



BRGM

analyse et modélisation des bassins versants de la Moselle française

modélisation de 40 bassins versants
et analyse de sensibilité du calage

B. R. G. M. \
24. JAN. 1986
BIBLIOTHEQUE

N/Réf. : SGN/EAU/bm

Orléans, le 20 janvier 1986

OBJET : Modélisation de la MOSELLE FRANCAISE
(rapport 85 SGN 435 EAU)



BORDEREAU DE TRANSMISSION

Veillez trouver ci-joint notre rapport n° 85 SGN 435 EAU, intitulé
"ANALYSE ET MODELISATION DES BASSINS VERSANTS DE LA MOSELLE FRANCAISE.
Modélisation de 40 bassins versants et analyse de sensibilité du
calage", par D. THIERY.

Nous vous en souhaitons bonne réception.

BUREAU DE RECHERCHES
GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

établissement public
à caractère industriel
et commercial

Siège : 191, rue de Vaugrand
75737 Paris cedex 15, France
Tél (33) 1 47.83.94.00
Télex : BRGM 780258 F
R.C. 58 B 5614 Paris
SIREN 582056149 B

Centre scientifique et technique
Avenue de Concy
Orléans-La Source (Loiret)
B.P. 8009
45060 Orléans cedex 2 France
Tél (33) 38 64 34 34
Télex : BRGM 780258 F
Télécopieur (33) 38 64 35 18 (GR 3

ANALYSE ET MODELISATION DES BASSINS VERSANTS DE LA MOSELLE FRANCAISE.
Modélisation de 40 bassins versants et analyse de sensibilité du calage.

par D. THIERY

Diffusion.

DG	Conseil Général du GREF/M.Foulhouze
DG/AD	(via J.J.Collin)
DFG/MET/DAA	
DCG/FR	INST.FLUIDES Strasbourg/M.Freid
DG/RPC	A.F.B. Seine-Normandie/M.Bediot
	A.F.B. Loire-Bretagne/M.Lefevre
SGN/DIG/Bibliothèque	CEMAGREF Montpellier/M.Mayol
DSGN/CME/J.Margat	CEMAGREF/M.Oberlin
DIV/ES/G.Rampon	ORSTOM/G.Girard
	Un.P.M.CURIE/M.Letolle
EAU/J.J.Collin	Un.BORDEAUX III/M.Pouchan
Bibliothèque	ORSTOM Montpellier/M.Pouyau
Auteur/D.Thiery	ENSEEIH Toulouse/M.Thirriot
Y.Barthélémy	E.N.HYDRAULIQUE Grenoble/M.Vachaud
M.L.Noyer	/M.Obled
C.Filippi	F.A.O. Bibliothèque Rome
Ph.Jean	
J.Martin	
M.Normand	
T.Pointet	
J.M.Royer	EAU/Hydrogéologues détachés
J.P.Sauty	M. Albinet
J.Schwartz	M. Cremille
J.J.Seguin	M. Dassibat
M.Vandenbeusch	M. Depagne
F.Milville	M. Diffre
Circulation	M. Van den Avenne
SGR/IDF/B.Mazenc	
ALS/J.P.Vançon	
CHA/F.Moreau	
RHA/Y.Gouisset	
RHA/V.Petit	
PAC/M.Sedan	
HNO/J.M.Barrat	
SGN/MAR/R.E.QueLennec	



analyse et modélisation des bassins versants de la Moselle française

modélisation de 40 bassins versants
et analyse de sensibilité du calage

D. Thiery

Septembre 1985
85 SGN 435 EAU

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES
SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL
Département Eau

B.P. 6009 - 45060 ORLÉANS CEDEX 2 - Tél.: (33) 38.64.34.34

R E S U M E

Ce rapport reprend quasiment intégralement la note technique n° 85/09 de mars 1985 qui constitue le troisième rapport d'avancement du travail de recherche financé par le B.R.G.M. et le Ministère de l'Environnement et de la Qualité de la Vie, sous le titre "Adaptation des modèles hydrologiques, Analyse de sensibilité, Application aux bassins de la Moselle", et sous le numéro de contrat 83.109. Il fait suite aux rapports suivants :

- * Analyse et Modélisation des bassins versants de la Moselle Française : analyse des données hydroclimatiques ; étude statistique de l'influence de la physiographie sur les écoulements - 1er rapport d'avancement, note technique SGN/EAU 84/31 par D. Thiery, octobre 1982 ;
- * Etude des bassins versants de la Moselle Française : Analyse des variations spatiales et temporelles des hauteurs de pluie mensuelles et calcul des lames d'eau mensuelles pour chaque bassin versant - 2me rapport d'avancement, note technique SGN/EAU 84/32, par P.A. Roche, Juin 1983.

L'objet de ce rapport est la modélisation séparée des débits de 40 bassins et sous-bassins de la Moselle Française avec une analyse de sensibilité des paramètres obtenus et une étude des relations entre les paramètres de modélisation (globale) et les caractéristiques physiographiques des bassins.

* *
*

TABLE DES MATIERES

<u>INTRODUCTION</u>	1
<u>CHAPITRE 1 - DESCRIPTION DES DONNEES DISPONIBLES</u>	3
1. LES BASSINS MODELISES	5
2. LES DONNEES HYDROMETRIQUES	5
3. LES DONNEES CLIMATIQUES	5
<u>CHAPITRE 2 - LE MODELE HYDROLOGIQUE GLOBAL</u>	13
1. LE MODELE UTILISE	15
2. DOMAINES D'APPLICATION DU MODELE GARDENIA	15
3. PARAMETRES DU MODELE	17
4. LES DONNEES NECESSAIRES A L'UTILISATION DU MODELE	19
5. LE COEFFICIENT D'AJUSTEMENT	19
6. PONDERATION DES ECARTS DANS LE MODELE	22
6.1. JUSTIFICATION D'UNE PONDERATION	22
6.2. DESCRIPTION DE LA PONDERATION CHOISIE	23
6.3. ANALYSE DE L'INFLUENCE DE LA PONDERATION	25
<u>CHAPITRE 3 - CALCUL DES LAMES D'EAU ET D'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE</u>	27
1. LAME D'EAU DE REFERENCE	29
2. LAME DE TEMPERATURE	34
3. LAME D'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE ETP	36
<u>CHAPITRE 4 - CALAGE DE REFERENCE</u>	39
1. LES HYPOTHESES DE CALAGE	41
2. LES PARAMETRES IDENTIFIES	43
3. LA QUALITE DE L'AJUSTEMENT	47
4. STABILITE DU CALAGE	64
<u>CHAPITRE 5 - INFLUENCE DE LA PONDERATION DES ECARTS</u>	67
1. COEFFICIENTS D'AJUSTEMENT	69
2. DEBITS CARACTERISTIQUES CALCULES	69
3. PARAMETRES OBTENUS	74
4. SIMULATION DES DEBITS MENSUELS	74

LISTE DES FIGURES

<u>FIGURE I.1</u> - Bassins élémentaires de la Moselle	6
<u>FIGURE I.2</u> - Bassins composés de la Moselle	7
<u>FIGURE I.3</u> - Bassins composés de la Moselle	8
<u>FIGURE I.4</u> - Bassins composés de la Moselle	9
<u>FIGURE II.1</u> - Schéma de fonctionnement du modèle GARDENIA	16
<u>FIGURE II.2</u> - Fonction de pondération des écarts Exemple d'un bassin versant de la Moselle	24
<u>FIGURE III.1</u> - Situation des 76 postes pluviométriques du bassin de la Moselle	28
<u>FIGURE III.2</u> - Température de l'air. Bassin de la Moselle.	37
<u>FIGURE IV.1</u> - Calage de référence : critères d'ajustement et 3 paramètres des 40 bassins modélisés	44
<u>FIGURE IV.2</u> - Calage de référence : paramètres des 40 bassins modélisés, répartition statistique	45
<u>FIGURE IV.3</u> - Calage de référence : bassins 1 à 5	48
<u>FIGURE IV.4</u> - Calage de référence : bassins 6 à 10	49
<u>FIGURE IV.5</u> - Calage de référence : bassins 11 à 16	50
<u>FIGURE IV.6</u> - Calage de référence : bassins 17 à 21	51
<u>FIGURE IV.7</u> - Calage de référence : bassins 23 à 28	52
<u>FIGURE IV.8</u> - Calage de référence : bassins 29 à 34	53
<u>FIGURE IV.9</u> - Calage de référence : bassins 35 à 39	54
<u>FIGURE IV.10</u> - Calage de référence : bassins 40 à 45	55

<u>FIGURE IV.11</u> - Bassins mal simulés	58
<u>FIGURE IV.12</u> - Débit moyen mensuel (spécifique)	59
<u>FIGURE IV.13</u> - Ecart-type du débit spécifique moyen	60
<u>FIGURE IV.14</u> - Débit spécifique minimal	61
<u>FIGURE IV.15</u> - Rapport débit spécifique mensuel minimal divisé par le débit moyen	62
<u>FIGURE IV.16</u> - Débit spécifique mensuel maximal	63
<u>FIGURE IV.17</u> - Contrôle de la stabilité du calage	65
<u>FIGURE V. 1</u> - Influence de la pondération	70
<u>FIGURE V. 2</u> - Influence de la pondération sur le coefficient d'ajustement naturel	71
<u>FIGURE V. 3</u> - Influence de la pondération sur le coefficient d'ajustement pondéré	72
<u>FIGURE V. 4</u> - Influence de la pondération sur les débits spécifiques	73
<u>FIGURE V. 5</u> - Influence de la pondération sur les débits minimaux calculés	75
<u>FIGURE V. 6</u> - Influence de la pondération sur les corrections de pluie	76
<u>FIGURE V. 7</u> - Influence de la pondération sur la capacité de la réserve superficielle	77
<u>FIGURE V. 8</u> - Simulation optimisant le coefficient d'ajustement naturel	78
<u>FIGURE V. 9</u> - Simulation de référence - Bassins 11 à 16	79
<u>FIGURE V.10</u> - Simulation ZERO 1. Pas de correction de pluie, ni d'ETP	81
<u>FIGURE V.11</u> - Simulation ZERO 2. Pas de correction de pluie ; correction d'ETP de + 20 %	82
<u>FIGURE V.12</u> - Influence de la pondération des écarts pour un bassin mal simulé	84
<u>FIGURE V.13</u> - Influence de la pondération des écarts pour un bassin bien simulé	85

<u>FIGURE VI. 1</u>	- Influence de la correction d'ETP sur le coefficient d'ajustement et la capacité de la réserve superficielle	90
<u>FIGURE VI. 2</u>	- Influence de la correction d'ETP sur la correction globale de pluie	91
<u>FIGURE VI. 3</u>	- Capacité de la réserve superficielle imposée à 50 mm (valeur médiane) - Effet sur l'ajustement des 40 bassins	93
<u>FIGURE VI. 4</u>	- Capacité de réserve superficielle imposée à 50 mm (valeur médiane) - Effet sur la correction globale de pluie	94
<u>FIGURE VI. 5</u>	- Ajustement pondéré. Pas de correction de pluie, ni d'ETP	96
<u>FIGURE VI. 6</u>	- Ajustement naturel. Pas de correction de pluie, ni d'ETP	97
<u>FIGURE VI. 7</u>	- Débit moyen observé et simulé. Pas de correction de pluie, ni d'ETP	98
<u>FIGURE VI. 8</u>	- Capacité de la réserve superficielle. Pas de correction de pluie, ni d'ETP	99
<u>FIGURE VI. 9</u>	- Coefficient d'équi-ruissellement. Pas de correction de pluie, ni d'ETP	100
<u>FIGURE VI.10</u>	- Influence du pas de temps de la pluie. Simulation des débits mensuels	104
<u>FIGURE VI.11</u>	- Influence du pas de temps de la pluie. Simulation des débits mensuels.	105
<u>FIGURE VI.12</u>	- Influence du pas de temps de la pluie. Simulation des débits mensuels.	106
<u>FIGURE VI.13</u>	- Influence du pas de temps de la pluie sur les corrections globales de pluies. Simulation des débits mensuels	108
<u>FIGURE VI.14</u>	- Influence du pas de temps de la pluie. Simulation des débits mensuels	109
<u>FIGURE VI.15</u>	- Influence du pas de temps de la pluie. 48 postes observés de 1968 à 1977	110
<u>FIGURE VI.16</u>	- Influence du pas de temps de la pluie. 48 postes observés de 1968 à 1977	111
<u>FIGURE VI.17</u>	- Influence du pas de temps de la pluie. 48 postes observés de 1968 à 1977	112
<u>FIGURE VI.18</u>	- Influence de la répartition de la pluie	113
<u>FIGURE VI.19</u>	- 40 bassins de la Moselle. Influence du pas de temps de la pluie selon la réserve superficielle	115

<u>FIGURE VI.20</u>	- 40 bassins de la Moselle : Influence de la réserve superficielle selon le pas de temps	117
<u>FIGURE VI.21</u>	- 40 bassins de la Moselle. Influence de la réserve superficielle selon le pas de temps	118
<u>FIGURE VI.22</u>	- Influence du pas de temps de calcul et de la réserve superficielle sur la pluie efficace en climat méditerranéen (Montpellier, 1978-1983)	119
<u>FIGURE VI.23</u>	- Influence de la neige sur l'ajustement pondéré	122
<u>FIGURE VI.24</u>	- Influence de la neige. Simulation du bassin n° 1 - Fresse/Moselle	123
<u>FIGURE VI.25</u>	- Influence de la neige.	124
<u>FIGURE VI.26</u>	- Influence d'un réseau pluviométrique réduit (avec neige) sur le coefficient d'ajustement	127
<u>FIGURE VI.27</u>	- Influence d'un réseau pluviométrique réduit sur la correction de pluie	128
<u>FIGURE VI.28</u>	- Influence d'un réseau pluviométrique réduit sur la capacité de la réserve superficielle	130
<u>FIGURE VI.29</u>	- Influence d'un réseau pluviométrique réduit	131
<u>FIGURE VII. 1</u>	- Influence du temps de demi-tarissement sur les coefficients d'ajustement	136
<u>FIGURE VII. 2</u>	- Influence du temps de demi-tarissement (seul)	137
<u>FIGURE VII. 3</u>	- Influence d'une deuxième composante d'écoulement souterrain	139
<u>FIGURE VII. 4</u>	- Fonction de transfert bi-linéaire. Influence sur le coefficient d'ajustement	140
<u>FIGURE VII. 5</u>	- Fonction de transfert bi-linéaire. Influence sur la correction globale de pluie	141
<u>FIGURE VII. 6</u>	- Fonction de transfert bi-linéaire. Influence sur le débit spécifique	142
<u>FIGURE VII. 7</u>	- Fonction de transfert bi-linéaire. Influence sur le débit spécifique minimal	143
<u>FIGURE VII. 8</u>	- Influence d'un débit extérieur constant (tarissement ajusté) sur l'ajustement	145
<u>FIGURE VII. 9</u>	- Débit extérieur constant (tarissement ajusté)	146

<u>FIGURE VII.10</u>	- Influence du débit extérieur constant (tarissement ajusté) sur la correction globale de pluie de pluie	147
<u>FIGURE VII.11</u>	- Influence de l'infiltration profonde sur le coefficient d'ajustement	149
<u>FIGURE VII.12</u>	- Influence de l'infiltration profonde sur le coefficient d'ajustement	150
<u>FIGURE VII.13</u>	- Influence de l'infiltration profonde sur la capacité de la réserve utile	152
<u>FIGURE VII.14</u>	- Influence de l'infiltration profonde sur la correction globale de pluie	153
<u>FIGURE VII.15</u>	- Influence de l'infiltration profonde sur la correction globale de pluie	154
<u>FIGURE VII.16</u>	- Influence de l'infiltration profonde sur la hauteur d'équi-ruissellement	155
<u>FIGURE VII.17</u>	- Influence de l'infiltration profonde sur la hauteur d'équi-ruissellement	156
<u>FIGURE VII.18</u>	- Influence de l'infiltration profonde sur le débit spécifique moyen	157
<u>FIGURE VII.19</u>	- Influence de l'infiltration profonde sur le débit spécifique minimal	158
<u>FIGURE VII.20</u>	- Influence de l'infiltration profonde sur le temps de demi-percolation profonde	160
<u>FIGURE VII.21</u>	- Influence de l'infiltration profonde sur le temps de demi-tarissement	161
<u>FIGURE VII.22</u>	- Influence de l'infiltration profonde sur le temps de demi-tarissement	162
<u>FIGURE VII.23</u>	- Influence de l'infiltration profonde sur le temps de demi-tarissement	163
<u>FIGURE VII.24</u>	- Influence de l'infiltration profonde sur le temps de demi-tarissement	164
<u>FIGURE VIII. 1</u>	- Relation entre la correction de pluie et d'ETP. Réserve superficielle optimale 80 mm	169
<u>FIGURE VIII. 2</u>	- Relation entre la correction de pluie et d'ETP. Réserve superficielle optimale 120 mm	170
<u>FIGURE VIII. 3</u>	- Relation entre la correction globale de pluie et d'ETP. Réserve superficielle 40 mm.	171

<u>FIGURE VIII. 4</u>	- Relation entre la correction globale de pluie et la capacité de la réserve superficielle	172
<u>FIGURE VIII. 5</u>	- Simulation du débit mensuel à Hauconcourt avec des pluies mensuelles	174
<u>FIGURE VIII. 6</u>	- Simulation du débit mensuel à Hauconcourt avec des pluies mensuelles	175
<u>FIGURE VIII. 7</u>	- Relation entre la hauteur d'équi-ruissellement et la correction globale de pluie	176
<u>FIGURE VIII. 8</u>	- Relation entre le temps de demi-percolation et le temps de demi-tarissement	178
<u>FIGURE VIII. 9</u>	- Relation entre la hauteur d'équi-ruissellement et le temps de demi-tarissement	179
<u>FIGURE VIII.10</u>	- Relation entre la hauteur d'équi-ruissellement et le temps de demi-percolation (demi-tarissement : 3 mois)	180
<u>FIGURE VIII.11</u>	- Relation entre la hauteur d'équi-ruissellement et le temps de demi-percolation (temps de demi-tarissement imposé à 1,5 mois)	181
<u>FIGURE IX.1</u>	- Relation entre paramètres physiographiques et paramètres de modélisation	193
<u>FIGURE IX.2</u>	- Relation entre paramètres physiographiques et paramètres de modélisation	196
<u>FIGURE X.1</u>	- Contrôle de la stabilité par 6 calages sur 5 ans	204
<u>FIGURE X.2</u>	- Contrôle sur une année du calage du modèle sur 5 ans	206
<u>FIGURE X.3</u>	- Contrôle sur une année du calage du modèle sur 5 ans	207
<u>FIGURE X.4</u>	- Débit spécifique annuel calculé par le rapport des pluies annuelles	208
<u>FIGURE X.5</u>	- Contrôle du calage du modèle. Comparaison avec la méthode du rapport des pluies	209
<u>FIGURE X.6</u>	- Simulation du débit mensuel à Hauconcourt. Calage avec des pluies mensuelles sur les 6 années 1971-1976	211

<u>FIGURE X.7</u> - Simulation du débit mensuel à Hauconcourt. Calage avec des pluies mensuelles sur les 4 années 1968-1970 et 1977	212
<u>FIGURE X.8</u> - Simulation du débit mensuel à Hauconcourt. Calage avec des pluies pentadaires sur les 4 années 1968-1970 et 1977	213
<u>FIGURE X.9</u> - Simulation du débit pentadaire à Hauconcourt. Calage 1971-1976	215
<u>FIGURE A.1</u> - Fichier physiographique de la Moselle	222
<u>FIGURE A.2</u> - Fichier physiographique de la Moselle	223
<u>FIGURE A.3</u> - Fichier physiographique de la Moselle	224

LISTE DES TABLEAUX

<u>TABLEAU I.1</u>	- Liste des 40 bassins modélisés au pas de temps mensuels	10
<u>TABLEAU III.1</u>	- Fichier d'attribution de la lame d'eau de référence	30
<u>TABLEAU III.2</u>	- Caractéristiques d'altitude de la lame d'eau de référence	33
<u>TABLEAU III.3</u>	- Différentes lames d'eau sur 45 bassins de la Moselle	35
<u>TABLEAU III.4</u>	- Situation des postes thermométriques	36
<u>TABLEAU III.5</u>	- Valeurs moyennes inter-annuelles de l'insolation, du nombre d'heures du jour et de l'énergie de radiation atmosphérique, à la latitude 51 degrés	38
<u>TABLEAU IV.1</u>	- Calage de référence des 40 bassins : pluies mensuelles brutes, débits mensuels, prise en compte de la neige, un seul réservoir souterrain, ETP augmentée de 20 %	42
<u>TABLEAU IV.2</u>	- Caractéristiques statistiques de l'ajustement et des paramètres. Calage de référence	43
<u>TABLEAU IV.3</u>	- Calage de référence des 40 bassins modélisés. Bilan annuel moyen	46
<u>TABLEAU IV.4</u>	- Caractéristiques statistiques (en mm/an) du bilan annuel moyen	47
<u>TABLEAU IV.5</u>	- Calage de référence. Bassins mal simulés.	463
<u>TABLEAU VI.1</u>	- Calage sans correction de pluie, ni d'ETP. Ajustement de la réserve superficielle et de la hauteur d'équi-ruissellement	101
<u>TABLEAU VI.2</u>	- Calage sans correction de pluie, ni d'ETP. Bilan annuel moyen	102
<u>TABLEAU VI.3</u>	- Lame d'eau calculée d'après un réseau réduit à 20 postes	126

<u>TABLEAU IX.1</u> - Moyenne et écart-type des paramètres des 538 mailles du bassin de la Moselle Française	189
<u>TABLEAU IX.2</u> - Fichier physiographique des 45 bassins de la Moselle	190

INTRODUCTION

Deux rapports d'avancements écrits en 1982 et 1983 ont permis d'analyser en détail les données hydrométriques et climatiques relatives à 45 bassins et sous-bassins de la Moselle. Ces données ayant été critiquées, il est possible de tenter une modélisation globale des débits de ces bassins et sous-bassins. Un modèle hydrologique global a été adapté pour permettre facilement une telle modélisation (séparée) d'un grand nombre de bassins et de sous-bassins. L'objet de ce rapport est de voir si un tel modèle permet de reproduire de manière fiable et stable les débits des bassins, si un pas de temps grossier (mensuel) permet de donner des résultats intéressants et si ce modèle peut être transposé sur des bassins non jaugés pour calculer des débits à partir de précipitations mesurées sur le bassin.

Ce rapport qui reprend quasiment intégralement la note technique n° 85/09, est constitué des 10 chapitres suivants :

- 1/ Description des données disponibles,
- 2/ Le modèle hydrologique global,
- 3/ Calcul des lames d'eau et d'évapotranspiration,
- 4/ Calage de référence,
- 5/ Influence de la pondération des écarts,
- 6/ Analyse des facteurs influençant la fonction "production" du modèle,
- 7/ Analyse des facteurs influençant la partie "transfert" du modèle,
- 8/ Analyse de sensibilité des paramètres sur le bassin de la Moselle à Haucoucourt (9 387 km²)
- 9/ Relation entre les paramètres du modèle GARDENIA et les caractéristiques physiographiques des bassins de la Moselle,
- 10/ Vérification du calage sur des données de contrôle.

Le rapport est constitué de très nombreuses illustrations qui seules permettent d'apprécier les résultats de modélisation de 40 bassins. Ces illustrations sont toutes commentées et peuvent se lire comme un livre d'images.

Les principaux résultats de cette recherche décrits dans les 3 rapports d'avancements sont résumés dans le rapport final BRGM 85 SGN 290 EAU.

CHAPITRE 1

DESCRIPTION DES DONNEES DISPONIBLES

1. LES BASSINS MODELISES

Les données hydrométriques de 45 bassins versants de la Moselle Française étaient répertoriées. Ils sont numérotés de 1 à 45, et décrits dans le rapport d'avancement n° 1. Ils sont représentés graphiquement sur les figures I.1 à I.4 au moyen de mailles de 5 kilomètres de coté. Parmi ces 45 bassins, 5 ont été éliminés, car ils présentaient des données absentes pendant une longue période.

Numéro	Cours d'eau	Commune	Raison de l'élimination
12	Moselle	St-Mard	Quasi confondu avec le bassin n° 13 : Moselle à Velle-Aval
22	Meurthe	Raon l'Etape	Données absentes de 1971 à 1972
27	Mortagne	Moyen	Données absentes de 1971 à 1976
33	Moselle	Custine	Données absentes de 1971 à 1972
41	Orne	Boncourt	Données absentes de 1971 à mars 1973

40 bassins ont donc été modélisés. Pour cette modélisation, un numéro d'ordre de 1 à 40 leur a été affecté automatiquement. La liste des bassins modélisés avec leur "numéro de travail" (de 1 à 45) et leur "numéro de modélisation" (de 1 à 40) est reproduite dans le tableau I.1.

2. LES DONNEES HYDROMETRIQUES

Les données hydrométriques journalières nous ont été fournies par l'Agence Financière de Bassin Rhin-Meuse. Les données mensuelles qui en découlent ont été analysées et critiquées en détail dans le rapport d'avancement n° 1.

3. LES DONNEES CLIMATIQUES

Les données pluviométriques nous ont été communiquées par l'Agence Financière de Bassin Rhin-Meuse et par la Météorologie Nationale. Elles sont disponibles en 79 postes dont la liste est donnée tableau 5 du rapport d'avancement n° 1. Les données journalières critiquées de la période 1971-1976 nous ont été communiquées. L'analyse des données mensuel-

fig. 1-1- Bassins élémentaires de la Moselle

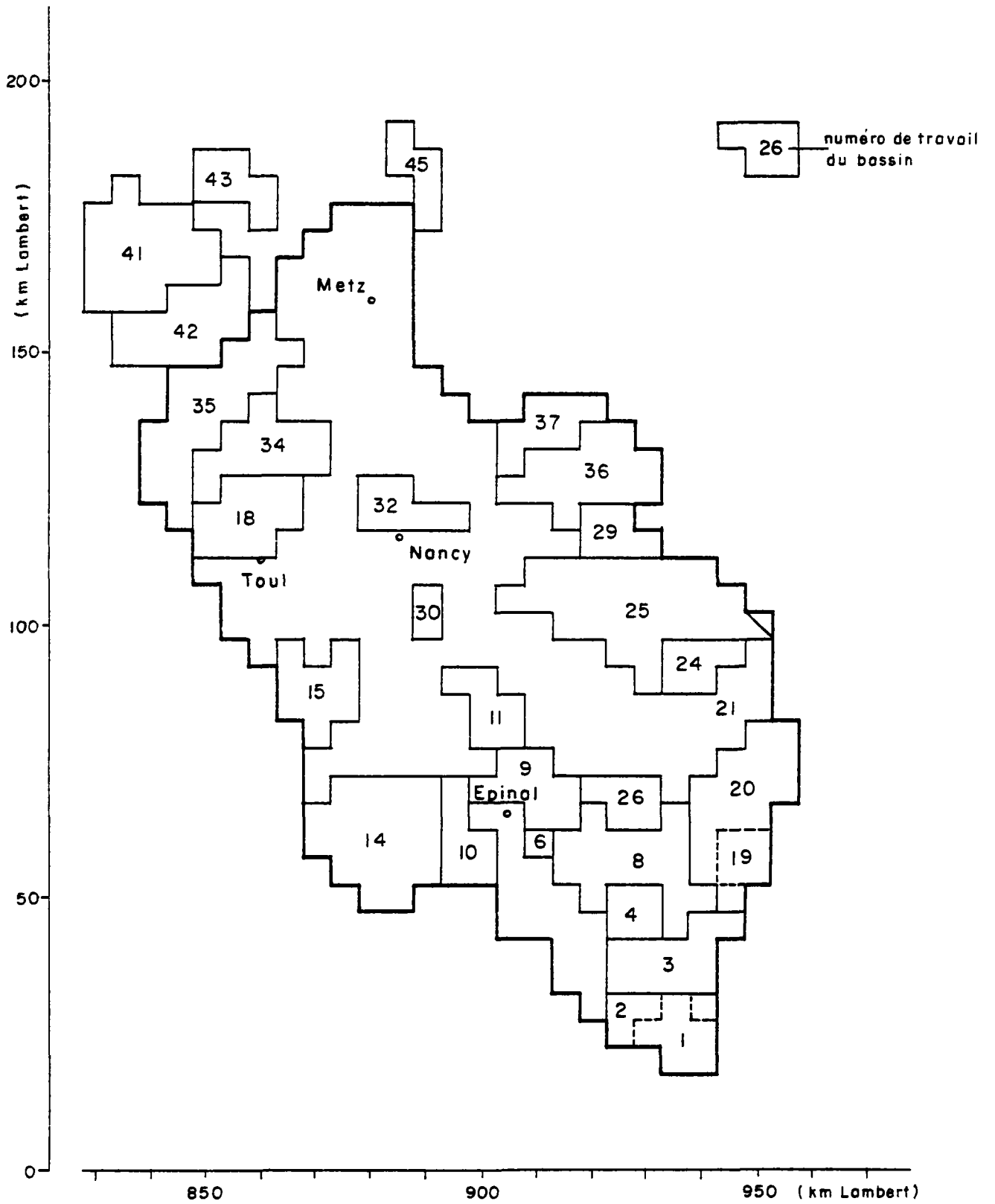


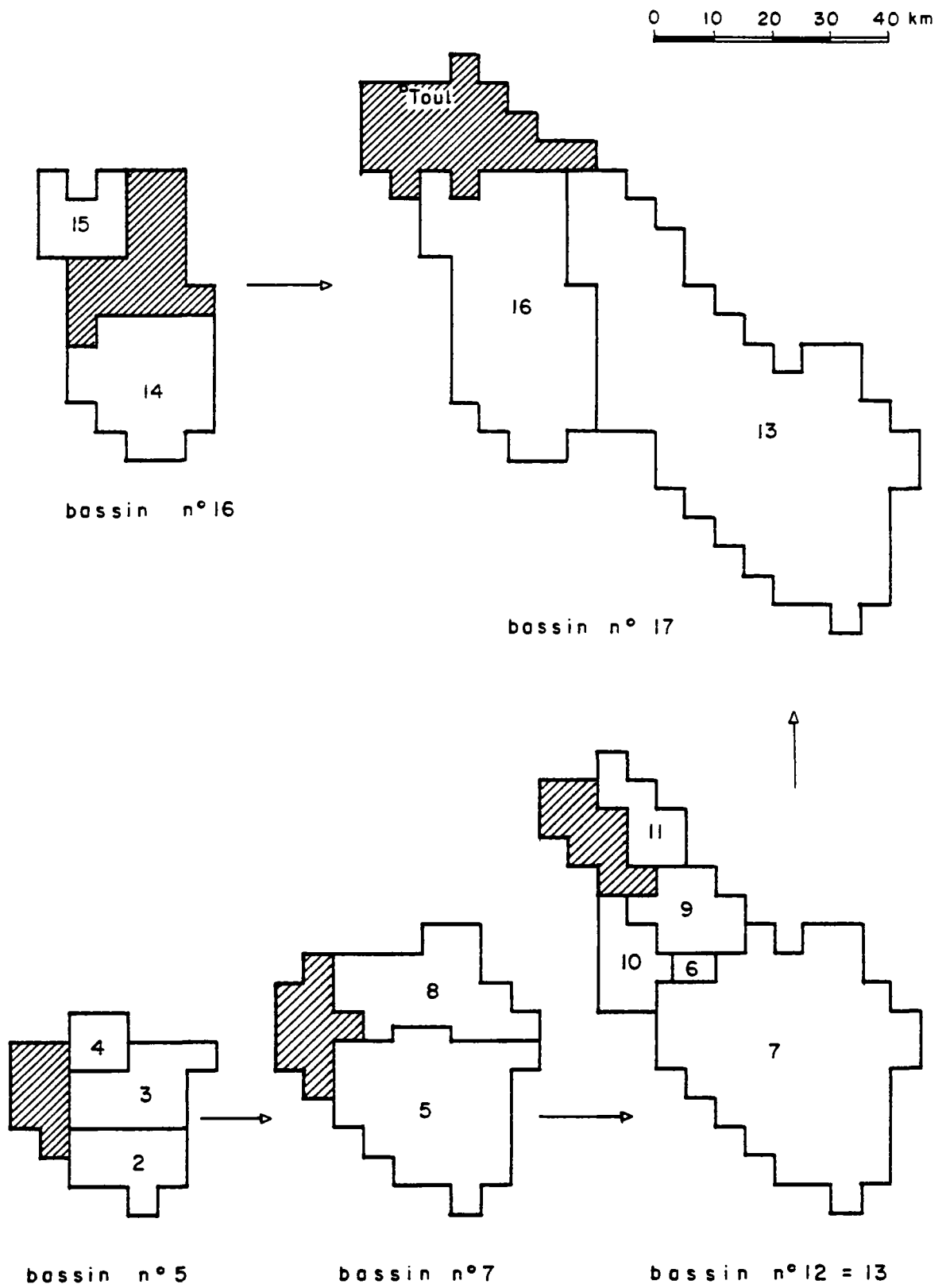
fig.1-2 - Bassins composés de la Moselle

fig. 1-3 _ Bassins composés de la Moselle (suite 1)

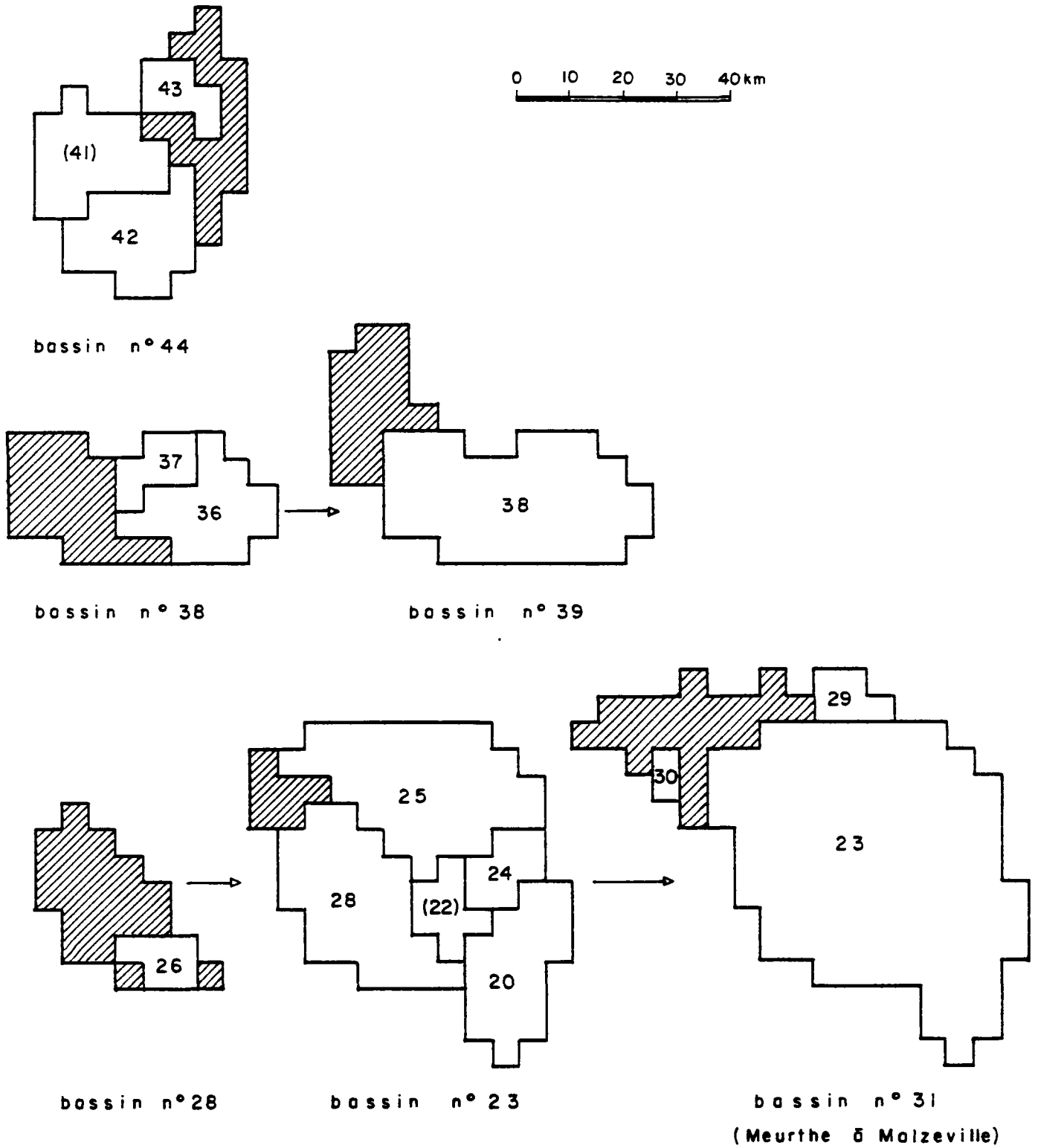
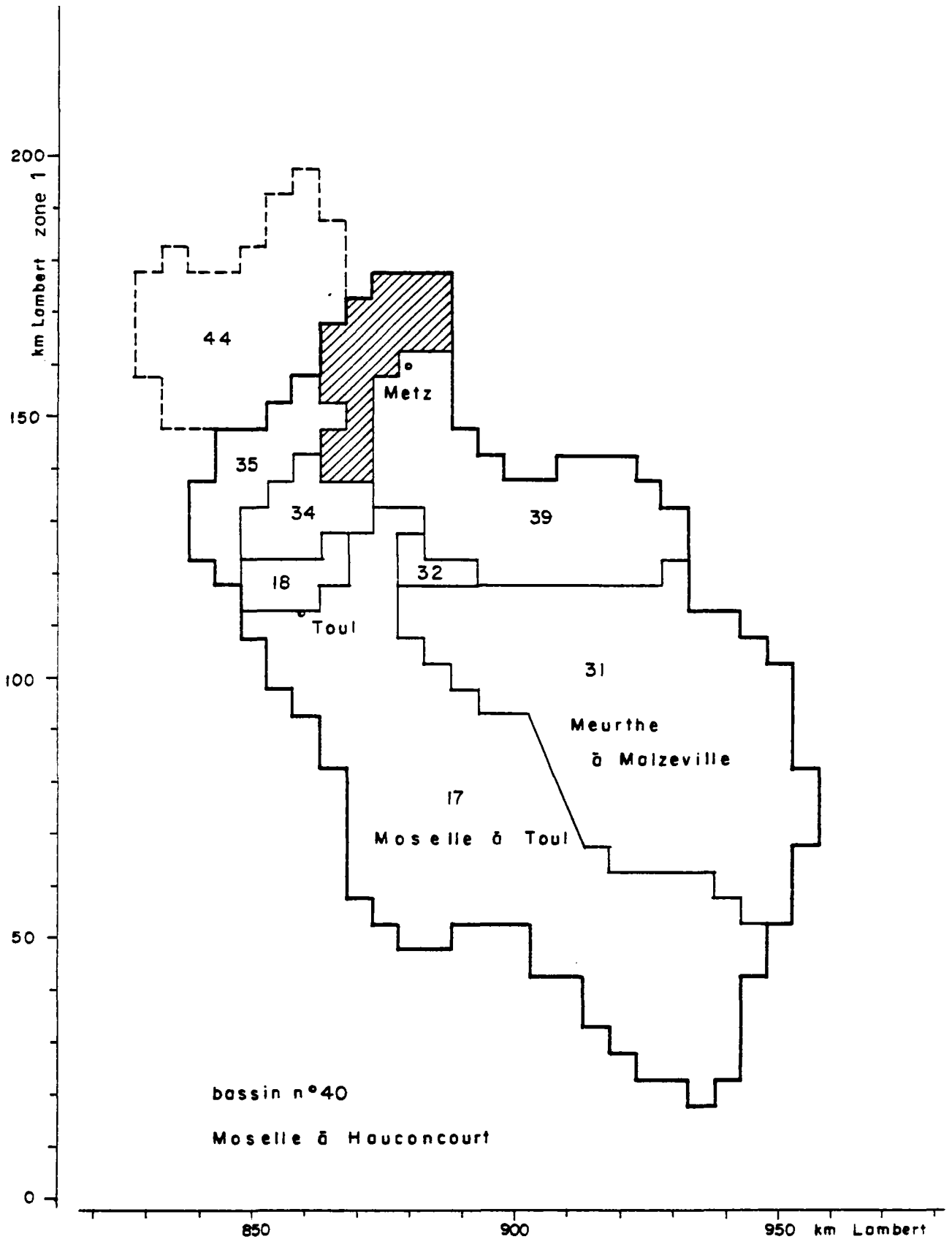


fig. 1-4 - Bassins composés de la Moselle (suite 2)



