du Doubs à Ville-du-Pont (Fig. 62) montre que le débit devient inférieur à 0.5 m³/s après un, deux ou trois jours d'enregistrement d'écoulements < 1 m³/s.

Il est donc judicieux de caler les mouvements de vannes à St Point sur des repères hydrométriques pris en aval de la zone des pertes (d'autant que les variations observées sont le reflet de celles du niveau piézométrique qui est supposé déterminer les infiltrations). Ainsi le dépassement d'un certain seuil de tarissement marquerait le début des lâchers en amont et la reprise des écoulements déterminerait leur arrêt.

La régulation des étiages < 0.5 m³/s à Ville-du-Pont par des apports du lac St Point débiterait après 2 jours marqués par des débits de tarissement < 1 m³/s, et s'arrêterait dès que les écoulements (débit naturel + soutien) dépassent cette valeur.

Une remontée de 0.40 m du niveau actuel de la retenue correspond à une mise en réserve de 1.68x10⁶ m³ qui seraient évacués en 39 jours à raison de 0.5 m³/s. Un rendement optimal serait obtenu en :

- procédant à une ouverture progressive des vannes (0.1 m³/s le 1er jour, 0.2 m³/s le 2nd ...) puisque la valeur du débit du 3ème jour après passage en-dessous de 1 m³/s est très proche de 0.5 m³/s ;
- en limitant le débit de soutien à 0.4 m³/s (le débit moyen à Ville-du-Pont est de 0.1 m³/s durant les étiages).

L'adoption de cette méthode de gestion permet d'envisager d'entretenir à Ville-du-Pont un débit voisin de 0.5 m³/s durant 47 jours consécutifs. L'arrêt de la vidange dès l'apparition d'un débit moyen journalier > 1 m³/s permettrait de reconstituer les réserves dans l'attente d'un nouvel épisode de tarissement. (Il est entendu que l'observation d'un débit < 1 m³/s le

jour qui suit la remontée des vannes conditionnerait la reprise immédiate de lâchers à 0.4 m³/s). Une incertitude demeure pour des écoulements nuls observés car on ne peut pas assurer que le débit complémentaire ne sera pas totalement absorbé avant d'atteindre Ville-du-Pont.

Le bilan des résultats qui auraient été obtenus par cette méthode durant les 52 mois d'observation est positif puisque :

- les lâchers auraient coïncidé avec les étiages observés (avec un retard de 1 ou 2 jours dans trois des cas et une anticipation de 1 ou 2 jours pour trois autres étiages) ;

- un seul lâcher inutile de 2 jours (les 14 et 15 Juillet 1982 puisque le 3ème jour le débit moyen était encore de 0.57 m³/s).

- Remarque : P. CHAUVE et Coll. (1980) prévoyaient un assèchement du lit du Doubs en aval de Maison-du-Bois pour un débit limite de 1.2 m³/s à la station hydrologique de Pontarlier. La régulation des étiages à Ville-du-Pont nécessiterait alors l'entretien d'un débit de 1.7 m³/s en amont de la zone de capture. L'utilisation de ce repère sur les 52 mois de référence montre 209 jours d'étiage (pour 242 observés) dont 185 coïncident avec les épisodes enregistrés (soit 76% de réussite). Le stockage des volumes complémentaires déterminés par cette méthode nécessiterait une remontée de 0.64 m pour l'étiage de recurrence 10 et une de 1.27 m pour celui de recurrence 100.

5 - CONCLUSION

La régulation des étiages à Ville-du-Pont est envisageable en apportant au débit du Doubs un soutien susceptible de compenser 22.5% des volumes détournés vers la Loue durant ces périodes.

Le stockage est possible au niveau du lac de St Point mais la remontée de son niveau ne pourrait excéder 0.40 m sans nuire aux installations bordières. Les lâchers débuteraient après 2 jours de débits de tarissement inférieurs à 1 m³/s à Ville-du-Pont et ils s'arrêteraient dès l'apparition d'un écoulement total (débit naturel + soutien) égal à cette valeur. L'optimisation de ces opérations devrait permettre d'entretenir en aval de la zone de pertes un débit voisin de 0.5 m³/s durant 47 jours consécutifs.

C. CONCLUSION

L'analyse des étiages observés (< 0.5 m³/s) du Doubs à Ville-du-Pont entre le 1/9/78 et le 31/12/82 révèle la disparition de 95% du débit du Doubs à la confluence entre ce point et Ville-du-Pont. La participation du Doubs à l'écoulement de la Loue s'élève à environ 40%.

L'ajustement à la loi de Gumbel des paramètres principaux permet d'extrapoler les caractéristiques de l'étiage "décennal" (fréquence 0.1) et "centennal" (fréquence 0.01).

Leurs durées respectives sont de 36.3 et 64.5 jours et s'accompagnent d'un déficit global de 4.76x10⁶ m³ ou 7.94x10⁶ m³ qui nécessiterait un soutien de 1.37x10⁶ m³ (0.44 m³/s) dans un cas et 2.5x10⁶ m³ (0.45 m³/s) dans l'autre.

La mise en oeuvre des solutions destinées à limiter l'infiltration laisse, dans ce contexte de pertes par fissures, des doutes quant à leur efficacité à long terme.

Le stockage éventuel, au niveau du lac St Point, des volumes complémentaires d'étiages conditionne une remontée de 0.33 à 0.60 m de son niveau actuel pour pallier 22.5% du produit des pertes associé aux fréquences 0.1 et 0.01.

L'essai de calage des mouvements de vannes avec l'hydrométrie montre que seule la prise en compte du débit à Ville-du-Pont peut permettre d'optimiser les possibilités régulatrices de cette solution. Une remontée de 0.40 m de la surface du plan d'eau rendrait possible l'entretien d'un débit de 0.5 m³/s durant 47 jours à Ville-du-Pont.

V - CONCLUSIONS

Le déficit d'écoulement du Haut Bassin du Doubs au profit de celui de la Loue s'évalue en posant le bilan :

Déficit = Débit du Doubs à Pontarlier + Débit du Dugeon à Vuillecin - Débit du Doubs à Ville-du-Pont.

L'analyse statistique des chroniques de débits journaliers enregistrées en divers points du système des pertes révèle une perte moyenne journalière de 1.8 m³/s (56.8x10⁶ m³/an soit 15% du régime des sources de la Loue).

Les variations quantitatives des débits perdus et l'instabilité de la dépendance des débits entre l'amont et l'aval de la zone de capture suggèrent une interprétation du phénomène dans laquelle intervient l'état de saturation du réservoir fissuré des sources de la Loue.

Les infiltrations seraient conditionnées par les fluctuations du niveau piézométrique. Un rabattement se traduit par un dénoyage partiel du réseau karstique suivi d'infiltrations compensatrices du Doubs qui peuvent correspondre à la totalité de ses écoulements (en aval de Pontarlier) et de ceux du Dugeon.

Les sources de la Loue se caractérisent par la juxtaposition à leur propre bassin d'alimentation d'un bassin de détournement. L'importance du réservoir résultant lui assure un débit de base relativement élevé (2 m³/s) tout en conditionnant une nette atténuation des signaux générateurs de crues.

La chronique des débits moyens journaliers constituée à la station hydrologique temporaire de Pontarlier Ville permet d'estimer à 70% le produit des pertes en aval de ce point. Les résultats des séries de jaugeages ponctuels montrent que l'essentiel des infiltrations se produisent au niveau de l'accident de Pontarlier.

La mise en place de cet accident tectonique a conditionné à la fois le tracé du Doubs et l'évolution du phénomène de capture (en dirigeant les infiltrations fissurales vers la Loue). Actuellement c'est à son niveau que se modulent les possibilités d'absorption.

Les moyens destinés à assurer à Ville-du-Pont un débit minimal de 0.5 m³/s doivent soit occasionner une diminution de 22.5% des volumes détournés durant les étiages (< 0.5 m³/s) par diverses opérations de colmatage, soit compenser la quantité qui se perd en utilisant le lac St Point comme lieu de stockage.

La mise en oeuvre de cette dernière solution et le calage des lâchers de soutien devraient permettre, pour remonter de 0.40 m de la surface actuelle du plan d'eau, de pallier à un étiage de 47 jours (fréquence 0.05), ce qui ne nie pas l'existence de communication entre les bassins.

CONCLUSIONS.

L'étude des trois phénomènes de surfaces particuliers rencontrés sur les Hauts Bassins du Doubs et de la Loue montre que :

- notre connaissance actuelle de la répartition et de l'évolution des paramètres météorologiques ne nous permet pas de reconstituer très précisément les réponses hydrodynamiques liées à l'enneigement,
- la surface du lac de St Point n'est pas horizontale et que les quantités d'eau retenues (par le barrage) ne constituent qu'un obstacle temporaire à la propagation du signal hydrologique (de l'amont vers l'aval),
- la capture partielle des débits du Doubs au profit de la Loue n'est ni constante ni proportionnelle à la charge hydraulique de la rivière. Les débits détournés sont contrôlés par des facteurs tectoniques (accident de Pontarlier) et hydraulique (car dépendant de l'état de remplissage du réservoir calcaire sous-jacent).

On retient que :

. L'essai de reconstitution de la fonte d'une couche de neige par le modèle thermodynamique HELIOS respecte la dynamique de fusion et les corrections au signal pluie fournissent une précision supplémentaire à la simulation des écoulements. Cependant les améliorations obtenues sont d'importance inégale et on ne peut à la fois conserver la sensibilité du système hydrologique en début de période (Décembre-Janvier) et retarder jusqu'au printemps (Avril) la disparition rapide de la couverture neigeuse. Ces remarques traduisent l'approche empirique qui est faite des phénomènes météorologiques par le modèle HELIOS et une conception imprécise des fonctions d'infiltrations (qui conditionne les résultats calculés par le modèle MERO). Une meilleure résolution de la fusion nivale nécessiterait un recalage du modèle à partir de mesures in situ des paramètres météorologiques utilisés et des lames de fusion.

. Les variations de hauteur de la tranche d'eau observées le long du lac de St Point révèlent à l'analyse le comportement de la surface en fonction de l'état hydrologique du réseau hydrographique. L'arrivée d'une crue provoque l'apparition d'une onde qui se déplace d'amont en aval avec une vitesse et une amplitude proportionnelles à la durée et à l'importance du signal de départ. Il y a donc un déphasage plus ou moins grand qui apparaît entre le régime du Doubs de part et d'autre de la retenue (entre Labergement et Oye et Pallet).

. L'analyse statique des débits du Doubs à Pontarlier et à Ville du Pont, des débits du Drugeon à Vuillecin et de ceux de la Loue à Mouthier enregistrés durant 108 mois permet d'estimer à $1.8\text{m}^3/\text{s}$ la perte moyenne journalière du Doubs sur cette partie de son cours. Cette perte témoigne d'un phénomène de capture du Doubs par la Loue où la détermination des débits de fuite est liée à l'état piézométrique du réservoir calcaire bénéficiaire. Les jaugeages sérieux confirment cette hypothèse et soulignent le rôle de l'accident de Pontarlier dans la genèse et l'évolution du phénomène et aussi sur la localisation et la détermination des débits détournés.

A partir de cette hypothèse et de l'étude fréquentielle de la réapparition des étiages à Ville du Pont, on a envisagé les différentes possibilités susceptibles d'assurer, en aval de la zone de capture, un débit minimum de $0.5\text{m}^3/\text{s}$. La solution la plus simple et la plus sûre, consisterait à utiliser le lac de St Point comme lieu de réserve pour soutenir le débit d'étiage du Doubs en compensant le produit des pertes. L'optimisation des lâchers est obtenue en calant les mouvements de vannes sur la courbe de tarissement du Doubs à Ville du Pont. Par exemple une remontée du niveau actuel du lac de 0.40m permettrait le stockage de $1.7 \times 10^6\text{m}^3$ qui, lâché deux jours après que le débit du Doubs à Ville du Pont ait été inférieur à $1\text{m}^3/\text{s}$ (à raison de $0.1\text{m}^3/\text{s}$ le premier jour et $0.2\text{m}^3/\text{s}$ le second ...) permettrait d'assurer un débit minimal voisin de $0.5\text{m}^3/\text{s}$ en ce point durant 47 jours consécutifs.

Au terme de cette étude des phénomènes propres à l'hydrologie de surface, il apparaît que seule la partie consacrée au détournement partiel des débits du Doubs au bénéfice de la Loue apporte une estimation quantitative de la perturbation des écoulements et une solution pratique au problème des pertes.

La tentative de simulation de la fusion nivale à l'échelle du bassin versant et l'examen des variations limnimétriques du lac de St Point nécessitent des travaux complémentaires pour :

- définir la variabilité des paramètres météorologiques et l'évolution saisonnière de l'infiltration dans le cas de l'enneigement ;
- préciser numériquement le ralentissement de régime du Doubs qui succèdent à la traversée du lac de St Point.

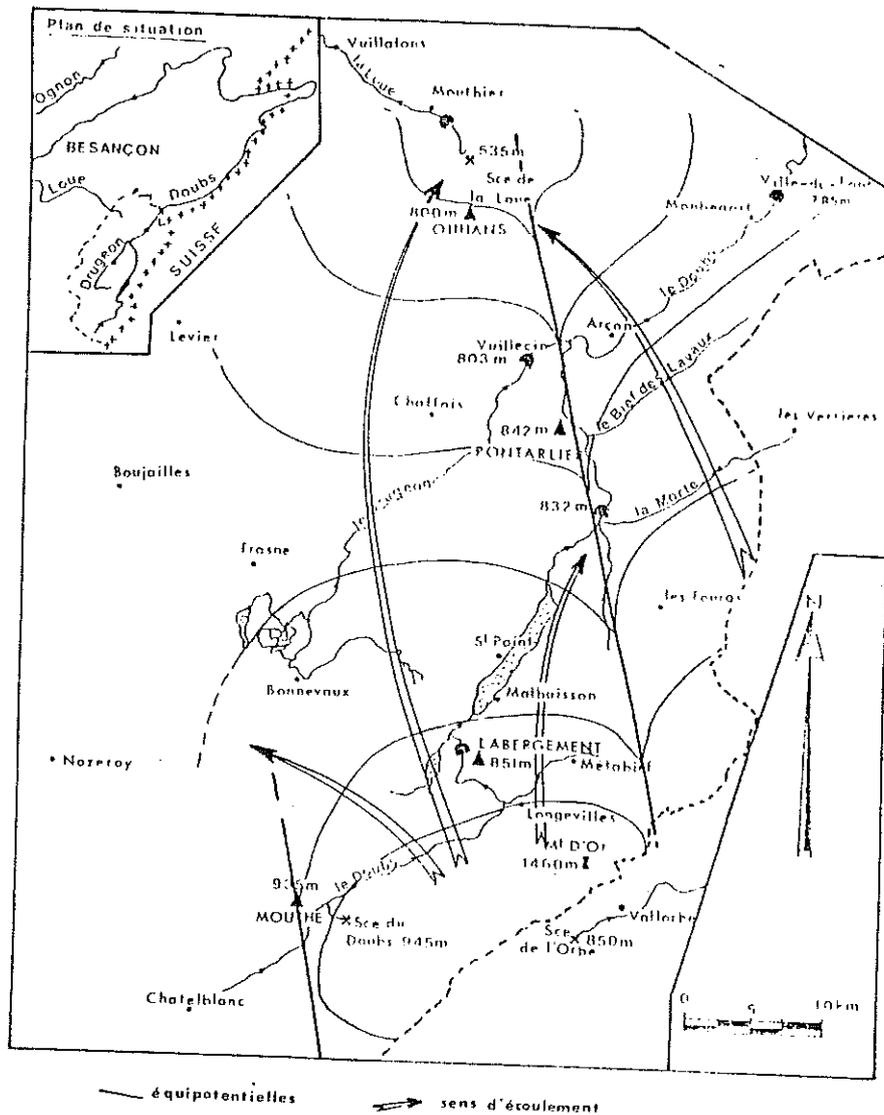


Figure 63 : Schéma interprétatif des écoulements dans les calcaires du Jurassique supérieur

C O N C L U S I O N : G E N E R A L E S

L'implantation des stations hydrométriques sur les Hauts Bassins du Doubs et de la Loue délimite quatre systèmes hydrologiques : les sous-bassins de Labergement et de Pontarlier pour le Doubs, le bassin du Drugeon à Vuillecin, le bassin des sources de la Loue à Mouthier.

L'analyse des données météorologiques et hydrologiques montre que tous ces bassins appartiennent à la même unité hydrogéologique. En tenant compte :

- des liaisons entre les bassins versants immédiats et les sources (ex. la source du Doubs dans le Massif du Mt d'Or) ;
- des communications hydrologiques entre les structures géologiques (tarissement de sources lors du percement du tunnel du Mt d'Or) ;
- des déficits (ou excès) d'écoulement calculés pour les différents bassins, on a pu ainsi définir trois niveaux d'écoulement (local, intermédiaire et régional).

Les circulations de surface suivent les structures de la Haute Chaîne et montrent un gradient général orienté vers le Nord Est. (Des fractures drainent aussi les écoulements souterrains dans cette direction puisque l'écoulement du Doubs est pérenne à partir de Ville du Pont). Des perturbations locales ou régionales (fig. 63) dévient la direction des rivières et permettent le passage des eaux d'une structure à l'autre et favorisent les pertes.

La décomposition graphique des hydrogrammes permet de distinguer quatre types d'écoulement que l'on peut assimiler au ruissellement superficiel et au drainage de trois unités karstiques emboîtées (le karst superficiel ou épikarst, le karst noyé avec des gros drains, et le microkarst des blocs microfissurés). Chacune de ces unités se caractérisent par une surface de recharge et un temps de tarissement.

L'utilisation d'un modèle hydrométéorologique de simulation des écoulements permet, à partir de cette conception, une estimation satisfaisante des débits moyens journaliers aux points d'observation et donne une bonne représentation du comportement des systèmes étudiés :

- le bassin du Doubs à Labergement est un système karstique type qui réagit promptement aux impulsions météorologiques mais qui possède peu de réserves
- le sous-bassin du Doubs à Pontarlier est marqué par la présence des lacs de St Point et de Remoray et ses réponses (hydrodynamiques) sont presque uniquement déterminées par les deux réservoirs superficiels
- le bassin du Drugeon à Vuillecin correspond à un système de fond de synclinal localisé pour l'essentiel dans des formations récentes et son comportement dynamique dépend de la capacité de rétention et de restitution de ces formations (qui ont été perturbées par de récentes rectifications du lit de la rivière)
- le bassin versant des sources de la Loue permet aussi une modélisation à quatre réservoirs emboîtés, mais il nécessite la prise en compte de surfaces de recharge et de temps de tarissement plus importantes, (pour le karst microfissural et le karst à gros drains) que pour les autres bassins karstiques. Cette augmentation est imputable aux pertes du Doubs.

Ainsi l'unité hydrogéologique des Hauts Bassins du Doubs et de la Loue est constituée par la juxtaposition de systèmes hydrologiques élémentaires dont le comportement est perturbé par la météorologie, la traversée d'un lac et les pertes.

Nous avons tenté d'analyser les répercussions hydrodynamiques de ces phénomènes : l'enneigement qui peut être important sur la région, l'influence

de l'inertie du lac de St Point et la capture d'une partie des débits du Doubs par les sources de la Loue.

Les précipitations neigeuses sont particulièrement abondantes sur le Haut Bassin du Doubs (environ 500 mm par an soit 31% de la pluviosité totale et durant un semestre au moins la moitié des précipitations sont observées sous forme de neige). La correction des signaux météorologiques par le modèle HELIOS améliore significativement les résultats de la simulation des écoulements lorsque l'on réduit fortement la vitesse de fusion de la neige. Néanmoins le modèle ne tient pas explicitement compte de l'exposition, de l'altitude et de l'hystérésis de comportement de l'eau dans l'horizon pédologique (milieu non saturé). L'équipement actuel du bassin ne permet pas d'estimer correctement l'influence de ces paramètres et la conception d'un modèle de fusion plus performant nécessite une étude complémentaire (avec mesure de la fonte réelle de la couverture neigeuse et des phénomènes de sublimation).

Les variations limnimétriques de la surface des lacs de St Point et de Remoray comparées aux données météorologiques locales montrent que l'arrivée d'une crue provoque une brusque remontée du plan d'eau sur sa partie amont. Cette onde se déplace vers l'aval, en augmentant localement et temporairement l'épaisseur de la tranche d'eau.

L'analyse des chroniques de débits moyens journaliers du Doubs enregistrées à Pontarlier et à Ville du Pont et de celles observées d'une part sur le Drugeon à Vuillecin et d'autre part sur la Loue à sa source permet :

- d'estimer le débit moyen journalier des pertes ($1.8\text{m}^3/\text{s}$) ;
- de proposer une interprétation du phénomène de capture (basée sur les fluctuations du niveau piézométrique dans les calcaires) ;
- de préciser les solutions proposées pour maintenir un débit réservé de $0.5\text{ m}^3/\text{s}$ à Ville du Pont (une remontée de 0.40 m de la surface du lac de St Point devrait permettre, en optimisant les lâchers, de soutenir durant 47 jours consécutifs le débit d'étiage du Doubs).

Le modèle hydrométéorologique utilisé (MERO) donne, par sa conception, une bonne représentation du comportement des systèmes hydrologiques mais il néglige notamment :

- . la variabilité et la nature des précipitations,
- . l'orientation des gradients hydrauliques,
- . l'influence de phénomènes de surface (lacs).

Par ailleurs il n'est pas possible d'aborder topologiquement la distribution des infiltrations et des écoulements résultants. En effet l'histoire géologique et la structure de la Haute Chaîne ont permis, au sein d'une même unité hydrogéologique, la connexion de plusieurs systèmes hydrologiques (bassin versant de chaque source) marqués par l'influence de plusieurs unités d'écoulements.

BIBLIOGRAPHIE

- ARLERY R., GARNIER M., LANGLOIS R. (1954) - Application des méthodes de Thornthwaite à l'esquisse d'une description agronomique du climat de la France. *La Météorologie*, 1954, p. 345-367.
- ARNOULT R., DELAVAL A. (1934) - Solutions de problèmes physiques. *Ed. Scient. Claude Hermant*, Paris, 246p.
- AUBERT D. (1953) - La tectonique du Mont d'Or et le décrochement de Vallorbe-Pontarlier. *Eclog. Geol. Helveticae*, vol. 46, n° 2, p. 175-186.
- AUBERT D. (1959) - Le décrochement de Pontarlier et l'orogénèse du Jura. *Mém. Soc. Vaud. Sci. Nat.*, n° 76, vol. 12, fasc. 4, p. 93-152, 11 fig., 2 cartes.
- AUBERT D. (1971) - Le Risoux, un charriage jurassien de grande dimension. *Eclogae geol. Helv.*, vol. 64, fasc. 1, p. 151-157, 1 fig.
- BEDEL J.A., JAN J., PERA RNAUD V., (1980) - Le gisement solaire en France. *Météo. Nationale*, 50 p.
- BEZES C. (1976) - Contribution à la modélisation des systèmes aquifères karstiques. Etablissement du modèle Bemmer. *C.E.R.G.A.*, Montpellier, t. X, fasc. I - II, 137 p.
- BIRTLES A.B. (1978) - Identification and separation of Major Base Flow Components from a Stream Hydrograph. *Water Resources Research*, vol. 14, n° 5 p. 791-803
- BLAVOUX B., BURGER A., CHAUVE P., MUDRY J. (1979) - Utilisation des isotopes du milieu à la prospection hydrogéologique de la chaîne karstique du Jura. *Rev. Géol. Dyn. et de Géograph. phys.*, vol. 21, fasc. 4, p. 215-306, Paris 1979.
- BROCHET P., GERBIER N. (1974) - L'évapotranspiration. Monographie n° 65 - *Météorologie Nationale*, 95 p.
- BROQUET P., PIGTEVIEUX G., SOUILLIATA. (1978) - Prospection géologique et géophysique de la région de Frasnè-Bonnevaux (Doubs). *Rapport C.U.E.R.*, n° 2, Université de Franche-Comté, 49p.
- BURGER A. (1958) - Interprétation mathématiques de la courbe de décroissance du débit de l'Areuse, Jura neuchâtelois (Suisse). *Bull. Soc. Neuchâtel Sci., Nat.*, t. 79, 1956, p. 49-54, 1 fig.
- BURGER A. (1976) - Le bassin de l'Areuse. *Deuxième Colloque d'Hydrologie en pays calcaire A.S.U.B.*, 3ème série, Géologie, fasc. 25, p. 127-136
- 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, Besançon, 1971. *Ann. Sc. Univ. Besançon*, 3ème série, Géologie, fasc. 15, p. 79-87, 4 fig.
- CABINET MERLIN (1983) - Etude de l'incidence du relèvement de 0,40 m du niveau du Lac de Saint-Point sur les installations hydrauliques, touristiques et sur les propriétés riveraines. *Rapport d'Etude*, pièce 1, 40 p.
- CAMMAL C. (1981) - Bassins versants souterrains dans les calcaires de Lorraine. *Agence de Bassin Rhin Meuse*, 17p, 2 annexes, 6 tableaux, 5 cartes.
- CASTANY G. (1963) - Traité pratique des eaux souterraines. *Dunod, Paris*, 657p.
- CHAUVE P. (1954) - Contribution à l'étude hydrogéologique de la région du Mont d'Or. *Ann. Sc. Univ. Besançon*, 2ème série, fasc. 3, p. 41-44.

- CHAUVE P. (1957) - Le synclinal crétacé de Fontaine Ronde et sa place dans le cadre tectonique de la région de Pontarlier. *Ann. Sc. Univ. Besançon*, 2ème série, fasc. 5 et 6, p. 63-71.
- CHAUVE P. (1971) - Rôle des failles dans les circulations souterraines du Jura. Exemples et applications. Acte du Colloque d'Hydrologie en pays calcaire, Besançon 1971. *Ann. Sc. Univ. Besançon, Géologie*, 3ème série, fasc. 15, p. 65-69, 3 fig.
- CHAUVE P., LE PENNEC R., METTETAL J.P., MUDRY J., ROSENTHAL P. (1976) - Drainage karstique vers la zone d'abaissement axial des plis du Flumen (région de St-Claude, Haut-Jura). *Bull. Ass. Spéléo. Est.* n° 13, p. 5-14, 1 fig.
- CHAUVE P. et coll. (1979) - Inventaire des circulations souterraines reconnues par traçage en Franche-Comté. *S.R.A.E. Franche-Comté et L.G.A. Besançon*. 10p, 18 cartes,.
- CHAUVE P., CHARLES G., LEONETTI A. (1980) - Etude des Pertes du Doubs . Rapport interne *L.G.A., Besançon*, 30 p.
- CHAUVE P., JACQUEMIN Ph., MANIA J. (1962) - Influence de l'enneigement et réponses hydrologiques des sous bassins calcaires du Haut-Doubs, *Documents du BRGM.*, n° 45, p. 193-199.
- CHAUVE P., JACQUEMIN Ph., MANIA J., REYLE R. (1983) - Analyse statistique des Pertes du Doubs. Rapport interne. *L.G.A. Besançon*, 30 p.
- CLAUDON G. (1977) - Etude hydrogéologique de la plaine de Pontarlier. *Thèse 3ème cycle*, n° 268, Fac. Sci. et Techn. de l'Univ. Besançon, 169 p.
- DELAROZIERE O. (1968) - Contribution à l'étude du bassin du Doubs : Climatologie Hydrologie et déficit d'écoulement rapportés aux unités géologiques. *Thèse 3ème cycle Fac. Sc. Paris I*, texte 1er volume p. 1-99.
- DROGUE C., GUILBOT A. (1977) - Représentativité d'un bassin témoin en hydrogéologie karstique : application à la modélisation des écoulements souterrains d'un aquifère de grande extension. *Journal of Hydrology*, 32, p. 57-70.
- DUBREUIL P. (1974) - Initiation à l'analyse hydrologique. *Masson et Cie ORSTOM* 205 p.
- DURRAFOURG M., PALACIO P. (1981) - Etude géologique, géophysique, géotechnique et hydrologique du synclinal de Frasné-Bonnevaux (Doubs). Thèse 3ème cycle, n° 342. *Fac. Sc. et Tech. de l'Univ. de Besançon*, 160p.
- FORESTIER G., VEREZ Ch. (1978) - Etude de la fracturation du plateau d'Ornans (Doubs). *Thèse 3ème cycle*, n° 301. Fac. Sc. et Techn. de l'Univ. de Franche-Comté.
- FOURNIER E. (1900) - Les réseaux hydrographiques du Doubs et de la Loue dans leurs rapports avec la structure géologique. *Annales de Géogr.*, 15 Mai 1900, n° 49, p. 219-228.
- FOURNIER E. (1913) - Communication des pertes du Doubs avec la Loue. *Imprimerie Jacques et Demontrond Besançon*, 24p.
- GUILLAUME A. (1977) - Analyse des variables régionalisées : Traitement du signal en sciences de la Terre. *Dion éditeur*, Paris, 180 p.
- GOUGOUSSIS C. et E. (1979) - Etude hydrodynamique de l'Exhaure de la mine de Maron. *Rapport D.E.A., Institut Nation. Polytech. Lorraine, Ecole Nationale Sup. de Géol. Appl. et de Pros. Min.*, 78 p.
- International Commission on Groundwater (1980) - Methods of assessing the interaction. *Studies and report in Hydrology*, n° 29, *UNESCO*, p. 27-73
- JAMIER D. (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 3ème cycle Neuchâtel (Suisse)*, 153 p.