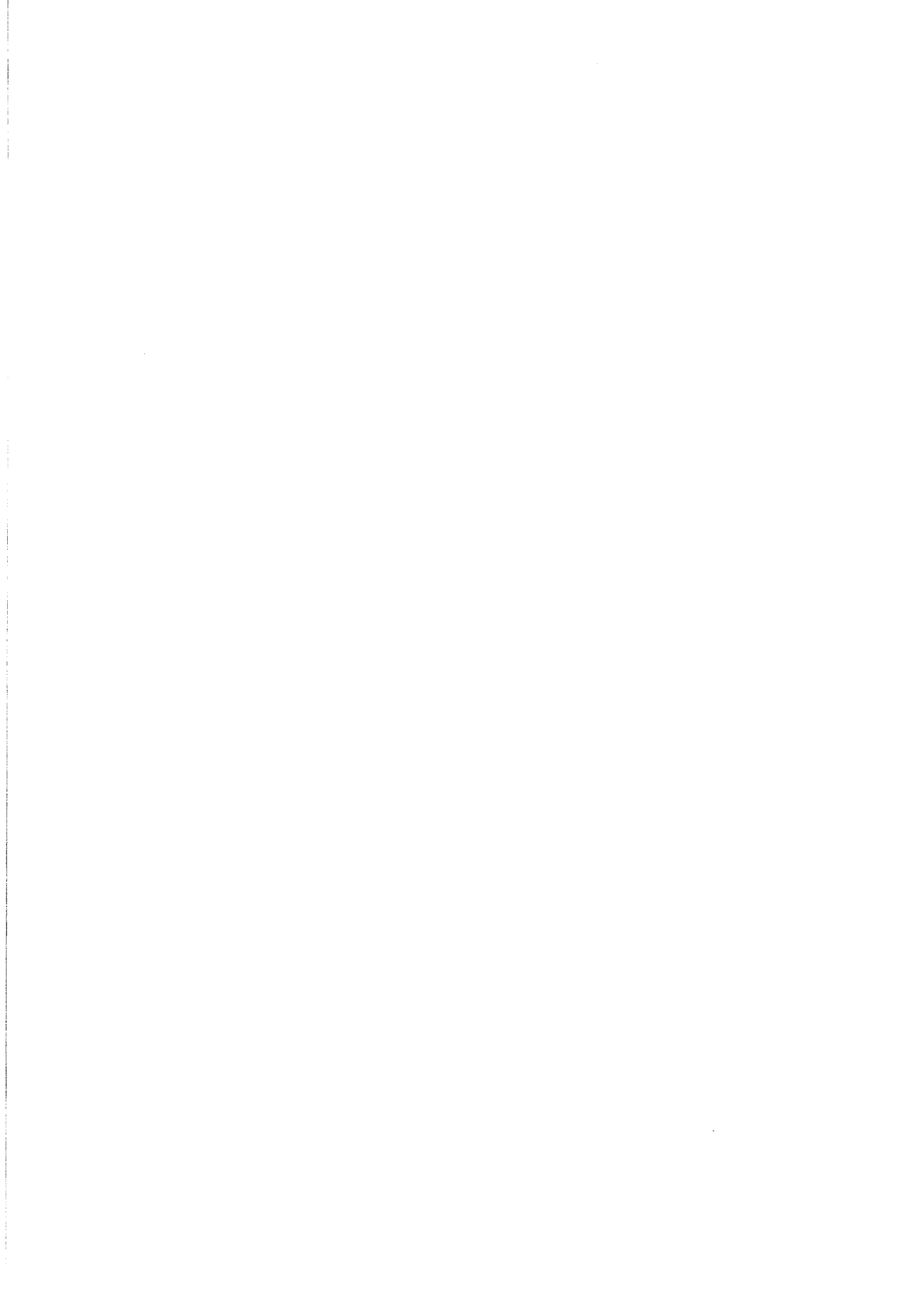
Num model	Numero de Travail (1 a 45)	commune/riviere	Code Hydrologique
1	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 1 FRESSE MOSELLE	40206
2	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 2 RUPT MOSELLE	40506
3	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 3 ZAINVILLIERS MOSELOTTE	41520
4	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 4 CLEURIE CLEURIE	41730
5	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 5 NOIR-GUEUX MOSELLE	42006
6	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 6 DEYVILLIERS ST-OGER	42630
7	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 7 EPINAL MOSELLE	42506
8	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 8 JARMENIL VOLOGNE	43620
9	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 9 VAXONCOURT DURBION	44420
10	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 10 FRIZON AVIERE	46320
11	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 11 FROVILLE EURON	50120
12	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 13 ST-MARD MOSELLE	51006
13	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 14 MIRECOURT MADON	52510
14	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 15 AUTREY BRENON	54220
15	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 16 PULIGNY MADON	54310
16	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 17 TOUL MOSELLE	57106
17	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 18 VILLEY ST-ET. TERROUIN	58420
18	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 19 FRAIZE MEURTHE	60010
19	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 20 SAINT-DIE MEURTHE	60510
20	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 21 MOYENMOUTHIER RABODEAU	61420
21	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 23 DAMELEVIERES MEURTHE	62710
22	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 24 TROUCHE PLAINE	63320
23	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 25 LUNEVILLE VEZOUZE	65611
24	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 26 AUTREY STE.H. MORTAGNE	66212
25	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 28 GERBEVILLER MORTAGNE	67412
26	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 29 LAGARDE SANON	68120
27	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 30 SAINT NICOLAS P. PETIT RHON	69038
28	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 31 MALZEVILLE MEURTHE	69410
29	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 32 LAY ST.-CHRIST AMEZULE	69530
30	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 34 JEZAINVILLE ESCH	71220
31	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 35 ONVILLE RUPT DE MAD	73520
32	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 36 VIC SUR SEILLE SEILLE	75810
33	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 37 CHATEAU-SALINS PETITE-SEILL	76420
34	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 38 NOMENY SEILLE	78210
35	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 39 METZ PT. LOTH. SEILLE	78810
36	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 40 HAUCONCOURT MOSELLE	79306
37	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 42 CARTOUCHERIE YRON	81220
38	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 43 BRIEY WOIGOT	83220
39	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 44 ROSSELANGE ORNE	84310
40	NUMERO DU CAS TRAITÉ	: 45 KOENIGSMACKER CANNER	87320

Tableau I.1 : Liste des 40 bassins qui ont été modélisés au pas de temps mensuels. (Les bassins 12 et 13 sont identiques ; Les bassins n° 22, 27, 33 et 41 qui sont incomplets ou absents n'ont pas été modélisés).

Les qui en ont été déduites, a été analysée dans le rapport d'avancement n° 1 (note technique 84/31), et surtout dans le rapport d'avancement n° 2 (note technique 84/32).

CHAPITRE 2

LE MODELE HYDROLOGIQUE GLOBAL



1. LE MODELE UTILISE

Le modèle utilisé est le modèle global GARDENIA (modèle Global A Réservoirs pour la simulation des DEbits et des Niveaux Aquifères) du B.R.G.M. qui a été adapté pour cette recherche. Le modèle GARDENIA est un modèle global pluie-débit qui permet de simuler le débit à l'exutoire d'un bassin versant à partir d'une lame d'eau sur le bassin, d'une "lame d'évapotranspiration potentielle" et d'un ensemble de paramètres. Il est décrit en détail dans le rapport BRGM 84 SGN 337 EAU (P.A. Roche et D. Thiery), et nous en donnons une description sommaire dans les pages qui suivent.

2. DOMAINES D'APPLICATION DU MODELE GARDENIA

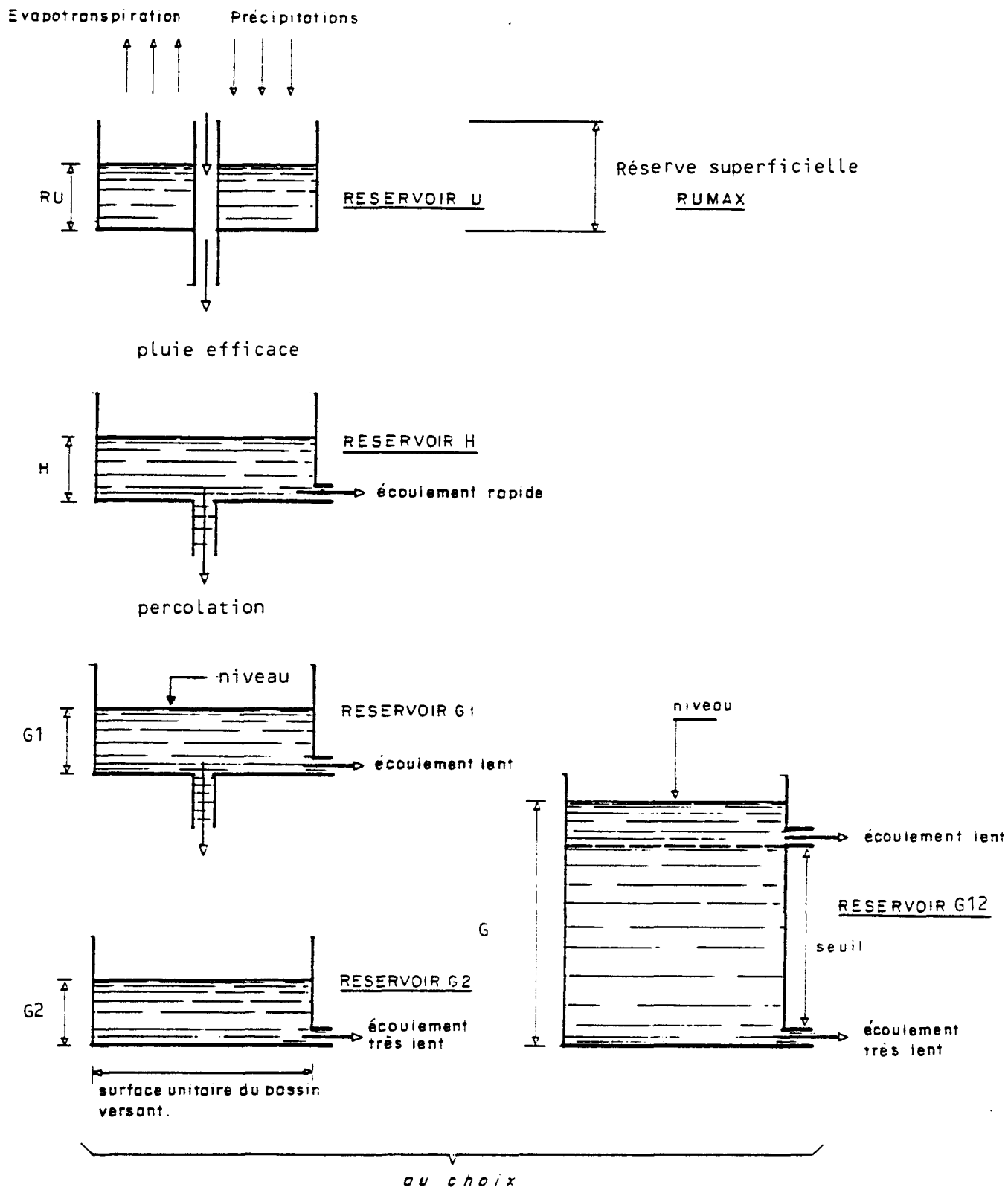
Le modèle GARDENIA est un modèle global qui permet de calculer au choix (voir figure II.1) :

- le débit à l'exutoire d'un cours d'eau (ou d'une source) à partir de la séquence des précipitations sur son bassin d'alimentation,
- le niveau en un point unique d'une nappe à partir également des précipitations.

Le pas de temps des calculs peut être au choix : journalier, pentadaire, décadaire ou mensuel ; le choix du pas de temps mensuel permet en particulier de mettre le modèle à la portée de nombreuses études, par la facilité d'analyse et de critique des données et le faible coût du traitement informatique (économie de temps et de place en mémoire). Pour une étude plus fine, ou après un premier dégrossissage, on pourra utiliser un pas de temps plus fin (1 jour ou 5 jours par exemple).

Ce programme est conçu pour enchaîner le traitement de plusieurs cas, avec des options communes pour ces cas. Il constitue donc un outil tout particulièrement adapté pour les synthèses régionales où l'on désire réaliser, avec une certaine cohérence, l'analyse de plusieurs bassins versants.

FIGURE II.1 - Schéma de fonctionnement du modèle GARDENIA



Option 2 réservoirs souterrains

Option 1 réservoir souterrain à 2 orifices de vidange

3. PARAMETRES DU MODELE

Le modèle GARDENIA fait intervenir un nombre maximal de 8 paramètres "hydrologiques" (capacité de réserves superficielles, temps de tarissement, coefficient sur les pluies...) et éventuellement sept paramètres pour tenir compte de stocks neigeux.

Ces paramètres sont les suivants :

* 6 paramètres dimensionnels caractéristiques des différents réservoirs du modèle :

- . RUMAX (mm) Réserve superficielle maximale du réservoir RU,
- . THG (mois) Temps de demi-montée du réservoir G1,
- . RUIPER (mm) Hauteur dans le réservoir H pour laquelle il y a répartition égale entre écoulement rapide et percolation,
- . TG1 (mois) Temps de demi-tarissement du réservoir G1,
- . TG12(*) (mois) Temps de demi-montée du réservoir G2 (temps de demi-transfert de G1 à G2),
- . TG2 (mois) Temps de demi-tarissement du réservoir G2 (temps de demi-tarissement lent).

* 2 coefficients correctifs destinés à prendre en compte la non-représentativité des entrées telles qu'elles ont pu être estimées, vis-à-vis des conditions météorologiques qui agissent réellement sur le bassin versant :

- . CORPL (%) Coefficient de correction des pluies chargé de compenser une mauvaise représentativité des données pluviométriques issues des observations faites sur des stations dispersées,
- . CETP (%) Coefficient de correction d'évapotranspiration potentielle (ETP), dont le but est similaire,

(*) Dans le cas d'un réservoir souterrain G unique avec deux exutoires, TG12 est le seuil de séparation entre les deux exutoires (il est exprimé en mm).

NOTA. Dans un calcul de niveau de nappe, s'il y a deux composantes souterraines, le choix d'un réservoir unique G à deux exutoires est imposé.

- * auxquels il faut rajouter éventuellement 7 paramètres pour simuler la gestion d'un stock de neige résultant des précipitations hivernales :
- . GRADT (°C) Constante de correction de la température destinée à tenir compte d'un éventuel écart entre la température moyenne la mieux représentative du bassin versant et la température fournie au modèle à partir d'une pondération effectuée sur différentes observations faites aux stations météorologiques les plus proches,
 - . DENSIM (%) Pourcentage de rétention maximale d'eau liquide d'un stock neigeux,
 - . EVNE (%) Coefficient caractérisant la sublimation du manteau neigeux dans une atmosphère où l'ETP n'est pas totalement satisfaite par les apports pluviométriques ; un stock de neige, s'il est suffisamment fourni, perd par sublimation un volume d'eau équivalent à :

$$PN \times (1 + EVNE) / 100$$
 où PN représente l'ETP résiduelle non satisfaite par la pluie,
 - . FONP (%) Pourcentage caractéristique de la fonte d'un stock neigeux, par une pluie PN à la température TEMP ; la quantité de neige susceptible de fondre par ce phénomène vaut :

$$PN \times (1 + FONP/100) \times TEMP/80$$
 - . TFONT (°C) Seuil de température en dessous duquel la neige ne fond plus (proche de 0°C),
 - . DJOU (mm/°C.jour) Hauteur d'eau équivalente à la quantité de neige susceptible de fondre quotidiennement (si le stock est suffisamment fourni) sous l'action d'un excès de température de 1°C au dessus de TFONT,
 - . FSOL (1/10^è mm/jour) Hauteur d'eau équivalente à la quantité de neige susceptible de fondre quotidiennement (si le stock neigeux est suffisamment fourni) sous l'action des calories dégagées par le sol.

En outre, deux autres paramètres peuvent, sur option, être calculés par le modèle, à partir de l'équation de régression linéaire qui transforme :

- soit le niveau du réservoir souterrain du modèle en niveau piézométrique observé,

- soit la somme des vidanges des réservoirs du modèle en débit observé à l'exutoire ;

Ces deux paramètres sont suivant le cas :

- le coefficient d'emmagasinement "équivalent" et le niveau de base local (pour une simulation de niveau), ou
- la surface du bassin versant (généralement bien connue) et un débit extérieur constant (ce débit extérieur constant étant le plus souvent imposé égal à zéro).

4. LES DONNEES NECESSAIRES A L'UTILISATION DU MODELE

Les paramètres globaux qui caractérisent le modèle, ne peuvent pas être mesurés sur le bassin. Les valeurs optimales de ces paramètres sont alors déterminées par un processus itératif à partir de valeurs initiales par recherche du meilleur ajustement entre observations et valeurs calculées par le modèle.

Pour ajuster le modèle, il faut disposer des données suivantes :

- une série de précipitations (pluies) continue,
- une série d'évapotranspiration potentielle (ETP) continue, qui peut être calculée à partir d'une série continue d'insolation et de température de l'air (et éventuellement d'humidité relative), ou bien mesurée dans une case lysimétrique,
- une série continue de température de l'air (uniquement pour prendre en compte la fonte de la neige),
- une série (pas forcément continue) de débits à l'exutoire du bassin ou de niveaux en un piézomètre.

Ces 3 (ou 4) séries doivent être disponibles sur la même période d'observations, et il est bon cependant de disposer de précipitations et d'évapotranspirations potentielles (ETP) pendant au moins 1 an avant les mesures de débit (pour faciliter l'initialisation du modèle).

5. LE COEFFICIENT D'AJUSTEMENT

Le modèle est ajusté par une procédure semi-automatique. Cette procédure tend à minimiser un critère qui est une fonction croissante de la somme des carrés des erreurs (ou à minimiser un critère d'ajustement qui est une fonction variant dans le sens opposé de la fonction d'erreur).

Le modèle calcule pour chaque pas de temps un écoulement EC exprimé en mètres d'eau. On en déduit un débit calculé QC exprimé en m³/s par la relation :

$$QC = \frac{SURF}{DT} \cdot EC + QB$$

avec

QC	débit calculé (m ³ /s)
EC	écoulement calculé (m par pas de temps)
DT	nombre de secondes dans un pas de temps
QB	débit de base constant (m ³ /s)

Le débit observé Q0 se déduit alors par :

$$Q0 = QC + E$$

avec E écart (ou erreur) de simulation

La procédure d'optimisation consiste à ajuster les paramètres hydrologiques du modèle (dans une certaine plage bien définie) de façon à minimiser une fonction croissante de la somme des carrés des erreurs E_i constatées à chaque pas de temps i.

La fonction SE2 à minimiser est :

$$SE2 = \frac{1}{n} \sum_i p_i \cdot E_i^2$$

avec

n	nombre de pas de temps
p _i	coefficient de pondération dépendant de la valeur observée Q0

SE2 est donc la moyenne pondérée des écarts quadratiques. La pondération p_i a été introduite de façon à donner plus de poids aux étiages et moins de poids aux forts débits, ce qui correspond mieux à un ajustement qui serait réalisée à l'oeil par un hydrologue, et prend en compte la distribution très asymétrique des débits observés avec quelques valeurs très fortes (sujettes à des erreurs importantes) et beaucoup de faibles valeurs.

Le coefficient d'ajustement choisi (correspondant à l'erreur quadratique moyenne) est :

$$R = \sqrt{1 - SE2 / SQ2}$$

en notant SQ2 la variance du débit observé.

En principe, quatre cas sont possibles :

1. SURF et QB sont inconnus (ou mal connus) :

Pour la série des valeurs EC_j calculées par le modèle, on calcule les valeurs de SURF et QB qui minimisent SE2.

Par définition, le coefficient d'ajustement R est égal au coefficient de corrélation (pondéré) entre les débits calculés (QC) et observés (QO).

On a alors :

a) moyenne pondérée QO = moyenne pondérée de QC

et de plus si $p_j = 1$ (c'est-à-dire s'il n'y a pas de pondération),

b) écart-type QC = R . écart-type QO

Le coefficient d'ajustement R est compris entre :

0 : simulation extrêmement mauvaise (qui serait obtenue si le débit calculé était constant et égal à la moyenne du débit observé,

+1 : ajustement parfait QC = QO

2. SURF et QB sont connus et imposés (généralement QB = 0)

C'est le cas le plus fréquent pour la simulation des cours d'eau.

a) Il n'y a plus égalité des moyennes pondérées de QO et QC, c'est-à-dire que l'erreur E_j n'a plus une moyenne nulle.

b) Il peut arriver, si SURF ou QB sont particulièrement mal choisis, que : SE2 > SQ2.

La moyenne (pondérée) des écarts quadratiques est plus grande que la variance des débits observés.

La quantité $R^2 = 1 - SE2/SQ2$ est alors négative. On ne peut plus alors calculer le coefficient d'ajustement sous la forme précédente.

Le coefficient d'ajustement sera donc :

- si $R^2 \geq 0$: $R = \sqrt{R^2} = \sqrt{1 - SE2/SQ2}$, comme précédemment

- si $R^2 < 0$: on notera (pour la commodité et pour la continuité des calculs) : $R = -\sqrt{-R^2}$

Etant donné que les séries QC et QO (quand elles sont ajustées) varient dans le même sens, il n'y a pas d'ambiguïté possible et un coefficient R négatif indiquera un mauvais ajustement.

Le coefficient R est compris entre :

- ∞ : ajustement très mauvais,

+ 1 : ajustement parfait QC = QO.

3. SURF imposé, QB à calculer

C'est le cas où on admet un débit de fuite (ou d'apport) constant, mais inconnu.

QB sera calculé par :

$$QB = QOM - A \cdot ECM$$

avec $\left\{ \begin{array}{l} QOM \text{ moyenne du débit } QO \text{ observé en } m^3/s, \\ ECM \text{ moyenne de l'écoulement } EC \text{ calculé en } m/pas \text{ de temps} \\ A = SURF / DT \end{array} \right.$

Dans ce cas, la moyenne de l'erreur est nulle.

4. QB est imposé, SURF à calculer

C'est le cas où la surface du bassin est mal connue (dans le cas d'une source par exemple).

Le débit extérieur est imposé (généralement à zéro).

Par minimisation de l'erreur quadratique moyenne, on obtient :

$$SURF = DT \cdot (S \cdot SQEC + ECM \cdot ECM - QB) / (SEC2 + ECM \cdot ECM)$$

avec $\left\{ \begin{array}{l} ECM \text{ moyenne de l'écoulement calculé } EC \text{ en } m/pas \text{ de temps} \\ SEC2 \text{ variance de l'écoulement calculé } EC \\ SQEC \text{ covariance de } EC \text{ et } QO \end{array} \right.$

Dans ces deux derniers cas, le coefficient d'ajustement a la même définition que dans le cas n° 2, il est donc compris entre - ∞ et + 1.

6. PONDERATION DES ECARTS DANS LE MODELE

6.1. Justification d'une pondération

Comme on l'a expliqué plus haut, les écarts de simulation sont pondérés d'un poids P qui dépend de la valeur des débits observés. On cherche généralement à favoriser les faibles débits, car :

- * d'une part, ils ont statistiquement un faible poids dans le coefficient d'ajustement à cause de leur distribution très asymétrique,
- * d'autre part, on admettra assez facilement un écart en hautes eaux en supposant que les précipitations peuvent être mal mesurées à cause de la faible couverture des pluviomètres. Par contre, en étiage en phase de tarissement naturel, un tel écart n'est pas admissible.

On laisse à l'utilisateur le choix d'un index de pondération :

- I = 0 ou 1 Pas de pondération (ou équi-pondération),
- I = 2 pondération moyenne de coefficient $C = I^2 = 4$
- I = 3 pondération forte de coefficient $C = I^2 = 9$

6.2. Description de la pondération choisie

La fonction pondération est la suivante :

- a) On calcule les valeurs moyenne QOM , minimale $QMIN$ et maximale $QMAX$ des débits observés QO .
- b) Si le débit observé QO est :
 - * égal à la moyenne : on lui affecte le poids 1,
 - * compris entre $QMIN$ et $(QMIN + QOM)/2$, on lui affecte le poids C (donc supérieur à 1),
 - * compris entre $QMAX$ et $(QMAX + QOM)/2$, on lui affecte le poids $1/C$ (donc inférieur à 1),
 - * compris entre $(QMIN + QOM)/2$ et QOM , on lui affecte un poids qui diminue linéairement de C à 1,
 - * compris entre $(QMAX + QOM)/2$ et QOM , on lui affecte un poids qui augmente linéairement de $1/C$ à 1.

De cette manière, on évite de trop influencer le calage par une valeur isolée exceptionnellement basse ou exceptionnellement forte qui influencerait complètement la pondération.

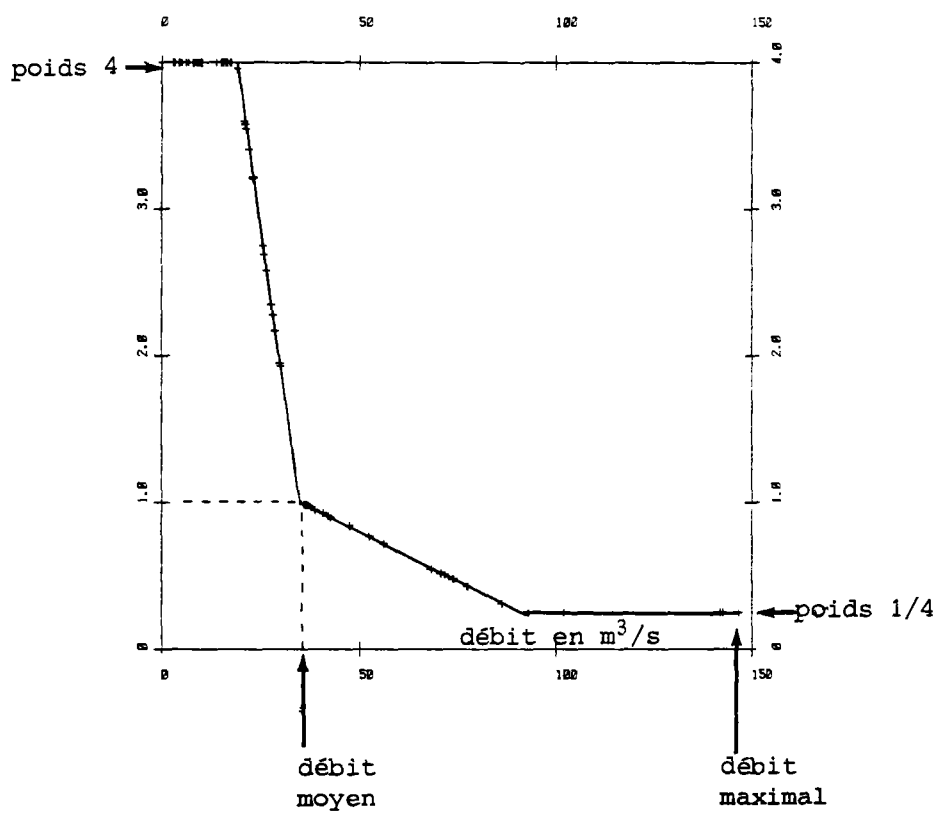


Figure II.2 : Fonction de pondération des écarts.
Exemple d'un bassin versant de la Moselle

6.3. Analyse de l'influence de la pondération

Il apparaît que, compte-tenu de la répartition des débits qui est très asymétrique, on observe généralement des débits :

- soit nettement supérieurs à la moyenne, ce sont des crues isolées, on leur donne le poids $1/C$,
- soit nettement inférieurs à la moyenne, c'est la période des étiages, on leur donne le poids C .

Il y a finalement très peu de débits compris entre Q_{MIN} et $(Q_{MIN}+Q_{OM})/2$ ou entre Q_{MAX} et $(Q_{MAX}+Q_{OM})/2$.

Supposons que le débit soit nettement inférieur à la moyenne $P\%$ du temps, la moyenne m des poids sera (en négligeant les débits "intermédiaires") :

$$m = P \cdot C + (1 - P) \cdot 1/C$$

soit la valeur approximative m_a de m :

$$m_a = P \cdot C$$

Exemple

P	C = 4	C = 9
50 %	$m = 2.13$ $m_a = 2.00$	$m = 4.56$ $m_a = 4.00$
75 %	$m = 3.06$ $m_a = 3.00$	$m = 6.78$ $m_a = 6.67$

Le poids relatif en basses eaux sera donc : $p_b = C/m \cong 1/P$.

Le poids relatif en hautes eaux sera : $p_h = (1/C)/m \cong 1/(P \cdot C^2)$.

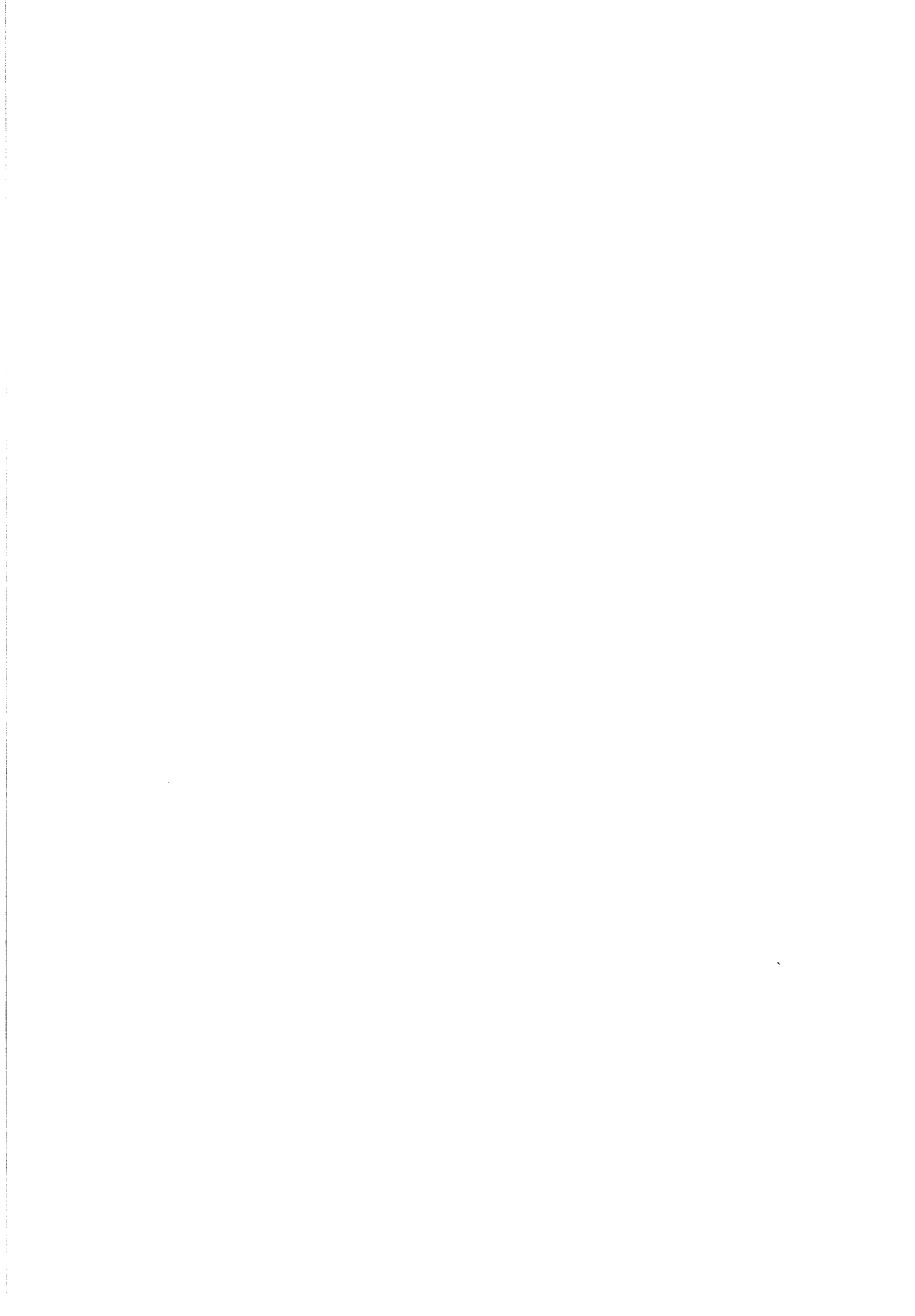
Le poids relatif en basses eaux est donc quasi-INDEPENDANT de la PONDERATION, alors que le poids relatif des forts débits diminue beaucoup avec la pondération.