- JEANBLANC A., SCHNEIDER G. (1981) - Etude géologique et hydrologique du Risoux Mont d'Or. *Thèse de 3ème cycle*, n° 374, Faculté des Sciences et des Techniques, Univ. Besançon.
- KIRALY L. (1978) - La notion d'unité hydrogéologique. Essai de définition. Thèse - *Bull. Centre Hydr.* Neuchâtel, n° 2, p. 83-216
- LAFITTE P. et coll. (1972) - Traité de d'Informatique Géologique. *Masson et Cie*, Paris 624 p.
- MALE D.H., GRANGER R.J. (1981) - Snow surface Exchange. *Water Resources Research*, vol. 17, n° 3, p. 609-627.
- MANIA J. (1978) - Gestion des systèmes aquifères. Application au Nord de la France. *Thèse d'Etat*, n° 397, Fac. Sc. et Techn. de Lille, 215 p.
- MANIA J., ROSIER Y., SANDMEIER N. (1982) - Réponses hydrodynamiques de l'Aquifère Granitique du Tunnel de Chateau-Lambert (Sud des Vosges). *3ème colloque Hydrogéologie en pays calcaire*, Neuchâtel, p. 241-247.
- MANGIN A. (1970) - Etude des aquifères karstiques à partir de l'analyse des courbes de décrue et tarissement *Ann. Spéléo.*, 25, 3, p. 581-610.
- MANGIN A. (1971) - Etude des débits classés d'exutoires karstiques portant sur un cycle hydrologique. *Ann. Spéléo.* 26, 2, p. 283-329.
- MARSILLY G. (de) (1981) - Hydrogéologie quantitative. *Masson édit.*, Paris, 215 p.
- MARTINEC J. (1982) - A snowmelt-runoff model for computing the daily discharge from temperature data. *Studies and reports in Hydrology* n° 32, UNESCO, p. 81-103.
- MATHERON G. (1962) - Traité de Géostatistique Appliquée. *Mémoires du B.R.G.M.* n° 14, fasc. 1, 333p.
- MERO F., GILBOA Y. (1974) - A Methodology for the rapid evaluation of groundwater resources, Sao Paulo state, Brazil. *Bull. Sci. Hydro.* XIX, 3, 9/1974, p. 346-358.
- MERO F. (1978) - The MMO8 Hydrometeorological simulation system. Basic concepts and operators guide. Tahal Consulting Engineers LTD, Tel Aviv Israël, 18 p.
- NAVARRÉ J.P. (1983) - Modèle déterministe de la Fonte Nivale - Modèle Genepi. *Note de travail de l'Etablis. d'Etudes de la Rech. Météo*, n° 60, 39 p.
- OBLED C. (1971) - Modèles mathématiques de la fusion nivale. *Thèse Doc. Ing.* Grenoble, 1971, 177 p.
- PASQUIER Ch. (1975) - Contribution à l'étude des bassins karstiques de la région de Champlive (Doubs) - *Thèse 3ème cycle*, Besançon, 144 p., 42 fig., 31 tabl.
- REMIERAS G. (1965) - L'hydrologie de l'ingénieur. *Eyrolles édit.*, Paris, 456 p., fig., tabl.
- ROCHE M. (1963) - Hydrologie de surface. *Gauthier-Villars édit*, Paris, 430p., fig. tabl.
- ROSSIER Y. (1982) - Relation entre tenseur de perméabilité et champ géologique de fissuration. Application en un massif granitique fissuré. *3ème Colloque Hydrogéologie en pays calcaire*, Neuchâtel, p. 183-190.

- SMITH E.J. (1979) - Spring discharge in relation to rapide fissure flow. Ground water, vol. 17, n° 4, p. 346-350.
- TOTH S. (1961) - A hydrogeological study of the three hills area. Alberta. Research Council of Alberta. 24, 117 p.
- VANCON J.P. (1965) - Reconnaissance géologique des sites de barrages sur le Doubs, la Loue et leurs affluents jurassiens. *Thèse 3ème cycle, Univ. Besançon*,
- VANCON J.P. (1966) - Essai d'une méthode de détermination ou graphique du déficit d'écoulement. *Ann. Sc. Univ. Besançon*, 3ème série, fasc. 2, p. 7-11, 5 fig.
- VERBEKE B. (1981) - Identification des composantes hydrologiques de deux bassins versants de l'Avesnois (Nord). *Mém. D.E.A., Fac. Sc. Tech. Univ. Lille*, 41 p.

L I S T E D E S F I G U R E S

C H A P I T R E I

<u>Figures</u>		<u>Pages</u>
1	. Situation géographique de la zone d'étude : Implantation des stations météorologiques et hydrologiques	2
2	. Variations des modules pluviométriques mensuels moyens sur les Hauts Bassins du Doubs et de la Loue (et au Russey)	6
3	. Distribution des modules pluviométriques annuels par cycle et par station (du 1.9.69 au 31.8.83)	8
4	. Distribution des modules nivométriques annuels par cycle et par station (du 1.9.69 au 31.8.83)	14
5	. Distribution des modules pluviométriques efficaces annuels par cycle et par station (du 1.9.69 au 31.8.83)	24

C H A P I T R E I I

6	. Le réseau hydrographique sur les Hauts Bassins du Doubs et de la Loue : Carte géologique simplifiée	38
7	. Les débits du Doubs à Labergement	40
8	. Les débits du Doubs à Pontarlier	40
9	. Les débits du Drugeon à Vuillecin	42
10	. Les débits de la Loue à sa source	42
11	. Comparaison de la distribution des débits sur les Hauts Bassins du Doubs et de la Loue	44
12	. Ajustement des modules mensuels du Doubs à Labergement à une loi de Gauss	47
13	. Ajustement des modules mensuels du Doubs à Labergement à une loi de Gauss (coordonnées logarithmiques).....	47
14	. Ajustement des modules mensuels du Doubs à Labergement à une loi de Galton	48
15	. Ajustement des modules décennaires du Doubs à Pontarlier à une loi de Galton	49
16	. Ajustement des modules mensuels du Doubs à Pontarlier à une loi de Galton	49
17	. Ajustement des modules mensuels du Drugeon à Vuillecin à une loi de Galton	50
18	. Ajustement des modules mensuels de la Loue à sa source à une loi de Galton	50
19	. Interprétation des écoulements au sein du Massif du Risoux Mt d'Or	62
20	. Interprétation des écoulements à l'intérieur des calcaires supraargoviens du Jurassique supérieur sur les Hauts Bassins du Doubs et de la Loue	62
21	. Décomposition de l'hydrogramme de décrue	63
22	. Les unités d'écoulement dans le karst	64

C H A P I T R E I I I

<u>Figures</u>		<u>Pages</u>
23	. Ordinogramme du modèle MERO (MM08)	68
24	. Résultats de la simulation des débits du Doubs à Laberge- ment	74
25	. Résultats de la simulation des débits du Doubs à Pontar- lier	74
26	. Résultats de la simulation des débits du Drugeon à Vuil- lecin	77
27	. Résultats de la simulation des débits de la Loue à Mouthier	77

C H A P I T R E I V

28	. Structure d'une couche de neige : localisation des échan- ges thermiques et transferts d'énergie	90
29	. Ordinogramme simplifié du modèle HELIOS	91
30	. Exemple de simulation de la fusion nivale à Mouthe	93
31	. Répartition des zones nivométriques en fonction de l'al- titude. Apports calorifiques atmosphériques	96
32	. Ordinogramme du modèle HELIOS	96
33	. Résultats de la simulation de la fusion nivale à Mouthe .	100
34	. Résultats de la simulation de la fusion nivale à Laberge- ment	100
35	. Comparaison graphique sur le bassin du Doubs à Labergement entre les précipitations, les résultats de la simulation de la fusion nivale et les débits moyens journaliers	100
36	. Résultats de la simulation des débits du Doubs à Laberge- ment après correction des précipitations	103

C H A P I T R E V

37	. Implantation des échelles limnimétriques sur les lacs de St Point et de Remoray. Tracé des courbes bathymétriques.	106
38	. Diagramme de dispersion des hauteurs d'eau	109
39	. Variations de la tranche d'eau au lac de St Point	109
40	(a,b ₁ ,b ₂ ,c,d,e,f) . Exemples de variations limnimétriques	112
41	. Schéma interprétatif de la propagation d'une onde de crue	114
42	. Diagramme de dispersion des hauteurs limnimétriques du Doubs	114
43	. Variations limnimétriques du Doubs	115

C H A P I T R E V I

44	. Localisation de la zone des pertes et des stations hydro- métriques	118
45	. Distribution des débits du Doubs à Pontarlier	120
46	. Distribution des débits du Drugeon à Vuillecin	120
47	. Distribution des débits de la Loue à sa source	122
48	. Distribution des débits théoriques du Doubs à sa conflu- ence	122
49	. Distribution des débits du Doubs à Ville-du-Pont	124

<u>Figures</u>	<u>Pages</u>
50 .	Schéma de variation des écarts de distribution entre la confluence et Ville du Pont 124
51 .	Comparaison entre les débits du Doubs à la confluence et à Ville du Pont 126
52 .	Caractéristiques des pertes du Doubs 126
53 .	Evolution des pertes avec les débits du Doubs 130
54 .	Diagramme de dispersion des débits du Doubs 130
55 .	Schéma de variation des écarts de distribution des débits de la Loue avec et sans les apports du Doubs 134
56 .	Interprétation hydrogéologique du déficit d'écoulement .. 137
57 .	Evolution des infiltrations entre la confluence et le Défilé d'Entreroche 140
58 .	Dispersion des pertes avec les débits à la confluence ... 140
59 .	Volumes perdus pour les étiages du Doubs à Ville du Pont $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ (ajustement Gumbel) 144
60 .	Durée des étiages inférieurs à $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ (ajustement Gumbel) 144
61 .	Volumes complémentaires pour des étiages = $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ (ajustement Gumbel) 146
62 .	Les débits du Doubs à Ville du Pont (du 1.9.78 au 31.8.82) 146

CONCLUSIONS GENERALES

63 .	Schéma interprétatif des écoulements dans les calcaires du Jurassique supérieur 152
------	---

L I S T E D E S T A B L E A U X

<u>Tableaux</u>	C H A P I T R E I	<u>Pages</u>
I	- Moyennes interannuelles des principaux paramètres pluviométriques	4
II	- Les variations des modules pluviométriques à Mouthe	7
III	- Les variations des modules pluviométriques à Labergement ..	9
IV	- Les variations des modules pluviométriques à Pontarlier ..	10
V	- Les variations des modules pluviométriques à Ouhans	10
VI	- Les variations des modules pluviométriques au Russey	11
VII	- Variabilité relative de la nivosité mensuelle (en mm)	16
VIII	- Les températures moyennes interannuelles (du 1.9.69 au 31.8.83)	17
IX	- Variabilité des températures moyennes mensuelles (en °C) ..	18
X	- ETP annuelle et températures moyennes annuelles : Pourcentages des pluies (P) annuelles évapotranspirées	20
XI	- ETP moyenne mensuelle (en mm)	22
XII	- Matrice de corrélations croisées des modules pluviométriques	26
XIII	- Matrice de corrélations croisées des modules pluviométriques utiles (P-ETP)	27
XIV	- Matrice de corrélations croisées des modules nivométriques annuels	27
XV	- Nombre de jours pluvieux (NP) et neigeux (NN) par cycle et par station	29
XVI	- Matrice de corrélations croisées du nombre de jours pluvieux	30
XVII	- Indices pluviométriques et nivométriques par cycle et par station	31
XVIII	- Matrice de corrélations croisées des indices pluviométriques annuels	32
XIX	- Matrice de corrélations croisées du nombre de jours de neige	33
XX	- Matrice de corrélations croisées des indices nivométriques annuels	33
C H A P I T R E II		
XXI	- Distribution des débits observés entre le 1.9.71 et le 31.8.80 (3288 jours)	43
XXII	- Intervalles de variation définis pour les débits caractéristiques	43
XXIII	- Débits moyens mensuels de dépassement (D) et de non dépassement (ND) du Doubs, du Drugeon et des sources de la Loue (à 90%)	52
XXIV	- Fréquences (fr) des débits caractéristiques sur les Hauts Bassins du Doubs et de la Loue	52
XXV	- Matrice de corrélations croisées des écoulements	53
XXVI	- Bilans hydrologiques annuels	57
XXVII	- Les modules hydrologiques annuels et leur rapport par cyle.	59
XXVIII	- Les temps de tarissement des différentes unités d'écoulement	65

C H A P I T R E III

<u>Tableaux</u>	<u>Pages</u>
XXIX - Valeurs des paramètres régulateurs retenues pour la simulation des écoulements	71
XXX - Résultats de la simulation d'automne	73
XXXI - Caractéristiques des débits observés et calculés en m ³ /s .	77
XXXII - Résultats de la simulation des écoulements sur les Hauts Bassins du Doubs et de la Loue durant le cycle 1975-76 ...	79
XXXIII - Participation annuelle des différentes unités d'écoulements (par simulation)	80
XXXIV - Paramètres dynamiques et numériques des systèmes hydrologiques	83

C H A P I T R E IV

XXXV - Exemple d'une simulation de la fusion de la première neige à Mouthe en 1969	94
XXXVI - Résultats de la simulation des écoulements du Doubs à Labergement sans et avec correction des précipitations	101
XXXVII - Résultats de la simulation des écoulements du Doubs à Labergement après ajustement du modèle HELIOS	102

C H A P I T R E V

XXXVIII - Matrice de corrélations croisées des hauteurs limnimétriques	108
XXXIX - Hauteurs limnimétriques caractéristiques	110
XXXX - Variations limnimétriques sur le lac de St Point	111

C H A P I T R E VI

XXXXI - Caractéristiques des débits et des pertes	119
XXXXII - Matrices de corrélations croisées	129
XXXXIII - Les coefficients de corrélations mensuels (a, b et r) des débits du Doubs entre l'amont et l'aval de la zone des pertes	132
XXXXIV - Modules hydrologiques du Doubs à la confluence et à Ville-du-Pont	132
XXXXV - Participation des débits du Doubs à l'écoulement de la Loue	133
XXXXVI - Débits équivalents en m ³ /s	134
XXXXVII - Volumes écoulés entre le 1.9.78 et le 31.5.81	138
(Résultats des jaugeages de séries du Drugeon le 3.3.83) (en Annexe)	
XXXXVIII - Résultats des jaugeages ponctuels	141
XXXXIX - Caractéristiques des écoulements durant les étiages du Doubs à Ville-du-Pont <0.5 m ³ /s	143

T A B L E S D E S M A T I E R E S

	<u>Pages</u>
<u>Première Partie</u> : CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES DES HAUTS BASSINS DU DOUBS ET DE LA LOUE	3
<u>Ch. I : LE CONTEXTE METEOROLOGIQUE</u>	5
. Introduction	
I - LA DISTRIBUTION INTERANNUELLE DES PRECIPITATIONS	5
A. AU NIVEAU REGIONAL	5
1 - Les moyennes annuelles interannuelles	5
2 - Les moyennes mensuelles interannuelles	5
3 - Les résultats	7
B. AU NIVEAU PONCTUEL	7
1 - La pluviosité à Mouthe	7
2 - La pluviosité à Labergement	9
3 - La pluviosité à Pontarlier	9
4 - La pluviosité à Ouhans	10
5 - La pluviosité au Russey	11
C. CONCLUSION	12
II - L'IMPORTANCE RELATIVE DES PRECIPITATIONS NEIGEUSES	12
A. AU NIVEAU REGIONAL	13
1 - La nivosité annuelle	13
2 - La nivosité mensuelle	13
3 - Résultats	15
B. AU NIVEAU PONCTUEL	15
1 - La nivosité annuelle	15
2 - La nivosité mensuelle	16
3 - Résultats	16
4 - Remarque	17
C. CONCLUSION	17
III - LES TEMPERATURES ET L'EVAPOTRANSPIRATION	17
A. DONNEES DE LA THERMOMETRIE	17
1 - Au niveau régional	17
2 - Au niveau ponctuel	18
3 - Conclusion	18
B. L'EVAPOTRANSPIRATION	19
1 - Rappels	19
2 - Résultats	21
3 - Conclusion	23
C. CONCLUSION : LES PLUIES EFFICACES	25
IV - CORRELATIONS LINEAIRES	25
A. LES MODULES PLUVIOMETRIQUES	26
1 - Résultats	26
2 - Conclusions	26

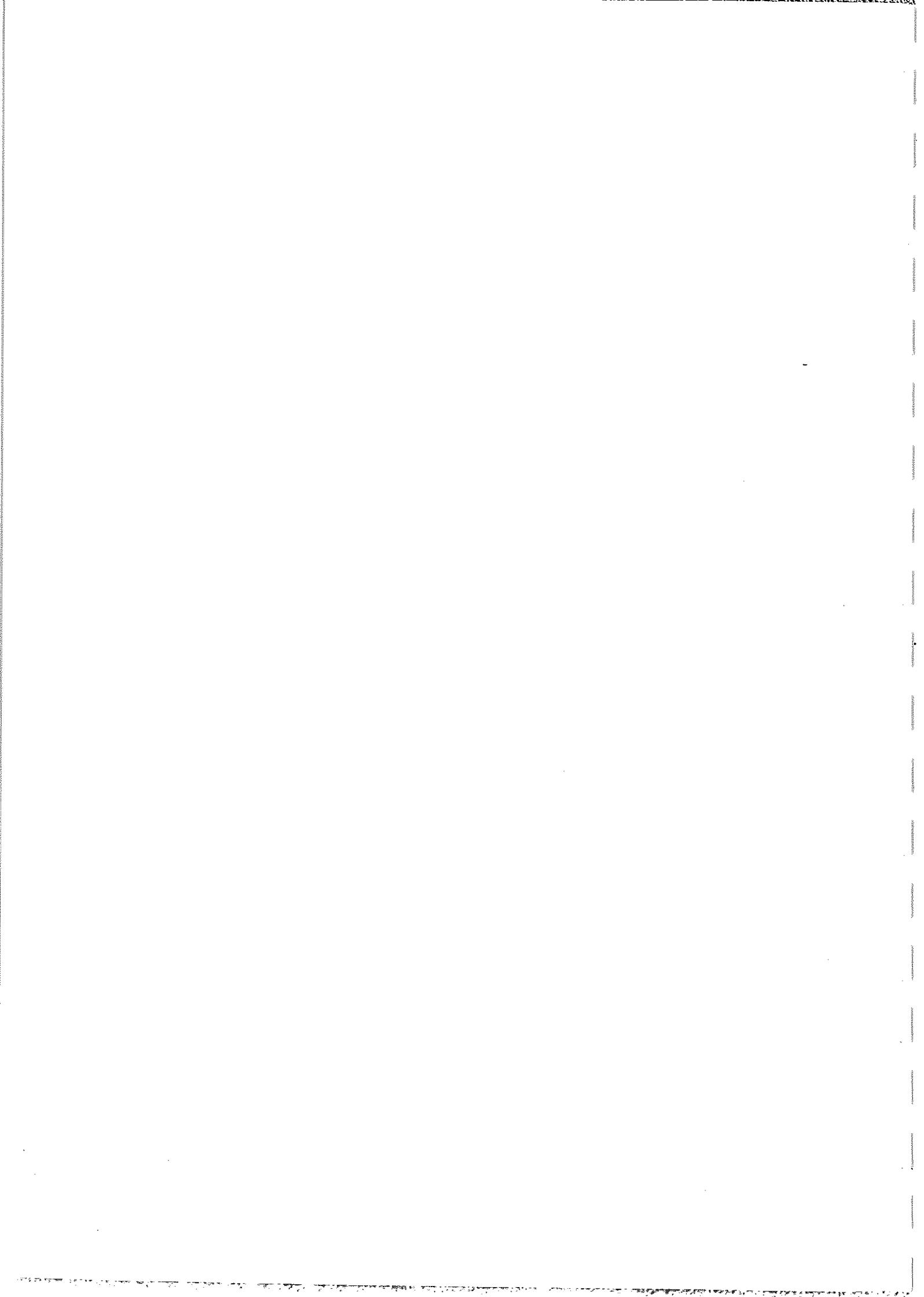
	<u>Pages</u>
B. LES MODULES PLUVIOMETRIQUES UTILES	27
1 - Résultats	27
2 - Conclusion	27
C. LES MODULES NIVOMETRIQUES	27
1 - Résultats	28
2 - Conclusion	28
D. CONCLUSION	28
V - LES INDICES PLUVIOMETRIQUES ET NIVOMETRIQUES	28
A. LES INDICES PLUVIOMETRIQUES	29
1 - Les jours de pluie	29
2 - Les indices pluviométriques	31
B. LES INDICES NIVOMETRIQUES	32
1 - Les jours de neige	32
2 - Les indices nivométriques	33
C. CONCLUSION	34
VI - CONCLUSIONS	34
<u>Ch. II : ETUDE HYDROLOGIQUE DES HAUTS BASSINS DU DOUBS ET</u> <u>DE LA LOUE</u>	37
. Introduction	
I - ANALYSE STATISTIQUE DES DEBITS	37
A. DISTRIBUTION DES DEBITS	39
1 - Analyse	39
2 - Résultats	43
3 - Conclusion	44
B. AJUSTEMENT DES DEBITS	45
1 - Rappels	45
2 - Définition de la loi d'ajustement	46
3 - Ajustement à une loi de Galton des débits moyens mensuels	48
4 - Conclusion	53
C. LES CORRELATIONS LINEAIRES	53
1 - Analyse	53
2 - Résultats	54
3 - Conclusion	54
II - DESCRIPTION DES ECOULEMENTS	54
A. LE SYSTEME D'ECOULEMENT	55
1 - Description des bassins hydrologiques	55
2 - Les bilans hydrologiques	56
3 - Les relations entre débits	59
4 - Conclusion :Le système d'écoulement des Hauts Bassins du Doubs et de la Loue	60

	<u>Pages</u>
B. LES COMPOSANTES DE L'HYDROGRAMME	63
1 - Rappels	63
2 - Tariessement des Hauts Bassins du Doubs et la Loue .	65
3 - Conclusion	66
III - CONCLUSION	66
<u>Ch. III : ESSAI DE SIMULATION DES ECOULEMENTS</u>	69
. Introduction	
I - LE MODELE MERO : PRINCIPE ET ETAPES DU CALCUL	69
A. PRINCIPE	69
1 - Equation de base	69
2 - Recharge du système	69
B. ETAPES DU CALCUL	70
II - SIMULATION DES ECOULEMENTS SUR LES HAUTS BASSINS DU DOUBS ET DE LA LOUE	71
A. CHOIX DES PARAMETRES	71
1 - Les paramètres de forme	71
2 - Les paramètres d'infiltration	72
3 - Les paramètres hydrodynamiques	72
4 - Les résultats de la simulation d'automne	73
5 - Conclusion	75
B. SIMULATION DES ECOULEMENTS DURANT LE CYCLE 75-76.	75
1 - Analyse qualitative	75
2 - Analyse quantitative	77
3 - Résultats	81
4 - Conclusion	82
C. CONCLUSION	82
CONCLUSIONS	85
<u>Deuxième Partie : INFLUENCE DES PHENOMENES DE SURFACE SUR L'HYDROGRAMME</u>	87
<u>Ch. IV : ESSAI DE SIMULATION DE LA FUSION NIVALE</u>	89
. Introduction	
I - SIMULATION DE LA FUSION NIVALE : LE MODELE HELIOS	89
A. FONDEMENTS DU MODELE	89
1 - Localisation des échanges thermiques	89
2 - Les transferts d'énergie	90
3 - Conclusion : le modèle Helios	91
B. ARTICULATIONS DU MODELE	91
1 - Estimation des apports énergétiques	91
2 - Estimation des frigories dans le manteau (CN)	92
3 - Calcul de la lame de fusion (LF)	92
4 - Remarques	92

	<u>Pages</u>
C. EXEMPLE D'APPLICATION	92
1 - Présentation	92
2 - Résultats	93
3 - Conclusion	94
D. CONCLUSION	
II - SIMULATION DE LA FUSION NIVALE A L'ECHELLE DU BASSIN VERSANT	95
A. PRINCIPE : LES ZONES NIVOMETRIQUES	95
1 - Critique des données météorologiques	95
2 - Hypothèses	95
3 - Les zones nivométriques	95
4 - Conclusion	98
B. CONCLUSION	98
III - APPLICATION AU HAUT BASSIN DU DOUBS	98
A. INFLUENCE DE L'ENNEIGEMENT SUR L'HYDRODYNAMISME.	98
1 - Rappels	98
2 - Estimation des paramètres d'échelle	99
3 - Résultats	99
4 - Conclusion	100
B. ANALYSE QUANTITATIVE	101
1 - Analyse	101
2 - Résultats	102
3 - Conclusion	102
C. AJUSTEMENT DU MODELE HELIOS	102
1 - Analyse	103
2 - Résultats	104
3 - Conclusion	104
D. CONCLUSION	104
IV - CONCLUSIONS	105
<u>Ch. V : COMPORTEMENT DYNAMIQUE DU LAC DE ST POINT</u>	107
. Introduction	
I - CARACTERES GENERAUX	107
II - PROPAGATION DES SIGNAUX HYDRODYNAMIQUES A TRAVERS LE LAC	108
A. COMPORTEMENT	108
1 - Situation des échelles	108
2 - Corrélations	108
3 - Variations limnimétriques	110
4 - Résultats	113
5 - Conclusion	113
B. INFLUENCE DU LAC SUR L'HYDRODYNAMISME DU DOUBS.	113
1 - Corrélations	113
2 - Variations	115
3 - Conclusion	115
C. CONCLUSION	115

	<i>Pages</i>
Ch. VI : <u>LES PERTES DU DOUBS</u>	117
. Introduction	
I - ESTIMATION DU DEFICIT D'ECOULEMENT	119
A. CARACTERISATION DES ECOULEMENTS	119
1 - Le Doubs à Pontarlier	121
2 - Le Drugeon à Vuillecin	121
3 - La Loue à Mouthier	121
4 - Résultats	123
5 - Remarques	125
B. ANALYSE QUANTITATIVE DU DEFICIT D'ECOULEMENT	125
1 - Estimation globale	125
2 - Les pertes moyennes journalières	127
3 - Conclusion	128
II - VARIATIONS DU PHENOMENE DE CAPTURE : INTERPRETATION.	129
A. LES LIAISONS STATISTIQUES	129
1 - Le système hydrologique des pertes	129
2 - Les pertes	131
3 - Effet de la zone de capture	131
4 - Conclusion	131
B. LA CONTRIBUTION DU DOUBS A L'ECOULEMENT DE LA LOUE	133
1 - La participation du Doubs à l'écoulement de la Loue .	133
2 - Conclusion	135
C. CONCLUSION : INTERPRETATION HYDROGEOLOGIQUE DU PHENOMENE	135
1 - Résultats	135
2 - Interprétation du phénomène de capture	136
3 - Conclusion	137
III - LOCALISATION DES ZONES D'INFILTRATION	137
A. LE DOUBS DE PONTARLIER AMONT A LA CONFLUENCE ...	138
1 - Les jaugeages	138
2 - Les chroniques de débits	138
B. LE DRUGEON	139
C. LA ZONE DE CONFLUENCE	139
D. LE DOUBS DE LA CONFLUENCE AU DEFILE D'ENTREROCHE	141
1 - Le déficit d'écoulement global	141
2 - Les zones d'infiltration	142
3 - Résultats	142
E. CONCLUSION	142
IV - REGULATION DES ETIAGES A VILLE DU PONT	143
A. ANALYSE DES ETIAGES OBSERVES	143
1 - La durée	145
2 - Les écoulements	145
3 - Les volumes complémentaires	145
4 - La pluviométrie	145
5 - Conclusion	147

B. REGULATION DES DEBITS D'ETIAGE	147
1 - Limitation des infiltrations	147
2 - Soutien des débits d'étiage	147
3 - Résultats	148
4 - Optimisation des lachers	148
5 - Conclusion	149
C. CONCLUSION	149
V - CONCLUSION	150
CONCLUSIONS	151
. CONCLUSIONS GENERALES	153
. BIBLIOGRAPHIE	155
. LISTE DES FIGURES	159
. LISTE DES TABLEAUX	162
. TABLE DES MATIERES	164
. ANNEXES .	



ANNEXES

. ANNEXE I : Modules mensuels et annuels des paramètres météorologiques observés du 1.9.69 au 31.8.83 sur Les Hauts Bassins du Doubs et de la Loue (et au Russey)

I₁ : Paramètres pluviométriques de Mouthe

S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	TOTAUX	MOUTHE													
120.2	0	4.1	0	188.3	34.7	97.7	87.7	105	57.5	427.8	71.8	131.6	72.5	249.5	47.6	78.6	0	222.4	0	172.2	0	166	0	264.2	37.3	S. 69-A.74
99.3	17.4	1.8	62.3	177.7	5.6	97.2	5	101.9	3.3	421.4	1.5	127	3.5	236.8	5.1	52.9	12.7	162.1	27	127.9	25.7	124.2	25	1729.8	17.5	S. 70-A.71
121.8	0	157.1	23.2	184	25	66.3	62.7	113.2	79.4	67.1	100	68.9	100	97.9	0	125.3	0	254.5	0	28	0	160.2	0	444.6	24.2	S. 71-A.72
103.4	15.1	145.4	7.6	175.6	4.6	63.8	1.7	111.6	1.4	65.9	1.7	65.1	5.5	82.4	15.8	88.2	29.7	206.5	18.8	13.9	50.4	119.8	25.2	241.9	15	S. 72-A.73
64	0	41.5	0	186	91	27.3	32.2	48.8	97.5	90.2	98.9	59.2	57.1	133.7	35	100.8	20	134.8	0	79.7	0	53	0	1019.1	40.8	S. 73-A.74
50.2	21.9	13.6	19.1	182.6	1.2	26.2	4.1	48.4	7	87.4	2.9	54.6	7.3	117.9	11.8	69.9	10.6	95.8	28.4	59.6	25.2	27.9	47.5	854.1	16.9	S. 74-A.75
55.3	0	40.3	15.3	304.4	31	75.3	44.2	95.2	97.1	66.8	36.5	26.1	75.3	104	86.8	113.7	0	115.4	0	163.4	0	198.8	0	1309.5	27.1	S. 75-A.76
37.2	32.3	36.1	10.3	295.7	2.9	73.1	1.5	44.3	2.2	65.8	1.4	24.9	5.4	95.5	8.2	80.6	29.1	79.7	30.9	111	32.1	155.8	21.6	1099.7	15.1	S. 76-A.77
107.3	0	135.4	0	159.3	36.8	39.4	54.7	95.3	50.3	116	76.9	121.4	9.2	43	24.9	167.5	7	203	0	125.3	0	124.9	0	1498.1	18.2	S. 77-A.78
92	14.2	124.1	3.2	154.3	1.6	97.3	2.1	89.9	50	109.8	5.4	111.9	7.3	37.4	13	139.1	16.8	164.7	18.9	88.4	29.5	88.8	28.9	1297.9	12.8	S. 78-A.79
270.3	5.7	230.9	76.4	210.4	59.4	169.4	52.4	153.6	72.7	31.2	87.2	123.6	85	120	55.7	140	0	114	7.2	105	0	183.4	0	1851.6	39.1	S. 79-A.80
233.3	13.7	222.8	3.5	203.4	3.3	159.9	5.7	147.5	4	30.1	3.6	110.5	4.1	115.1	4.3	119.4	14.8	83.6	26.7	77.3	26.3	136.7	25.3	1647.2	11.3	S. 80-A.81
204.4	0	68.7	0	186.3	44.4	69.4	81.2	95.4	65.3	77.3	99.1	49.8	47.4	35.1	80.2	96.3	0	13	0	221.2	0	66.9	0	1184	27.9	S. 81-A.82
176.7	13.6	63.2	3	177.7	4.6	69.4	2	93.1	2.2	77.3	1	48.4	2.9	30.5	13.9	64.9	32.7	9.3	28.4	170.9	12.3	40.9	38.9	1022	14	S. 82-A.83
191	0	32.3	0	168.3	35.3	157.1	65.2	210.3	66.3	338.9	27.3	85.3	22.5	235.4	37.7	140.7	25.1	218.8	0	222.9	0	158	0	2209.2	24.3	S. 83-A.84
168.3	13.4	66.4	19.1	162.9	1.2	155.5	1.1	207.7	1.3	329.9	1.7	70.3	17	216.7	8	114.5	18.4	172.7	21.1	172.2	22.7	123	22.1	1961.2	12.1	S. 84-A.85
18.11	0	121.2	0	233	58.3	167.8	47.6	172.8	94	241.9	49.7	442.6	46	87.6	29.3	150.7	17.3	165.3	2.5	149.1	0	178.3	0	2128.6	35.7	S. 85-A.86
12.5	11	104.2	14.1	225.5	3.2	163	2.9	172.7	1.1	237.2	1.9	436.3	1.4	76.1	13.2	121.7	19.2	133.1	19.6	105.6	29.2	157	11.3	1944.9	17.3	S. 86-A.87
115.3	0	40.3	51.4	15.1	80.4	218.4	25.9	195.3	88.1	168.6	7.7	215	46.2	121	72.6	116.1	29.4	156.5	0	50.2	0	172.9	0	1586	31.3	S. 87-A.88
18.9	14.7	37	8.1	14.3	3.3	212	3	195.3	3	160.4	4.8	201.3	5	108.7	10.3	34.3	17.4	112.7	18	36.1	18	136.2	11.2	1396.9	13.1	S. 88-A.89
11.5	3	115.7	0	199.7	39.3	257	73.4	198.9	74.3	138.7	18.1	142.6	40	71.2	72.5	109.3	0	278.1	0	193.9	0	90.4	0	1837.1	29.9	S. 89-A.90
31.1	25.7	98.2	15.2	192.8	3.5	250.3	2.7	197.2	9	134.2	3.2	134.7	53	60.9	14.4	78.6	28.1	224.4	19.3	152.2	11.5	58.7	35	1613.2	19.5	S. 90-A.91
43.1	0	194.1	32.3	61.6	70.9	172.2	84.1	221.9	68.3	76.4	42.4	232.1	31.7	21.7	39.6	160.2	24.7	111.2	0	150	0	68.4	0	1552.9	15.9	S. 91-A.92
68.2	19.5	181	6.8	57.1	7.2	171.5	4	221.8	0	75.9	7	215.3	7.3	13.4	18.4	127.3	20.6	78.3	29.6	110.9	26	51	25.5	1370.2	15.2	S. 92-A.93
216.4	0	279	13	107.1	90.8	355.6	65.9	197	38.1	38.7	60.7	151.1	97.8	31.5	65.1	37.9	22.6	201	0	93.4	0	170.3	0	1929	33.9	S. 93-A.94
189.3	14.1	254.3	9.6	105.4	1.3	353.5	5	191.3	2.6	17	4.5	147.2	2.6	25.2	20.3	63.2	28.2	164.3	18.3	69.1	25	146	14.1	1743.2	11.8	S. 94-A.95
192	0	216.6	12.7	186.4	54	253.4	48.3	330.8	21	117.9	82.9	116.3	11	292.4	39.6	373.3	12.9	32.2	0	44.3	0	118.7	0	2091	34	S. 95-A.96
31.4	5.1	148.4	12.9	180	3	249.2	1.9	175.1	2	116.5	1.2	110.2	1	271.3	5	341.4	3	50.8	35.5	27.1	39.5	43.8	30	1886.3	13.1	S. 96-A.97