Exemple. Soit une série de 100 débits dont 75 % sont nettement inférieurs à la moyenne, on observe les valeurs suivantes :

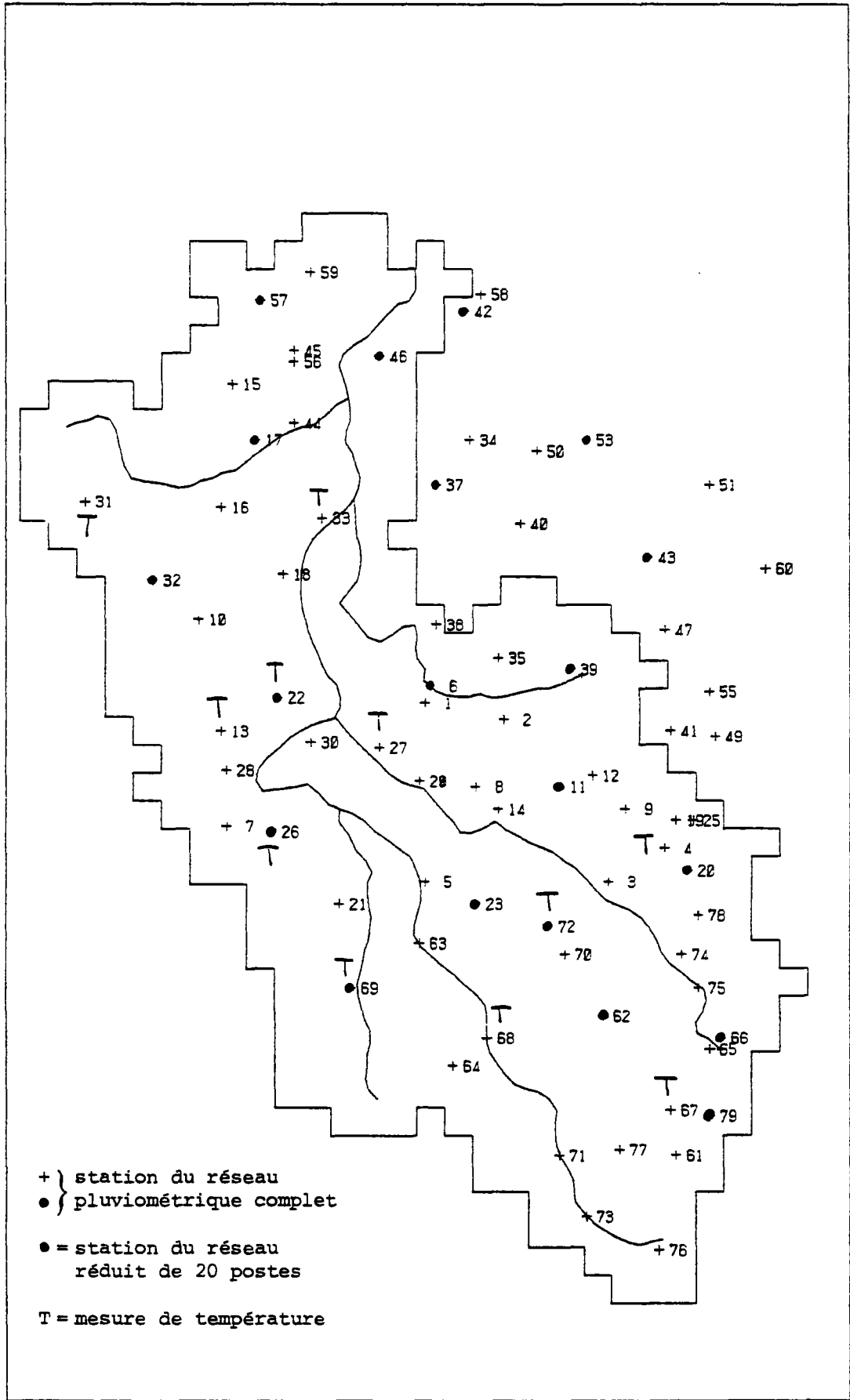
Coefficient de pondération	Poids relatif pb d'un faible débit	Poids relatif ph d'un fort débit	rapport pb/ph
0	1 %	1 %	1
4	1.33 %	0.083 %	16
9	1.33 %	0.016 %	81

CHAPITRE 3

CALCUL DES LAMES D'EAU ET D'ETP



km Lambert (zone 1)



820.00

km Lambert

970.00

Figure III.1 : Situation des postes pluviométriques du bassin de la Moselle

1. LA LAME D'EAU DE REFERENCE

La lame d'eau a été calculée comme il a été expliqué dans le rapport d'avancement n° 1, à partir de 76 postes pluviométriques (voir figure III.1). Pour chaque bassin, un programme a sélectionné les postes pluviométriques situés sur le bassin. Si le nombre de postes sélectionnés est inférieur à 6, les postes situés à 1 maille (de 5 km de côté) du bassin ont été considérés ; si le nombre de postes total est encore inférieur à 6, les postes situés à 2 mailles, puis 3 et 4 (soit 20 kilomètres) ont été également sélectionnés.

Une pondération a été affectée à chaque poste en fonction décroissante de son éloignement suivant la relation suivante :

$$\text{POND} = 10 - \text{IDIST} \quad (\text{IDIST étant le nombre de mailles de distance}).$$

Pour cette première lame de référence, aucune correction d'altitude n'a été réalisée, car il est apparu (dans le rapport d'avancement n° 2) que les corrections effectuées sur la base d'un gradient pluviométrique annuel (de 190 mm par an par 100 mètres) tendaient à sur-corriger les pluies.

L'analyse de la répartition spatiale des pluies a montré que le très net gradient pluviométrique apparent de 190 mm/an par 100 mètres d'altitude (corrélation 0,85) traduit uniquement le fait qu'il pleut plus (en moyenne) sur les Vosges qu'en plaine et sur le piémont. Par contre, si on considère deux stations proches (toutes deux dans les Vosges par exemple), mais à des altitudes différentes, leur différence de pluie annuelle n'est plus liée à la différence d'altitude par ce même gradient. En fait, on a montré qu'il existe un gradient flou (coefficient de corrélation de 0,55) de seulement 70 mm/an par 100 mètres de différence d'altitude.

La liste des postes pluviométriques affectés à chaque bassin, ainsi que le coefficient de pondération qui lui est affecté, apparaît dans le tableau III.1.

FICHIER DES MAILLES ET % DES BASSINS ** REFERENCE 6 STA POND 1 DIS 4 ENVIRON

BASSIN 1 NB POSTES= 6	* 76	23%	* 61	18%	* 73	16%	* 77	16%	* 67	14%	*
	* 79	14%	*								
BASSIN 2 NB POSTES= 7	* 73	18%	* 76	18%	* 77	16%	* 61	14%	* 71	12%	*
	* 67	11%	* 79	11%	*						
BASSIN 3 NB POSTES= 7	* 77	16%	* 61	16%	* 76	14%	* 67	14%	* 79	14%	*
	* 73	13%	* 71	13%	*						
BASSIN 4 NB POSTES= 9	* 67	14%	* 77	12%	* 79	12%	* 71	11%	* 61	11%	*
	* 73	10%	* 62	10%	* 65	10%	* 66	10%	*		
BASSIN 5 NB POSTES= 6	* 71	17%	* 73	17%	* 77	17%	* 76	17%	* 61	17%	*
	* 67	17%	*								
BASSIN 6 NB POSTES= 5	* 68	24%	* 62	21%	* 70	21%	* 64	18%	* 71	18%	*
BASSIN 7 NB POSTES= 7	* 73	14%	* 71	14%	* 77	14%	* 76	14%	* 61	14%	*
	* 67	14%	* 79	14%	*						
BASSIN 8 NB POSTES= 6	* 62	18%	* 67	18%	* 79	18%	* 61	16%	* 65	16%	*
	* 66	16%	*								
BASSIN 9 NB POSTES= 7	* 70	16%	* 62	16%	* 68	15%	* 23	15%	* 63	13%	*
	* 64	13%	* 72	13%	*						
BASSIN 10 NB POSTES= 6	* 64	22%	* 68	22%	* 63	15%	* 69	15%	* 23	13%	*
	* 70	13%	*								
BASSIN 11 NB POSTES= 6	* 23	20%	* 5	18%	* 63	16%	* 70	16%	* 72	16%	*
	* 14	14%	*								
BASSIN 12 NB POSTES=13	* 63	8%	* 5	8%	* 64	8%	* 68	8%	* 23	8%	*
	* 71	8%	* 73	8%	* 77	8%	* 62	8%	* 76	8%	*
	* 61	8%	* 67	8%	* 79	8%	*				
BASSIN 13 NB POSTES=12	* 5	8%	* 64	8%	* 68	8%	* 23	8%	* 71	8%	*
	* 73	8%	* 77	8%	* 62	8%	* 76	8%	* 61	8%	*
	* 67	8%	* 79	8%	*						
BASSIN 14 NB POSTES= 7	* 69	18%	* 64	16%	* 68	16%	* 63	15%	* 21	13%	*
	* 5	11%	* 23	11%	*						
BASSIN 15 NB POSTES=10	* 21	14%	* 7	12%	* 26	12%	* 69	10%	* 5	10%	*
	* 28	8%	* 63	8%	* 30	8%	* 24	8%	* 29	8%	*
BASSIN 16 NB POSTES= 8	* 69	14%	* 63	14%	* 7	12%	* 26	12%	* 21	12%	*
	* 5	12%	* 64	12%	* 68	12%	*				
BASSIN 17 NB POSTES=19	* 28	5%	* 7	5%	* 26	5%	* 30	5%	* 21	5%	*
	* 69	5%	* 63	5%	* 5	5%	* 64	5%	* 68	5%	*
	* 23	5%	* 71	5%	* 73	5%	* 77	5%	* 62	5%	*
	* 76	5%	* 61	5%	* 67	5%	* 79	5%	*		
BASSIN 18 NB POSTES= 6	* 13	19%	* 22	19%	* 28	17%	* 32	15%	* 30	15%	*
	* 10	13%	*								
BASSIN 19 NB POSTES= 6	* 65	20%	* 66	20%	* 79	18%	* 67	16%	* 61	14%	*
	* 75	14%	*								
BASSIN 20 NB POSTES= 7	* 79	15%	* 75	15%	* 65	15%	* 66	15%	* 67	14%	*
	* 74	12%	* 78	12%	*						
BASSIN 21 NB POSTES= 6	* 74	19%	* 78	19%	* 20	17%	* 4	15%	* 75	15%	*
	* 25	15%	*								
BASSIN 22 NB POSTES= 8	* 79	13%	* 75	13%	* 78	13%	* 65	13%	* 66	13%	*
	* 74	12%	* 67	12%	* 20	12%	*				
BASSIN 23 NB POSTES=18	* 14	6%	* 70	6%	* 72	6%	* 11	6%	* 12	6%	*
	* 62	6%	* 3	6%	* 9	6%	* 74	6%	* 4	6%	*
	* 19	6%	* 79	6%	* 75	6%	* 78	6%	* 20	6%	*
	* 25	6%	* 65	6%	* 66	6%	*				
BASSIN 24 NB POSTES= 6	* 4	18%	* 20	18%	* 74	16%	* 78	16%	* 19	16%	*
	* 25	16%	*								
BASSIN 25 NB POSTES= 8	* 14	12%	* 11	12%	* 12	12%	* 9	12%	* 4	12%	*
	* 19	12%	* 20	12%	* 25	12%	*				
BASSIN 26 NB POSTES=10	* 62	13%	* 70	11%	* 75	11%	* 74	11%	* 72	9%	*
	* 3	9%	* 78	9%	* 65	9%	* 66	9%	* 67	9%	*
BASSIN 27 NB POSTES= 7	* 70	15%	* 72	15%	* 62	15%	* 23	14%	* 3	14%	*
	* 75	14%	* 74	14%	*						
BASSIN 28 NB POSTES= 7	* 72	15%	* 62	15%	* 23	14%	* 70	14%	* 3	14%	*
	* 75	14%	* 74	14%	*						
BASSIN 29 NB POSTES=10	* 12	12%	* 9	12%	* 41	12%	* 11	10%	* 39	10%	*
	* 2	9%	* 19	9%	* 25	9%	* 49	9%	* 55	9%	*

numéro ↑ ↑ poids

Tableau III.1 : Fichier d'attribution de la lame d'eau de référence

*FICHER DES MAILLES ET % DES BASSINS ** REFERENCE 6 STA POND 1 DIS 4 ENVIRON*

<i>BASSIN 30 NB POSTES= 6</i>	<i>* 24</i>	<i>19%</i>	<i>* 29</i>	<i>19%</i>	<i>* 5</i>	<i>15%</i>	<i>* 1</i>	<i>15%</i>	<i>* 8</i>	<i>15%</i>	<i>*</i>
	<i>* 27</i>	<i>15%</i>	<i>*</i>								
<i>BASSIN 31 NB POSTES=22</i>	<i>* 27</i>	<i>5%</i>	<i>* 24</i>	<i>5%</i>	<i>* 29</i>	<i>5%</i>	<i>* 8</i>	<i>5%</i>	<i>* 14</i>	<i>5%</i>	<i>*</i>
	<i>* 70</i>	<i>5%</i>	<i>* 72</i>	<i>5%</i>	<i>* 11</i>	<i>5%</i>	<i>* 12</i>	<i>5%</i>	<i>* 62</i>	<i>5%</i>	<i>*</i>
	<i>* 3</i>	<i>5%</i>	<i>* 9</i>	<i>5%</i>	<i>* 74</i>	<i>5%</i>	<i>* 4</i>	<i>5%</i>	<i>* 19</i>	<i>5%</i>	<i>*</i>
	<i>* 79</i>	<i>5%</i>	<i>* 75</i>	<i>5%</i>	<i>* 78</i>	<i>5%</i>	<i>* 20</i>	<i>5%</i>	<i>* 25</i>	<i>5%</i>	<i>*</i>
	<i>* 65</i>	<i>5%</i>	<i>* 66</i>	<i>5%</i>	<i>*</i>						
<i>BASSIN 32 NB POSTES= 7</i>	<i>* 1</i>	<i>16%</i>	<i>* 27</i>	<i>15%</i>	<i>* 24</i>	<i>15%</i>	<i>* 29</i>	<i>15%</i>	<i>* 6</i>	<i>15%</i>	<i>*</i>
	<i>* 30</i>	<i>13%</i>	<i>* 2</i>	<i>13%</i>	<i>*</i>						
<i>BASSIN 33 NB POSTES=42</i>	<i>* 28</i>	<i>2%</i>	<i>* 13</i>	<i>2%</i>	<i>* 7</i>	<i>2%</i>	<i>* 26</i>	<i>2%</i>	<i>* 22</i>	<i>2%</i>	<i>*</i>
	<i>* 30</i>	<i>2%</i>	<i>* 21</i>	<i>2%</i>	<i>* 69</i>	<i>2%</i>	<i>* 27</i>	<i>2%</i>	<i>* 63</i>	<i>2%</i>	<i>*</i>
	<i>* 5</i>	<i>2%</i>	<i>* 24</i>	<i>2%</i>	<i>* 29</i>	<i>2%</i>	<i>* 1</i>	<i>2%</i>	<i>* 64</i>	<i>2%</i>	<i>*</i>
	<i>* 68</i>	<i>2%</i>	<i>* 23</i>	<i>2%</i>	<i>* 8</i>	<i>2%</i>	<i>* 14</i>	<i>2%</i>	<i>* 71</i>	<i>2%</i>	<i>*</i>
	<i>* 70</i>	<i>2%</i>	<i>* 72</i>	<i>2%</i>	<i>* 11</i>	<i>2%</i>	<i>* 73</i>	<i>2%</i>	<i>* 12</i>	<i>2%</i>	<i>*</i>
	<i>* 77</i>	<i>2%</i>	<i>* 62</i>	<i>2%</i>	<i>* 3</i>	<i>2%</i>	<i>* 9</i>	<i>2%</i>	<i>* 76</i>	<i>2%</i>	<i>*</i>
	<i>* 61</i>	<i>2%</i>	<i>* 67</i>	<i>2%</i>	<i>* 74</i>	<i>2%</i>	<i>* 4</i>	<i>2%</i>	<i>* 19</i>	<i>2%</i>	<i>*</i>
	<i>* 79</i>	<i>2%</i>	<i>* 75</i>	<i>2%</i>	<i>* 78</i>	<i>2%</i>	<i>* 20</i>	<i>2%</i>	<i>* 25</i>	<i>2%</i>	<i>*</i>
	<i>* 65</i>	<i>2%</i>	<i>* 66</i>	<i>2%</i>	<i>*</i>						
<i>BASSIN 34 NB POSTES= 7</i>	<i>* 22</i>	<i>18%</i>	<i>* 32</i>	<i>16%</i>	<i>* 13</i>	<i>14%</i>	<i>* 10</i>	<i>14%</i>	<i>* 18</i>	<i>14%</i>	<i>*</i>
	<i>* 28</i>	<i>12%</i>	<i>* 30</i>	<i>12%</i>	<i>*</i>						
<i>BASSIN 35 NB POSTES= 9</i>	<i>* 32</i>	<i>14%</i>	<i>* 10</i>	<i>14%</i>	<i>* 16</i>	<i>12%</i>	<i>* 18</i>	<i>12%</i>	<i>* 33</i>	<i>11%</i>	<i>*</i>
	<i>* 13</i>	<i>9%</i>	<i>* 28</i>	<i>9%</i>	<i>* 22</i>	<i>9%</i>	<i>* 17</i>	<i>9%</i>	<i>*</i>		
<i>BASSIN 36 NB POSTES= 9</i>	<i>* 35</i>	<i>13%</i>	<i>* 39</i>	<i>13%</i>	<i>* 2</i>	<i>11%</i>	<i>* 41</i>	<i>11%</i>	<i>* 47</i>	<i>11%</i>	<i>*</i>
	<i>* 6</i>	<i>10%</i>	<i>* 11</i>	<i>10%</i>	<i>* 12</i>	<i>10%</i>	<i>* 55</i>	<i>10%</i>	<i>*</i>		
<i>BASSIN 37 NB POSTES= 9</i>	<i>* 38</i>	<i>13%</i>	<i>* 35</i>	<i>13%</i>	<i>* 39</i>	<i>13%</i>	<i>* 6</i>	<i>11%</i>	<i>* 2</i>	<i>11%</i>	<i>*</i>
	<i>* 1</i>	<i>10%</i>	<i>* 40</i>	<i>10%</i>	<i>* 47</i>	<i>10%</i>	<i>* 43</i>	<i>10%</i>	<i>*</i>		
<i>BASSIN 38 NB POSTES= 6</i>	<i>* 1</i>	<i>17%</i>	<i>* 6</i>	<i>17%</i>	<i>* 38</i>	<i>17%</i>	<i>* 2</i>	<i>17%</i>	<i>* 35</i>	<i>17%</i>	<i>*</i>
	<i>* 39</i>	<i>17%</i>	<i>*</i>								
<i>BASSIN 39 NB POSTES= 7</i>	<i>* 33</i>	<i>14%</i>	<i>* 1</i>	<i>14%</i>	<i>* 6</i>	<i>14%</i>	<i>* 38</i>	<i>14%</i>	<i>* 2</i>	<i>14%</i>	<i>*</i>
	<i>* 35</i>	<i>14%</i>	<i>* 39</i>	<i>14%</i>	<i>*</i>						
<i>BASSIN 40 NB POSTES=51</i>	<i>* 32</i>	<i>2%</i>	<i>* 10</i>	<i>2%</i>	<i>* 28</i>	<i>2%</i>	<i>* 13</i>	<i>2%</i>	<i>* 7</i>	<i>2%</i>	<i>*</i>
	<i>* 26</i>	<i>2%</i>	<i>* 22</i>	<i>2%</i>	<i>* 18</i>	<i>2%</i>	<i>* 30</i>	<i>2%</i>	<i>* 21</i>	<i>2%</i>	<i>*</i>
	<i>* 33</i>	<i>2%</i>	<i>* 69</i>	<i>2%</i>	<i>* 27</i>	<i>2%</i>	<i>* 63</i>	<i>2%</i>	<i>* 5</i>	<i>2%</i>	<i>*</i>
	<i>* 24</i>	<i>2%</i>	<i>* 29</i>	<i>2%</i>	<i>* 1</i>	<i>2%</i>	<i>* 64</i>	<i>2%</i>	<i>* 6</i>	<i>2%</i>	<i>*</i>
	<i>* 38</i>	<i>2%</i>	<i>* 68</i>	<i>2%</i>	<i>* 23</i>	<i>2%</i>	<i>* 8</i>	<i>2%</i>	<i>* 14</i>	<i>2%</i>	<i>*</i>
	<i>* 2</i>	<i>2%</i>	<i>* 35</i>	<i>2%</i>	<i>* 71</i>	<i>2%</i>	<i>* 70</i>	<i>2%</i>	<i>* 72</i>	<i>2%</i>	<i>*</i>
	<i>* 11</i>	<i>2%</i>	<i>* 73</i>	<i>2%</i>	<i>* 12</i>	<i>2%</i>	<i>* 39</i>	<i>2%</i>	<i>* 77</i>	<i>2%</i>	<i>*</i>
	<i>* 62</i>	<i>2%</i>	<i>* 3</i>	<i>2%</i>	<i>* 9</i>	<i>2%</i>	<i>* 76</i>	<i>2%</i>	<i>* 61</i>	<i>2%</i>	<i>*</i>
	<i>* 67</i>	<i>2%</i>	<i>* 74</i>	<i>2%</i>	<i>* 4</i>	<i>2%</i>	<i>* 19</i>	<i>2%</i>	<i>* 79</i>	<i>2%</i>	<i>*</i>
	<i>* 75</i>	<i>2%</i>	<i>* 78</i>	<i>2%</i>	<i>* 20</i>	<i>2%</i>	<i>* 25</i>	<i>2%</i>	<i>* 65</i>	<i>2%</i>	<i>*</i>
	<i>* 66</i>	<i>2%</i>	<i>*</i>								
<i>BASSIN 41 NB POSTES= 4</i>	<i>* 31</i>	<i>30%</i>	<i>* 16</i>	<i>24%</i>	<i>* 17</i>	<i>24%</i>	<i>* 15</i>	<i>21%</i>	<i>*</i>		
<i>BASSIN 42 NB POSTES= 8</i>	<i>* 16</i>	<i>15%</i>	<i>* 31</i>	<i>14%</i>	<i>* 10</i>	<i>14%</i>	<i>* 18</i>	<i>12%</i>	<i>* 17</i>	<i>12%</i>	<i>*</i>
	<i>* 32</i>	<i>11%</i>	<i>* 15</i>	<i>11%</i>	<i>* 33</i>	<i>11%</i>	<i>*</i>				
<i>BASSIN 43 NB POSTES= 6</i>	<i>* 15</i>	<i>20%</i>	<i>* 17</i>	<i>18%</i>	<i>* 44</i>	<i>16%</i>	<i>* 45</i>	<i>16%</i>	<i>* 56</i>	<i>16%</i>	<i>*</i>
	<i>* 57</i>	<i>16%</i>	<i>*</i>								
<i>BASSIN 44 NB POSTES= 6</i>	<i>* 31</i>	<i>17%</i>	<i>* 16</i>	<i>17%</i>	<i>* 15</i>	<i>17%</i>	<i>* 17</i>	<i>17%</i>	<i>* 57</i>	<i>17%</i>	<i>*</i>
	<i>* 44</i>	<i>17%</i>	<i>*</i>								
<i>BASSIN 45 NB POSTES= 8</i>	<i>* 46</i>	<i>16%</i>	<i>* 34</i>	<i>13%</i>	<i>* 42</i>	<i>13%</i>	<i>* 37</i>	<i>11%</i>	<i>* 44</i>	<i>11%</i>	<i>*</i>
	<i>* 45</i>	<i>11%</i>	<i>* 56</i>	<i>11%</i>	<i>* 58</i>	<i>11%</i>	<i>*</i>				

Tableau III.1 : Fichier d'attribution de la lame d'eau de référence
(suite)

Les caractéristiques d'altitude des 45 lames d'eau calculées sont décrites dans le tableau III.2 qui permet de comparer :

- * l'altitude moyenne du bassin qui est la moyenne des altitudes des diverses mailles qui le composent,
- * l'altitude moyenne des postes pluviométriques retenus qui est la moyenne des altitudes des postes sélectionnés affectés du coefficient de pondération (fonction inverse de la distance) qui leur est affecté;
- * l'altitude moyenne lissée des postes pluviométriques dans laquelle l'altitude réelle de chaque poste a été remplacée par l'altitude moyenne de la maille de 5 kilomètres à laquelle il appartient ; cette altitude est généralement plus élevée, car les postes sont situés au fond des vallées profondes (style canyon), et semble plus représentative de la pluie locale ;
- * la différence entre l'altitude du bassin et l'altitude des postes,
- * La différence entre l'altitude du bassin et l'altitude lissée des postes.

Ce tableau montre en particulier que l'altitude lissée est plus haute (de 46 mètres en moyenne). La différence entre l'altitude d'un bassin et l'altitude lissée des postes est la plus faible et la plus régulière. Elle a une moyenne de 19 mètres, mais atteint 220 mètres pour les bassins les plus hauts. Elle est assez liée avec l'altitude du bassin (corrélation 0.63, bien que les répartitions ne soient pas gaussiennes), mais cependant moins que la différence d'altitude (non lissée) qui présente un coefficient de corrélation de 0.91.

Comparaison entre différentes lames d'eau

7 lames d'eau différentes ont été calculées avec des paramètres d'attribution différents :

lame d'eau de REFERENCE (altitudes en metres)

NUMERO BASSIN	ALTITUDE BASSIN	ALTITUDE POSTES	ALTIT. POSTES LISSEE	DIFFER. ALTITUD	DIFFER. ALTITUD LISSEE
1	803.	597.	713.	206.	90.
2	746.	555.	673.	191.	73.
3	819.	571.	684.	248.	135.
4	703.	536.	648.	167.	55.
5	720.	534.	653.	186.	67.
6	396.	352.	394.	44.	2.
7	652.	567.	682.	85.	-30.
8	637.	583.	689.	54.	-52.
9	347.	317.	340.	30.	7.
10	366.	310.	334.	56.	32.
11	309.	272.	284.	37.	25.
12	531.	455.	526.	76.	5.
13	527.	469.	547.	58.	-20.
14	346.	306.	336.	40.	10.
15	342.	280.	304.	62.	38.
16	332.	310.	336.	22.	-4.
17	441.	404.	460.	37.	-19.
18	252.	266.	264.	-14.	-12.
19	917.	575.	697.	342.	220.
20	655.	505.	605.	150.	50.
21	531.	336.	416.	195.	115.
22	567.	479.	584.	88.	-17.
23	408.	353.	408.	55.	0.
24	520.	331.	395.	189.	125.
25	314.	286.	329.	28.	-15.
26	444.	392.	456.	52.	-12.
27	356.	315.	348.	41.	8.
28	353.	315.	348.	38.	5.
29	259.	262.	275.	-3.	-16.
30	273.	233.	248.	40.	25.
31	375.	329.	378.	46.	-3.
32	256.	235.	243.	21.	13.
33	399.	346.	395.	53.	4.
34	266.	251.	265.	15.	1.
35	263.	231.	243.	32.	20.
36	236.	235.	244.	1.	-8.
37	251.	229.	237.	22.	14.
38	241.	225.	236.	16.	5.
39	234.	220.	229.	14.	5.
40	357.	323.	366.	34.	-9.
41	230.	251.	262.	-21.	-32.
42	242.	231.	246.	11.	-4.
43	273.	298.	260.	-25.	13.
44	246.	284.	276.	-38.	-30.
45	236.	268.	239.	-32.	-3.
Moyenne	422	356	402	65	19
Ecart Type	188	120	161	81	51
Asymetrie	1.0	0.8	0.8	1.5	1.9

Tableau III.2 : Caractéristiques d'altitude de la lame d'eau de référence

Numéro	Nombre minimal de postes	Distance maximale de recherche (en carreaux)	Pondération
1	6	4	très décroissante
2	6	4	peu décroissante
3	3	4	peu décroissante
4	1	4	peu décroissante
5	6	référence	
6	réseau réduit : 20 postes pluviométriques		
7	réseau disponible en 1968-1977 : 48 postes pluviométriques		

A part de très rares exceptions, les 5 premières lames d'eaux ont des caractéristiques moyennes inter-annuelles extrêmement semblables (voir tableau III.3). Des écarts importants apparaissent spécialement pour les bassins n° 5, 7 et 8.

2. "LAME" DE TEMPERATURE

11 postes de relevés de température étaient disponibles à des altitudes relativement basses (les 2 plus hauts postes sont respectivement à 340 mètres et à 660 mètres d'altitude) (voir tableau III.4).

Pour les 72 mois d'observations de la période 1971-1976, on a calculé par régression la relation entre la température et l'altitude :

$$T(p,m) = T_0(m) + \text{GRAD}(m) \cdot \text{ALTI}(p)$$

avec

{	T ₀ température à l'altitude zéro
{	GRAD gradient de température avec l'altitude
{	p indice du poste (1 à 11)
{	m indice du mois (1 à 72)

On a alors calculé, pour chacun des 72 mois, la température en chaque bassin b d'après son altitude moyenne ALTI(b) par :

$$T(b,m) = T_0(m) + \text{GRAD}(m) \cdot \text{ALTI}(b)$$

où b = de 1 à 45.

7 DIFFERENTES LAMES d'EAU 45 bassins de la MOSELLE
 lame moyenne ANNUELLE en MM/AN

NUM	1	2	3	4	5	6	7
1	1411.	1423.	1453.	1519.	1398.	1506.	1449.
2	1409.	1419.	1421.	1496.	1410.	1215.	1407.
3	1405.	1407.	1407.	1510.	1404.	1259.	1498.
4	1319.	1321.	1355.	1249.	1254.	1237.	1369.
5	1406.	1408.	1442.	1442.	1386.	1147.	1384.
6	992.	980.	930.	921.	924.	800.	916.
7	1404.	1404.	1404.	1404.	1403.	1180.	1409.
8	1219.	1230.	1444.	1444.	1200.	1164.	1446.
9	840.	843.	859.	921.	787.	800.	842.
10	789.	792.	773.	847.	760.	668.	832.
11	713.	711.	706.	671.	670.	722.	781.
12							
13	1176.	1176.	1176.	1176.	1155.	1051.	1328.
14	721.	733.	806.	806.	721.	660.	792.
15	654.	657.	689.	689.	644.	671.	681.
16	707.	703.	628.	628.	707.	670.	720.
17	989.	989.	989.	989.	969.	895.	1041.
18	650.	649.	643.	643.	638.	658.	643.
19	1206.	1212.	1248.	1210.	1179.	1252.	1312.
20	1122.	1122.	1128.	1128.	1071.	1131.	1158.
21	907.	907.	907.	909.	908.	960.	945.
22							
23	861.	861.	861.	861.	872.	926.	931.
24	898.	899.	899.	953.	916.	907.	937.
25	769.	769.	769.	769.	796.	775.	809.
26	958.	950.	862.	923.	908.	892.	933.
27							
28	830.	829.	802.	802.	807.	805.	816.
29	736.	737.	751.	740.	731.	674.	676.
30	627.	625.	614.	600.	606.	663.	634.
31	814.	814.	814.	814.	823.	960.	888.
32	621.	621.	621.	645.	613.	628.	613.
33							
34	630.	630.	630.	650.	631.	651.	629.
35	627.	626.	623.	607.	627.	665.	629.
36	653.	651.	651.	592.	661.	608.	653.
37	615.	616.	616.	653.	631.	608.	617.
38	614.	614.	614.	614.	614.	607.	625.
39	613.	613.	613.	613.	614.	607.	617.
40	814.	814.	814.	814.	814.	794.	843.
41							
42	622.	622.	616.	642.	629.	669.	616.
43	694.	694.	694.	704.	705.	719.	722.
44	662.	662.	662.	662.	681.	704.	678.
45	652.	649.	649.	620.	653.	611.	635.

- 1: 6 stations; au moins distance maxi=4 carr ponder très décroiss
 2: 6 stations au moins distance maxi=4 carr ponder peu décroiss
 3: 3 stations au moins distance maxi=4 carr ponder peu décroiss
 4: 1 station au moins distance maxi=4 carr ponder peu décroiss
 5: lame de REFERENCE
 6: lame Réseau réduit (20 Postes Pluviométriques)
 7: lame Réseau 1968/77 (48 Postes Pluviométriques)

Tableau III.3

TABLEAU III.4 - Situation des postes thermométriques

<i>Nom du poste</i>	<i>X</i> <i>(km)</i>	<i>Y</i> <i>(km)</i>	<i>Z</i> <i>(m)</i>
BADONVILLER	937.3	98.6	326.
LUCEY	857.5	119.5	270.
OCHEY-THUILLEY	867.0	102.0	336.
TOUL ROSIERES	868.0	126.0	285.
TOMBLAINE	885.8	117.0	210.
HAUDIOMONT	834.0	161.0	268.
AUGNY METZ FRESCATY	876.0	158.0	190.
GERARDMER	938.2	51.6	666.
GOLBEY	904.9	64.8	340.
MIRECOURT	881.1	74.3	274.
ROVILLE AUX CHENES	915.9	85.0	260.

Les variations de température moyenne mensuelle au cours de la période 1971 à 1976 sont illustrées par la figure III.2 qui montre d'une part la température à Golbey (340 mètres d'altitude) et la température médiane des 11 stations. Cette figure montre que ces variations de température sont assez régulières avec en particulier des températures très proches de zéro degré tous les mois de janvier, sauf 1975, la période la plus froide étant janvier et février 1973. En fait, il apparaît nettement qu'une correction ou une erreur de + ou - 1 degré tout à fait admissible peut suffire à faire considérer ou non des précipitations mensuelles comme neigeuse.

3. LAME D'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE (ETP)

La formule mensuelle de L. TURC a été utilisée. La moyenne inter-annuelle du nombre d'heures d'insolation de chaque mois a été relevée dans un atlas, ainsi que le nombre théorique d'heure de jour HJOU et l'énergie de radiation atmosphérique Iga à la latitude 51°.

La température t en degrés C utilisée est celle calculée par régression mois par mois pour chacun des 72 mois, en fonction de l'altitude des bassins.

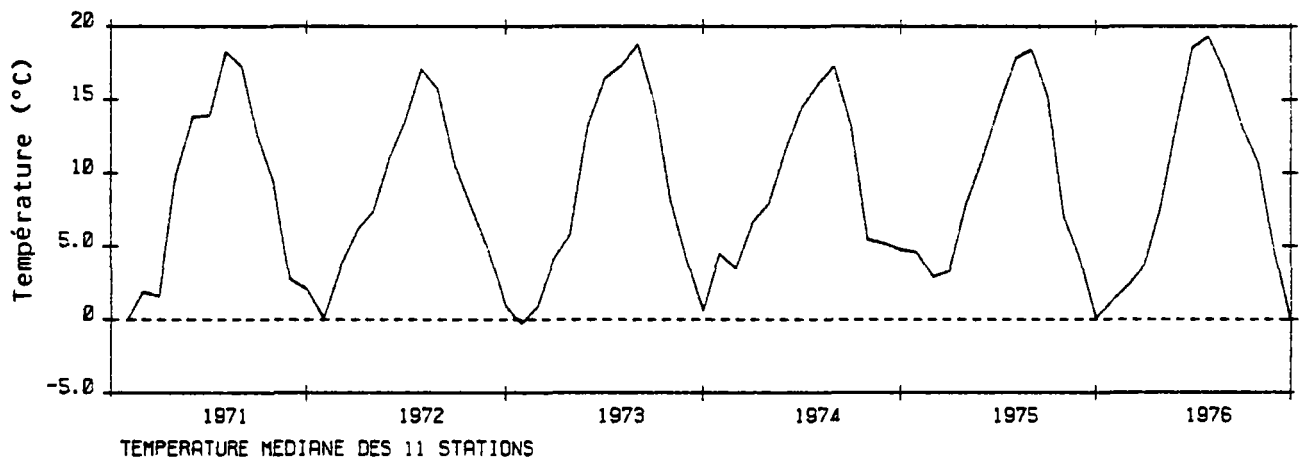
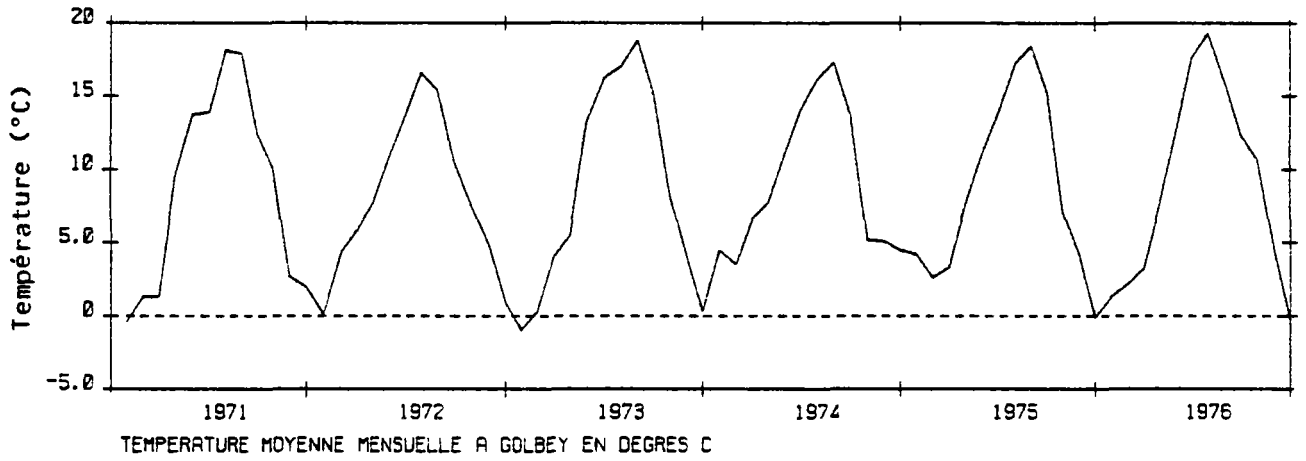


FIGURE III.2 - Température de l'air, bassin de la Moselle

L'évapotranspiration potentielle estimée d'après la formule mensuelle de L. TURC est donnée par :

$$ETP_{mm} = 0.40 \cdot [50 + Iga (0.18 + 0.62 \text{ INSOL/HJOU})] \cdot t/(t+15)$$

Les valeurs moyennes de INSOL, HJOU et Iga sont données dans le tableau III.5 suivant :

TABLEAU III.5 - Valeurs moyennes inter-annuelles de l'insolation INSOL, du nombre d'heures de jour HJOU, et de l'énergie de radiation Iga, à la latitude 51 degrés

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
INSOL heures	50	75	150	190	225	210	237	212	175	125	50	40
HJOU heures	262	282	368	415	483	495	497	452	379	333	268	247
Iga cal/cm ² /j	208	347	551	757	918	983	936	794	597	391	232	166

CHAPITRE 4

CALAGE DE REFERENCE

1. LES HYPOTHESES DE CALAGE

De nombreux essais de simulations avec le modèle GARDENIA au pas de temps mensuel, ont fait apparaître une certaine variabilité des paramètres suivant les contraintes imposées. Il est apparu nécessaire de définir un calage de référence auquel seront comparés tous les autres. Ce calage de référence a été réalisé avec la lame d'eau de référence définie dans le chapitre 3, c'est-à-dire sans correction d'altitude et avec les contraintes suivantes :

- correction d'évapotranspiration potentielle ETP fixé à +20%,
- temps de demi-percolation fixé à 1,5 mois,
- temps de demi-tarissement fixé à 3,0 mois,
- corrections de pluie comprises entre -25% et +25%,
- prise en compte de la neige,
- une seule composante souterraine,
- calage par maximisation du coefficient d'ajustement pondéré (avec index de pondération égal à 2).