- 1 = modules pluviométriques
- 2 = pourcentages de neige
- 3 = modules pluviométriques efficaces
- 4 = pourcentages ETP_I

1	2
3	4

I₂ : Paramètres pluviométriques à Labergement

		S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	TOTAUX LABERG.												
0	0	125.1	141.1	51.6	110.0	94.8	146.6	293.3	191.2	118.5	69.8	21.1	159.3	77.7	6.3	171.5	0	138.6	0	141.7	0	1669.2	4.4			
43.7	41	1.7	74.5	140.8	9.5	91.2	4	89	6.1	188.9	1.1	112.1	5.4	200.8	7.5	53.4	131.3	110.7	35.5	89.7	136.2	97	31.2	1013.3	33.7	
107.8	0	58.9	76.5	182.4	135.7	55.5	132.6	102.9	141.4	66.4	93.7	79.8	86.4	84.2	0	81.4	0	206.1	0	28.5	0	150.1	0	1276	22.8	
80.4	16	47.9	6.9	150.9	7.1	52.3	5.8	100	2.8	65	2.2	70.6	5.3	47.4	21.6	49.7	138.9	153.9	25.3	13.6	52.7	108.3	27.9	1065.9	117.7	
80.0	0	38.7	0	130.2	180.5	78.6	144.4	36	95	77	87.2	65.6	88.9	124.5	30	38.8	21.7	146.5	0	53.6	0	65.3	0	921	136	
48.6	20.1	31.5	116.7	126	3.2	25.8	110.4	34.2	5.1	68.2	5.2	58.2	11.2	108.3	113	65.5	133.7	108.7	25.8	78.9	46	36.9	43.7	740.8	119.7	
50.7	0	44.1	45.8	297.5	41.1	71.5	147.6	50.6	153.5	100.2	100	25.4	75.5	65.7	83.3	128.9	0	105.3	0	133.7	0	179.7	0	1277.3	32.7	
32.5	35.9	36.7	12.3	288.5	3	68.1	4.7	48.4	3.9	89.5	7	26.1	11.3	76.1	111.2	91.3	119.2	76.4	17.5	86.8	35.1	131.8	05.7	1064.3	15.2	
100.5	0	28.8	1	139.1	116.1	128.8	69.6	88.7	50.8	98.7	79.6	118.5	22	25.3	22.7	135.3	1	114.7	0	98.1	0	120	0	1288	20.6	
80	20	16.7	9.4	133.5	4.1	117.7	2.5	78.9	110.5	91.7	7.1	107.2	9.6	16.9	133	105.3	122.2	86.6	24.5	64.6	134.7	80.9	32.6	1079.8	17.5	
219.4	4.3	138.9	74.2	192	3.5	146.4	160	136.7	43.1	33.4	72.5	110.7	80.7	99.9	52.3	154.8	3.1	118.3	7.4	78.3	0	147.4	0	1676.3	34.6	
186.7	34.5	28.3	4.4	182.2	5.1	138.2	5.6	128.4	6.1	21.5	5.7	103.1	6.9	91.8	6.1	124	15.9	78.6	133.5	50.7	35.2	105.7	128.3	1889.2	14.5	
201.5	0	62.1	0	163	130.9	83.6	95	119.3	58.1	91.8	90.3	23.5	78.7	41.3	187.9	60.1	0	9.5	0	147.6	0	188.4	0	1103.7	28.4	
174.7	13	56.3	9.3	154.5	5.2	61.9	2.7	116.4	2.5	90.1	1.8	20.2	13.5	36.2	112.4	35.7	40.8	5.9	38	92.3	37.5	92.5	123.2	936.8	116.7	
175.5	0	33.6	0	155.3	135.5	167.2	194	156.2	67.4	251.8	34.9	64.5	15.5	204.8	192.6	116.9	9	178	0	189.8	0	126.9	0	1870.5	26.9	
148.9	15	64.9	22.5	145.8	6.1	164.3	1.7	151.4	3.1	238.7	5.3	48.7	24.5	186.7	8.9	94	19.5	131.1	26.4	140.8	25.8	88.2	130.5	1603.5	15.8	
28.4	0	120.6	0	181	178	126.5	35.4	172.4	4.8	191.4	47.9	212.1	65.2	79.6	22.5	143.9	2.6	118.7	6.1	125	0	174.8	0	1670.4	34	
15.6	36.4	89.2	37.5	172.2	4.9	120	5.5	171.9	3	184.6	7.6	205.3	1.2	63.3	20.5	108.1	24.9	86.5	27.5	82.8	33.8	151.5	13.7	1480.9	15.9	
97.6	0	34.7	42.1	10.9	83.4	204.7	31.2	143.9	83.2	115.6	11.8	179.2	47.2	102.5	166.9	101.9	34.2	213.8	0	35.4	0	143.9	0	1384.3	29.1	
79.1	18.5	28.8	17.7	9.8	9.8	195.1	4.7	141.5	1.7	106.6	7.8	163	5.1	84.4	17.6	71.3	30	170.7	20.1	21.7	39.1	131.8	22.3	1183.6	16.6	
53.4	0	38.9	0	178.7	43.6	215.4	67	153.9	88.6	123	24.3	117	53.8	66.2	63.4	119.9	0	250.5	0	161.8	0	88.1	0	1630.1	29.9	
35.1	14.3	78	21.2	170	4.6	208.5	3	152.2	1.1	119.2	2.9	105.8	9.6	53.7	19	89.4	25.4	206.8	18.5	122.5	24.3	53.1	39.7	1394.2	11	
72.2	0	155.8	5	55	68	142.6	85.6	189	72	66.5	41.2	187.3	32.5	25.2	55.2	157.7	18.3	89.8	0	152.3	0	52.6	0	1347.1	32.3	
55.8	26.8	143.8	8.2	51.8	5.8	180.1	1.8	187.7	7	64.9	2.4	166.2	11.5	14.2	83.7	115.8	26.6	52.6	81.4	103.2	32.3	32.8	37.6	1426.1	19.5	
168.3	0	187.6	10.3	100	86	268.2	83.5	153.4	28.7	28.1	67.6	137	92.3	36.7	50.1	90	6.7	174.5	0	161.5	0	228.4	0	1730.4	31.4	
136.2	19.3	162.4	13.6	96.9	3.1	263	1.9	147	4.2	25.4	9.6	129.5	5.5	32.4	11.8	58.7	34.8	127	27.5	123.4	23.8	225.4	0	1526.9	12.7	
103.0	0	171.3	0	151.2	48.9	202.1	55.4	142.9	39	103.7	75.5	101.9	83.8	220.4	58.2	327.7	18.5	144.6	0	32.4	0	125	0	1792.3	33.1	
94.4	18.5	151.3	11.1	151.5	5.5	164	3	137.9	22.4	101	2.5	83.2	4.5	244	4	227	12.5	23	156.2	11	24	0	0	0	1444	4.4

		S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	TOTAUX PONTARLIER											
14.9	4	11.2	4.7	44.2	100	14.1	231.2	93.6	114.4	81.2	100.3	75.3	13.2	214.4	4	125.4	0	135.2	0	162.2	0	162.2	0	1622.0	50.1
21.5	14.7	9.6	1.1	149.5	7.5	84.3	1.4	95.3	5.5	129.3	1.3	108.3	5.6	80.8	7.0	65.8	37.4	154	26.3	93.9	30.6	112.1	24.1	1394.8	18.5
95.5	0	104.3	33	145	15	32.4	40	91.8	44.9	51.2	96.5	89.2	89.6	67.3	0	85.1	0	209.7	0	33.6	0	131.9	0	1419.4	24.7
75.8	20.7	155.1	4	122.1	8.3	49.2	4.4	86.7	3.4	49.6	2.8	84.8	4.9	52.3	22.3	48.5	43	156.1	25.6	20.2	39.9	91	33	1004.7	17.9
45.2	0	32.5	4	174	89	35.8	79.2	41.9	95.6	74	94.6	54.5	81.9	88.4	37.8	91.5	6.2	154.7	0	65.4	0	61.2	0	957.2	41.3
34	24.7	25.7	11.1	170	2.3	32.6	9	40.2	4.1	70	5.4	48.3	13.4	10.5	112.6	60.9	33.4	115.8	25.5	40.1	14.5	35.1	42.0	743.2	19.2
37.8	0	57.9	59.3	284.2	48.4	71.2	41.5	65	97.1	98.4	100	31.1	71.7	29.7	187.1	129.9	14.5	126.5	0	108.2	0	134.5	0	1748.5	38.7
23.6	37.5	46.6	20.5	255.2	1.5	69.4	5	61	3	95.7	7	27.7	10.8	19.8	7.6	94.3	27.6	93.4	26	67.9	37.2	101.5	24.6	1058.6	16.1
78	0	97.9	2	139.1	21.6	94.8	90.1	71.2	46.4	95	86.0	105.7	23.7	76.6	143.2	111	1.4	110.3	0	63.3	0	96	0	1112.4	24.5
60	33	85.9	32.5	133.2	1.5	95.5	3.1	62.5	12.4	88.2	7.5	93.9	10.7	19	28.6	83	25.7	84	73.5	57.5	30.5	63.4	33.5	926.1	18
176.3	2.9	238.1	17.2	172.9	70.8	131.2	50.8	134.8	60.8	33.9	74	134.3	78.1	37.6	162.3	107.4	4.6	154.1	2.9	63.1	0	143.3	0	1586.8	41.6
144.4	18.1	227.6	4.4	162.6	6	122.9	6.5	176.5	6.2	31.6	6.5	126.3	6	88	9.8	81.6	24.7	155.8	24.5	37.9	39.5	106.1	25.5	1371.2	14.8
150.6	0	58.2	0	144.4	40.3	61.5	50.6	84.1	83.4	74.5	98.5	17.8	78.1	33.1	87.3	85.7	0	140.1	0	141.9	0	69.8	0	998.4	31
127.9	15.1	52.8	9.3	174.9	4.5	60	2.5	81	3.1	73	7	13.5	24.4	46.1	13.2	55.8	34.0	11.9	34.2	102.3	27.5	47.2	31.2	846.7	17
141.1	0	87.8	0	140.3	80	148.6	97.7	165.6	71.1	237.1	25.1	70.4	40.9	90.7	47.5	150.9	12.7	195.6	0	203.2	0	146	0	1877.1	28.4
115.3	14.5	67.6	23.1	10.7	6.5	145.9	7	160.2	3.5	223.3	5.8	54.7	22.3	172.4	9.6	125	16.9	151.4	22.4	156.4	23	108.4	26	1611.4	15
35.8	0	106.4	0	193.8	66.3	121.2	23	159.4	88.3	169.9	46.8	195.8	46.8	99	27.3	127.7	0	152.3	0	142.3	0	116.5	0	1815.3	32.4
15.8	38.5	86	19	186.4	1.5	114.8	3.8	159.1	2	163.4	1.8	307.3	2.1	81.5	17.7	94	26.3	117.2	26.5	86.1	34.4	112.9	17.4	1590.2	16.4
30.5	0	38.8	46.4	17.9	80.4																				

I₄ : Paramètres pluviométriques à Ouhans

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	TOTAUX OUHANS														
37	0	0.1	0	173.2	44.6	113.2	69.8	119.2	46.1	341	86.6	116.6	181.2	195.2	63.9	70	0	298.4	0	121.5	0	111.6	0	1726	18.8	S.69-A.70	
14.3	10.8	5	39.6	159.3	8	112.9	1	113.0	9.5	156.6	1.2	110.4	5.3	181.9	7.3	46.1	34.1	240.2	19.5	87.1	32.3	79.4	28.6	1506.1	19.2	S.70-A.71	
89.6	0	84.8	0	140	22.6	59.8	17.4	84.2	45.6	63.1	74.2	37.5	50.9	66.7	0	143.9	0	236.2	0	10.8	0	98	0	1274.7	15.5	S.71-A.72	
70.2	21.6	73.8	6	129	7.5	57.3	4.3	81.5	3.2	61.7	2.5	93.5	9.1	49.1	26.4	109.6	23.6	188	20.4	1	90.5	59.6	139.2	1024.2	20.8	S.72-A.73	
51.5	0	42.8	0	120.7	61.4	57.8	68.3	39.2	92.4	81.2	59.5	48.5	37	125.4	74.1	86.1	0	127.2	0	91.1	0	76.2	0	1018.6	31	S.73-A.74	
41.7	39	35.6	16.3	186.9	2	54.5	5.1	37.6	4	77.7	5	41.6	11.4	110.4	11.7	56.1	35	95.2	25.2	65	28.7	45.3	160.5	447.8	17.3	S.74-A.75	
16.1	0	65.9	40.2	290.5	22.2	78.7	43.1	73.1	87	56.9	20.1	37.8	77.2	113	73.2	145.9	0	128	0	109.6	0	100.5	0	1266	10.7	S.75-A.76	
12.6	51.7	60.2	8.6	201.1	3.3	75.4	4.2	71.1	2.7	96.2	1	34.7	9.7	102	0.7	117.4	136.6	95.4	25.7	42.8	192.7	75.6	124.8	1074.2	17.4	S.76-A.77	
74.1	0	12	0	161	30	115.8	50.6	78.2	11.2	97.4	38.6	109.5	12.3	35.1	3.4	127.8	0	93.9	0	79.8	0	133.6	0	1218.6	17.8	S.77-A.78	
60.5	10.1	99.5	11.5	154.7	3.5	112.9	3.5	69	11.7	90.2	7.4	100	0.7	75.9	126.2	99.3	121.1	64.8	31	50	37.5	103.8	127.5	1031	116.5	S.78-A.79	
0.3	0	70.2	57.1	181.1	20.7	145.9	14.5	185.2	9.1	29.2	0	119.8	51.8	93.6	54.8	119.7	0	145.6	0	56.3	0	164.7	0	1714.8	20.5	S.79-A.80	
164	17.4	59.1	4.1	17.2	5.4	137.3	5.9	176.1	4.9	17.4	6.5	112.9	5.0	81.0	110.4	90.7	24.2	107.4	26.2	30.5	45.8	122.9	125.4	1487	5.19.2	S.80-A.81	
185.6	0	85.4	0	194.3	9.5	55.0	36.2	102.7	37.5	83.5	76.2	13.9	43.9	38.3	48.4	141.6	0	26.9	0	97.4	0	56.3	0	1041.7	15.6	S.81-A.82	
161.3	13.1	40	18.3	186	4.3	54.4	2.4	99.9	2.7	82	1.8	11.1	19.9	34.5	3.6	114.8	19	21.4	30.5	58.3	40.5	30.9	143.1	914.5	15.6	S.82-A.83	
176.9	0	69	0	147.7	22.7	146.4	53.6	195.7	53.6	289.9	5.8	65.7	34.6	198.4	41.8	174.4	0	181.3	0	341.7	0	150.5	0	2101.6	15.5	S.83-A.84	
150.8	14.8	40.8	19.2	137.5	4.9	143.1	2.2	190.4	2.7	277	4.5	49.3	24.9	181.7	4.6	151.8	15	138.1	11.3	242.8	19.3	114.7	21.6	1826.3	14.6	S.84-A.85	
18	4	0	32.2	0	193.7	57.8	137.6	15.1	138.7	62.7	194.4	51.5	202.8	47.2	120.7	22.8	103.3	0	106.7	0	141.2	0	129	0	1628.8	27.2	S.85-A.86
10.2	144.5	114.3	13.6	106.2	3.9	110.6	5.1	136.2	3	188	3.3	195.5	3.6	103.7	14.1	74.9	17.5	76.1	10.7	98.7	30.2	113.3	18.5	1424.6	16.1	S.86-A.87	
92.1	0	31	0	14.5	44.2	179	14.5	149.7	86.2	132.4	13.7	198	22.9	134.6	34.5	134.3	20.2	129.9	0	54.6	0	184.6	0	1458.9	21.1	S.87-A.88	
74	19.0	41.5	16.7	16.4	11.6	168.7	5.7	147.2	1.6	124.2	6.2	181	8.6	118.8	11.7	103.4	23	94.4	37	45.9	17	155.4	15.6	1221.9	13.7	S.88-A.89	
13.3	0	0.1	0	158.7	20.2	104.3	44.6	165.5	37.4	129.5	13	103.7	36	81.5	4.5	130.4	0	250.3	0	151.9	0	105.8	0	1628.6	17.4	S.89-A.90	
11.2	2.8	87.6	21.4	154	5.3	197.0	1	164	1	126.1	2.6	92.2	11.1	69.1	15.2	102	21.6	106.2	37.6	114.8	21.8	70	33.6	1409	15.2	S.90-A.91	
76.2	0	146.2	4.3	75.7	59.8	182.4	85	202.4	73	79.6	41	161.2	25	28.9	37.4	140.6	0	133.2	0	227.5	0	54.3	0	1512.5	29.2	S.91-A.92	
57.8	14.1	134	4	71	5	140.9	1	201.1	6	77.5	2.5	149.9	14	17.5	29.4	104.9	25.7	95.9	28	183.8	19.7	38.9	33.5	1301.3	16.7	S.92-A.93	
191	0	208.1	10.7	99	54.2	310.2	48	174	12.5	32.5	35.7	162.3	45.5	35	4.3	73	0	245.7	0	175	0	210.4	0	1920.6	21	S.93-A.94	
158.4	12.1	182	11.4	94	5	105	1	171.4	1.6	30.4	4.5	155.3	4	29.1	16.9	50.4	30.5	186.4	24.7	144.4	32.5	230.4	0	1718.3	11.6	S.94-A.95	
104.7	0	159.4	0	164	5	224.4	37	157.4	17.8	127.8	77.4	105.1	47.2	253.8	41.8	181.4	0	97.4	0	29.1	0	104.5	0	1907.9	21.7	S.95-A.96	
36	61.7	134	11	151	4	218	3	152	4	1	1	1	1	331	4	242	4	10	4	1	1	1	1	1	1487	11.2	S.96-A.97

S O N D J F M A M J J A TOTAUX LE RUSSEY

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	TOTAUX LE RUSSEY													
34	0	5.1	0	141	0	36.4	89.4	90.3	70.7	110	67.3	102.5	46.5	159	41.9	104.7	15	184.4	0	99.6	0	30.1	0	1440.1	14	S.69-A.70
32.9	104.3	2.1	37	179.7	9.4	96.5	4	84.8	0.1	305.6	1.4	96.3	6.1	144.1	9.4	41.5	25	132.5	28.3	69	30.7	57.4	26.3	1327.4	18.7	S.70-A.71
72.5	0	15.2	54.8	26	118.4	39	25.3	62.1	44.3	44	100	57.7	100	46.7	0	94.4	0	185.8	0	78.6	0	113.5	0	1046.4	21.1	S.71-A.72
53.6	26.1	107.3	6.9	115.4	8.4	47	6	58.9	5.2	43.1	2.1	53.7	6.9	35.2	24.7	65.5	30.6	135.4	127.1	55.1	29.9	72.4	36.7	842.6	17.5	S.72-A.73
30	0	22.1	0	42.2	81.2	60.4	58.1	28.7	55.6	46.7	46.7	49.6	150.7	103.3	31.9	84.6	1.9	120.1	0	86.7	0	88.2	0	858.6	33.3	S.73-A.74
22	25.5	34.4	24.7	41.5	2.5	56.1	3.7	24.0	3.1	43.8	6.3	62.9	9.6	87.3	115.5	58.9	30.4	88.5	36.3	35.6	45.6	67.1	23.9	713.3	18.7	S.74-A.75
59.8	0	49.5	56.8	236	47.6	70.3	40.1	44.2	96.3	74.3	92.9	67.3	88.4	166.7	61.3	174.3	0	156.2	0	97.9	0	81	0	1233.8	29.8	S.75-A.76
45	29.8	44	11	229.7	3.6	66.9	4.8	46.4	3.8	71.5	1	63.9	5.1	105.3	9.8	124.2	23	120.1	23.1	61.1	37.6	54.7	32.5	1044.7	15	S.76-A.77
48.3	0	88	0.9	131	33.7	105.3	37.1	55.1	1.6	41.7	72	77.2	30.7	22	52.3	100.3	0	66.5	0	60	0	67.3	0	848	19.8	S.77-A.78
36.1	129.4	74	213.4	127.1	3	103.4	1.8	49.9	9.4	77.3	5.4	67.7	12.3	12.3	19.2	25	25.1	41.6	37.1	33.9	43.7	42.2	22.2	747	21	S.78-A.79
142.5	5.5	222.3	63.5	134	37.5	132.6	70	136.8	23.2	23.6	100	95.6	64.9	76.7	50.3	110.3	6.4	102.9	0	81.5	0	116.5	0	1395.1	27.4	S.79-A.80
117.5	17.5	112.3	4	146.1	7.9	126.3	4.8	130.1	4.9	22.1	6.4	87.9	4	84.1	113.2	85.5	27.5	70.2	31.5	53.2	34.6	79.6	31.6	1204.9	15.1	S.80-A.81
190	0	32.9	0	151.2	24.2	38.3	40.5	80.9	65.7	42.8	95	29.3	45.2	37.6	0	95.4	0	21.1	0	163.4	0	89.3	0	985.2	17.2	S.81-A.82
160	15.6	26.2	30.1	144.2	4.6	16.4	5	86.2	3.1	52.2	1.1	26.7	8.8	31.8	2.6	70.7	125.8	15.4	127.1	111	32.1	62.7	30.3	823	14.7	S.82-A.83
107.3	0	88.2	0	106.3	21.9	143.6	63.1	129.3	63.8	209.2	14.8	59.9	41.1	145.1	44.6	80.2	24.9	184	0	181.6	0	209.4	0	1653.7	20.7	S.83-A.84
81.7	24.2	71.1	19.3	99.5	6.8	140.1	1	136.7	2.3	197.2	5.7	47.3	21	131.1	3.6	62.1	17.6	137.7	25.2	124.6	31.9	163.6	21.9	1343	15.5	S.84-A.85
35.1	0	107.8	0	148	55.7	117.3	11.8	116.9	76.6	160.5	41.5	152.4	41.4	82												

CYCLE	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	TOURNAI
69-70	72.0	49.8	13.2	0.1	8.1	4.4	8.8	24.2	65.7	102.6	160.8	93.6	595.0
P-ETP	55.0	34.7	11.0	0.0	8.2	4.5	8.8	24.2	65.7	102.6	160.8	93.6	595.0
70-71	73.5	51.2	12.1	50.0	62.1	46.0	57.7	45.7	56.4	105.8	78.5	113.5	1037.5
P-ETP	71.9	37.7	23.2	4.6	5.5	5.1	7.1	52.9	78.4	71.9	116.5	102.4	584.2
71-72	61.5	77.5	103.7	45.1	55.5	39.9	50.5	64.2	15.0	105.9	37.9	11.1	453.1
P-ETP	51.5	37.1	11.0	7.2	6.7	14.9	26.9	31.2	67.1	85.1	66.7	99.2	993.5
72-73	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
P-ETP	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
73-74	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
P-ETP	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
74-75	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
P-ETP	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
75-76	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
P-ETP	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
76-77	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
P-ETP	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
77-78	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
P-ETP	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
78-79	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
P-ETP	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
79-80	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
P-ETP	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
80-81	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
P-ETP	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
81-82	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
P-ETP	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
82-83	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
P-ETP	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
83-84	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5
P-ETP	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5

Le_Russey

ANNEXE II : Coefficients de régression a et b entre les modules
 II1 pluviométriques
 II2 pluviométriques efficaces

1*) La Pluviométrie

MOU	MOUHC (MOU)			LAIEMENT (LAI)			PORTAILIER (POR)			SABANS (SAB)				LE PUYEY (LEP)			Y
	A	H	D	A	H	I	A	H	I	A	H	D	A	H	I		
MOU	1	1	1	1.24	1.1		1.1	1.1		1	1	1	1.2	1.15		a	
LAB	0	0	0	-153.5	1		149.4	1.0		1	1	1	141.1	1.1		a	
PON	.79	.5		1	1	1	.86	.67		1	1	1	1.07	1.07		a	
OUH	154	4	12.2	0	0	0	296.6	2.7		1	1	1	209.6	5.4		a	
RUSS	.05	.73		1.07	.87		1	1	1	1	1	1	1.07	1.07		a	
MOU	4.7	5.7	12.7	-156.1	3.8	5.8	0	0	0	10	4.7	7.6	29.2			a	
OUH	.9	.8		1.13	.95		1	1.05		1	1	1	1.13	1.13		a	
RUSS	27.2	5.2		-134.4	3.7		115.6	1.7		0	0	0	1.07	1.07		a	
MOU	.68	.63		.88	.76		1.18	.81		.77	.73		1	1		a	
RUSS	1689	6.7		.83	5		194.5	4.3		1.18	5.2		0	0	0	a	

2*) La Pluviométrie utile

MOU	MOUHC (MOU)			LAIEMENT (LAI)			PORTAILIER (POR)			SABANS (SAB)				LE PUYEY (LEP)			Y
	A	H	D	A	H	I	A	H	I	A	H	D	A	H	I		
MOU	1	1	1	1.24	1.13	1.12	1.06	1.15	1.15	1.02	1	1	1.02	1.17	1.20	1.19	a
LAB	0	0	0	-10.13	4.15	1.50	220.4	7.22	1.54	157.1	11.92	2.36	258.2	10.69	4.1	1	a
PON	.8	.81	.78	1	1	1	1	.99	1.01	1	1	1	1.08	1.07	1.01		a
OUH	37.89	3.97	2.16	0	0	0	200.5	1.37	1.52	146.0	1.67	3.74	203.2	8.27	3.76		a
RUSS	.85	.78	.69	1.07	.90	.84	1	1	1	1	1	1	1.07	1.07	1.05		a
MOU	111.2	6.77	5.02	-101.4	4.7	3.2	0	0	0	111.2	6.77	5.02	101.4	4.7	3.2		a
OUH	.91	.84	.78	1.14	1	1.11	1	1.07	1.05	1	1	1	1.14	1.14	1.11		a
RUSS	-66.07	4.6	5.87	-101.4	4.7	3.2	0	0	0	111.2	6.77	5.02	101.4	4.7	3.2		a
RUSS	-14.77	1.7	1.7	1.07	1.07	1.05	1	1	1	1	1	1	1.07	1.07	1.05		a