La correction d'évapotranspiration potentielle a été fixée à +20% car il est apparu d'une part que la formule mensuelle de L. TURC tend à sous-estimer l'évapotranspiration potentielle, et d'autre part qu'au vu des premiers essais la plupart des bassins présentaient un excès d'eau.

L'initialisation des calculs a été réalisée de la manière suivante :

- a) Tous les réservoirs du modèle ont été placés dans l'état d'équilibre correspondant à la pluie efficace moyenne de la période observée (1971-1976) (en fonction des paramètres de modélisation au cours de la modélisation).
- b) En partant de cet état d'équilibre, deux années ont été simulées mois par mois avec les pluies mensuelles et les évapotranspirations potentielles mensuelles moyennes inter-annuelles des 12 mois de l'année. C'est seulement après cette double initialisation que les calculs ont démarré en janvier 1971.

calage 1971/76 REFERENCE CORR de PLUIE +-25%

NUMERO ORDRE	NUMERO BASSIN	AJUST POND	AJUST NATUR	CORRECT PLUIE	RESERVE SUPERF. mm	EQUI-RUISS MM
1	1	0.890	0.942	15.6	83.	71.2
2	2	0.873	0.911	12.7	198.	58.1
3	3	0.864	0.920	10.0	40.	92.4
4	4	0.857	0.919	9.4	44.	111.1
5	5	0.876	0.932	3.1	53.	74.1
6	6	0.825	0.880	-25.0	3.	410.0
7	7	0.859	0.916	-18.4	16.	101.8
8	8	0.858	0.909	-15.9	13.	108.8
9	9	0.787	0.855	-18.7	41.	42.5
10	10	0.781	0.863	-20.3	20.	64.0
11	11	0.869	0.880	-24.5	26.	28.6
12	13	0.881	0.923	-18.0	22.	89.6
13	14	0.827	0.886	-12.4	34.	41.0
14	15	0.786	0.873	-5.1	80.	22.5
15	16	0.866	0.882	-20.8	35.	28.6
16	17	0.850	0.909	-13.6	44.	75.2
17	18	0.775	0.826	-21.2	83.	11.1
18	19	0.696	0.777	-3.5	33.	253.2
19	20	0.770	0.865	-15.7	23.	101.8
20	21	0.820	0.918	18.7	74.	161.1
21	23	0.836	0.914	-10.9	66.	67.9
22	24	0.848	0.919	2.5	21.	223.1
23	25	0.784	0.883	-17.6	57.	51.9
24	26	0.854	0.915	-10.3	19.	198.0
25	28	0.850	0.903	-19.0	44.	60.8
26	29	0.657	0.834	-24.6	0.	61.0
27	30	0.807	0.879	-25.0	48.	27.7
28	31	0.822	0.890	-7.7	59.	73.4
29	32	0.800	0.830	-12.9	67.	20.8
30	34	0.725	0.830	-25.0	78.	24.7
31	35	0.766	0.825	-22.2	46.	43.7
32	36	0.589	0.760	-25.0	53.	47.2
33	37	0.821	0.868	-17.4	20.	65.1
34	38	0.739	0.819	-23.1	25.	46.9
35	39	0.740	0.821	-21.6	42.	35.4
36	40	0.826	0.890	-10.0	50.	64.0
37	42	0.731	0.728	-21.1	51.	40.6
38	43	0.799	0.889	25.0	101.	243.1
39	44	0.804	0.866	-25.0	43.	59.0
40	45	0.675	0.865	-25.0	50.	93.2

Tableau IV.1 : Calage de référence des 40 bassins ; pluies mensuelles brutes, débits mensuels, prise en compte de la neige, un seul réservoir souterrain, ETP augmentée de 20 %

2. LES PARAMETRES IDENTIFIES

Pour chaque bassin, il n'y a que trois paramètres à optimiser. Les paramètres identifiés et les coefficients d'ajustement sont reproduits sur le tableau IV.1, ainsi que sur les figures IV.1 et IV.2. Les caractéristiques statistiques obtenues sont rassemblées dans le tableau IV.2 suivant.

TABLEAU IV.2 - Caractéristiques statistiques de l'ajustement et des paramètres. Calage de référence.

	Moyenne	Ecart-type	Moyenne géométrique	Médiane	Intervalle (10% - 90%)	Coefficient d'asymétrie		
						arithmétique	racine	logarithmique
Ajustement pondéré	0.80	0.07	--	0.82	0.72/0.86	-1.2	-1.3	--
Ajustement naturel	0.87	0.05	--	0.88	0.81/0.91	-1.1	-1.2	--
Correction de pluie (%)	-12	14	--	-18	-25 / +10	1.2	--	--
Réserve superficielle (mm)	48	34	--	42	15 / 80	2.3	0.2	--
Equi-ruisselement (mm)	87	79	65	63	26 / 210	2.3	1.3	0.2

On en déduit les remarques suivantes :

- * Les ajustements sont satisfaisants : 80 % des coefficients d'ajustements pondérés sont compris entre 0.72 et 0.86. Les coefficients d'ajustement naturels, c'est-à-dire non pondérés, étant dans la fourchette 0.81-0.91.
- * Les corrections de pluies sont négatives ; la médiane est de -18%, ce qui peut sembler surprenant a priori, car les stations pluviométriques sont généralement situées trop bas, ce qui devrait entraîner une sous-estimation des lames d'eau. La correction pour le plus grand bassin (Hauconcourt, 9 387 km², n° de modélisation 36) est de -10%. Sa lame d'eau résulte pourtant de la pondération de 51 postes pluviométriques.
- * Les capacités des réserves superficielles sont assez faibles : médiane de 42 mm ; 80 % des valeurs sont comprises entre 15 et 80 mm. Une exception cependant : 198 mm pour le bassin n° 2 (Rupt-sur-Moselle), mais cette valeur n'est pas bien identifiée.
- * Les hauteurs d'équi-ruisselement sont très variables : 63 mm pour la médiane, mais 80 % des valeurs comprises entre 26 et 210 mm, soit un intervalle de 1 à 8. En particulier, le très petit bassin n° 6

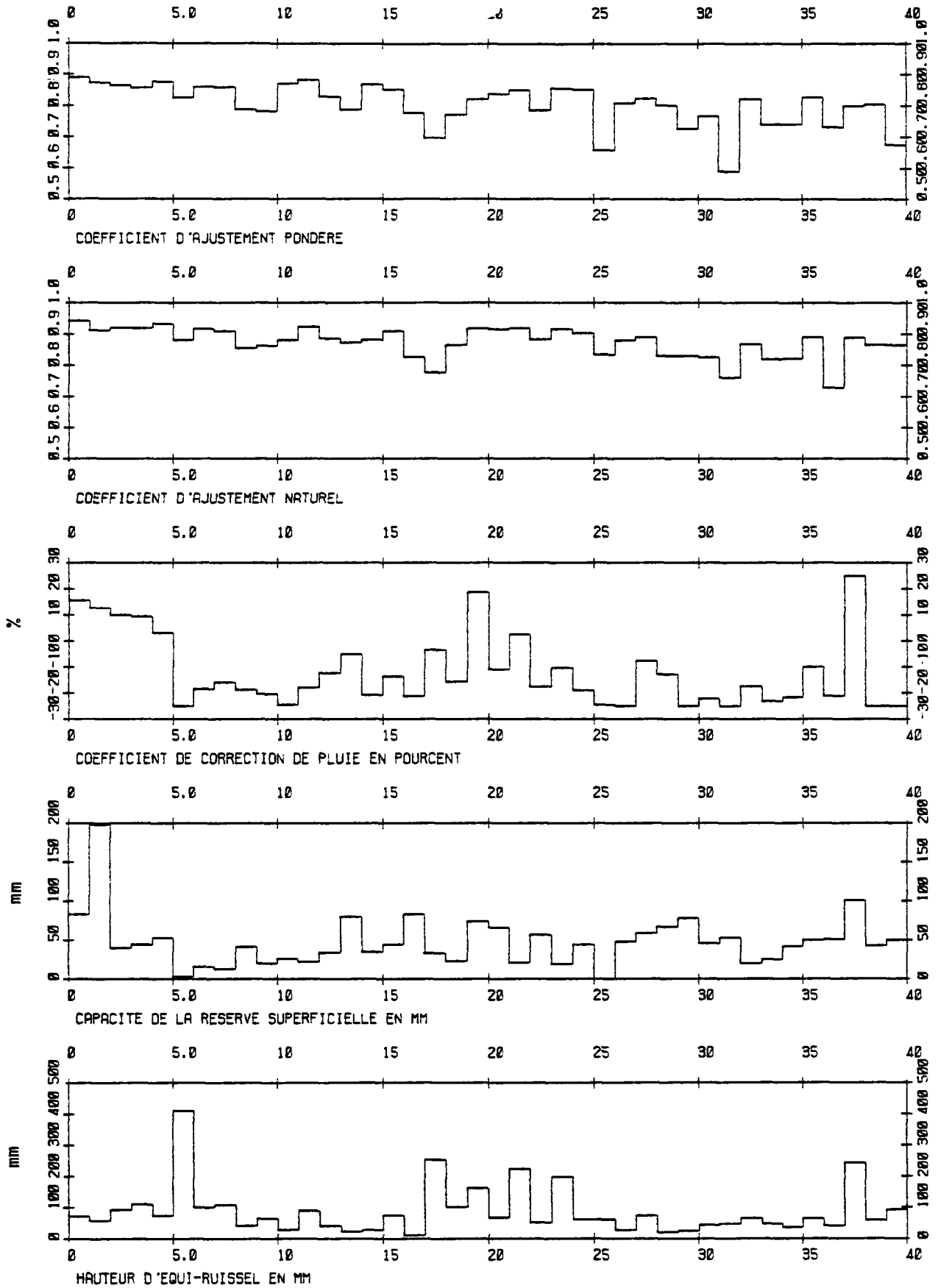


Figure IV.1 : Calage de référence : critères d'ajustement et 3 paramètres des 40 bassins modélisés

NOTA. En abscisse, sont les numéros des 40 bassins versants modélisés.

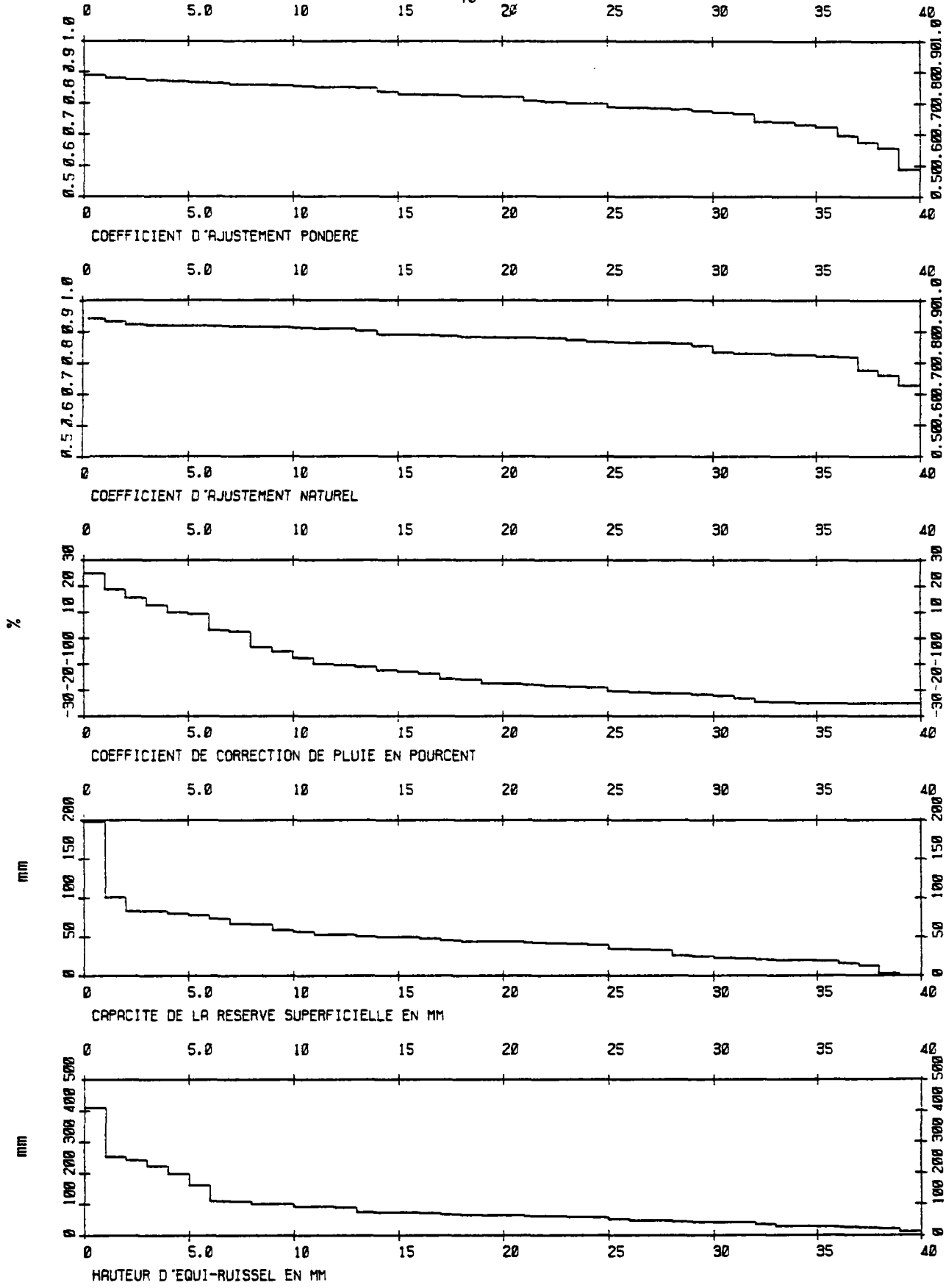


Figure IV.2 : Calage de référence : paramètres des 40 bassins modélisés : répartition statistique

NOTA. Cette figure est obtenue à partir de la figure IV.1 en classant les valeurs en ordre décroissant de la plus forte (n° 1) à la plus faible (n° 40).

calage de REFERENCE 1971/1976 (lame d'eau brute) BILAN ANNUEL en MM/AN

NUMERO ORDRE	NUMERO BASSIN	PLUIE	ETR	PLUIE EFF	ECOUL. RAPIDE	ECOUL. LENT	ETR/ETP %	QLENT/QTOT %
1	1	1615.	585.	1006.	642.	390.	96.	38.
2	2	1589.	616.	950.	636.	343.	99.	35.
3	3	1545.	561.	961.	563.	422.	92.	43.
4	4	1373.	573.	788.	407.	392.	91.	49.
5	5	1430.	574.	836.	509.	346.	92.	40.
6	6	693.	403.	265.	44.	245.	59.	85.
7	7	1145.	483.	652.	331.	330.	76.	50.
8	8	1008.	471.	529.	241.	296.	74.	55.
9	9	639.	423.	217.	108.	109.	61.	50.
10	10	606.	387.	205.	93.	127.	56.	58.
11	11	506.	354.	129.	75.	73.	51.	50.
12	13	947.	463.	475.	231.	253.	70.	52.
13	14	632.	414.	218.	110.	108.	60.	50.
14	15	611.	463.	149.	84.	63.	67.	43.
15	16	561.	386.	147.	90.	80.	56.	47.
16	17	837.	475.	362.	171.	190.	70.	53.
17	18	503.	424.	79.	48.	30.	60.	38.
18	19	1139.	514.	610.	200.	425.	87.	68.
19	20	903.	463.	432.	190.	249.	73.	57.
20	21	1078.	586.	485.	184.	307.	89.	63.
21	23	777.	503.	274.	121.	152.	74.	56.
22	24	939.	509.	399.	120.	303.	77.	72.
23	25	656.	468.	189.	83.	105.	67.	56.
24	26	814.	456.	358.	103.	255.	68.	71.
25	28	654.	432.	189.	93.	125.	63.	57.
26	29	551.	363.	188.	76.	112.	51.	59.
27	30	454.	364.	87.	40.	50.	52.	55.
28	31	759.	497.	236.	107.	150.	72.	58.
29	32	534.	433.	102.	53.	48.	61.	48.
30	34	473.	402.	71.	32.	38.	57.	54.
31	35	488.	377.	111.	44.	66.	53.	60.
32	36	496.	391.	105.	39.	67.	55.	63.
33	37	521.	374.	146.	52.	95.	53.	65.
34	38	473.	357.	115.	43.	72.	50.	62.
35	39	482.	380.	102.	42.	60.	53.	59.
36	40	733.	473.	226.	111.	142.	69.	56.
37	42	496.	383.	113.	47.	65.	54.	58.
38	43	882.	570.	312.	78.	229.	81.	75.
39	44	510.	375.	135.	50.	83.	53.	62.
40	45	489.	373.	104.	30.	84.	53.	74.
Moyenne		789	453	326	158	177	67	56
Ecart type		336	75	269	167	122	14	11

Tableau IV.3 : Calage de référence des 40 bassins modélisés.
Bilan annuel moyen en mm/an.

(Deyvilliers St Oger - 21 km²) qui est très amorti à une hauteur d'équiruissellement qui atteint 410 mm (soit 2.4 écarts-types au dessus de la moyenne en valeurs logarithmiques).

La décomposition du bilan annuel moyen est donné dans le tableau IV.3. Les caractéristiques statistiques (en mm/an) sont rassemblées dans le tableau IV.4 suivant.

TABLEAU IV.4 - Caractéristiques statiques (en mm par an) du bilanf annuel moyen

	Moyenne	Ecart-type	Moyenne géométrique	Médiane	Intervalle (10% / 90%)	Coefficient d'Asymétrie	
						arithmétique	logarithmique
Pluie corrigée	789	336	729	660	480/1420	1.1	0.6
Evapotranspiration réelle ETR	453	75	447	450	370/ 515	0.6	0.3
Pluie efficace	326	269	242	212	97/ 870	1.3	0.3
Composante rapide	158	167	105	90	40/ 510	1.8	0.6
Composante lente	177	122	137	130	55/ 385	0.7	-0.1
ETP/ETR (%)	67	14	66	66	52/ 90	0.7	0.4
Composante lente / Débit total (%)	56	11	55	55	42/ 71	0.3	-0.3

On remarque qu'en moyenne l'évapotranspiration réelle ETR représente 66 % de l'évapotranspiration potentielle ETP (corrigée), mais le pourcentage est compris entre 52 % et 90 %, dans 80 % des bassins. Le pourcentage étant beaucoup plus élevé pour les bassins ayant une forte pluie (le coefficient de corrélation entre ce rapport ETP/ETR et la pluie annuelle en variables logarithmiques est de 0.96).

L'écoulement lent (qui représente en principe la composante souterraine) représente 55 % de l'écoulement, mais ce pourcentage qui varie de 42 % à 75 % (dans 80 % des bassins) n'est pas lié à la pluie.

3. LA QUALITE DE L'AJUSTEMENT

Les débits simulés des 40 bassins modélisés (en trait pointillé) sont comparés aux débits mesurés (en trait continu) sur les figures IV.3 à IV.10. Pour permettre une comparaison plus efficace, ce sont les débits spécifiques (en l/s/km²) qui ont été tracés.

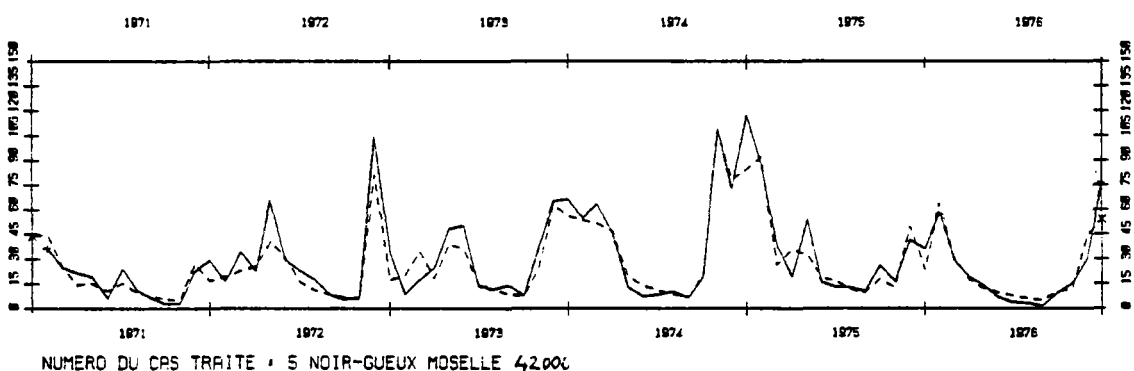
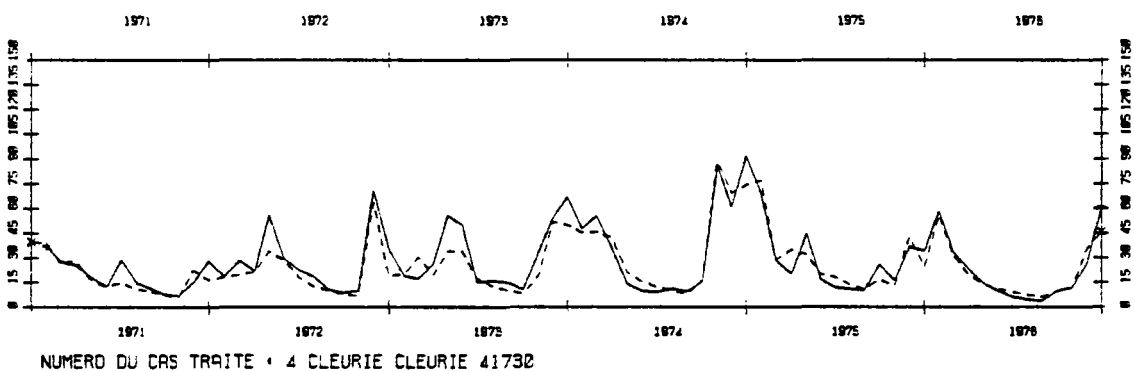
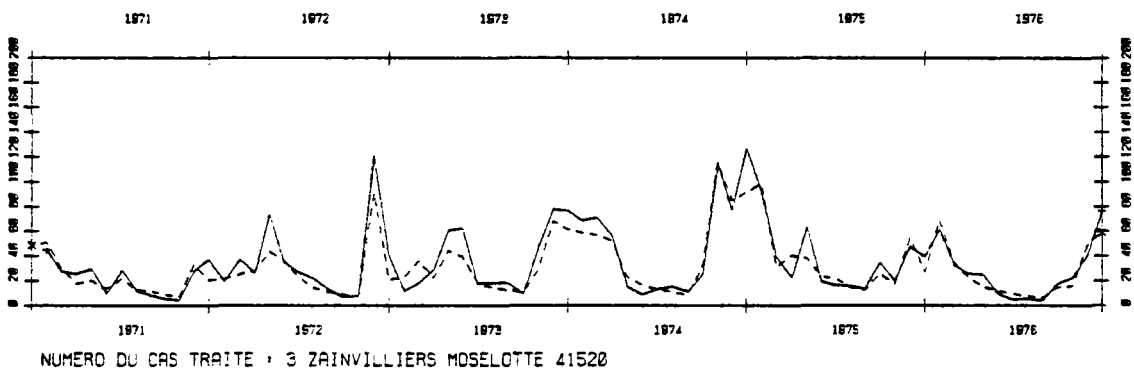
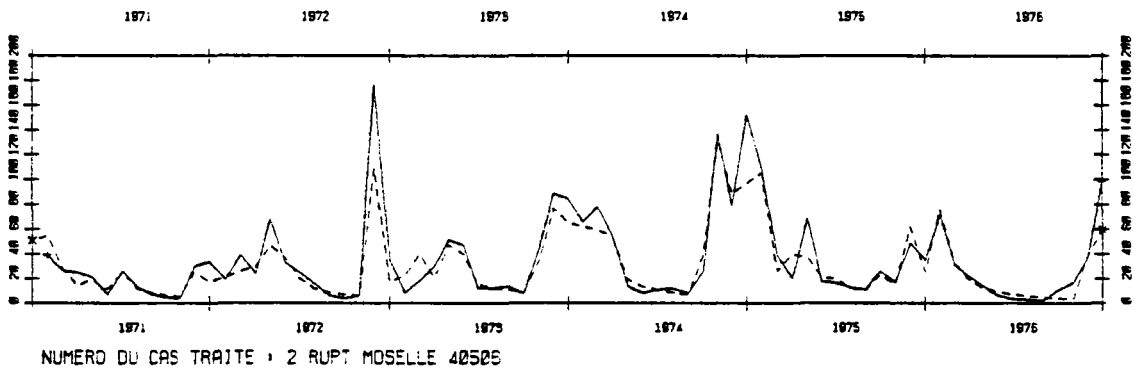
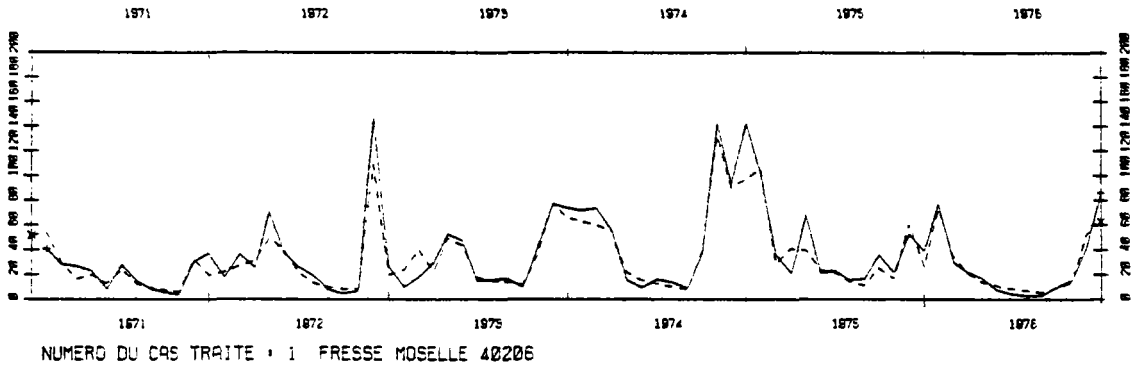
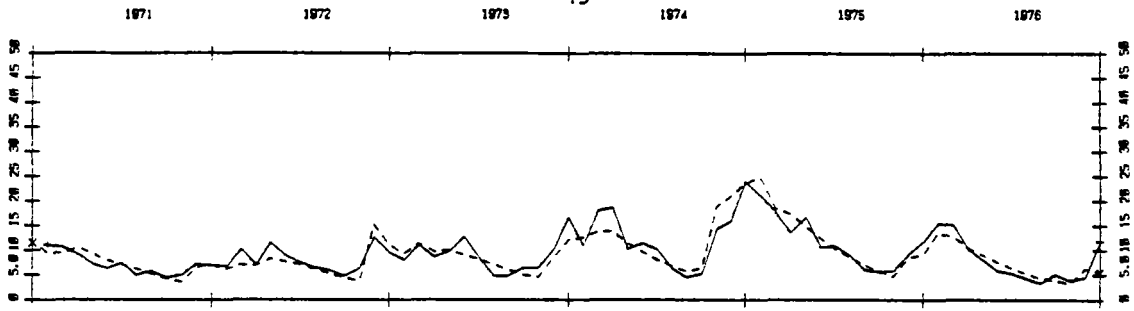
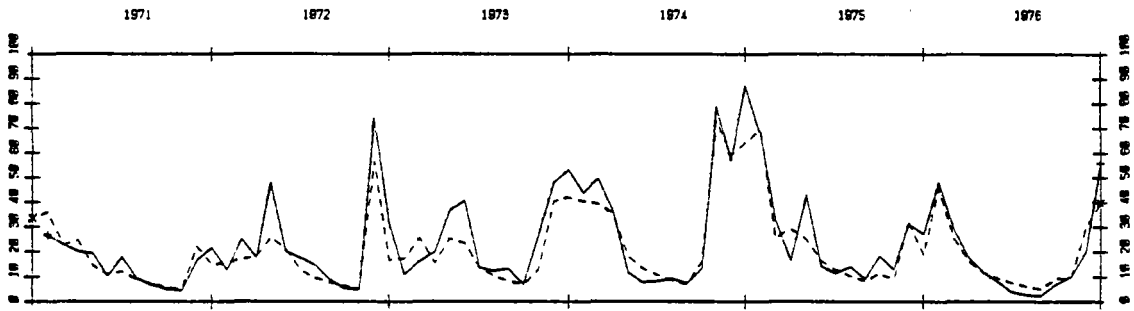


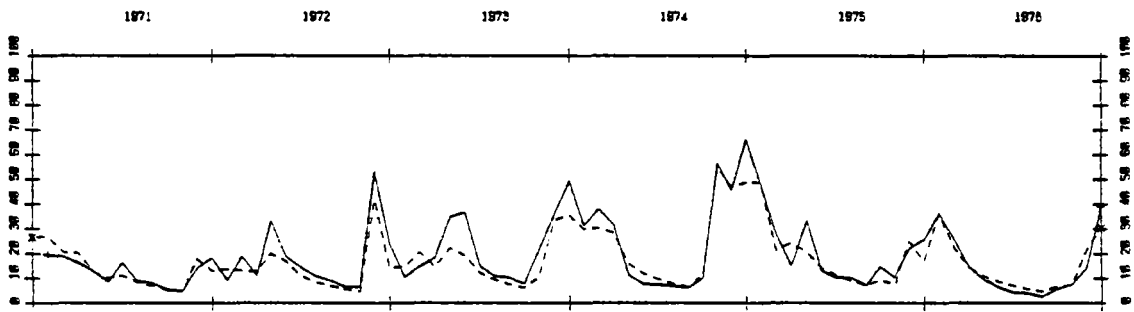
Figure IV.3 : Calage de référence - bassins 1 à 5



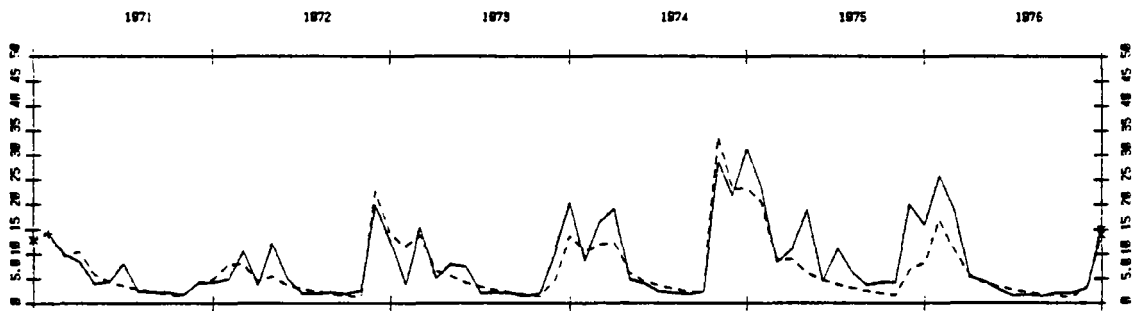
NUMERO DU CAS TRAITÉ : 6 DEYVILLIERS ST-OGER 42630



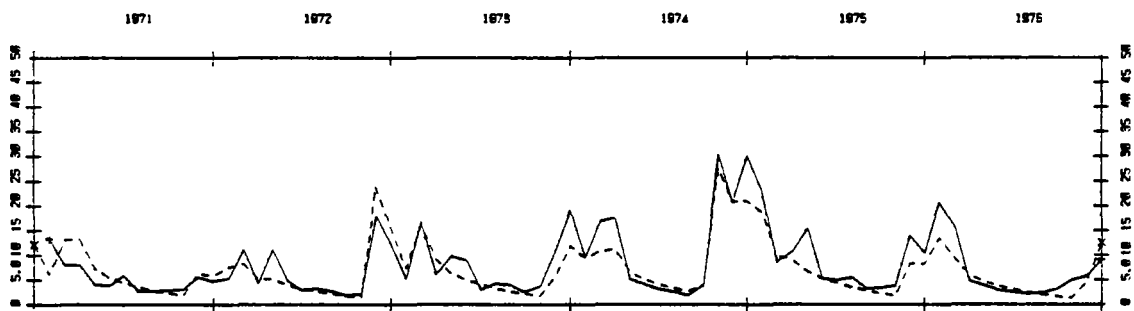
NUMERO DU CAS TRAITÉ : 7 EPINAL MOSELLE 42506



NUMERO DU CAS TRAITÉ : 8 JARMENIL VOLOGNE 43620



NUMERO DU CAS TRAITÉ : 9 VAXONCOURT DURBION 44420



NUMERO DU CAS TRAITÉ : 10 FRIZON AVIERE 46320

Figure IV.4 : Calage de référence - bassins 6 à 10

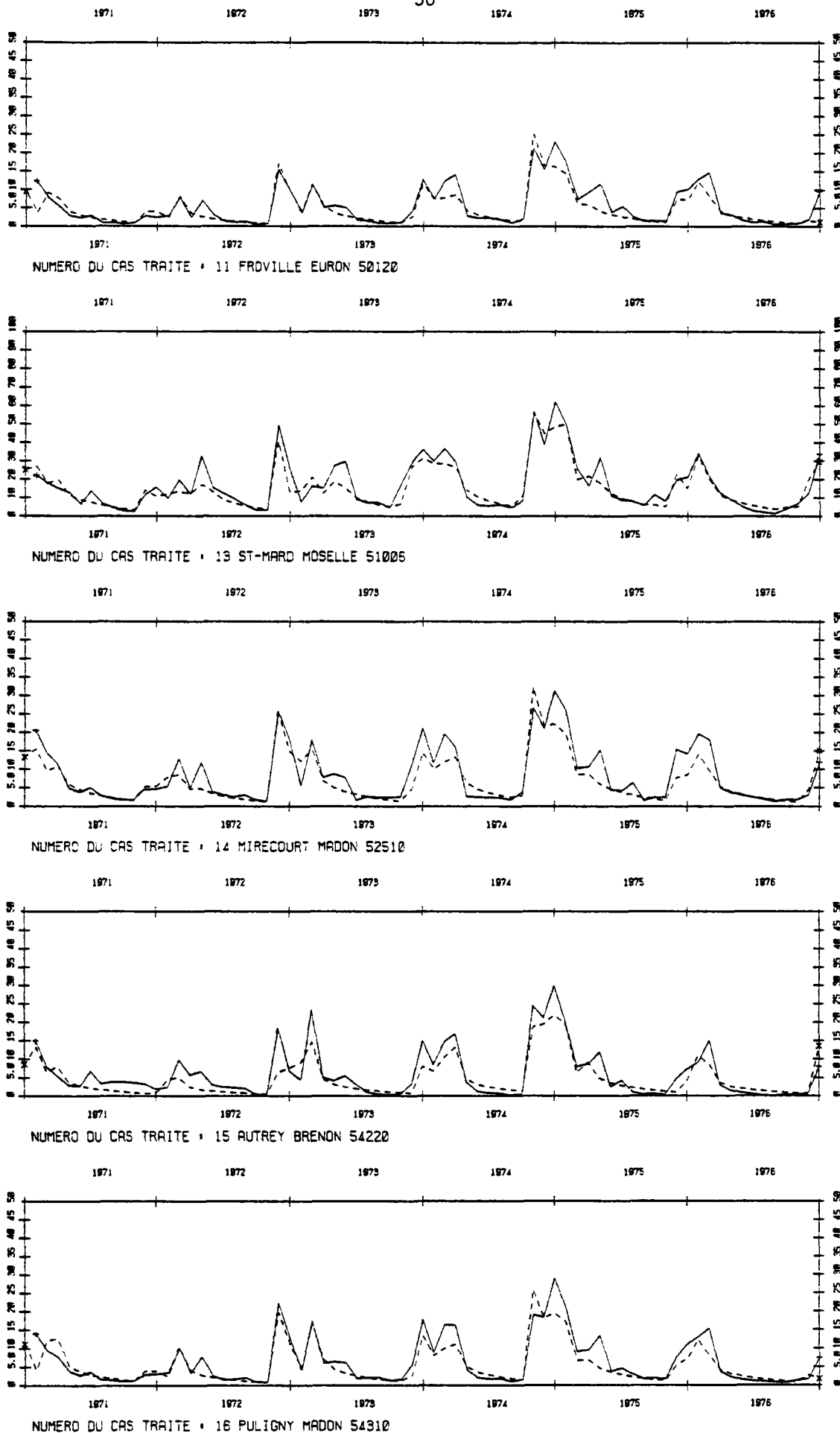
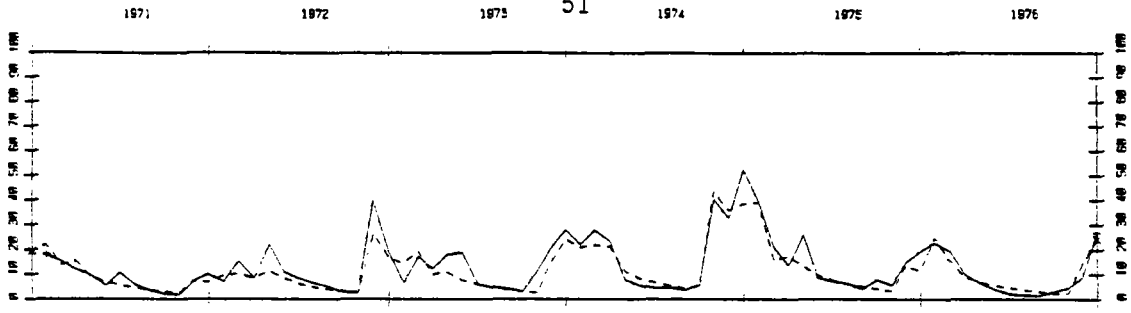
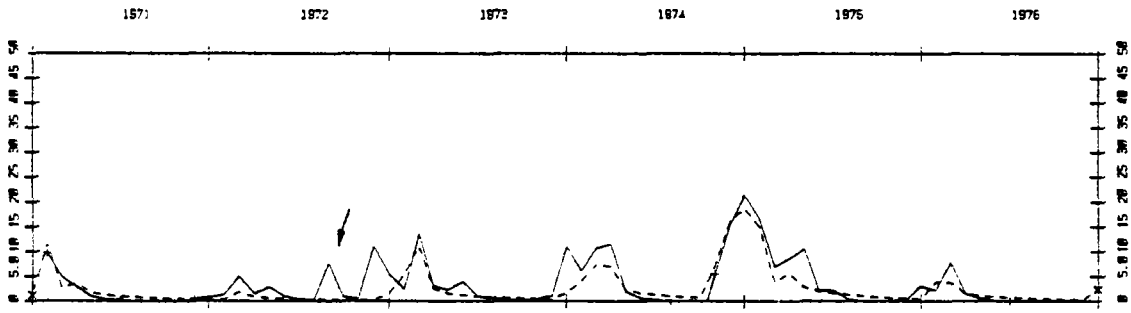


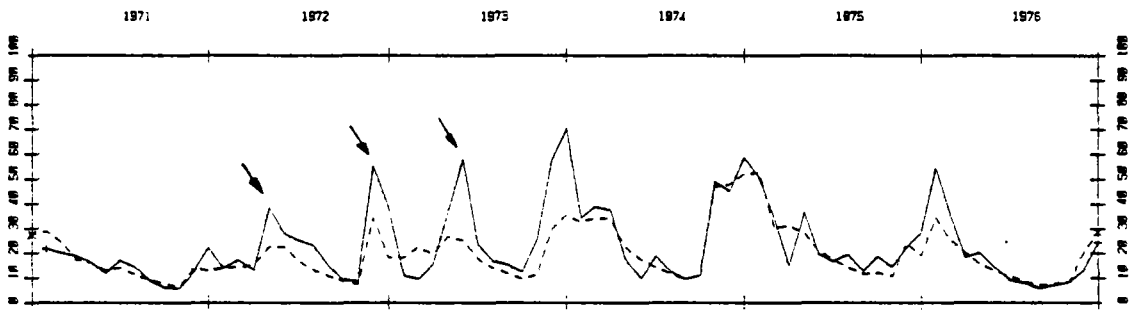
Figure IV.5 : Calage de référence - bassins 11 à 16



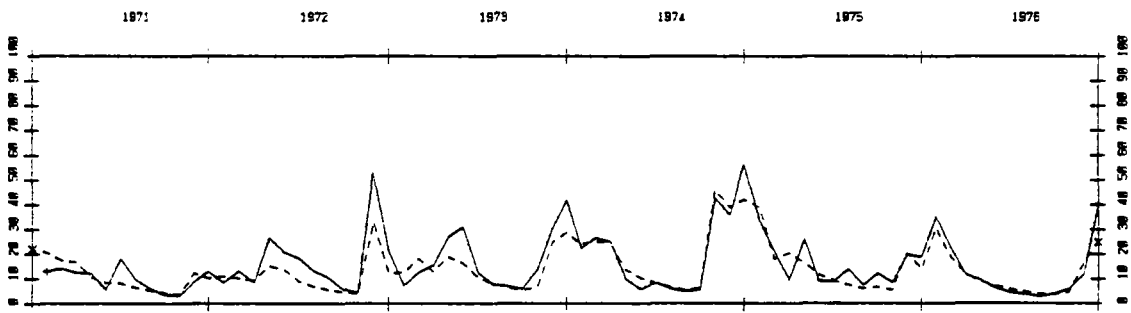
NUMERO DU CAS TRAITÉ : 17 TOUL MOSELLE 57106



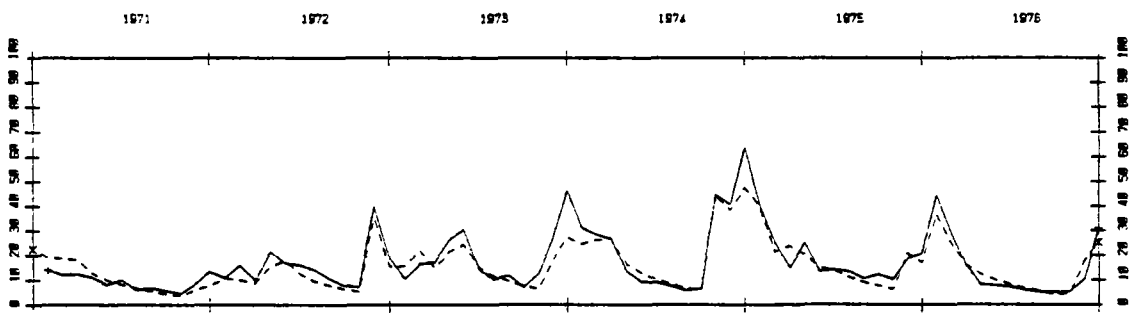
NUMERO DU CAS TRAITÉ : 18 VILLEY ST-ET. TERROUIN 58420



NUMERO DU CAS TRAITÉ : 19 FRAIZE MEURTHE 60010



NUMERO DU CAS TRAITÉ : 20 SAINT-DIE MEURTHE 60510



NUMERO DU CAS TRAITÉ : 21 MOYENMOUTHIER RABODEAU 61420

Figure IV.6 : Calage de référence - bassins 17 à 21

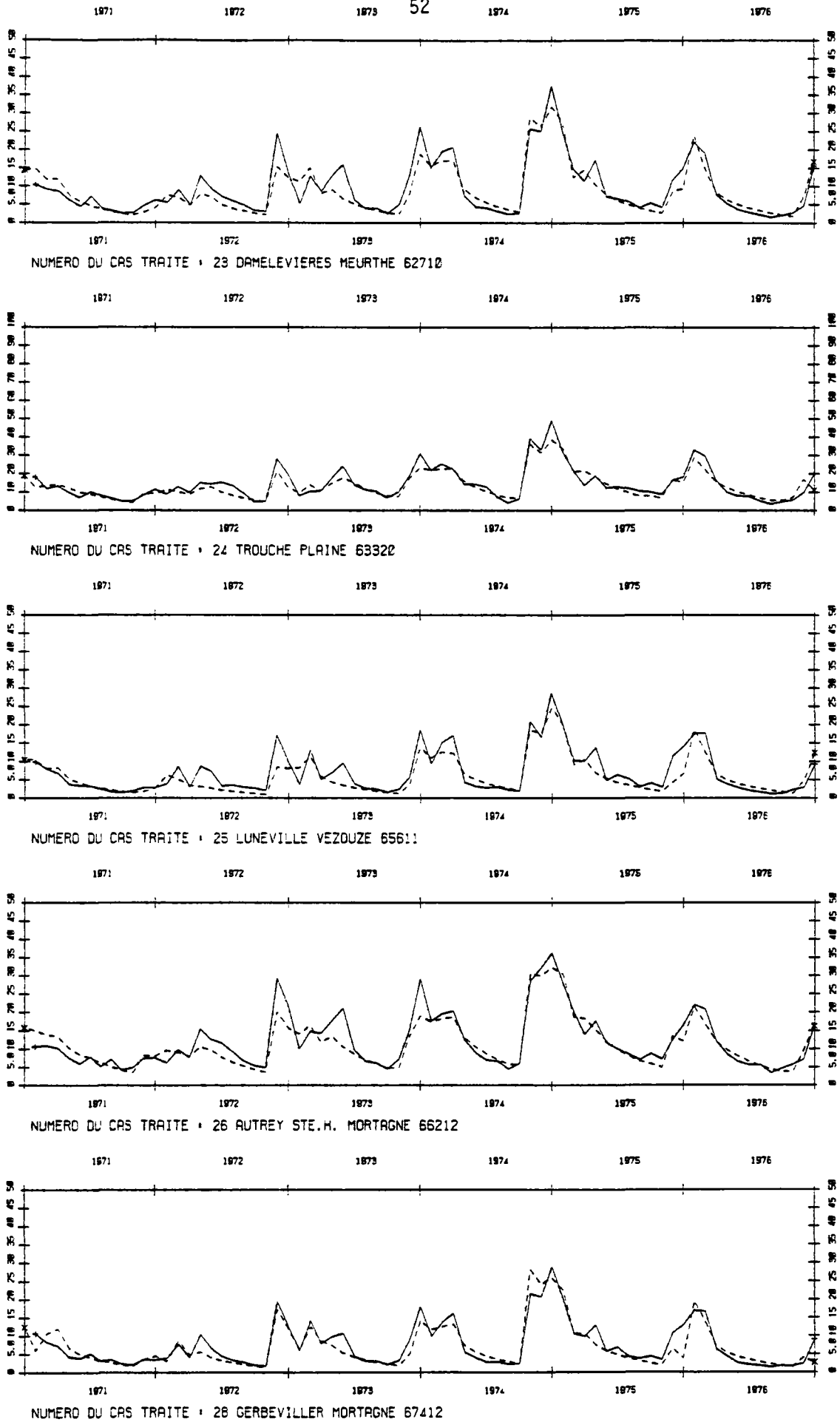


Figure IV.7 : Calage de référence - bassins 23 à 28

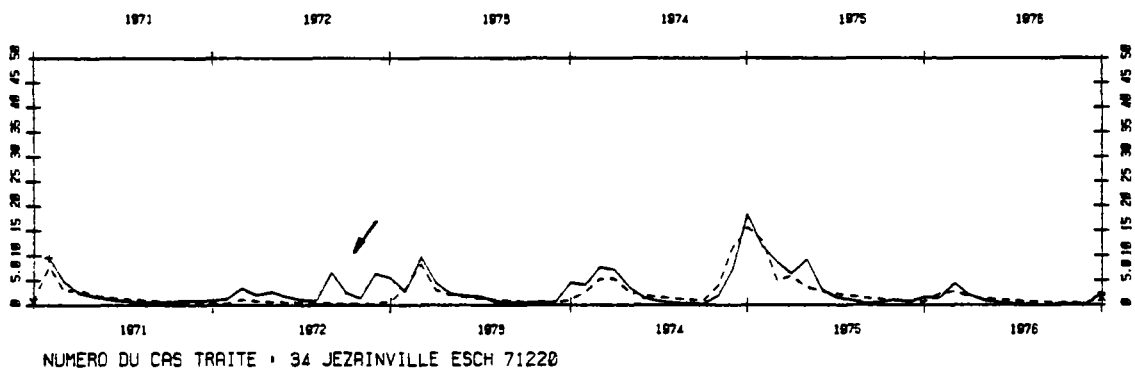
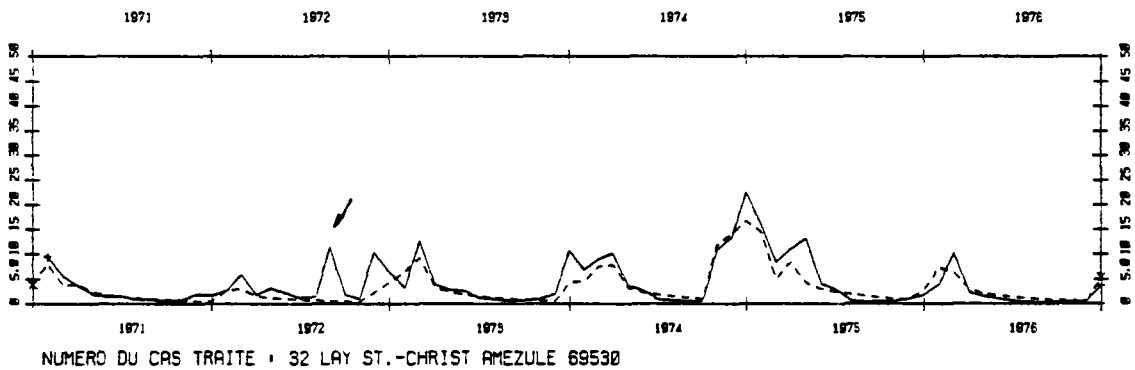
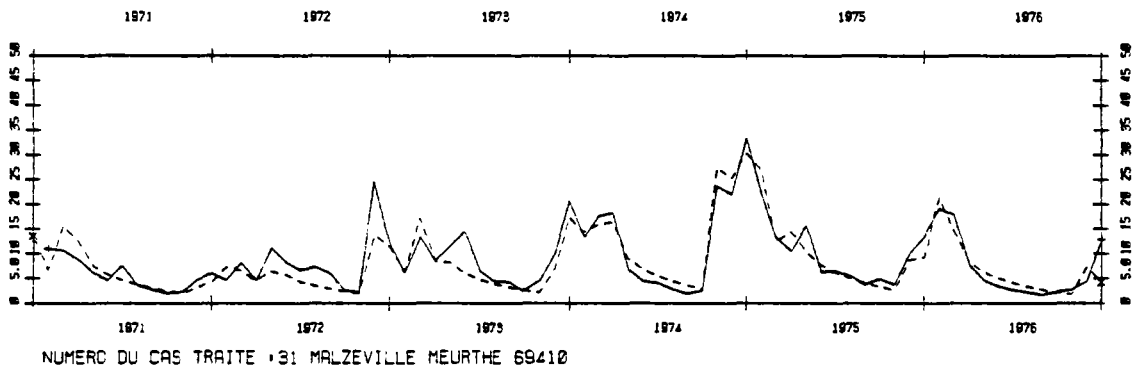
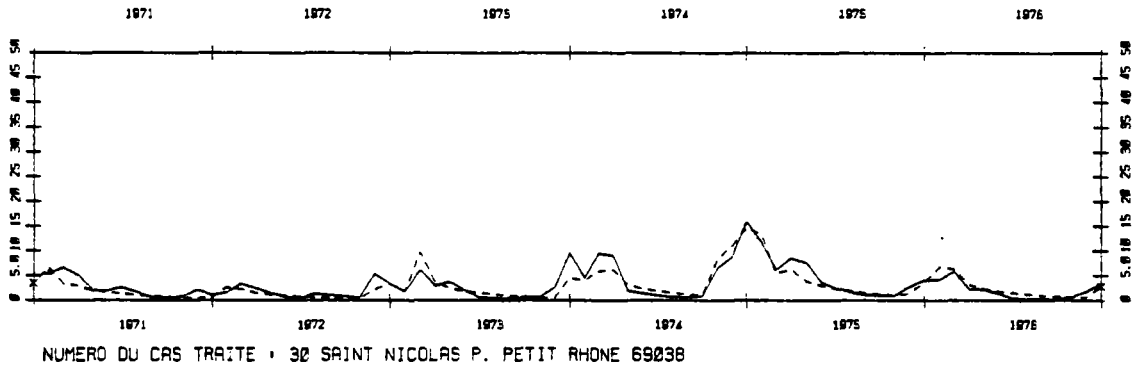
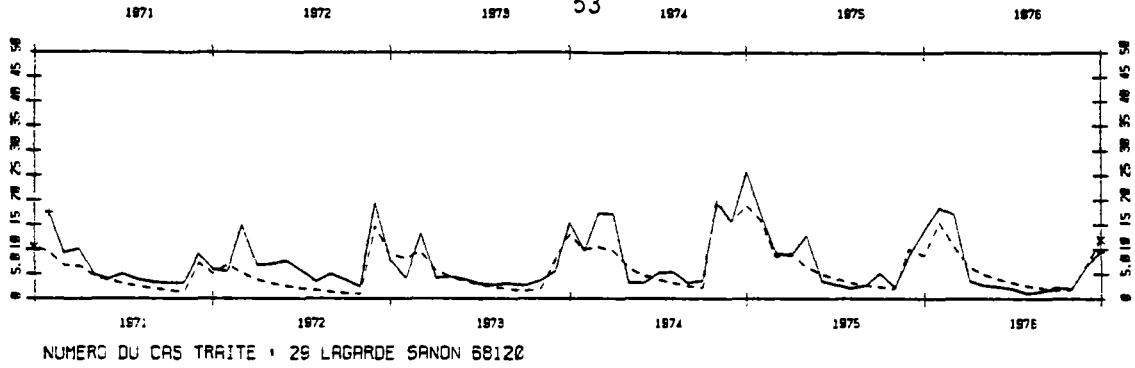


Figure IV.8 : Calage de référence - bassins 29 à 34

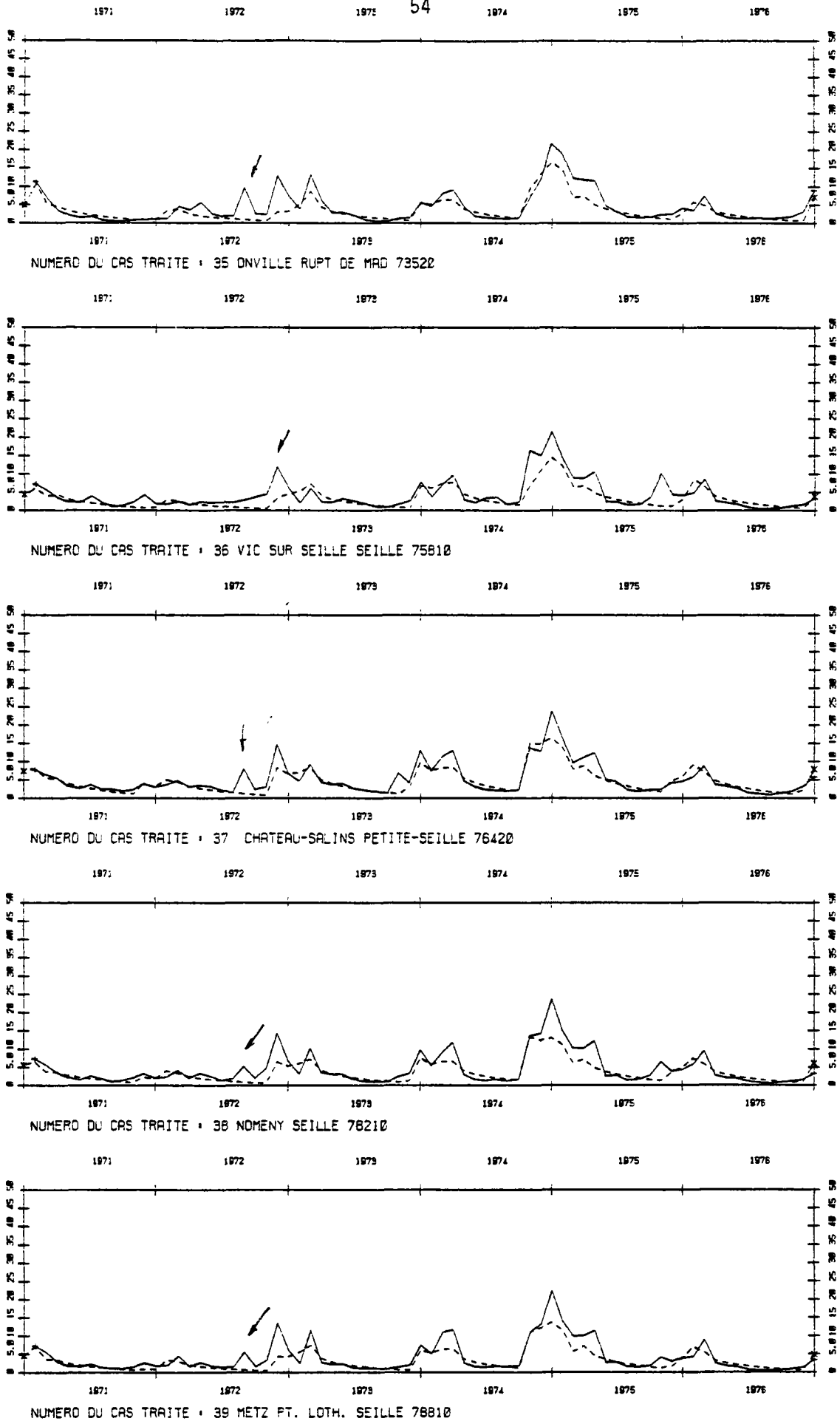


Figure IV.9 : Calage de référence - bassins 35 à 39

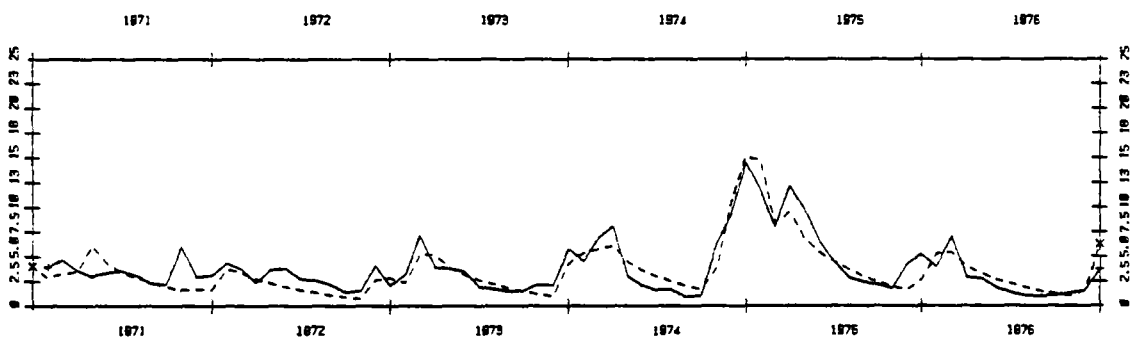
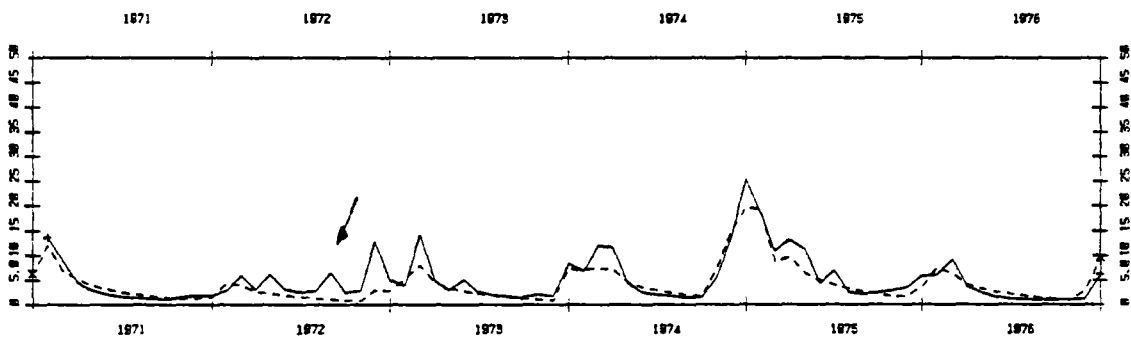
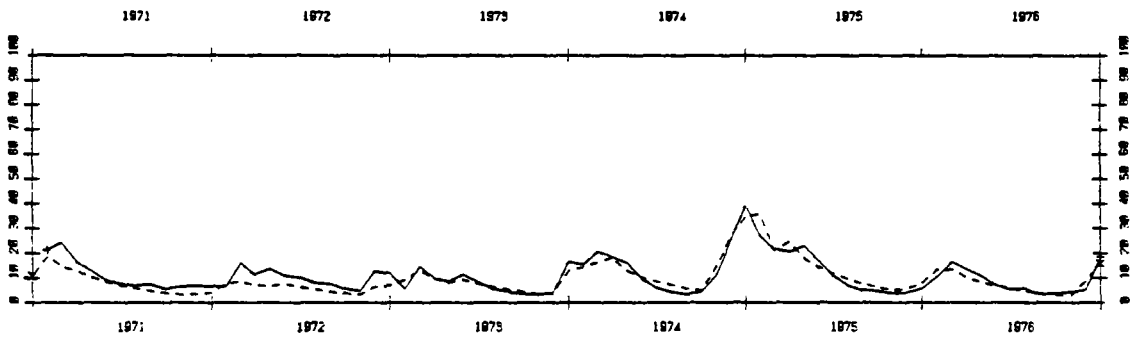
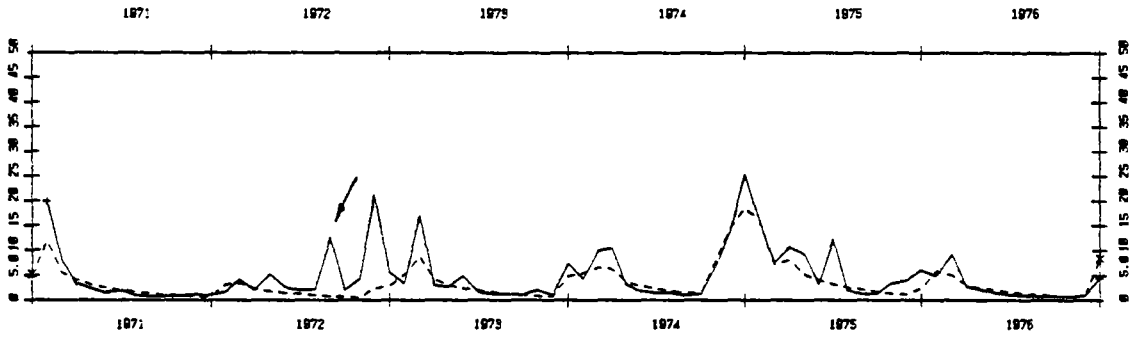
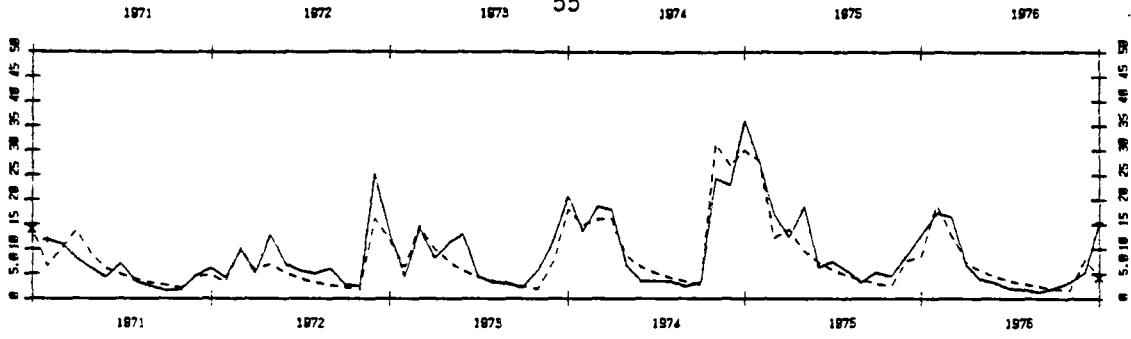


Figure IV.10 : Calage de référence - bassins 40 à 45

Sur les 40 bassins modélisés, 30 (soit 75 %) sont bien modélisés. 10 sont moins bien simulés, au moins pendant une partie du temps. Ces bassins mal simulés sont décrits dans le tableau IV.5 et sur la figure IV.11.

Parmi ces 10 bassins, le n° 19 (Meurthe à Fraize) est un peu particulier, et présente des débits surprenants. Les 9 autres ont les caractéristiques moyennes suivantes :

	9 bassins mal simulés	40 bassins simulés
Pluie annuelle	522 mm	789 mm
Correction de pluie	- 20 %	- 12 %
Réserve superficielle	56 mm	48 mm
Equi- ruissellement	37 mm	87 mm
Ajustement pondéré	0.74	0.80
Ajustement naturel	0.82	0.87

Il apparait ainsi que ces 9 bassins sont tous mal simulés en 1972. Ils ont les caractéristiques communes suivantes :

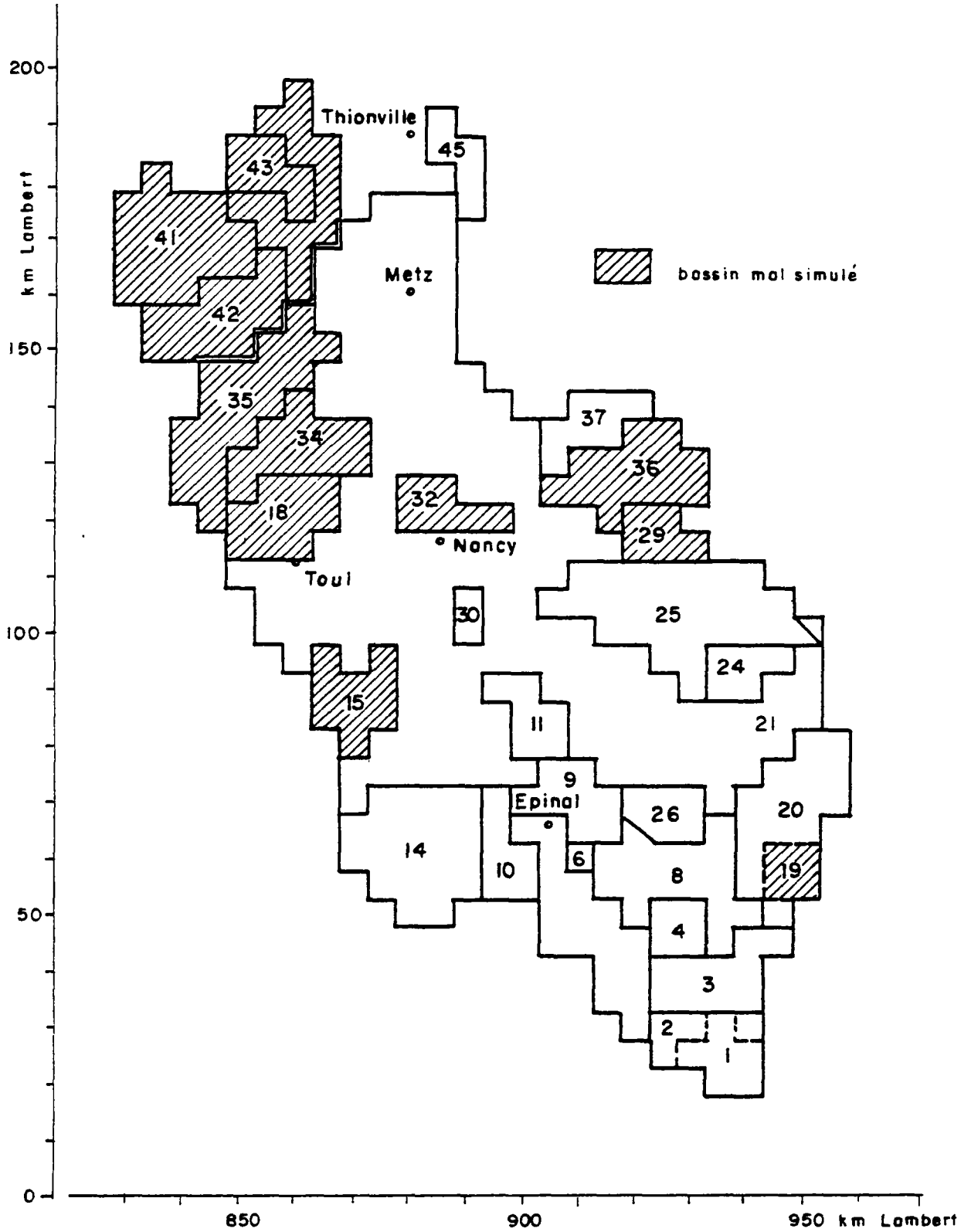
- pluie annuelle corrigée faible,
- forte correction négative de la pluie,
- réserve superficielle normale,
- hauteur d'équi-ruissellement faible,
- coefficients d'ajustement faibles.

Les coefficients d'ajustement traduisent donc bien cette difficulté de simulation ; la correction de pluie qui a été rendue nécessaire pour simuler correctement toute la période 1972-1976, en donnant une forte importance aux étiages, n'a pas permis de simuler correctement l'année 1972 qui est déficitaire.