CYCLE	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	TOTAL	
69 - 70	ETP 72.0	35.9	15.2	162.3	84.7	100.9	333.7	114.9	206.5	73.2	210.2	135.4	155.9	1233.8
	P-ETP -35.1	43.8	19.2	0.4	8.1	4.4	8.8	24.2	65.7	102.6	100.8	59.6	55.5	555.5
		35.5	165.3	165.2	84.3	92.8	323.3	105.1	182.3	7.5	107.5	34.5	56.3	1074.2
70 - 71	ETP 71.3	37.7	22.4	4.5	5.5	5.1	7.1	52.9	78.4	78.3	116.5	102.4	594.5	1220.4
	P-ETP 24.6	128.5	122.8	48.0	65.3	45.1	82.1	14.4	6.7	150.8	-82.3	23.5	555.9	594.5
		46.2	32.6	174.0	35.8	41.9	74.0	54.5	126.4	91.5	154.7	65.4	61.2	958.2
71 - 72	ETP 87.4	47.1	11.0	7.4	8.7	14.9	26.9	31.3	65.1	85.4	107.3	102.7	35.6	593.4
	P-ETP -21.2	14.5	163.0	28.4	33.2	59.1	27.6	95.1	28.4	59.3	52.3	-32.4	398.8	593.4
		38.8	51.9	264.2	73.3	65.0	95.4	31.1	123.7	123.9	125.5	108.2	134.5	1243.5
72 - 73	ETP 53.3	42.1	21.0	7.1	2.3	1.4	10.3	20.8	89.5	97.5	105.2	107.8	550.0	550.0
	P-ETP -15.1	9.8	243.2	66.2	62.7	25.0	20.8	108.9	83.3	23.9	3.0	26.7	539.5	539.5
		73.0	97.9	139.1	98.8	71.3	95.0	105.2	25.5	110.3	83.2	95.0	1113.4	1113.4
73 - 74	ETP 73.6	38.0	17.8	6.0	12.4	11.8	30.0	37.3	63.7	83.7	98.9	102.0	575.3	575.3
	P-ETP 5.4	53.9	121.3	92.8	58.9	83.2	75.2	-10.7	47.3	26.5	-15.7	-6.0	538.1	538.1
		177.3	238.1	172.9	131.2	134.8	333.9	134.3	97.6	107.4	150.1	65.1	143.1	1587.8
74 - 75	ETP 55.2	12.2	14.8	11.5	14.5	13.5	11.3	37.5	57.5	65.5	109.2	174.3	548.4	548.4
	P-ETP 111.1	225.9	156.1	119.5	120.3	20.4	123.0	60.0	39.8	69.5	-46.1	28.8	1073.4	1073.4
		151.6	58.2	183.6	61.5	84.1	74.5	17.8	53.1	85.2	18.1	141.9	534.8	534.8
75 - 76	ETP 74.6	33.9	14.0	3.4	4.7	9.3	17.4	36.5	73.4	103.3	111.4	99.5	576.7	576.7
	P-ETP 77.0	24.3	163.6	58.1	79.4	65.2	0.4	16.5	11.0	-85.2	30.5	-18.8	432.1	432.1
		142.1	87.9	140.3	148.8	155.6	237.1	70.4	190.7	150.5	193.5	203.2	145.6	1928.7
76 - 77	ETP 63.6	47.0	13.2	6.0	6.4	15.4	34.9	30.1	67.4	90.8	105.0	91.0	574.0	574.0
	P-ETP 78.5	40.9	127.1	142.8	159.2	220.7	35.5	160.6	83.1	104.7	98.2	55.6	1326.7	1326.7
		25.8	105.4	135.4	121.2	153.6	169.9	395.8	93.0	127.7	152.5	132.3	151.9	1910.9
77 - 78	ETP 53.1	54.1	18.5	11.3	0.7	10.6	20.5	30.1	68.2	85.8	100.4	83.1	550.3	550.3
	P-ETP -35.3	52.3	174.9	103.9	158.9	153.5	375.3	68.9	61.5	66.5	31.9	47.4	1270.6	1270.6
		91.5	38.8	17.9	164.1	147.4	123.2	137.2	113.4	113.5	157.5	43.9	170.8	1395.4
78 - 79	ETP 64.0	40.9	20.0	12.9	2.5	10.6	13.7	28.8	53.2	93.9	107.3	87.3	552.9	552.9
	P-ETP 27.5	-2.1	151.2	144.4	144.8	112.6	177.5	90.6	44.4	67.7	-63.4	82.9	851.5	851.5
		45.4	101.3	157.2	144.4	125.5	126.3	87.1	81.8	123.4	229.2	166.9	104.7	1501.2
79 - 80	ETP 73.2	57.9	10.9	2.2	8.3	17.0	24.1	55.8	77.4	91.3	100.7	556.5	556.5	556.5
	P-ETP -25.8	43.4	160.3	133.5	118.0	70.1	57.7	72.6	151.8	75.5	4.0	954.5	954.5	954.5
		70.1	170.4	51.5	165.9	157.8	69.1	171.8	53.9	147.0	91.3	0.0	1358.9	1358.9
80 - 81	ETP 71.8	30.2	12.9	5.0	1.4	2.8	30.4	51.0	73.3	95.6	95.3	93.5	554.4	554.4
	P-ETP -1.7	140.2	48.7	142.9	156.4	66.3	141.4	2.9	73.7	-7.3	-95.3	-95.5	574.5	574.5
		195.0	187.0	86.0	233.0	142.0	19.0	136.7	23.6	59.9	233.5	148.7	215.7	1693.1
81 - 82	ETP 71.9	40.6	15.5	5.2	10.8	9.7	11.1	33.1	73.2	102.1	121.2	0.0	434.5	434.5
	P-ETP 123.1	145.4	70.4	227.8	131.2	9.3	125.6	-3.5	-15.3	137.4	27.5	215.7	1153.6	1153.6
		101.0	166.7	153.4	225.9	158.0	117.0	113.3	244.4	71.2	85.2	31.1	150.1	1501.3
82 - 83	ETP 62.4	38.5	21.1	7.7	6.5	2.9	14.9	37.3	55.7	102.0	137.9	100.4	587.3	587.3
	P-ETP 38.5	128.2	138.3	216.2	151.5	110.1	98.4	207.1	315.5	-15.8	-106.8	53.7	1344.4	1344.4
		92.3	108.3	146.9	122.8	117.5	115.7	122.8	103.0	127.3	153.2	96.3	125.4	1427.0
83 - 84	ETP 67.8	40.7	17.0	7.0	5.3	8.7	18.5	34.0	50.2	91.4	107.4	20.1	559.0	559.0
	P-ETP 25.1	67.5	129.3	111.4	107.0	164.2	75.0	53.2	64.9	-10.1	55.1	870.5	870.5	870.5

Ouhans

Pontarlier

ANNEXE VI : Résultats des jaugeages
du 3 Mars 1983 effectués
sur le Druegon entre
Vuillecin et la confluence

ANNEXE III : Distribution des débits par cycle et par station

m ³ /s	1971 - 72			1972 - 73			1973 - 74			1974 - 75			1975 - 76			1976 - 77			1977 - 78			1978 - 79			1979 - 80												
	Lab	Pon	Drue	Lab	Pon	Drue	Lab	Pon	Drue	Lab	Pon	Drue	Lab	Pon	Drue	Lab	Pon	Drue	Lab	Pon	Drue	Lab	Pon	Drue	Lab	Pon	Drue	Lab	Pon	Drue	Lab	Pon	Drue	Lab	Pon	Drue	
0.5	83.6	100	71.6	100	83.8	95.9	73.4	100.1	98.6	99.2	99.5	96.4	90.4	94.3	72.7	100	98.9	99.5	100	96.2	89.9	93.4	74.5	89.9	93.4	74.5	99.4	99.7	99.7	99.4	99.7	99.7	99.4	99.7	99.7		
1	63.7	97	54.4	100	74.5	87.1	40	96.2	83.6	92.1	96.2	76.2	74.6	88.8	51.9	99.5	91.2	100	84.4	86.6	99.2	77.3	66.8	78.6	58.9	66.8	78.6	58.9	82.9	92.3	80.1	82.9	92.3	80.1	82.9	92.3	80.1
1.5	52.2	82.4	38.8	99.5	58.6	66.3	34.8	95.1	62.2	79.5	91.2	63.3	56.3	79.5	37.4	95.4	78.1	98.9	69.6	75.1	91.5	66.6	57.5	69	46	57.5	69	46	74.9	91	65.8	74.9	91	65.8	74.9	91	65.8
2	40.7	74.3	32.2	90.4	43	54	30.4	91.5	47.7	69	89	52.1	40.4	74	31.4	91	70.4	92.9	61.9	67.4	85.5	57.5	100	52.3	64.1	37.8	99.5	66.9	86.1	56	66.9	86.1	56	66.9	86.1	56	
3	27.6	57.9	18	70.5	33.4	42.5	24.9	55.2	26.6	48.8	78.6	39.2	99.7	24.3	62	22.7	57.3	78.1	51	40	53.7	30.4	84.4	40	53.7	30.4	84.4	50.3	76.8	38.8	50.3	76.8	38.8	50.3	76.8	38.8	
5	12.3	30.7	7.7	46.2	20.3	32.9	15.1	46.3	19.2	32.1	62.2	22.7	89.3	13.4	30.1	12.3	38.9	60.3	28.2	38.4	55.9	17.3	93.2	24.7	43.8	12.9	72.3	31.2	60.7	19.9	31.2	60.7	19.9	31.2	60.7	19.9	
10	2.7	9.3	.8	15.3	9.3	20.3	4.9	27.7	7.7	14.2	34.8	7.9	51	3.6	13.9	5.5	14	31	10.7	17.3	32.6	6	52.6	10.4	20.8	5.2	36.2	13.5	27.9	9	13.5	27.9	9	13.5	27.9	9	
15	.8	4.2	.5	4.6	6.6	11.5	3	18.6	3.6	6.6	21.4	3.6	26.8	1.6	7.7	2.5	8.8	20.3	7.1	8.2	24.4	4.1	21.6	6	13.2	3.6	17	7.2	18	6.3	7.2	18	6.3	7.2	18	6.3	
20	.3	1.2	.3	.8	3.8	7.9	1.6	8.8	1.6	3.3	12.6	3.15.1	.3	4.9	.5	4.4	4.9	12.9	4.7	4.4	16.7	2.2	13.4	4.9	9.3	2.5	8.8	4.1	13.9	4.1	4.1	13.9	4.1	4.1	13.9	4.1	
30				.3	.8	4.9	.5	3	.3	1.9	3.8	4.7			1.9	1.6	1.9	5.8	2.2	2.2	5.8	1.1	7.9	1.1	4.9	.3	5.5	.8	6.8	1.9	.8	6.8	1.9	.8	6.8	1.9	
50										.3																											
Min.	4.06																																				
Max.	21.1	25.2	21.5	30.3	36.3	69.5	52.6	62	32.1	40.5	24.3	34.1	47	23.5	43.7	25.6	36.7	29.9	41.4	41.7	67.5	57.5	59.4	52.5	49.3	30.2	63.3	37.7	65.5	68.5	62.1	37.7	65.5	68.5	62.1		
Moy.	2.5	4.7	1.9	6	3.9	6.7	2.6	8.3	3.5	6.2	2.5	8	5.1	9.7	3.7	12.5	2.7	5.4	2.5	7.4	5.8	10.1	5	14	6.1	10.2	3.9	13.3	4.4	7.2	2.9	10.5	5.2	9.6	4.6	13.2	

Vuillecin 4.12 m³/s

Passerelle 4.11

- 100 m 3.7

- 200 m 4.25

- 400 m 4.13

Pont Rouge

- 80 m 4.11

- 200 m 4.23

- 300 m 4.61

- 400 m 5.09

- 657 m 4.76

Confluence -50m 4.43

(Débit du Doubs = 8.4 m³/s à
50 m en amont de la confluence)

ANNEXE IV : Calcul des paramètres astronomiques

L'effet de la traversée de l'atmosphère le rayonnement solaire subit une série de perturbations (réflexion, diffusion...) pour lesquelles les conditions climatiques locales jouent un grand rôle.

Il est souvent impossible de mesurer in situ l'énergie fournie par le rayonnement solaire, aussi doit-on l'estimer à partir des relevés des stations météorologiques les plus proches du site.

La formule:

$$G = G_0 (a \cdot S / S_0 + b)$$

permet d'évaluer cette énergie à partir de paramètres astronomiques.

Ces paramètres sont: -G=irradiation solaire extraterrestre

-S=durée astronomique du jour

-DS=déclinaison solaire

La durée astronomique du jour est comparée à la durée d'insolation mesurée au voisinage du site (S). Cette dernière valeur correspond à l'intervalle de temps pendant lequel un ~~rayonnement horizontal~~ est soumis à un rayonnement solaire direct.

a=LA DECLINAISON SOLAIRE (DS)

Elle représente l'angle formé par la direction du soleil et le plan de l'Equateur. Elle varie entre +23°27' au solstice d'été et -23°27' au solstice d'hiver (elle sera nulle aux équinoxes).

La valeur de DS se calcule d'une manière satisfaisante par la formule de Dogniaux:

$$DS (en^\circ) = 0.3728 - 22.984 \cos(2HNJ) - 0.3499 \cos(4HNJ) - 0.1398 \cos(6HNJ) + 3.7872 \sin(2HNJ) + 0.03205 \sin(4HNJ) + 0.07187 \sin(6HNJ)$$

où HNJ=nombre de jours écoulés depuis le 1er janvier

N=27/N (N=nombre de jours de l'année)

b=LA DUREE ASTRONOMIQUE DU JOUR (S)

$$S_0 (en h) = \frac{24}{\pi} \arccos(-\tan \phi \tan \delta)$$

φ=latitude du lieu

c=LA IRRADIATION SOLAIRE (G)

A la limite supérieure de l'atmosphère l'énergie reçue par unité de surface (placée normalement aux rayons), est en moyenne = 1380 W/m²

En fait cette puissance interceptée est liée au cycle annuel Terre-Soleil. Aussi doit-elle être approximée par l'expression de Dogniaux

$$G_0 (en W/m^2) = 1380 + 5.226 \cos(2HNJ) + 0.88018 \cos(4HNJ) - 0.00461 \cos(6HNJ) + 1.8037 \sin(2HNJ) - 0.09746 \sin(4HNJ) + 0.18412 \sin(6HNJ)$$

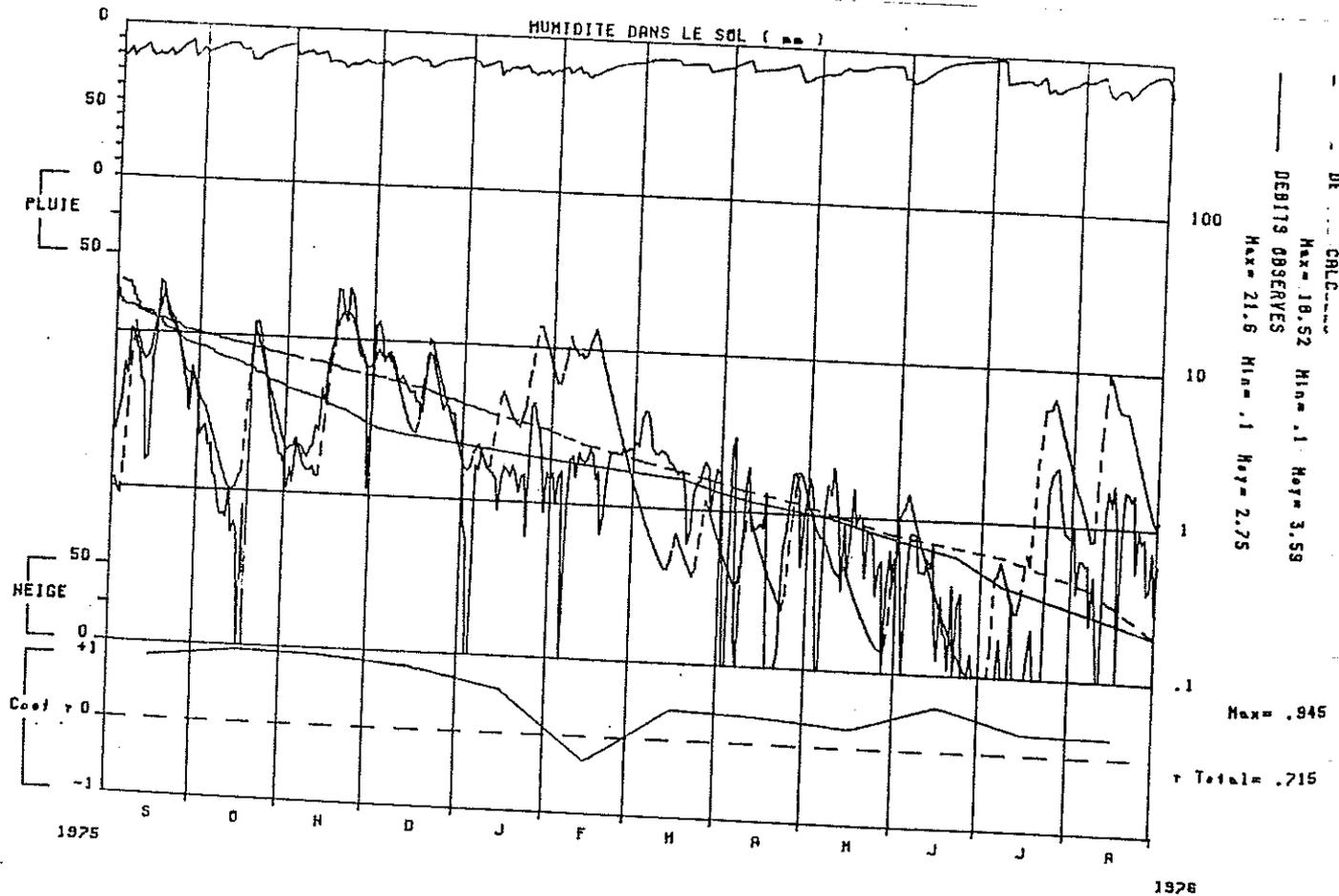
L'énergie G₀ reçue au cours d'une journée par une surface horizontale est alors:

$$G_0 (en J/m^2) = 0.36 \cos^2(S_0) \sin \phi \sin \delta + \sin \delta \sin \phi + 24/\pi \sin \delta \cos \phi \cos(S_0)$$

SD31 = 151 - HW000

Angle horaire au coucher du soleil

ANNEXE V : Résultats de la simulation des écoulements du Doubs à Labergement avec correction progressive de l'héliométrie



E R R A T A

p 3 lire en fonction des précipitations au lieu de la pluviométrie

p 28 lire La station météorologique de Pontarlien enregistre

p 44 figure 11: Les débits caractéristiques sont:

* Max= 68.5 m³/s Moy= 3.3 m³/s Min= 0.1 m³/s pour le DRUGEON à
VUILLECIN

* Max= 62.5 m³/s Moy= 4.4 m³/s Min= 0.08 m³/s pour le DOUBS à
LABERGEMENT

* Max= 69.5 m³/s Moy= 7.8 m³/s Min= 0.2 m³/s pour le DOUBS à
PONTARLIER

* Max= 78.5 m³/s Moy= 10.4 m³/s Min= 0.8 m³/s pour la LOUE à
MOUTHIER

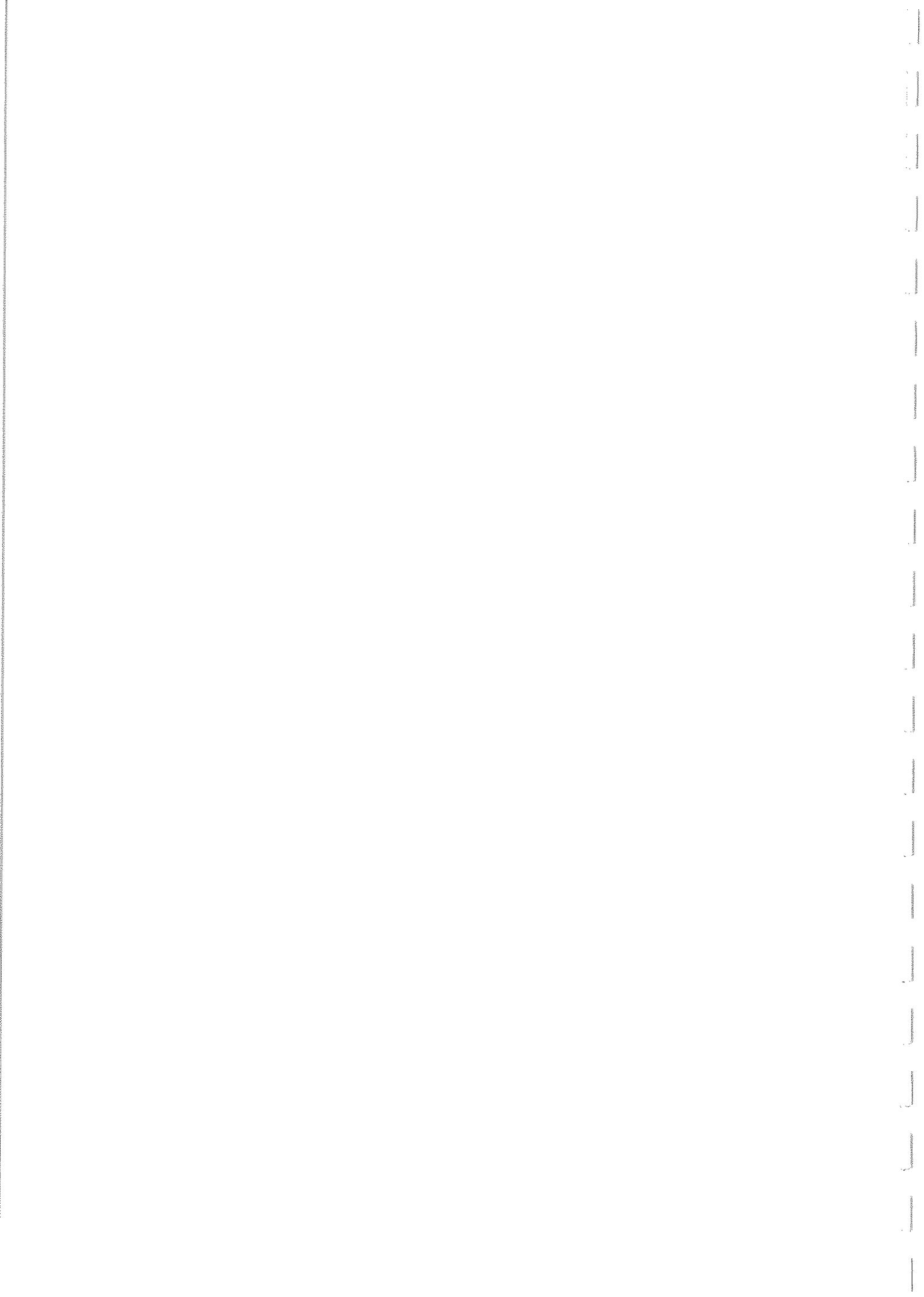
p 19 lire : a est une fonction de I

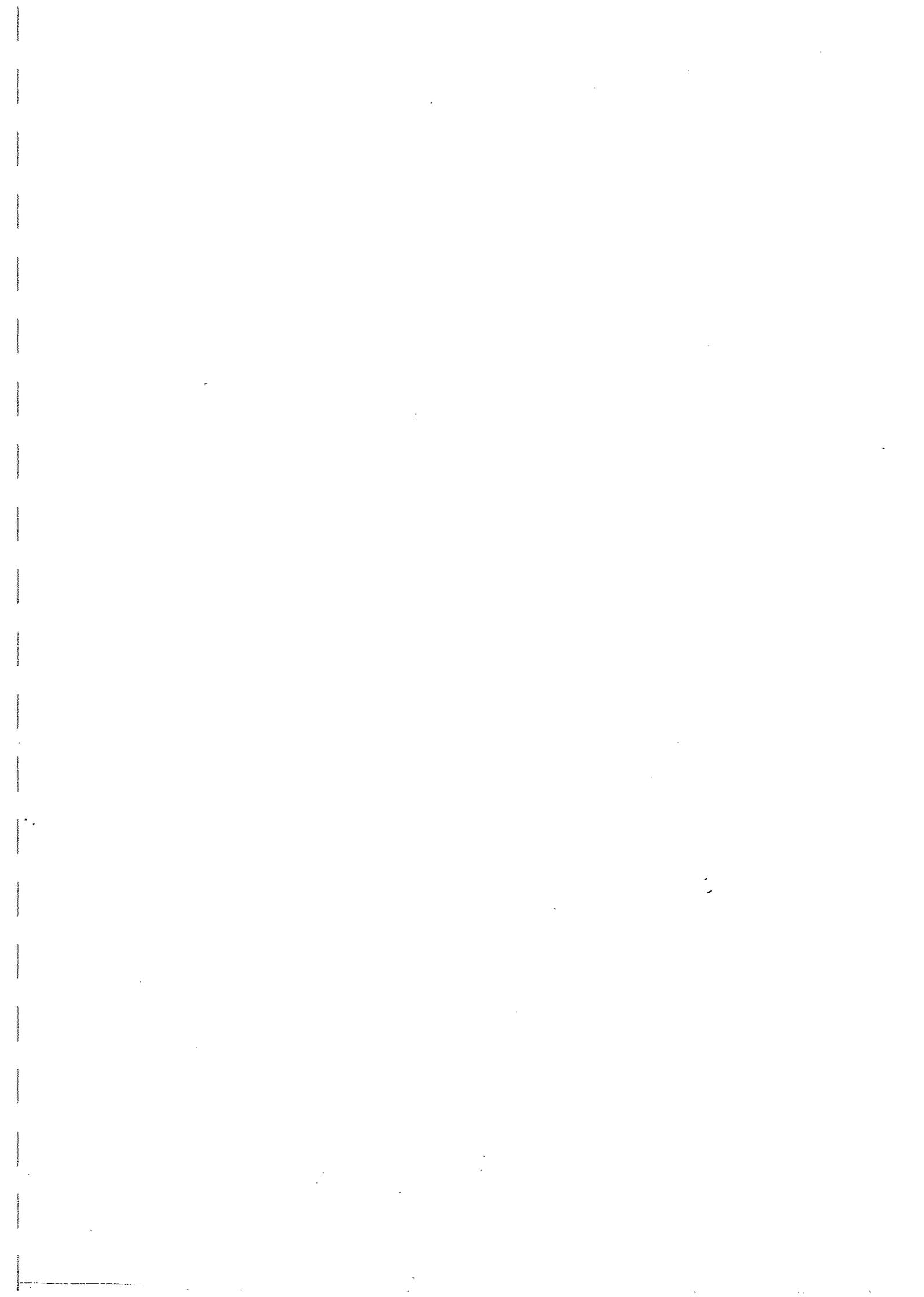
p 63 figure 21:L'hydrogramme représenté est purement théorique

p 128 lire La perte effective ... au lieu de effectuée

p 129 lire (r=0.977) au lieu de (r=9.77)

p 140 la figure 57 représente les jaugeages effectués en Août 1983





REPONSES HYDRODYNAMIQUES DES HAUTS BASSINS DU DOUBS ET DE LA LOUE :
SIMULATION DES ECOULEMENTS ; INFLUENCE DE L'ENNEIGEMENT ET DE LA
TRAVERSEE DU LAC DE ST POINT ; ETUDE DES PERTES DU DOUBS.

R E S U M E

Les Hauts Bassins du Doubs et de la Loue appartiennent à la Haute Chaîne Jurassienne où se rencontrent des plis orientés N60° recoupés par des décrochements méridiens.

L'analyse des données météorologiques (du 1.9.69 au 31.8.83) et hydrométriques (du 1.9.71 au 31.8.80) recueillies sur la région montre :

- de fortes précipitations (1200 mm à Pontarlier et 1680 mm à Mouthe) caractérisées localement par leur fréquence, leur intensité et l'importance de l'enneigement (de 350mm (Ouhans) à 531mm (Mouthe)) ;
- un écoulement général vers le Nord-Est qui suit les structures du Jurassique supérieur, dans lesquelles on peut reconnaître trois niveaux de circulation (local, intermédiaire et régional) ;
- une dérivation des eaux hors des sous-bassins du Doubs et du Dugeon le long des décrochements (vers l'Ain pour l'accident de Mouthe et vers les sources de la Loue (et de l'Orbe ?) pour l'accident de Pontarlier).

La décomposition des hydrogrammes suggère la participation de quatre unités d'écoulement au régime des rivières (l'unité de ruissellement et trois unités karstiques : superficielle, noyée et microfissurale). L'utilisation du modèle hydrométéorologique MERO valide ce mode de représentation des systèmes karstiques. Les essais de simulation des écoulements, sur le cycle Septembre 1975-Août 1976, donnent de très bons résultats en automne, mais qui se dégradent dès l'observation de précipitations neigeuses. Néanmoins, il est possible, au niveau annuel, de déterminer la participation des différentes unités d'écoulement et de qualifier leur hydrodynamisme.

Ainsi, le sous-bassin du Doubs à Labergement montre des réactions rapides, faiblement influencées par les réserves, ce qui correspond aux réponses d'un système karstique. Celui de Pontarlier est marqué par la présence des lacs de St Point et de Remoray. Le comportement dynamique du bassin du Dugeon dépend des capacités de rétention et de restitution de ses formations superficielles. Le bassin des sources de la Loue est nettement influencé par les pertes du Doubs.

L'influence des phénomènes perturbateurs (enneigement, traversée des lacs et les pertes du Doubs) est abordée, ce qui permet : - de proposer un modèle thermodynamique de la fusion nivale (modèle HELIOS), - d'améliorer les résultats de la simulation des écoulements, - de montrer le mode de propagation des ondes de crue à la surface du lac de St Point, - d'estimer le produit des pertes, - d'interpréter le phénomène de capture et de discuter des solutions pour modifier le débit d'étiage du Doubs (en aval de Pontarlier).

A B S T R A C T

The Upper Part of Doubs and Loue catchments are be part of the Hight Jura where the N60° folds show the meridian tear faults.

The meteorological (from 1.9.69 to 31.8.83) and hydrological (from 1.9.71 to 31.8.80) datas analysis of this area show :

- high precipitations (1200 mm to Pontarlier and 1680 mm to Mouthe) with locally typical frequency, intensity and snowing up (from 350 mm (Ouhans) to 531 mm (Mouthe)) ;
- an general north-east discharge following the Upper Jurassic structures, in whom there is three circulation levels (near, intermediate and regional) ;
- an water diversion outside the Doubs and Dugeon subbasins along tear faults (toward Ain near to Mouthe's accident and toward Loue's sources (and perhaps Orbe's source) near the Pontarlier accident.

The hydrogram separation is displaying four flows components (one of runoff and three karstic units : surface unit drowned unit and microcrakting unit). The MERO hydrometeorological system is according with this concept. Flows simulation trials, from September 1975 to August 1976, give significant results for autumn, but they are more bad when snow effect begins. Still, it's possible in annual step, to bring about four flows components contribution and to term their hydrodynamism.

The Doubs'Labergement sub-basin is showing fast reactions with a little reserve influence. The St Point lake puts a mark on the one of Pontarlier. The Dugeon's basin dynamic behaviour is dependent on retention and restitution capacities of his superficial formations. The Loue's sources basin is distinctly influencing by the Doubs' losses.

The disturbing phenomena effects analysis (snowing up, lakes'crossing and Doubs' losses) permits : - to improve the flows simulation trials, - to show the swelling propagation mode on the St Point lake surface, - to value the losses, - to explain the capture phenomenon and to examine possible solutions to change the Doubs' lowest water level (downstream of Pontarlier).

M O T S C L E S

Hauts Bassins du Doubs et de la Loue - Jura - Hydrologie de surface -
Relation pluie débit - Simulation - Modèle mathématique - Prévision -
Karst - Statistiques - Neige - Précipitations.