On a également analysé la qualité de l'ajustement de ce calage de référence au moyen des figures IV.12 à IV.16 qui suivent. Les variables analysées sont :

TABLEAU IV.5 - Calage de référence. Bassins mal simulés

Numéro de modélisation (1 à 40)	Numéro de travail (1 à 45)	Rivière COMMUNE	Coefficient d'ajustement		REMARQUES
			pondéré	naturel	
14	15	Brenou AUTREY	0.79	0.87	1971-1972 mal simulé étiages toujours trop forts
17	18	Terrouin VILLEY ST-E.	0.78	0.83	1972 sous-estimé (données d'étiages mesurés suspectes)
18	19	Meurthe FRAIZE	0.70	0.78	quelques mois abondants mal simulés
26	29	Sanon LAGARDE	0.66	0.83	1972 sous-estimé
29	32	Amezule LAY St-CHRIST	0.80	0.83	1972 nettement sous-estimé pour ces 4 bassins
30	34	Esch JEZAINVILLE	0.73	0.83	
31	35	Rupt de Mad ONVILLE	0.77	0.83	
32	36	Seille VIC SUR SEILLE	0.59	0.76	
37	42	Yron CARTOUCHERIE	0.73	0.73	1972 nettement sous-estimé
39	44	Orne ROSSELANGE	0.80	0.87	1972 sous-estimé

fig. IV-II- Bassins mal simulés

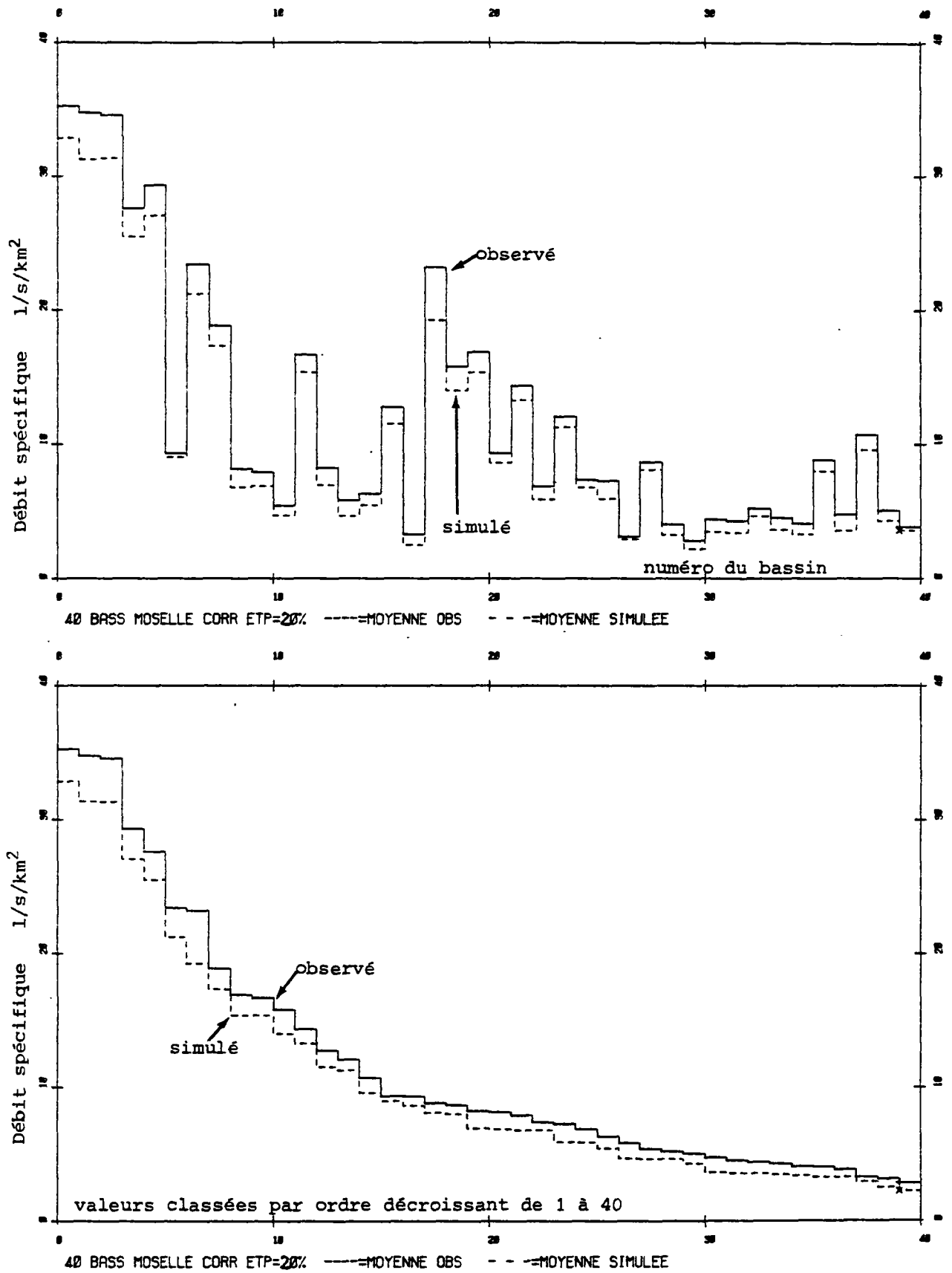


Figure IV.12 : Débit moyen mensuel (spécifique)

Bien que la pondération des écarts soit prévue pour privilégier les forts écarts et les faibles débits, le débit moyen observé est très bien simulé (il est cependant très légèrement sous estimé)

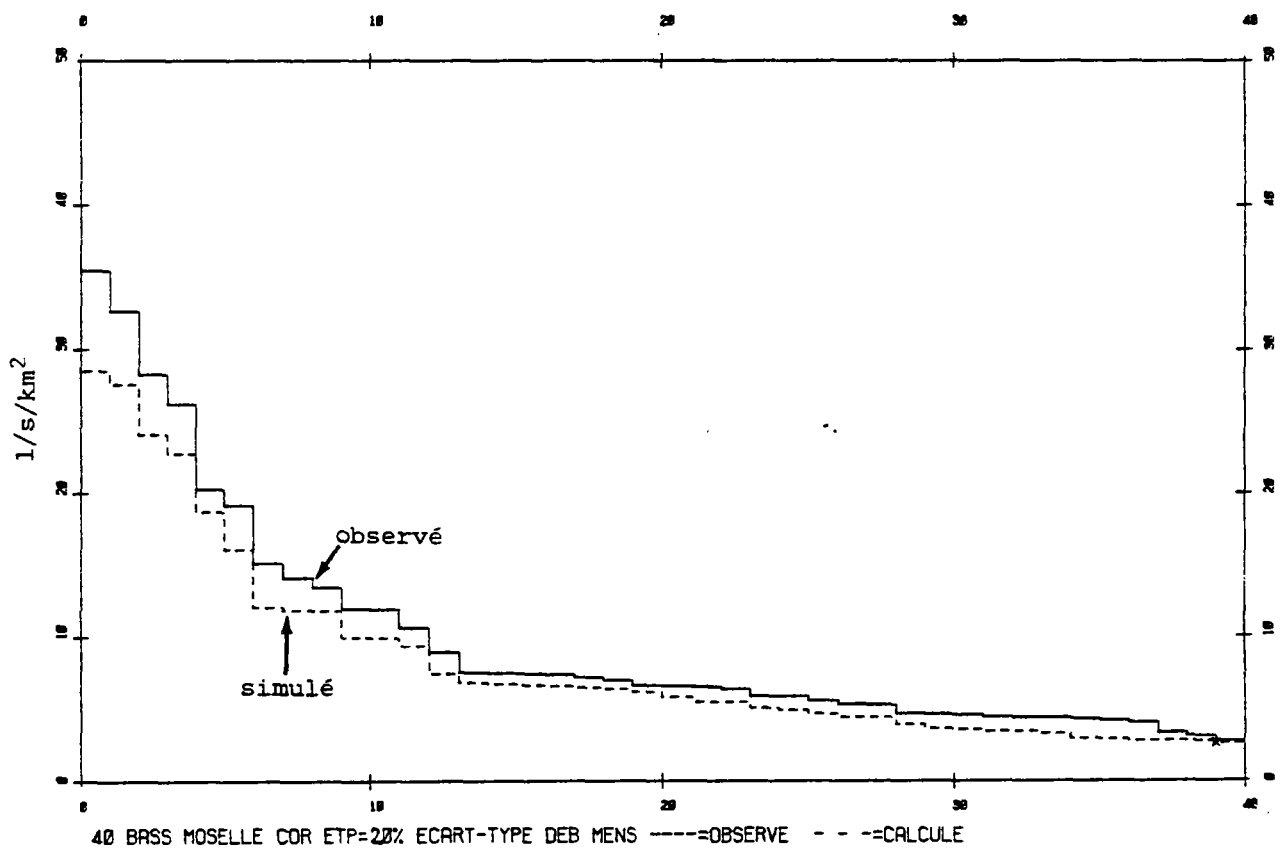
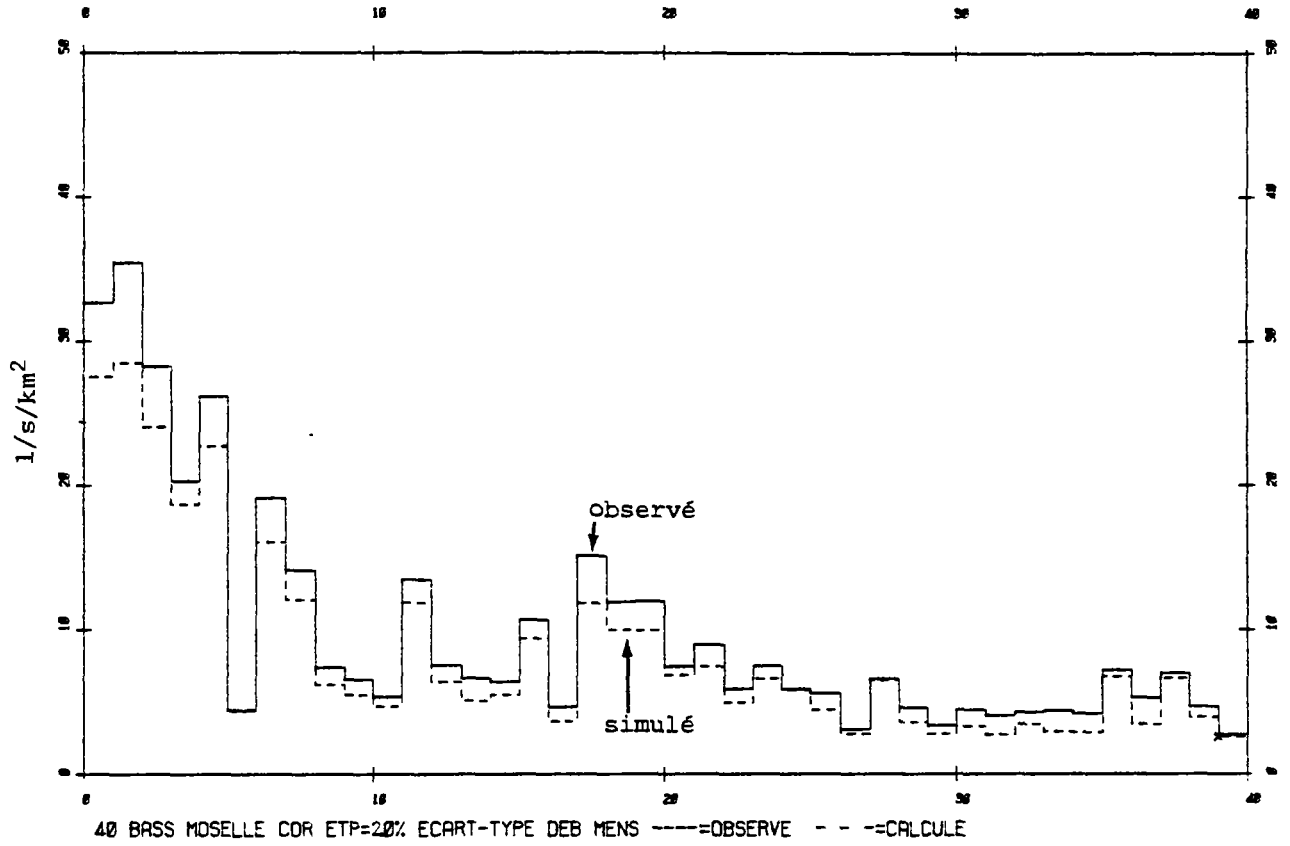


Figure IV.13 : Ecart-type du débit spécifique mensuel

L'écart-type du débit mensuel est très bien simulé pour tous les bassins.

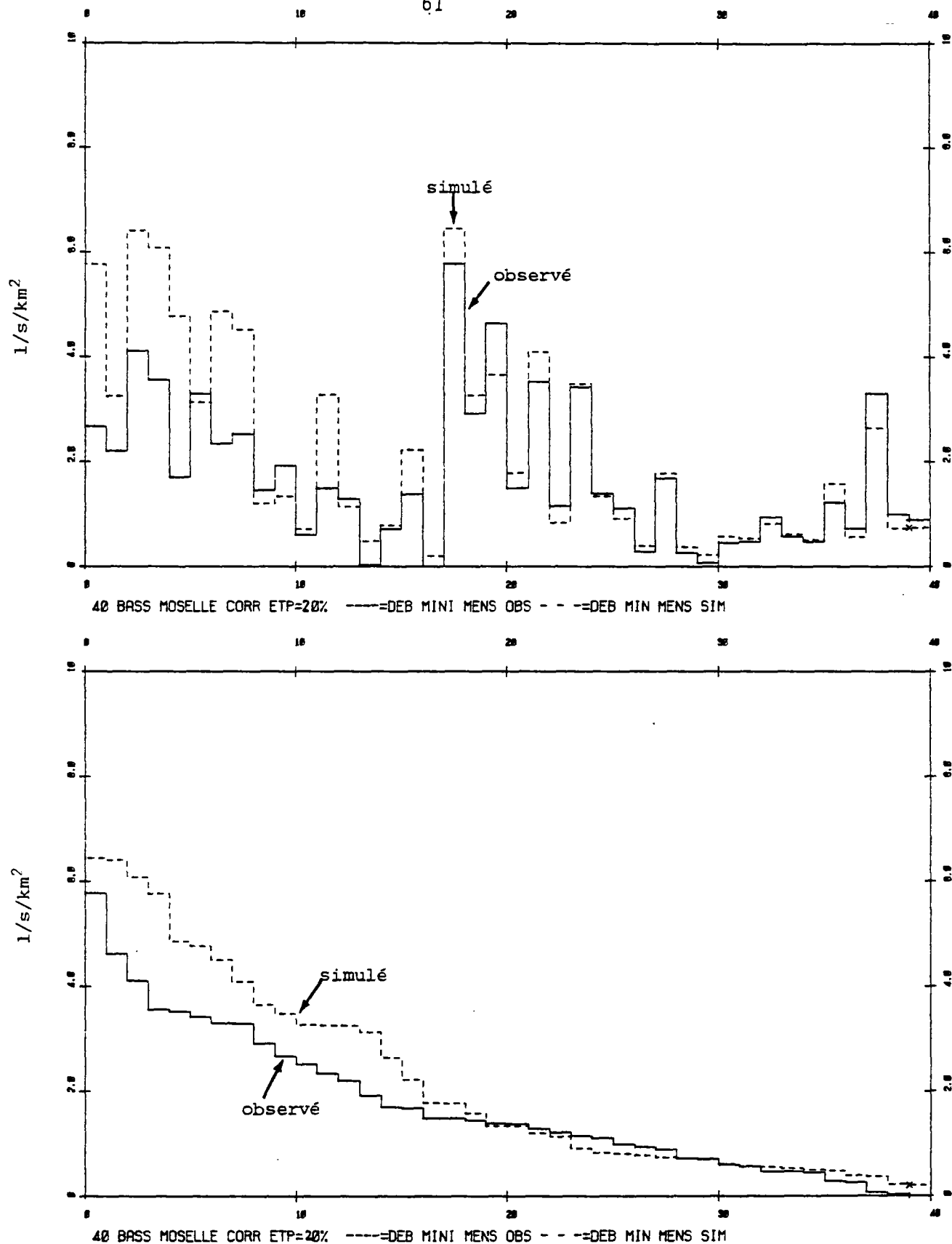


Figure IV.14 : Débit spécifique minimal

Les débits minimaux (mensuels) qui sont généralement observés en 1976 sont bien reproduits sauf ceux des bassins 1 à 15 (c'est-à-dire la Haute Moselle) qui sont surestimés par le modèle.

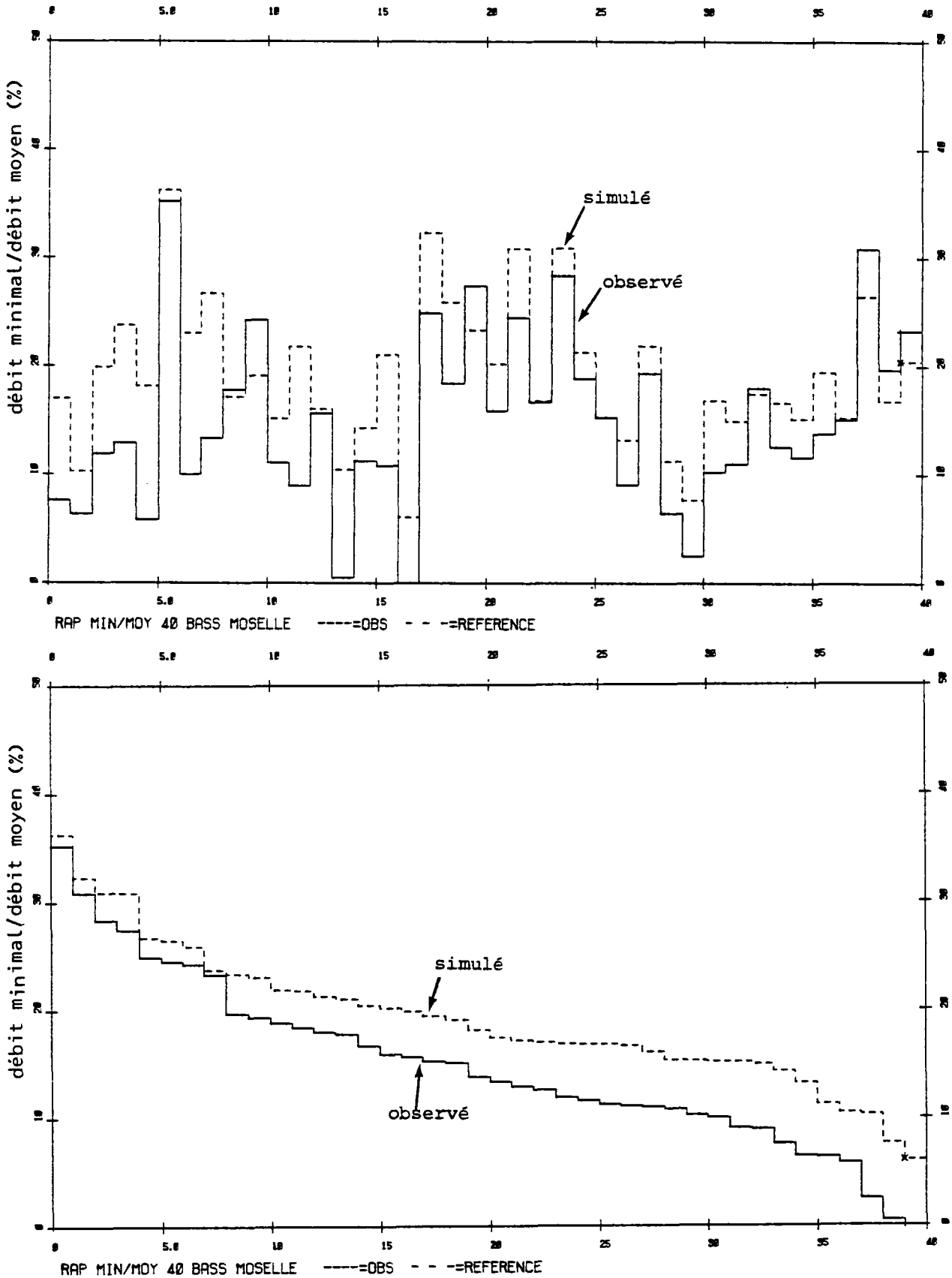


Figure IV.15 : Rapport débit spécifique mensuel minimal divisé par le débit moyen

Les valeurs simulées sont généralement surestimées. La médiane observée est de 14 % du débit moyen ; la valeur médiane calculée est de 18 % du débit moyen (calculé).

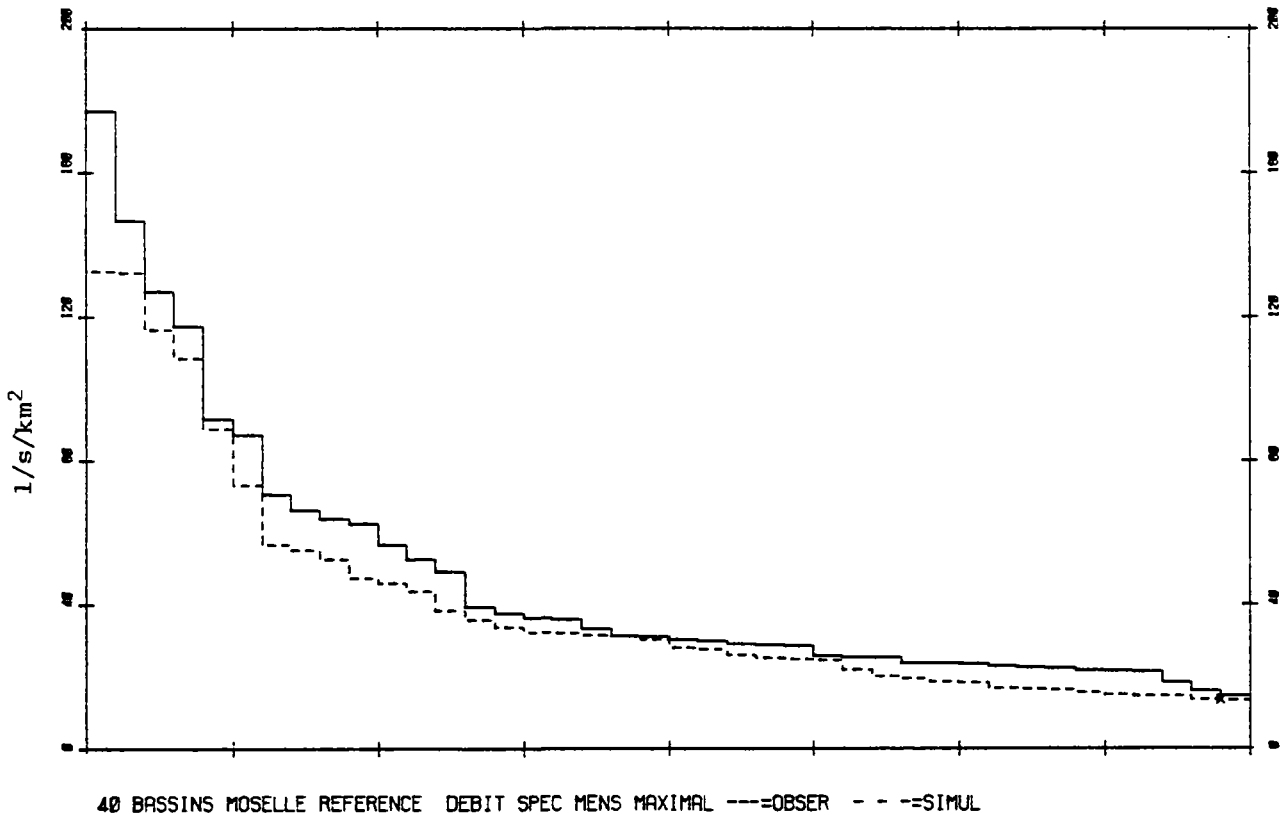
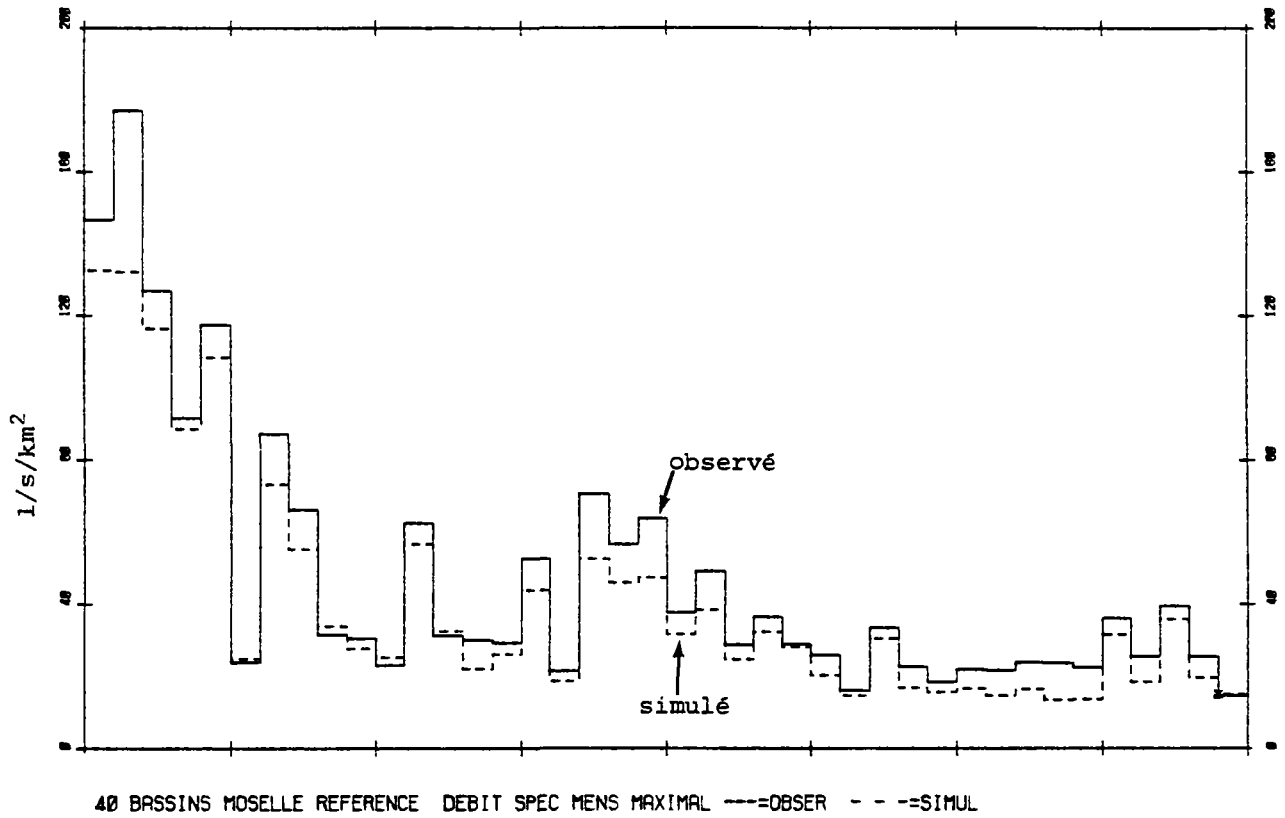


Figure IV.16 : Débit spécifique mensuel maximal

Le débit spécifique mensuel maximal est bien simulé pour la majorité des bassins malgré la pondération des écarts introduit qui lui donne peu de poids.

- * La comparaison des débits spécifiques mensuels moyens observés et calculés (figure IV.12) montre que les débits moyens sont bien reproduits bien que la pondération donne un poids important surtout aux faibles débits.
- * La comparaison des écarts-types des débits spécifiques mensuels observés et calculés (figure IV.13) montre que l'écart-type, donc la variabilité des débits, est très bien reproduite, ce qui est très important si le modèle est utilisé en extension de données pour analyser la variabilité d'un remplissage de réservoir ou d'une production de micro-centrale par exemple.
- * La comparaison du débit spécifique mensuel minimal de la période 1971 à 1976 observés et calculés (figure IV.14) : ces débits minimaux qui surviennent généralement au cours de l'été 1976 sont bien reproduits, sauf ceux du bassin de la Haute-Moselle que le modèle surestime.
- * Rapport du débit spécifique mensuel minimal au débit spécifique moyen (figure IV.15) : ce rapport adimensionnel peut caractériser les bassins, indépendamment des précipitations moyennes. Il est (comme précédemment) généralement surestimé par le modèle. La médiane observée est de 14 % du débit spécifique moyen (observé) ; la médiane calculée est de 18 % du débit moyen (calculé).
- * La comparaison du débit spécifique mensuel maximal : le débit spécifique mensuel est bien simulé pour tous les bassins, malgré la pondération des écarts introduits qui lui donne peu de poids.

4. STABILITE DU CALAGE

Avant d'analyser l'influence des hypothèses choisies pour le calcul des lames ou l'imposition de certains paramètres, il était nécessaire d'analyser la stabilité ou la robustesse du calage de référence. On s'est donc attaché à voir si les valeurs des paramètres et de l'ajustement, obtenues en fin de calage, étaient bien uniques et ne dépendaient pas des valeurs initiales des paramètres. Dans ce but, on a réalisé un deuxième calage pour les 40 bassins modélisés avec pour chaque bassin les valeurs initiales suivantes pour les 3 paramètres optimisés :

- correction globale de pluie nulle,
- capacité de la réserve superficielle de 50 mm, c'est-à-dire proche de la valeur médiane des 40 bassins obtenue dans le calage de référence,

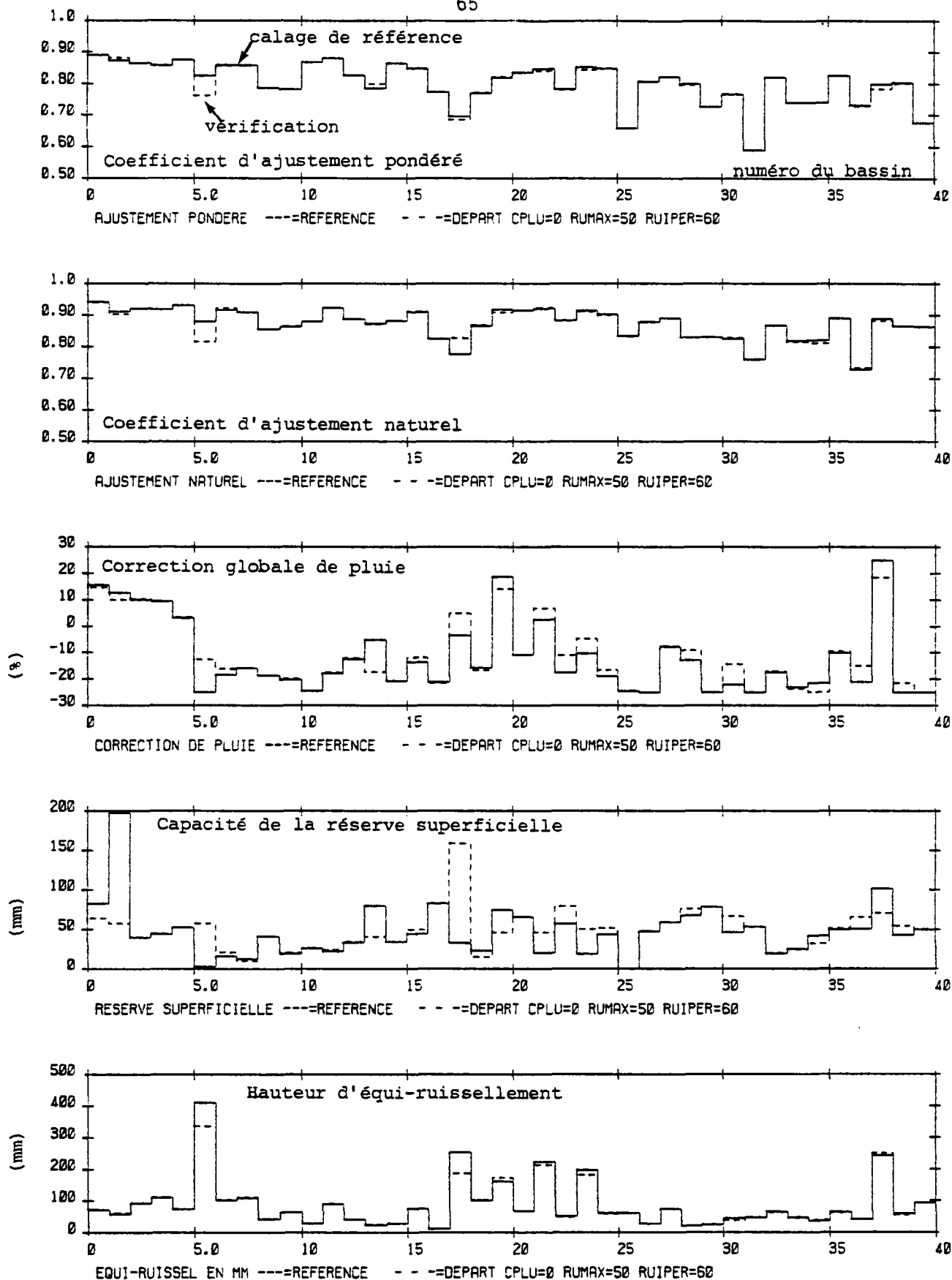


Figure IV.17 : Contrôle de la stabilité du calage

Pour vérifier la stabilité des paramètres obtenus lors du calage de référence après optimisation, on a refait un calage avec pour valeurs initiales les valeurs suivantes : pas de correction de pluie, réserve superficielle 50 mm, équi-ruisselement 60 mm. Il apparaît que les paramètres obtenus en fin d'optimisation sont quasi identiques à ceux du calage de référence (à 2 exceptions près).

- hauteur d'équi-ruissellement de 60 mm : proche elle aussi de la médiane des 40 bassins.

Après optimisation (par enchaînement de 2 passages de 70 itérations chacun pour chacun des bassins), on a obtenu de nouveaux jeux pour les 2 coefficients d'ajustement (pondéré et non pondéré) et les 3 paramètres (voir figure IV.17). Cette figure montre qu'on retrouve des coefficients d'ajustement quasiment identiques (à part une légère différence pour le bassin n° 6). Les paramètres identifiés sont tous extrêmement proches de ceux du calage de référence, ce qui montre donc très nettement la stabilité et l'unicité du calage. On note cependant deux exceptions :

- * Le bassin n° 2 (Rupt-sur-Moselle) pour lequel la capacité de la réserve superficielle qui était anormalement élevée (200 mm) est ramenée à une valeur beaucoup plus raisonnable (de 50 mm) pour un ajustement aussi bon. En fait, pour ce bassin, la capacité de la réserve superficielle n'a pas un rôle très important, car elle ne joue que très rarement pour ce bassin abondant.
- * Le 18ème bassin (Fraize/Meurthe) fait apparaître une capacité plus grande dans le calage de vérification (probablement pour les mêmes raisons).

En conclusion, il apparaît nettement que le calage de référence est stable et que les valeurs des paramètres obtenues par maximisation du coefficient d'ajustement pondéré sont uniques et peuvent être analysées et comparées à celles obtenues avec d'autres hypothèses de calcul.

CHAPITRE 5

INFLUENCE DE LA PONDERATION DES ECARTS

Le calage de référence a été réalisé avec un index de pondération égal à 2 qui donne donc plus de poids aux faibles débits. Il est intéressant de comparer les résultats obtenus avec une autre pondération.

La figure V.1 montre que les coefficients d'ajustement naturels (sans pondération) calculés sur les séries des calages de référence (donc obtenues par optimisation des écarts pondérés) sont beaucoup plus élevés que les coefficients d'ajustements pondérés.

On a également réalisé un calage en optimisant (c'est-à-dire en maximisant) le coefficient d'ajustement non pondéré (par minimisation des écarts naturels).

1. COEFFICIENTS D'AJUSTEMENTS

* *Coefficient d'ajustement naturel.* La figure V.2 montre, ce qui est logique, que quand on effectue un calage sur les écarts naturels, c'est-à-dire quand on cherche à maximiser le coefficient d'ajustement naturel, ce coefficient d'ajustement est un peu plus élevé que quand on cherche à maximiser le coefficient d'ajustement pondéré (la médiane est de 0.90 au lieu de 0.88). La différence est cependant assez faible.

* *Coefficient d'ajustement pondéré.* La figure V.3 montre, par contre, que si on maximise le coefficient d'ajustement naturel, on obtient un coefficient d'ajustement nettement moins bon. La médiane est de 0.77 au lieu de 0.82, mais on observe surtout que les bassins qui étaient mal simulés le sont encore beaucoup plus mal. Les 25 % plus mal simulés (10 sur 40) des bassins ont des coefficients d'ajustement dont la meilleure valeur passe de 0.77 à 0.66.

2. DEBITS CARACTERISTIQUES CALCULES

* *Débit spécifique moyen.* Le débit spécifique moyen par contre est parfaitement bien reproduit comme le montre la figure V.4. Ceci n'était pas évident, car d'une part le coefficient d'ajustement n'est pas un coefficient de corrélation (on impose la surface du bassin versant et un débit extérieur nul), d'autre part la correction globale de pluie est bridée à $\pm 25\%$.

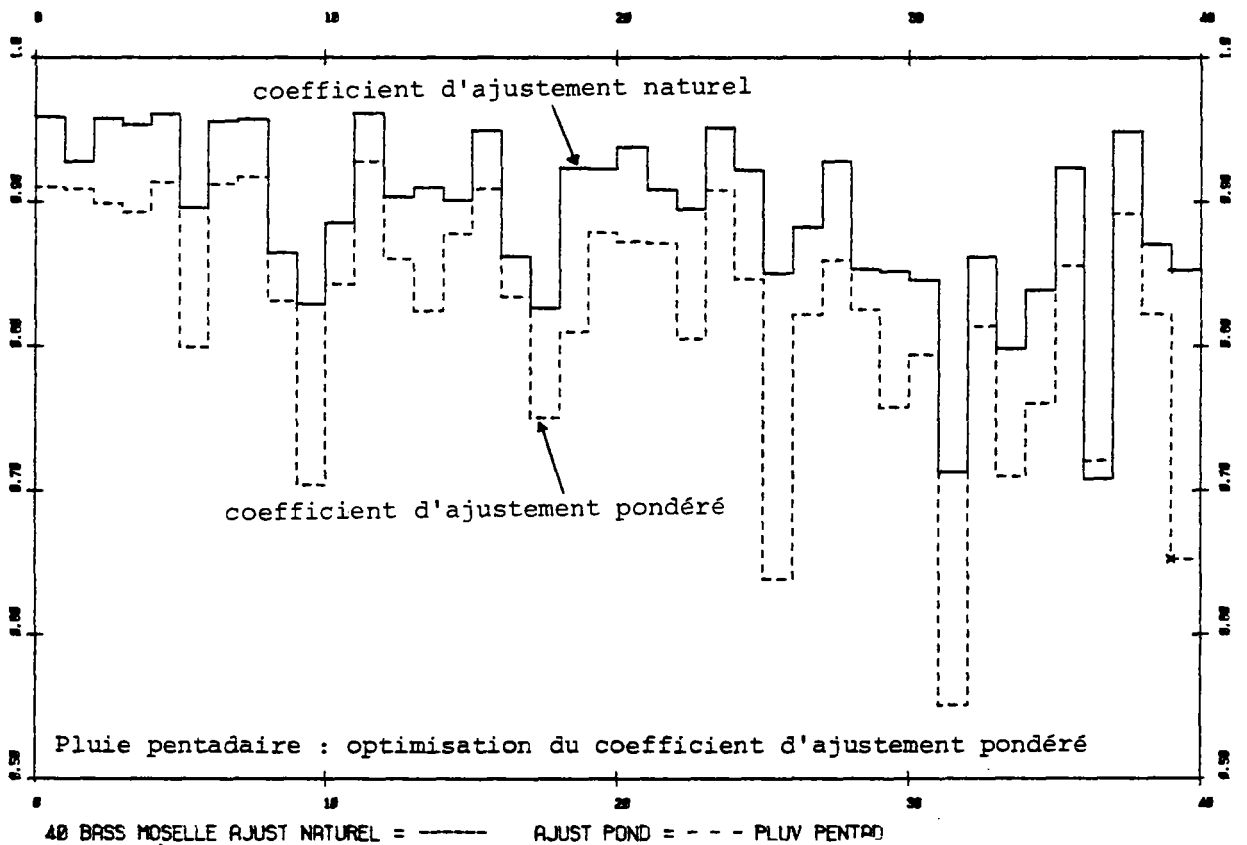
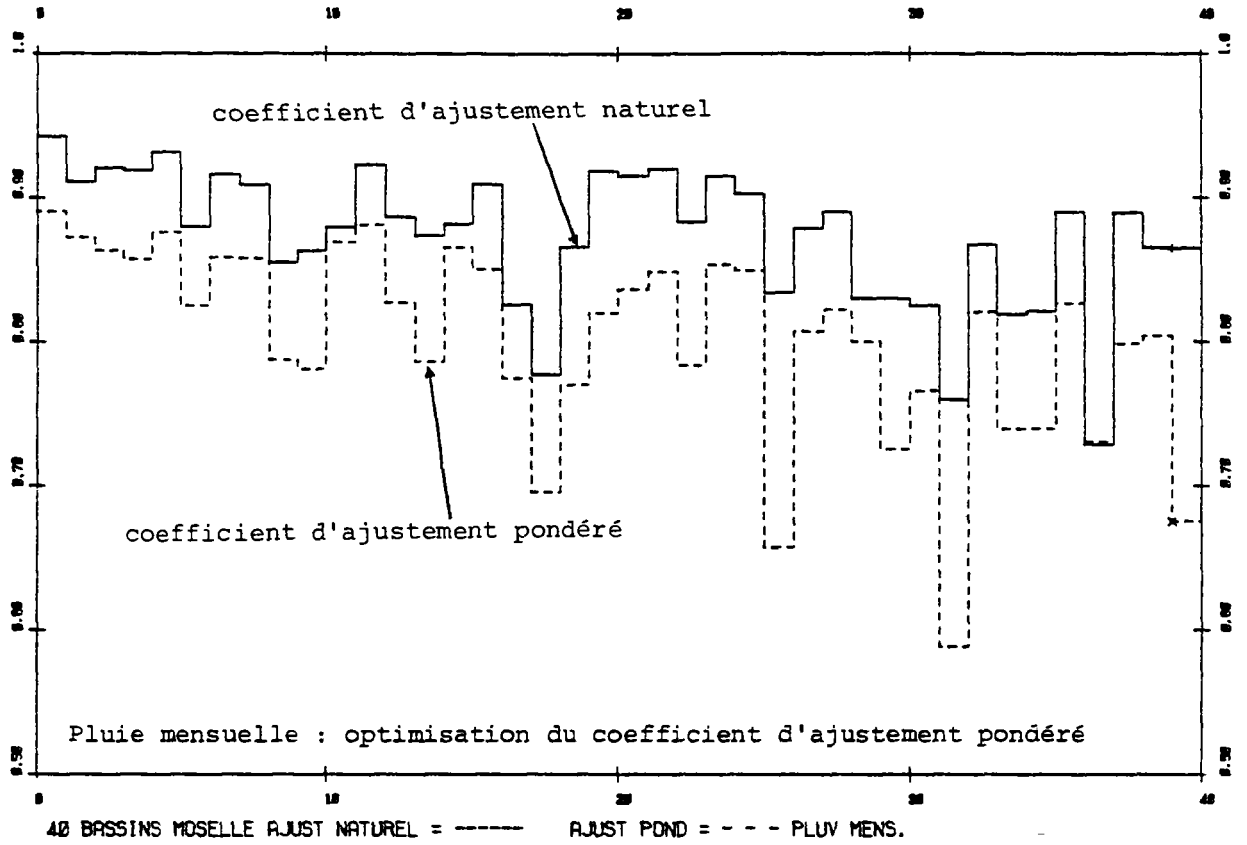


Figure V.1 : Influence de la pondération

Les coefficients d'ajustement pondérés (qui donnent plus d'importance aux étiages) sont nettement moins élevés que les coefficients d'ajustement naturels.

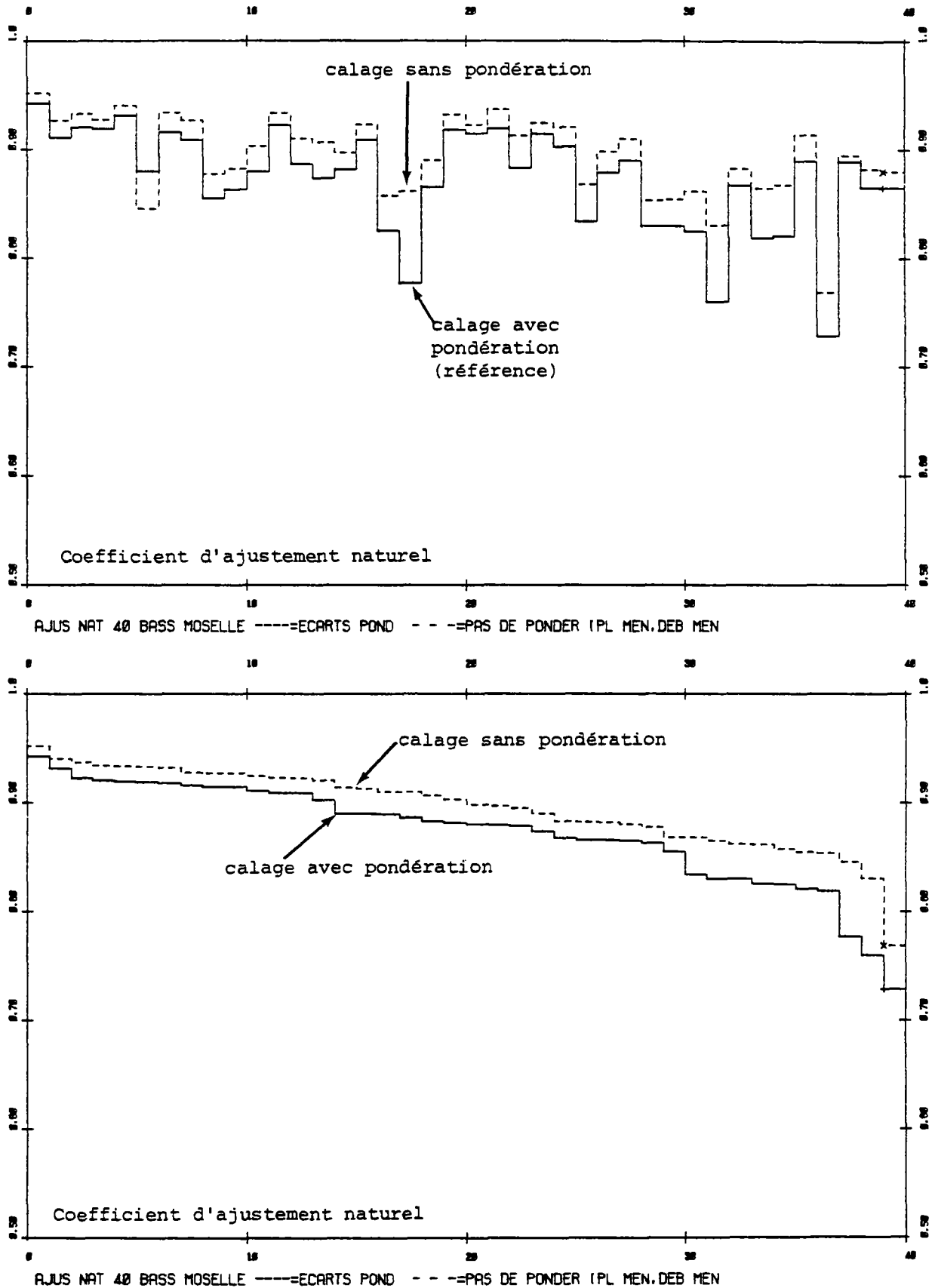


Figure V.2 : Influence de la pondération sur le coefficient d'ajustement naturel

Quand on n'introduit pas de pondération, on cherche à maximiser directement le coefficient d'ajustement naturel. Il est normal de trouver qu'il est plus élevé que quand on cherche à maximiser un coefficient pondéré (médiane 0.90 au lieu de 0.88).

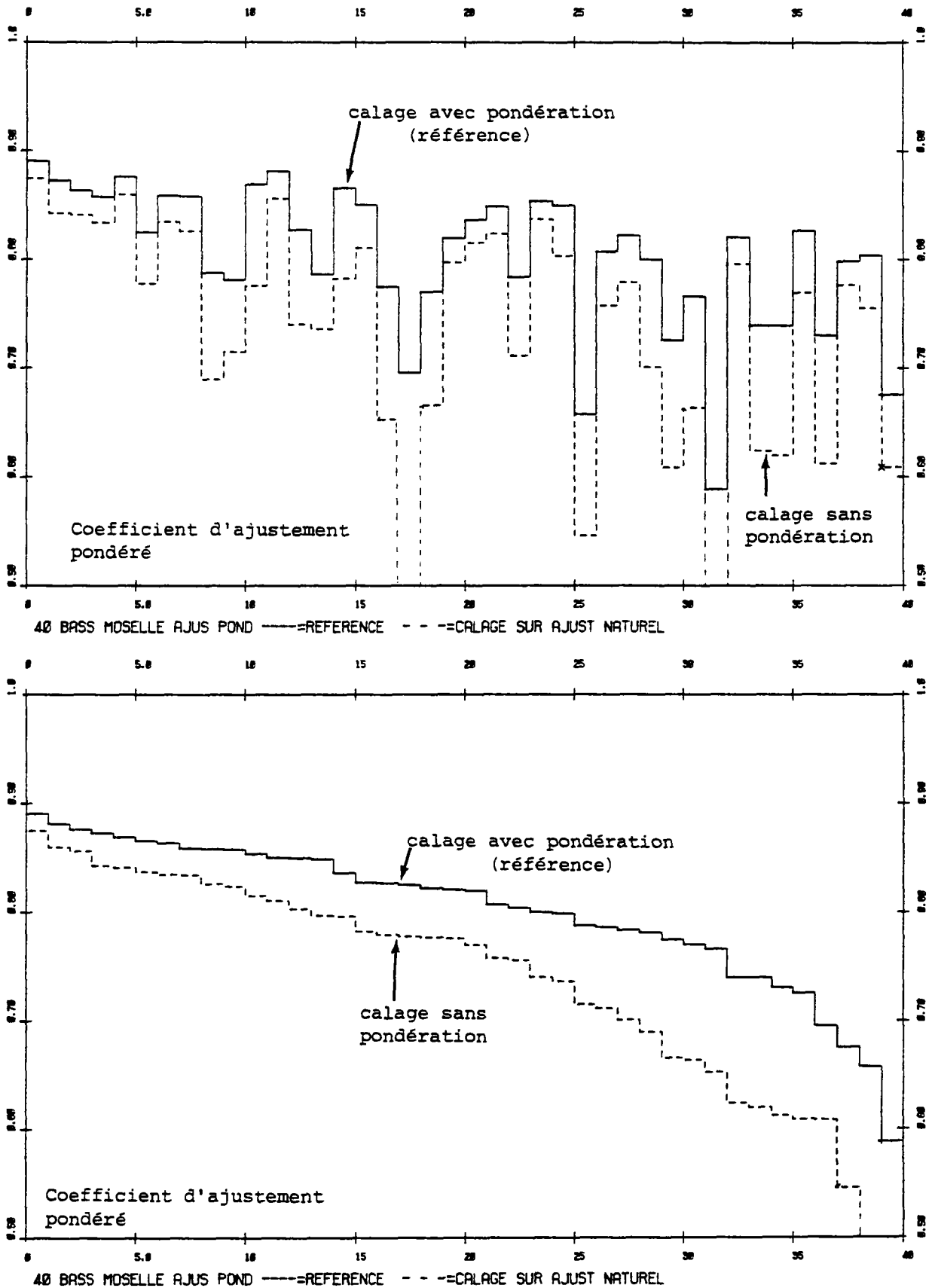


Figure V.3 : Influence de la pondération sur le coefficient d'ajustement pondéré

Le calage par maximisation du coefficient d'ajustement naturel (sans pondération) donne un ajustement pondéré nettement moins bon. Les bassins qui étaient mal simulés sont encore beaucoup plus mal simulés. (Il est évident qu'un bassin parfaitement simulé reste parfaitement simulé quelle que soit la pondération des écarts qui sont alors extrêmement petits).

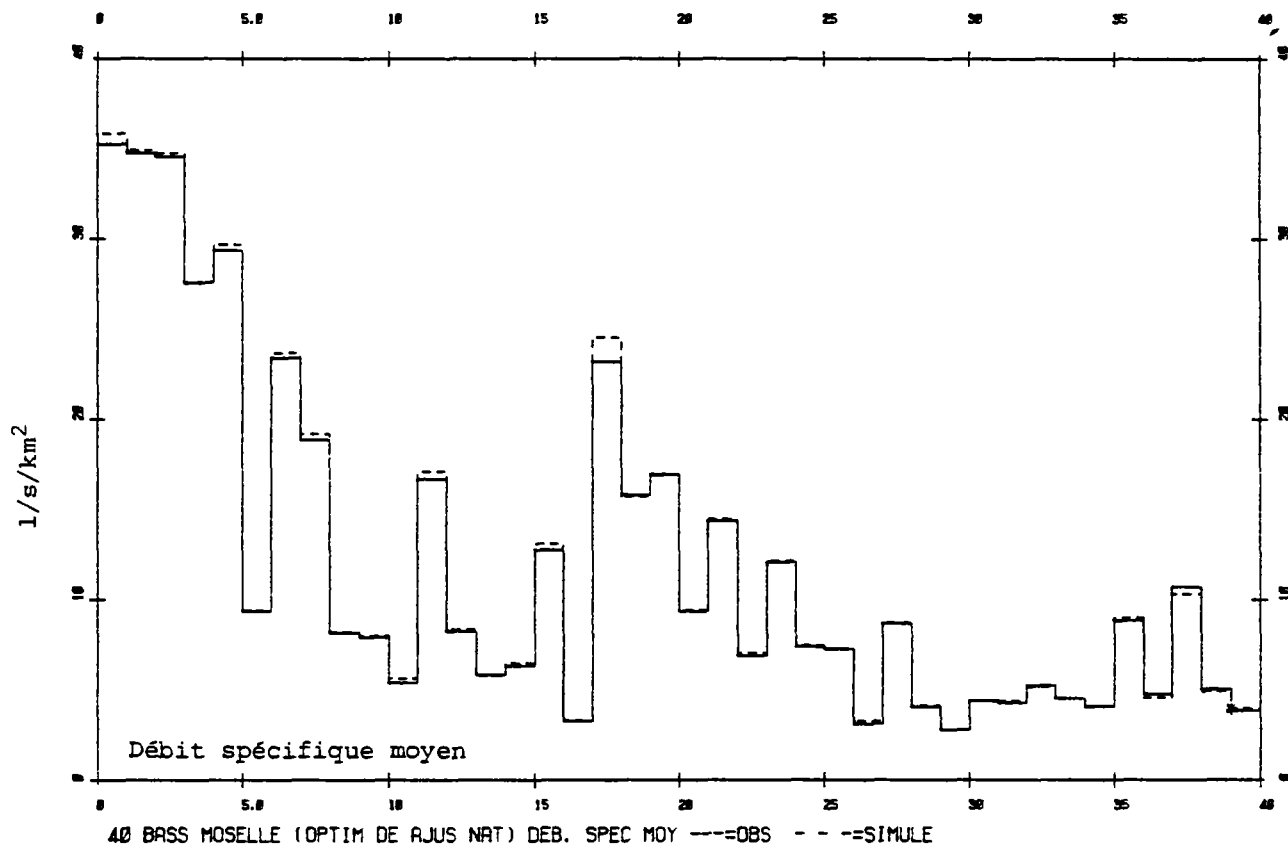


Figure V.4 : Influence de la pondération sur Les débits spécifiques calculés

En optimisant le coefficient d'ajustement naturel, on minimise la somme des carrés des écarts. On arrive ainsi à une simulation quasi parfaite du débit moyen (ce n'était pas évident a priori car la correction des pluies est bridée à $\pm 25\%$ et la correction d'ETP est imposée à $+20\%$).

* *Débit spécifique minimal.* Les débits spécifiques minimaux (figure V.5) sont plus mal simulés, ce qui est assez logique, car ils ont moins de poids dans la pondération. Ces débits spécifiques sont généralement sur-estimés par le modèle (surtout les plus forts d'entre eux). On voit donc que le modèle ne peut pas simuler parfaitement tous les débits. Ou bien (avec pondération), il sous-estime un peu la moyenne et simule correctement les débits minimaux ; ou bien (sans pondération) il simule parfaitement la moyenne, mais sur-estime les débits minimaux.

3. PARAMETRES OBTENUS

* *Corrections de pluie.* La figure V.6 montre nettement que les corrections de pluies identifiées sans pondération sont nettement moins négatives. La médiane des correction est de -10%, au lieu de -17%. Avec cette correction plus faible, on obtient une très bonne reproduction des débits spécifiques moyens. Cependant, les débits minimums sont sur-estimés. Il convient de remarquer que même sans pondération il faut diminuer globalement les pluies de 10 % pour équilibrer le bilan.

* *Capacité de la réserve superficielle.* Les capacités de réserves superficielles identifiées sont très comparables (figure V.7), on voit cependant deux exception : les bassins de numéro de modélisation 18 et 19. Pour ces bassins, il se produit cependant une certaine compensation. Leur réserve superficielle est augmentée (ce qui permet plus d'évapotranspiration réelle), mais leur correction globale de pluie est augmentée (ce qui produit plus d'alimentation).

4. SIMULATION DES DEBITS MENSUELS

* *Simulation.* La figure V.8 montre les simulations obtenues pour les bassins n° 11 à 16. La comparaison avec la figure V.9 (calage de référence avec pondération) montre que les périodes de tarissement et les bas débits en général sont mal simulés avec le calage sans pondération.

On a également examiné en particulier l'influence de la pondération sur le bassin de la Moselle à Hauconcourt (le plus grand), ainsi que les 3 plus gros bassins qui le composent. Pour chaque caractéristique, on donne entre parenthèses la valeur du calage de référence. (voir tableau de la page 80).

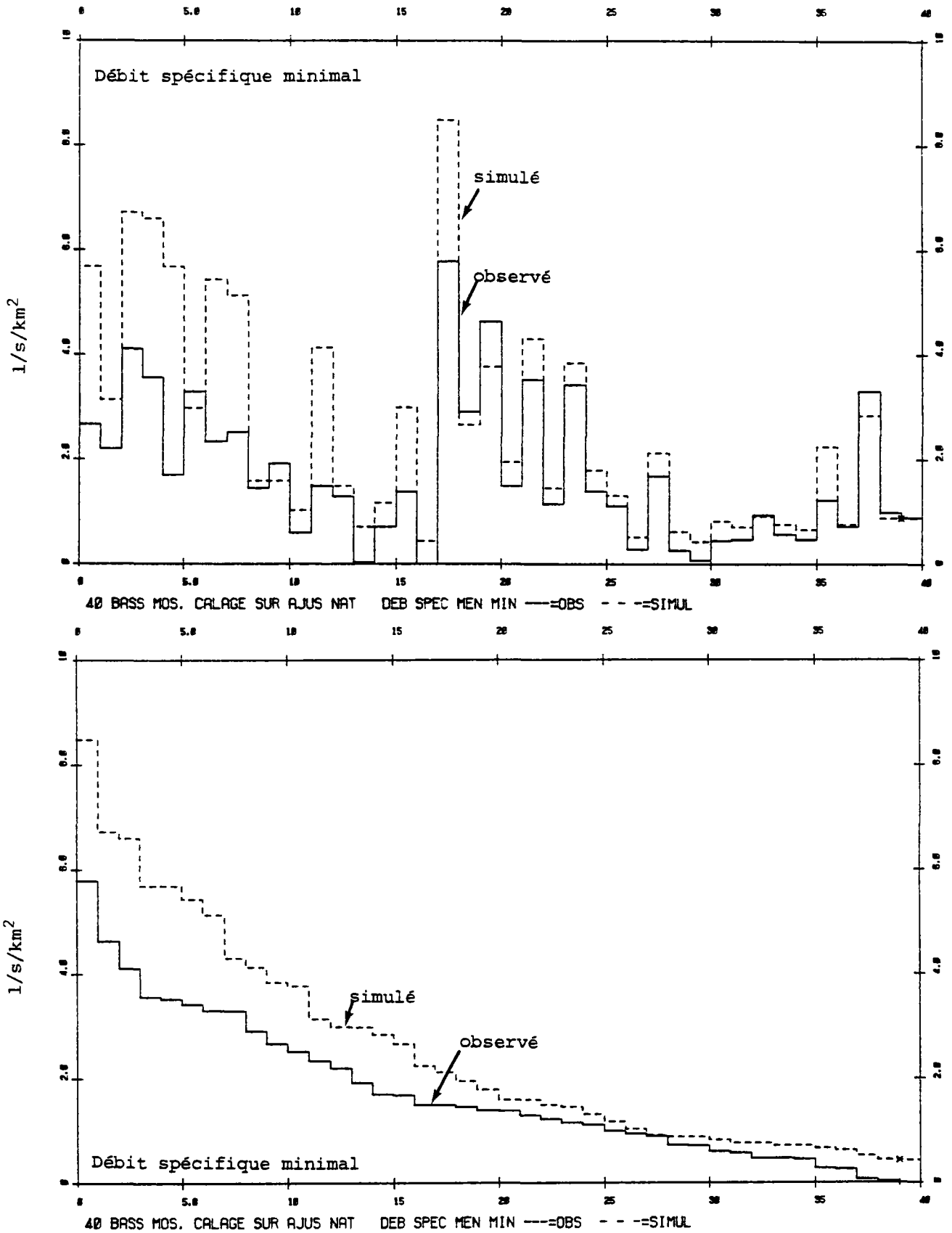


Figure V.5 : Influence de la pondération sur les débits minimaux calculés

Par comparaison avec le calcul sans pondération, il apparaît que les débits spécifiques minimaux sont plus mal simulés quand on effectue un calage sur le coefficient d'ajustement naturel, ce qui est logique.

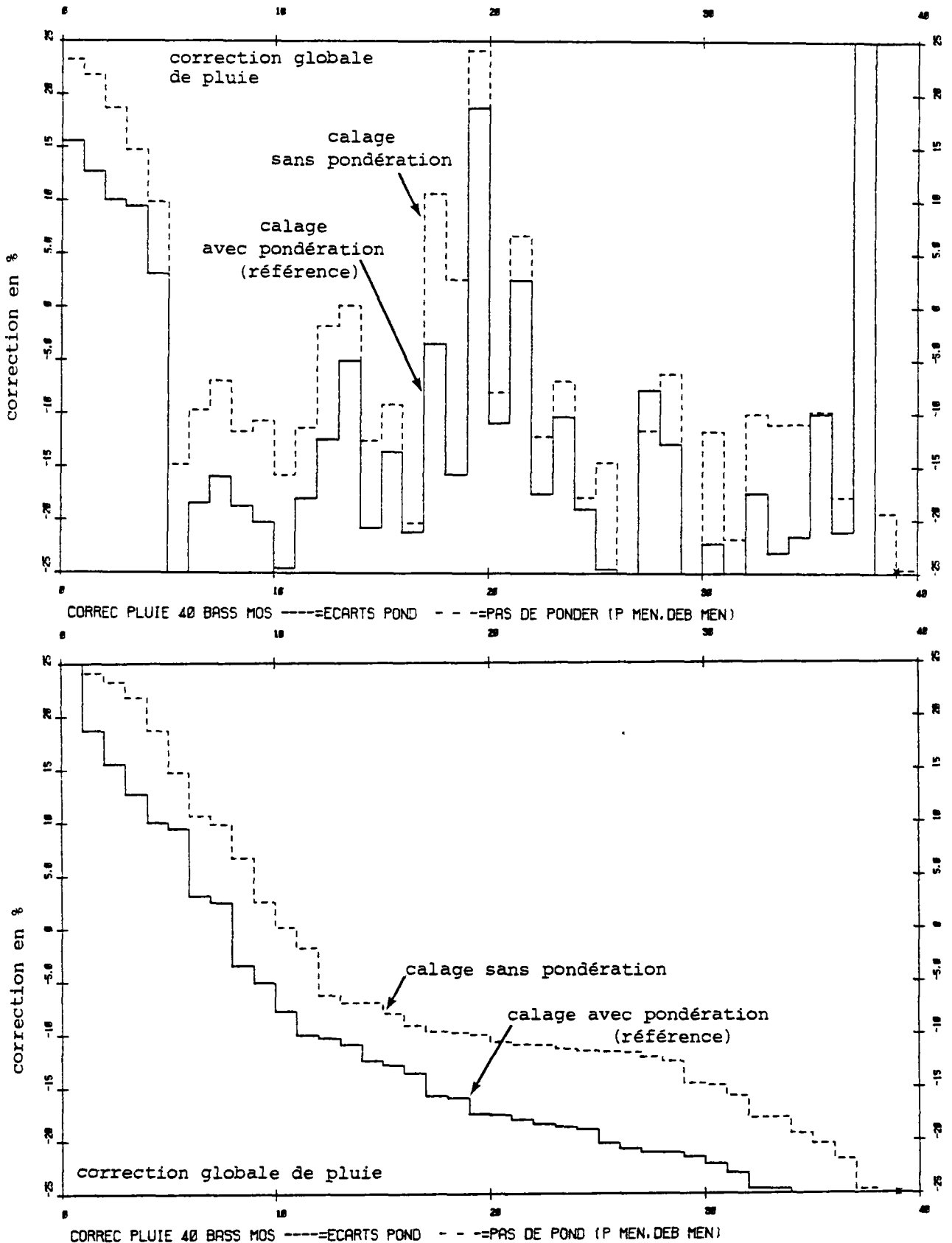


Figure V.6 : Influence de la pondération sur les corrections de pluie

Il apparaît nettement que la simulation avec des écarts pondérés privilégiant les étiages identifie des corrections qui tendent à diminuer beaucoup plus les pluies (médiane de -17 % contre -10 % sans pondération). En effet, on a vu qu'avec des écarts pondérés le débit moyen est sous-estimé.

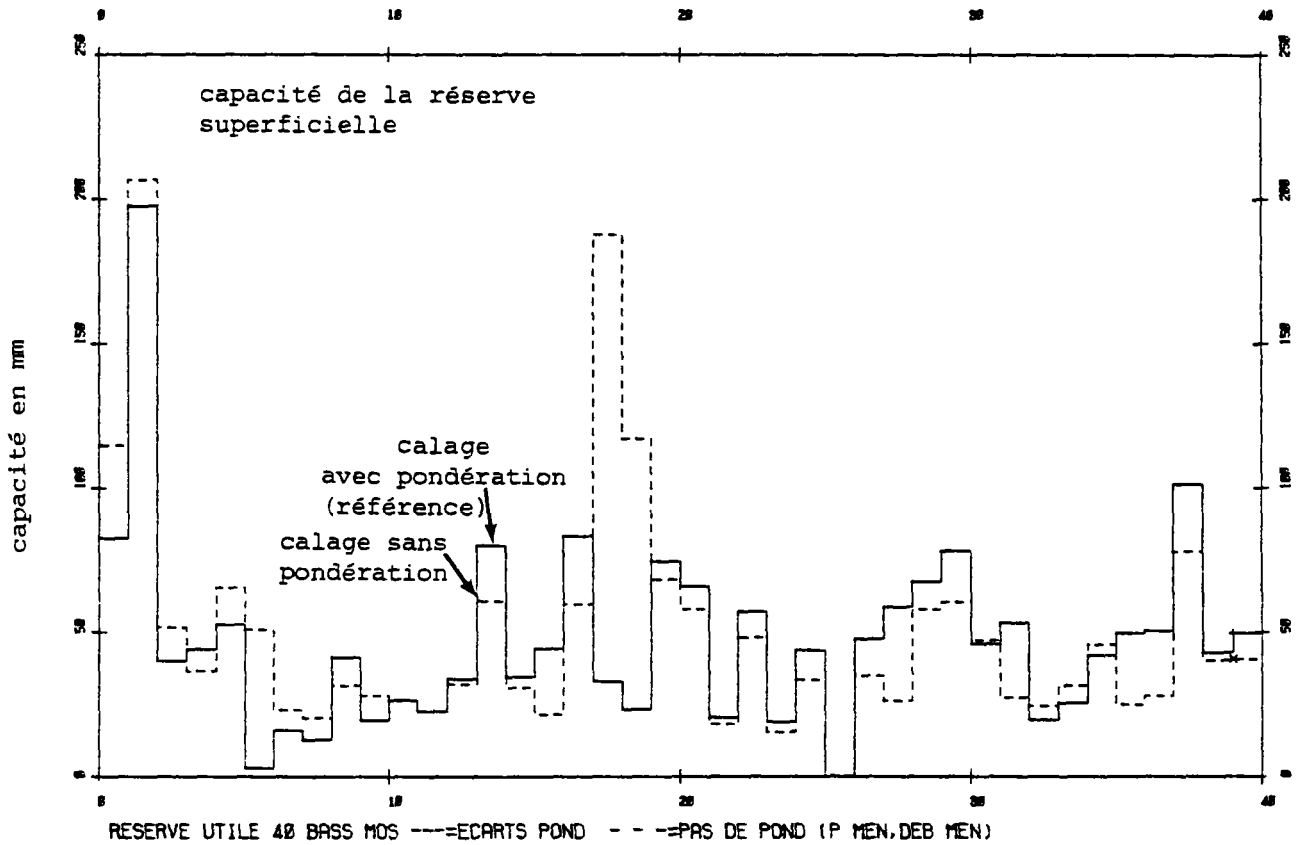


Figure V.7 : Influence de la pondération sur la capacité de la réserve superficielle

Les réserves utiles identifiées avec ou sans pondération sont comparables à quelques exceptions près. (Pour ces bassins il se produit une compensation : réserve utile augmentée (donc plus d'évapotranspiration réelle) et correction de pluie augmentée (donc plus d'alimentation)).

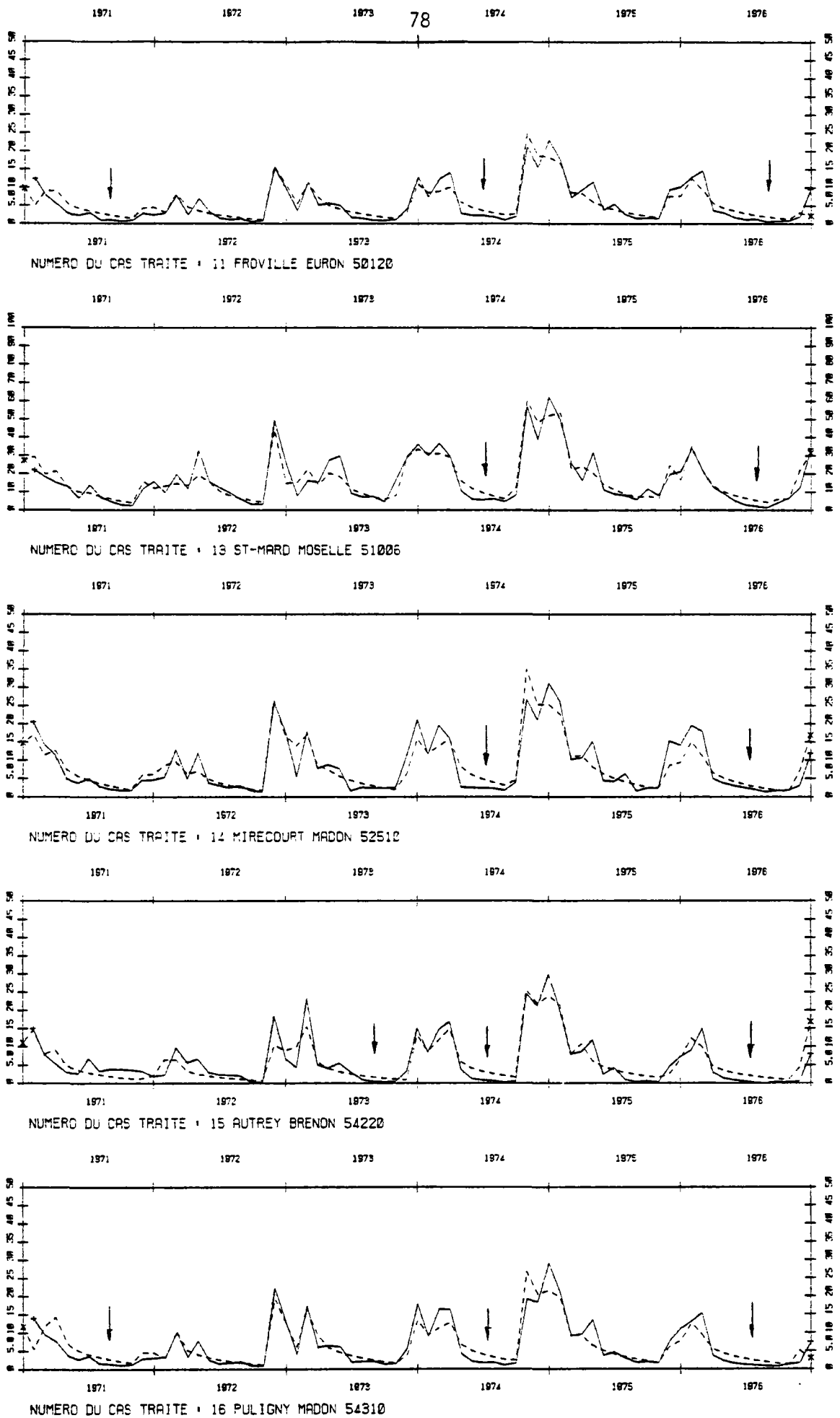


Figure V.8 : Simulation en optimisant le coefficient d'ajustement naturel :
 Les étiages sont nettement moins bien simulés en particulier
 en 1971/74 et 76

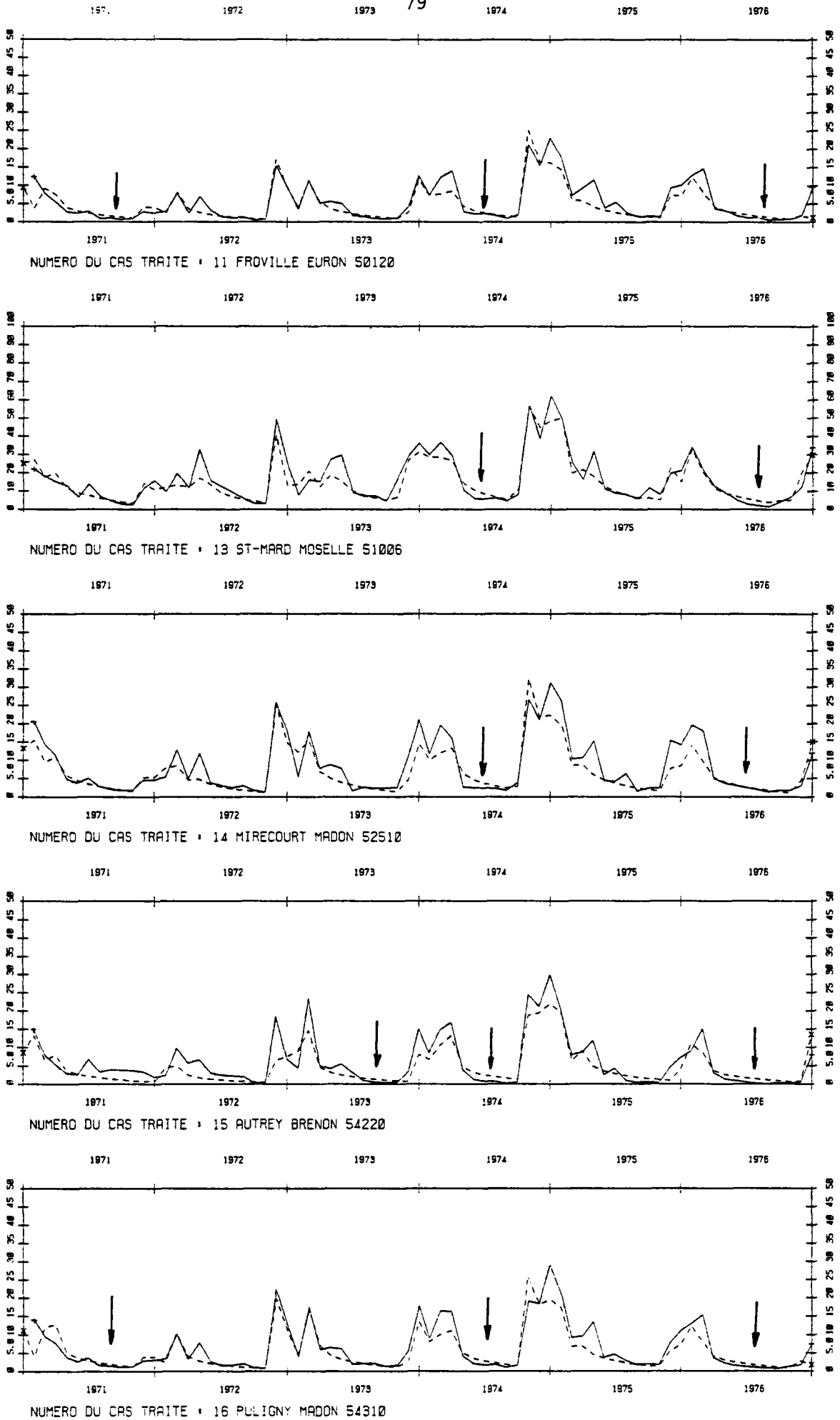


Figure V.9 : Simulation de référence : bassins n° 11 à 16 (pour comparaison)

Numéro de travail	N O M	Superficie (km ²)	Ajustement pondéré	Correction de pluie % (réf.)	Réserve superficielle (mm)
17 (16)	Moselle à TOUL	3 340	0.81 (0.85)	- 9 (- 14)	35 (44)
31 (28)	Meurthe à MALZEVILLE	2 914	0.78 (0.82)	- 12 (- 8)	25 (59)
39 (35)	Seille à METZ P.LOTH	1 269	0.62 (0.74)	- 11 (- 22)	41 (42)
40 (36)	Moselle à HAUCONCOURT	9 387	0.77 (0.83)	- 10 (- 10)	25 (50)

Pour préciser le manque de sensibilité du coefficient d'ajustement naturel, on a réalisé deux autres ensembles de simulation avec des hypothèses de simplification extrêmes sans aucun calage :

- Simulation ZER01 (figure V.10) :

- . correction de pluie CORPLU = 0 %
- . correction d'évapotranspiration potentielle CETP = 0 %
- . réserve superficielle (valeur fréquemment admise) RUMAX = 100 mm
- . hauteur d'équi-ruissellement (proche de la moyenne) RUIPER = 90 mm

- Simulation ZER02 (figure V.11)

- . hypothèses identiques, mais avec une correction d'évapotranspiration potentielle fixée à + 20%, comme dans le calage de référence.

Ces figures (relatives aux bassins n° 6 à 16) montrent une mauvaise simulation, surtout pour l'hypothèse ZER01. On a calculé les coefficients d'ajustement pondéré et non pondéré correspondant à ces bassins, et on les a reporté sur le tableau V.1 en regard des coefficients de la simulation de référence. Ce tableau montre nettement que le coefficient d'ajustement naturel est très peu sensible à la dégradation du calage des bassins 7, 9, 10, 11, 13, 14, 15 et 16, alors que le coefficient d'ajustement pondéré y est très sensible, ce qui correspond aux graphiques observés.

On a analysé également sur deux bassins : l'un mal simulé (le bassin n° 11 Froville/Euron), l'autre bien simulé (bassin n° 1 Fresse/Moselle), l'influence des écarts de simulation sur le coefficient d'ajustement naturel et pondéré (figures V.12 et V.13).

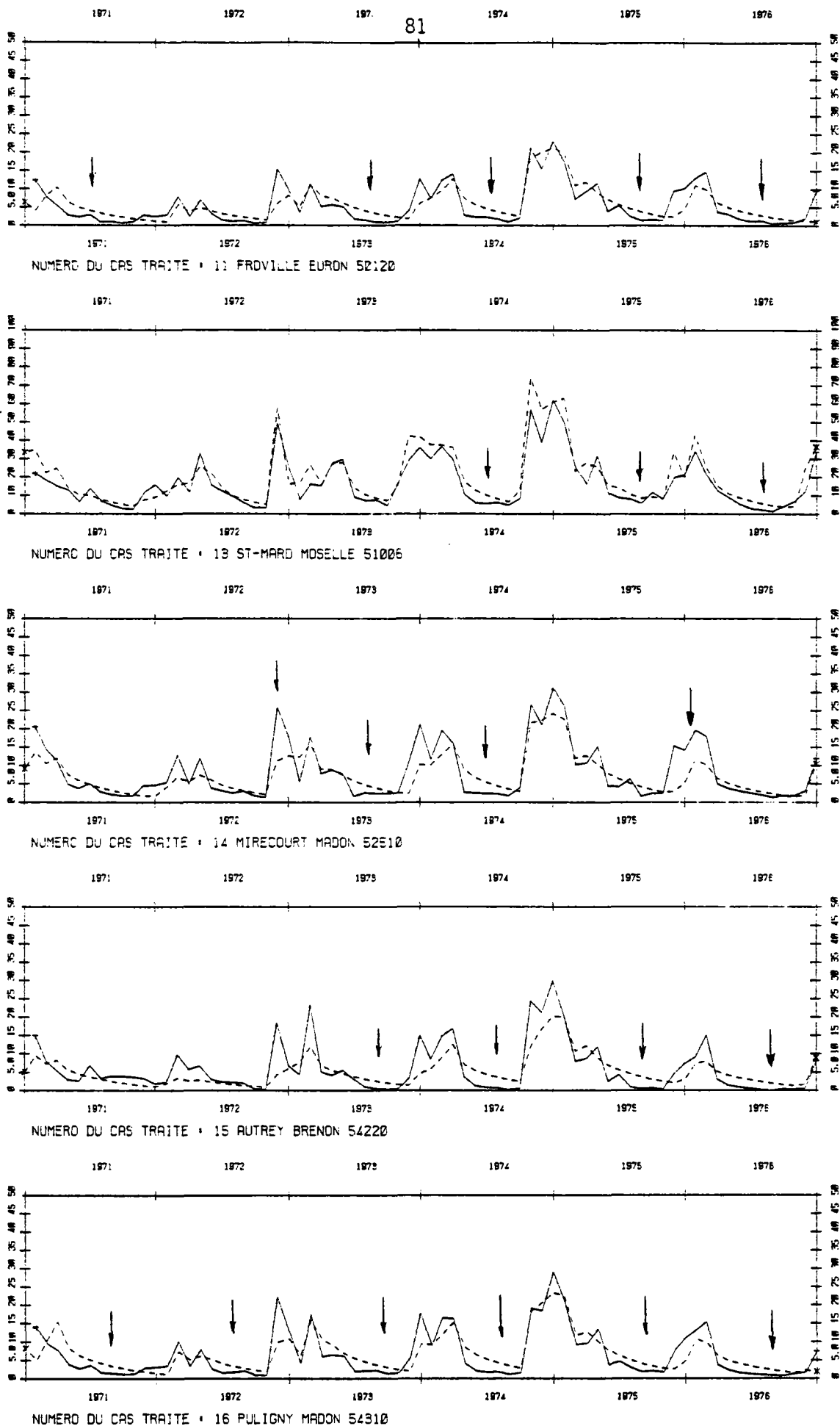
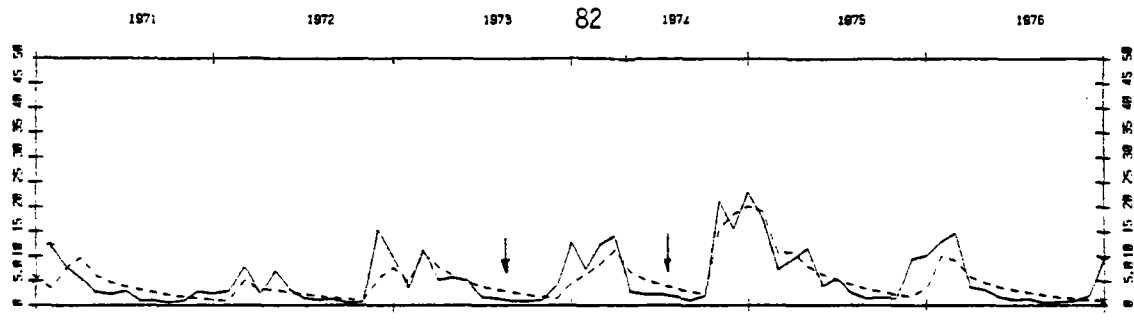
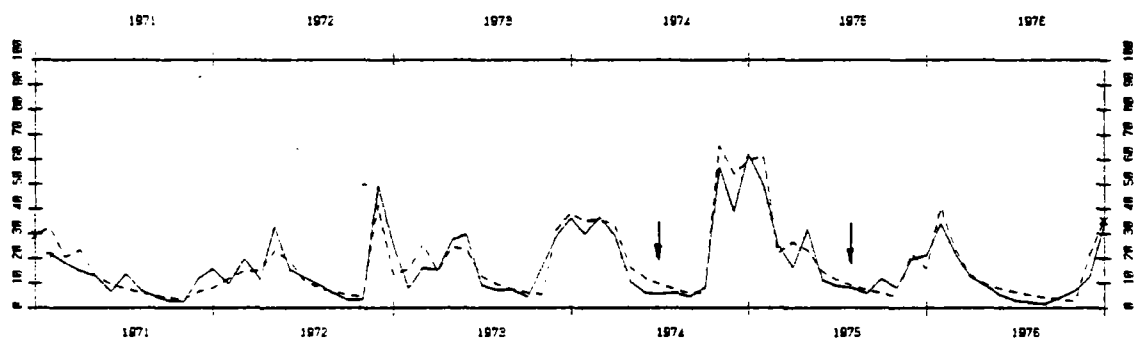


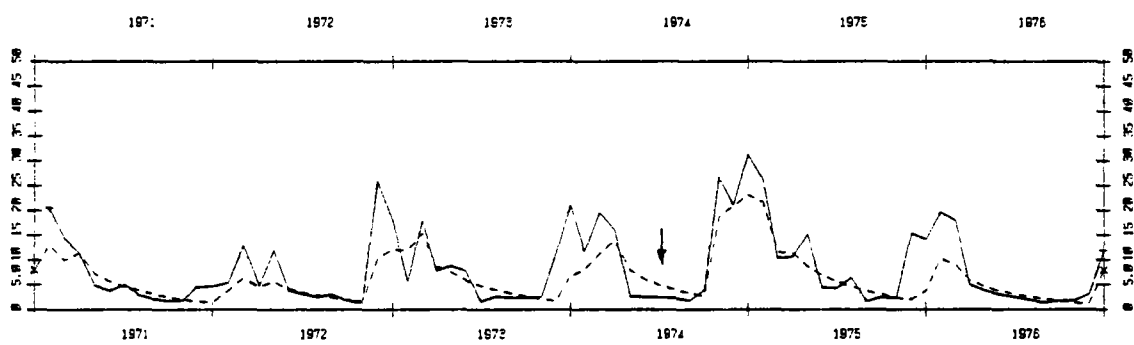
Figure V.10 : Simulation ZERO 1 : pas de correction de pluie ni d'ETP ; réserve superficielle égale à 100 mm. Tous les étiages sont mal simulés ainsi que l'hiver 1972/73



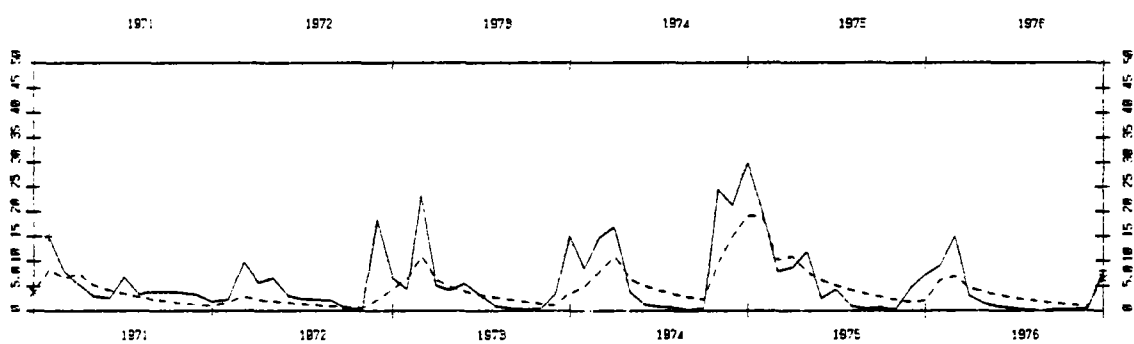
NUMERO DU CAS TRAITÉ : 11 FROVILLE EURON 50120



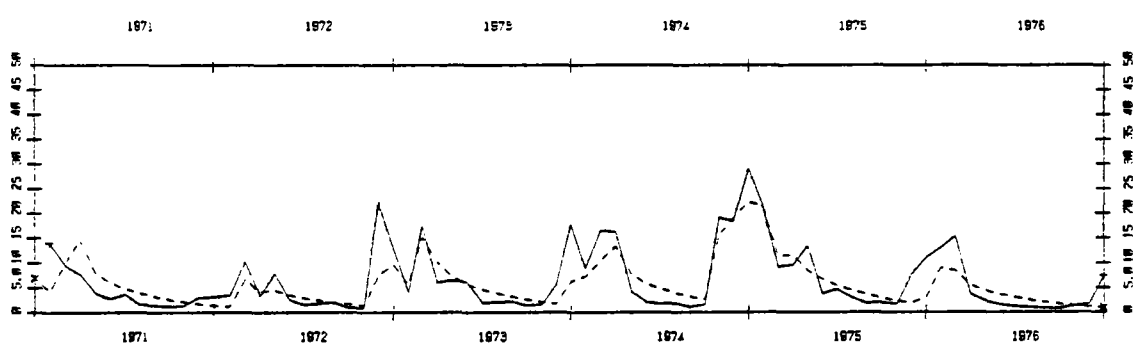
NUMERO DU CAS TRAITÉ : 12 ST-MARD MOSELLE 51006



NUMERO DU CAS TRAITÉ : 14 MIRECOURT MADON 52510



NUMERO DU CAS TRAITÉ : 15 AUTREY BRENON 54220



NUMERO DU CAS TRAITÉ : 16 PULIGNY MADON 54310

Figure V.11 : Simulation ZERO 2 : pas de correction de pluie, correction d'ETP : +20 % ; réserve superficielle 100 mm. La simulation des étiages reste mauvaise, mais un peu meilleure qu'avec la simulation ZERO 1

La figure V.12 montre que les quelques écarts importants associés à de forts débits comme en 1971, 1975 et 1976 ont peu d'influence sur la somme des écarts pondérés. Par contre, les écarts sur les étiages qui sont ici mal représentés (en 1974 et 1976 en particulier) ont une influence prépondérante. Le coefficient d'ajustement naturel (non pondéré) fait apparaître le contraire.

La figure V.13 qui montre un bon ajustement des étiages, montre que la pondération diminue l'influence des écarts observés avec les forts débits des hivers 1972 et fin 1974. Par contre, l'écart de février 1973 (dû à la neige difficile à prendre en compte ce mois) et de mars 1975 est beaucoup plus important.

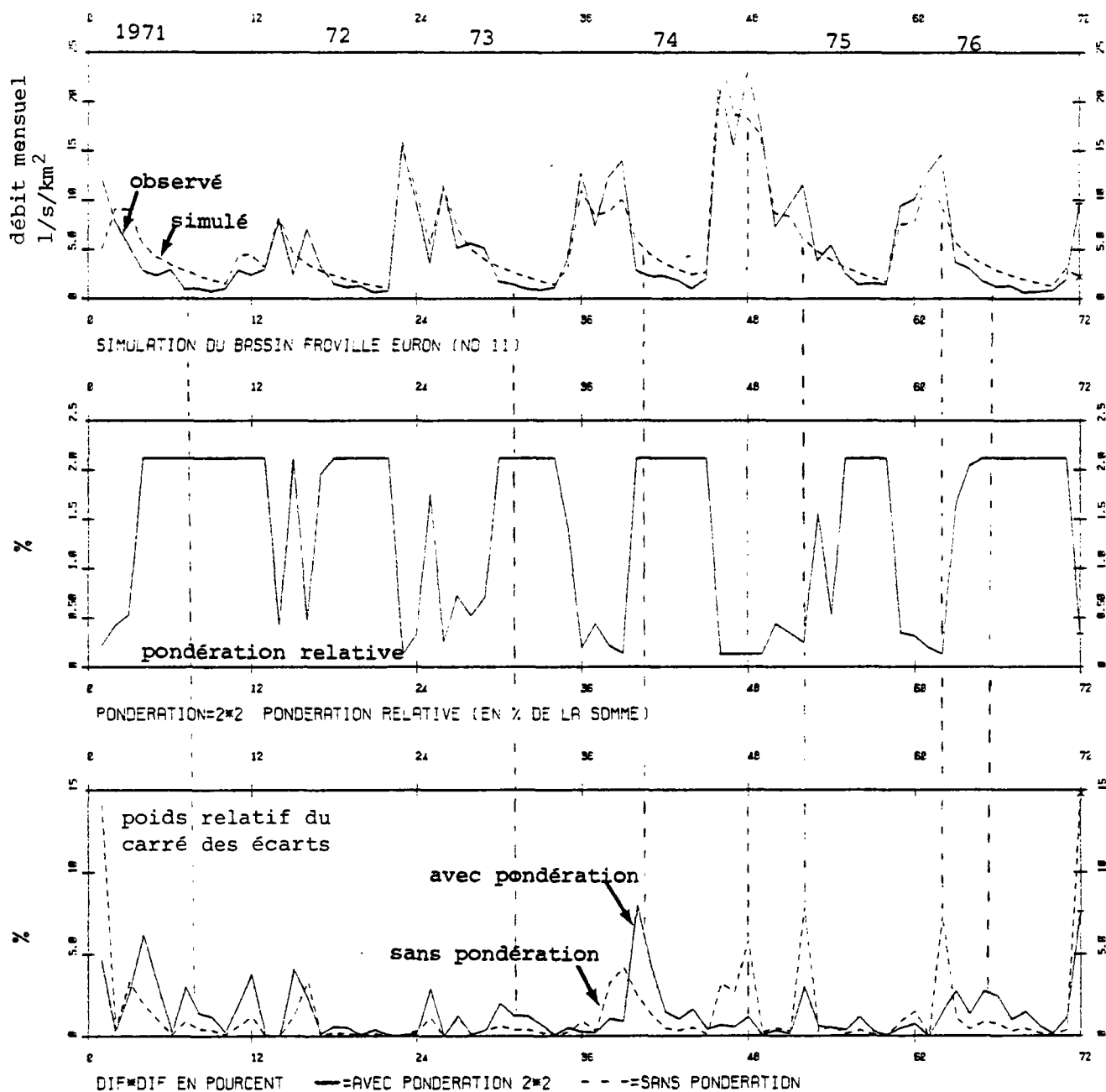


Figure V.12 : Influence de la pondération des écarts : pour un bassin mal simulé

Il apparaît nettement que les quelques écarts importants associés aux forts débits ont peu d'influence sur la somme des écarts pondérés. Par contre, les écarts sur les étiages qui sont ici mal représentés ont une influence prépondérante.

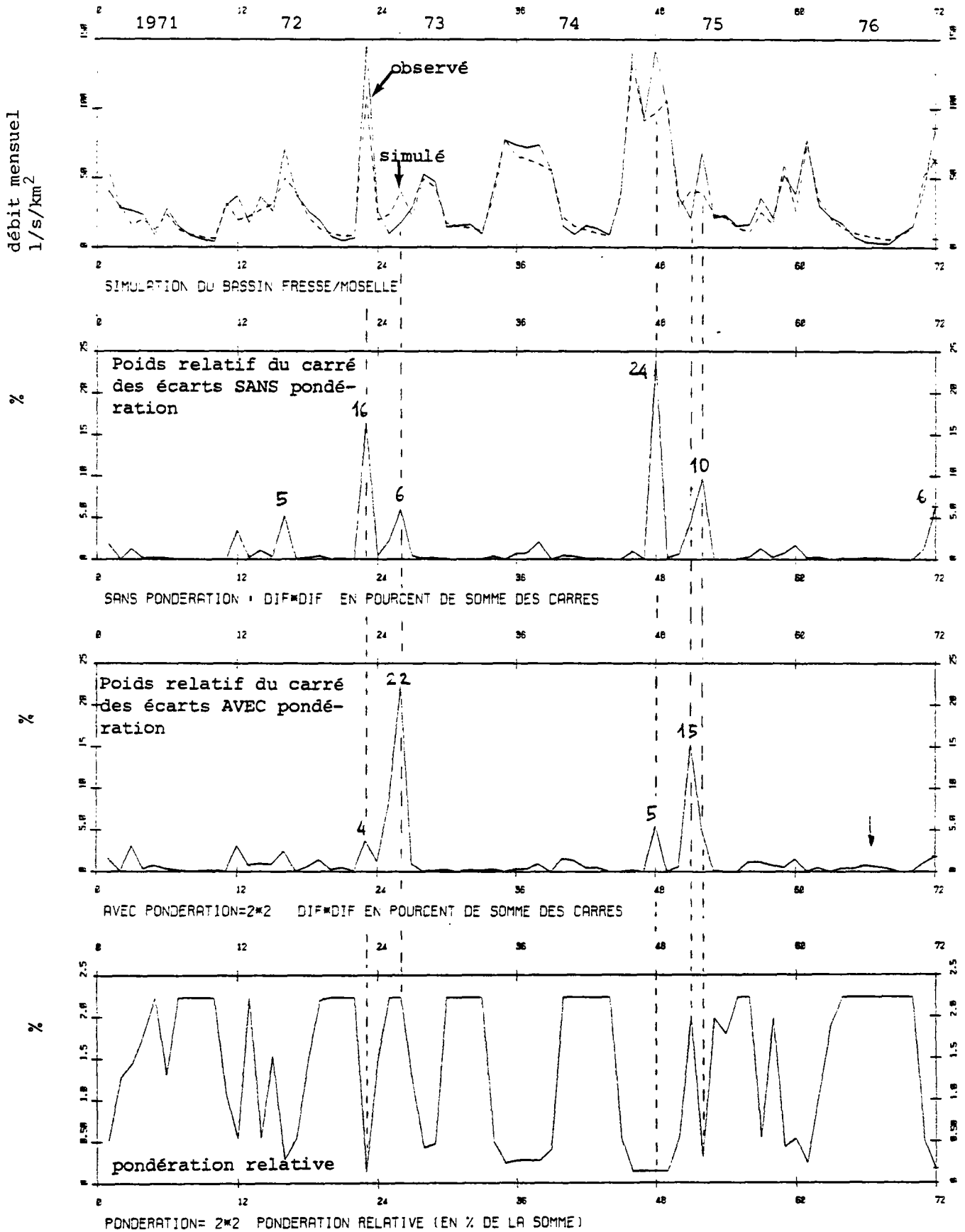


Figure V.13 : Influence de la pondération des écarts pour un bassin BIEN simulé

Dans cet exemple où les étiages sont bien simulés, on voit que la pondération diminue l'influence des écarts des forts débits de novembre 1972 et décembre 1974 mais donne plus d'importance à l'écart de février 1973 (dû à la neige) et mars 1975 ainsi qu'aux étiages.

CHAPITRE 6

ANALYSE DES FACTEURS INFLUENÇANT
LA PARTIE "PRODUCTION" DU MODELE

1. INFLUENCE DE LA CORRECTION GLOBALE D'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE

Il est apparu que le calage de référence tendait à faire apparaître un surplus d'eau. La formule mensuelle de L. TURC pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle ayant tendance à donner des résultats sous-estimés, on avait augmenté globalement l'évapotranspiration potentielle ETP de +20%. On a tenté une correction globale d'évapotranspiration potentielle de +30% pour voir si les résultats étaient plus satisfaisants.

- * *Ajustement pondéré* (figure VI.1). Il apparaît que les coefficients d'ajustement pondérés sont quasiment identiques à ceux du calage de référence.
- * *Capacité de la réserve superficielle* (figure VI.1). Les réserves superficielles identifiées sont quasiment identiques (à une exception près : le bassin n° 19 : Fraize/Meurthe).
- * *Correction globale de pluie* (figure VI.2). Les corrections globales de pluies sont pratiquement inchangées. La correction médiane est de -15%, au lieu de -17,5%, ce qui tend légèrement à compenser l'augmentation d'évapotranspiration potentielle. Seul le bassin n° 19 (Fraize sur Moselle) fait apparaître une augmentation de pluie de 10 % de plus qui est pratiquement compensée par une augmentation significative de la capacité de réserve superficielle.
- * *Conclusion*. Une augmentation globale de l'évapotranspiration potentielle (qui n'est pas très bien connue) ne permet pas d'obtenir des corrections de pluies plus faibles. En fait en examinant la répartition de l'évapotranspiration potentielle au cours de l'année, il apparaît que :
 - . en hiver l'évapotranspiration potentielle est très faible et même quasi-nulle en altitude quand la température approche zéro,
 - . c'est pendant l'hiver que les écoulements abondants se produisent et que le modèle tend à sur-estimer.
 Une correction en pourcentage, donc homothétique de l'évapotranspiration potentielle, introduit donc très peu de variation d'évapotranspiration potentielle pendant ces mois d'hiver. L'été par contre, les variations d'ETP sont plus importantes, mais les pluies étant de toute façon inférieures et la réserve superficielle quasi-vide, on observe peu de différence.

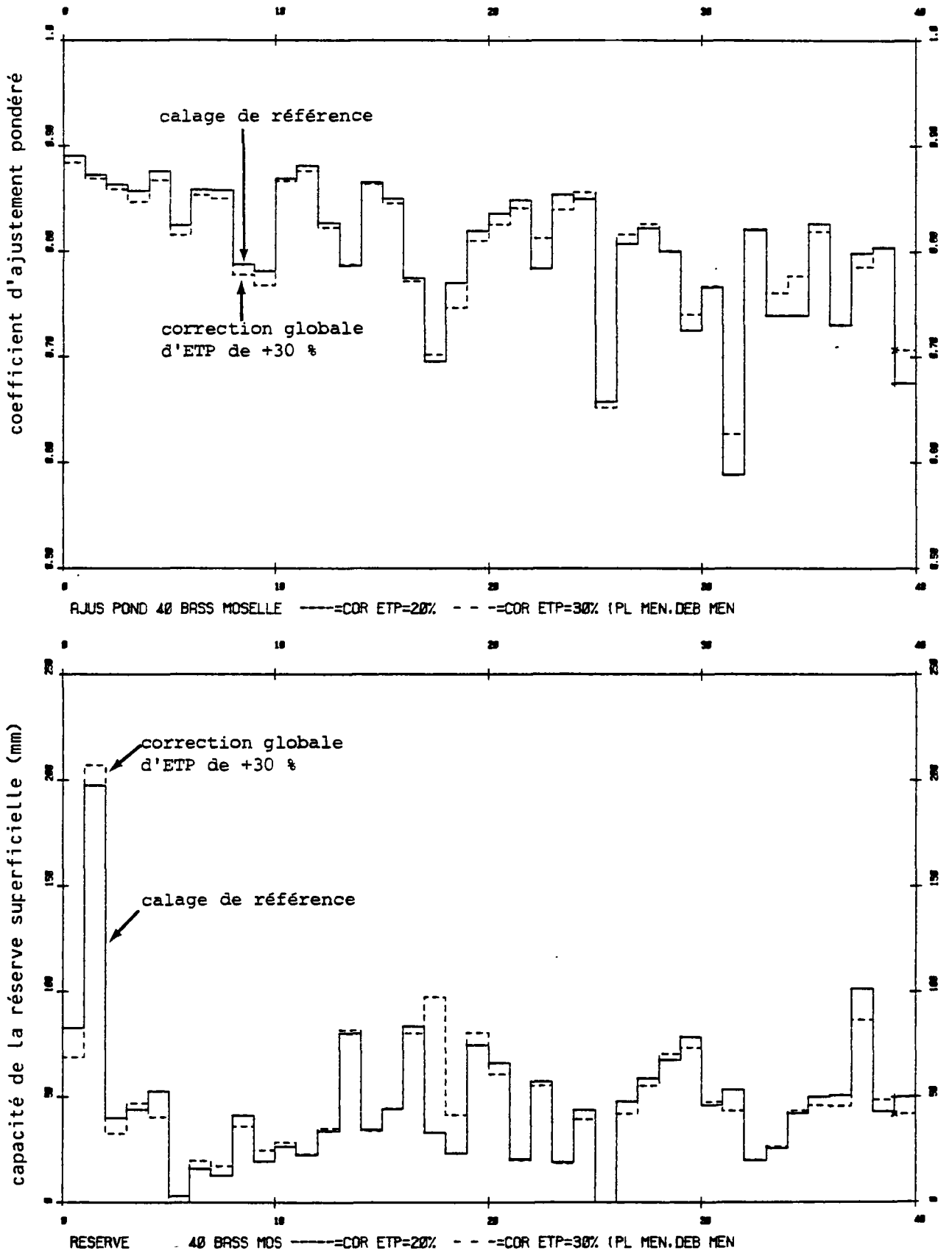


Figure VI.1 : Influence de la correction d'ETP sur le coefficient d'ajustement et la capacité de la réserve superficielle

Si on impose une ETP majorée de 30 % (au lieu de 20 %) les coefficients d'ajustement sont quasi identiques ; les capacités de réserves superficielles également à une exception près.

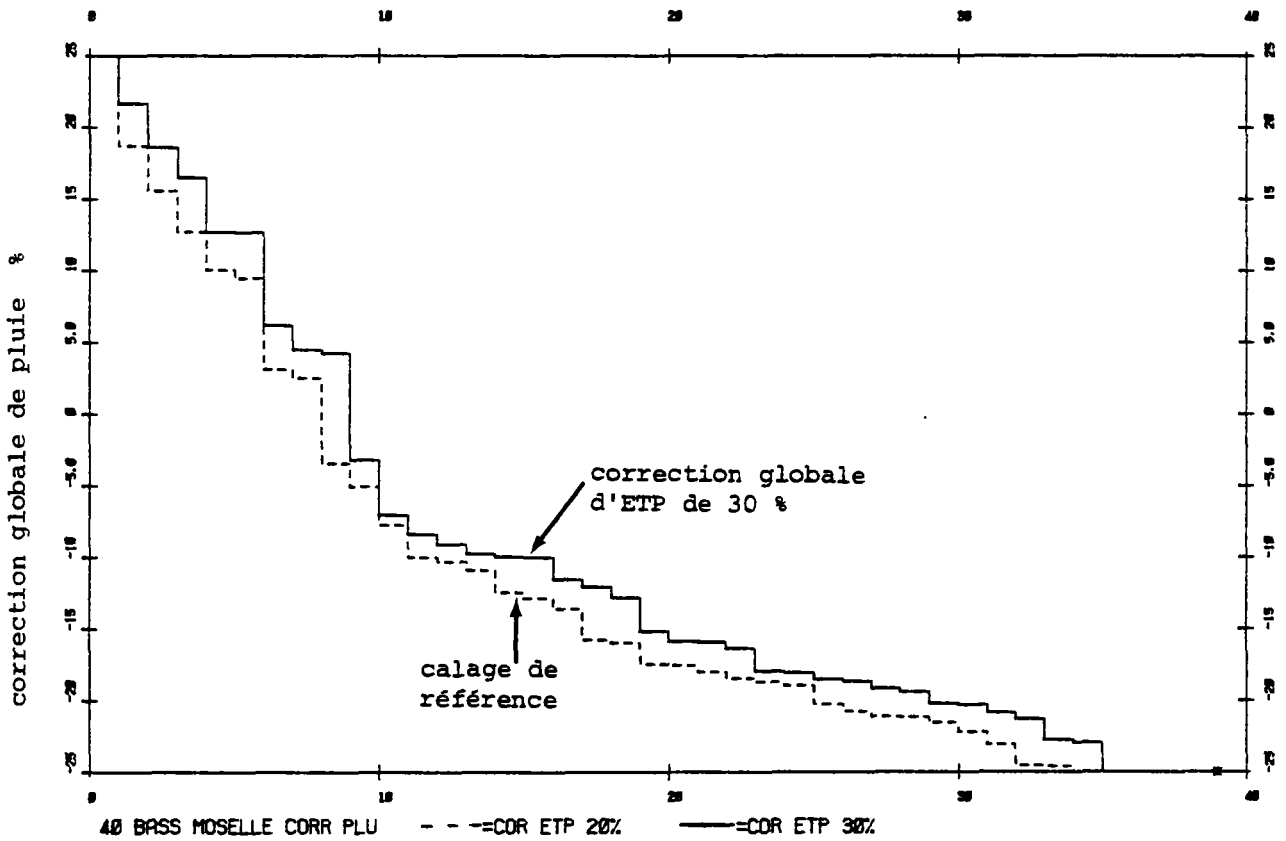
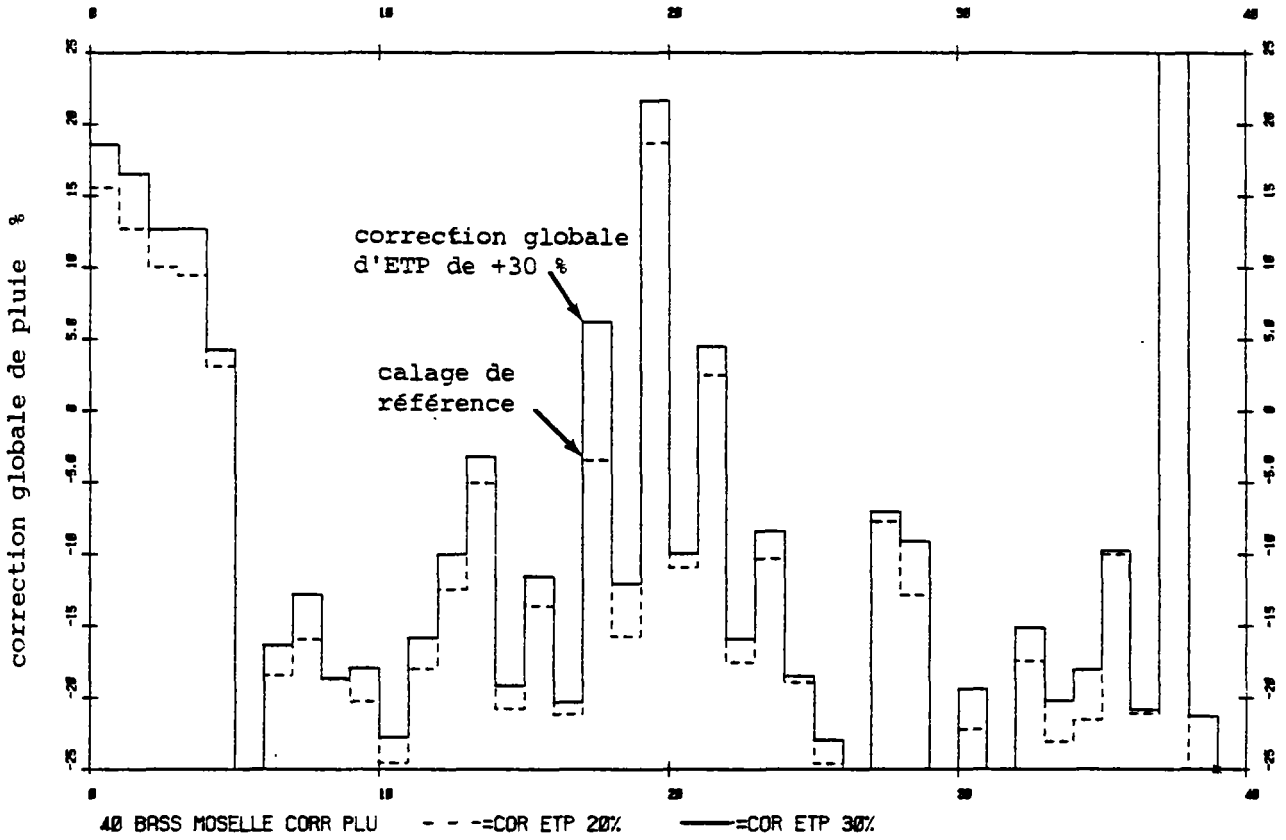


Figure VI.2 : Influence de la correction d'ETP sur la correction globale de pluie

En imposant une augmentation de l'ETP plus forte (30 % au lieu de 20 %) on obtient une augmentation de la pluie qui tend légèrement à compenser pour rétablir l'équilibre (la valeur médiane passe de -17.5 % à -15 %). On a vu que l'ajustement est pratiquement identique.

2. INFLUENCE DE LA CAPACITE DE LA RESERVE SUPERFICIELLE

Dans le but de voir l'influence réelle de la capacité de la réserve superficielle sur la qualité de l'ajustement, on a réalisé une simulation en imposant cette capacité à 50 millimètres, soit de l'ordre de grandeur de la médiane des capacités des 40 bassins.

- * *Coefficient d'ajustement pondéré* (figure VI.3). On constate un ajustement qui est peu dégradé, sauf pour quelques bassins particuliers :
 - . Le bassin n° 6 (Deyvilliers/St Oger) qui avait une capacité de 3 mm,
 - . Le 17ème bassin (n° 18 : Vилley/Terrouin) qui avait une capacité de 83 mm,
 - . Le 26ème bassin (n° 29 : Lagarde/Sanon) qui avait une capacité de 0 mm,
 - . Le 30ème bassin (n° 34 : Jezainville/Esch) qui avait une capacité de 78 mm.

Pour ces quelques bassins, il n'a pas été possible d'obtenir une simulation à peu près équivalente, malgré un ajustement de la correction globale de pluie, car pour les bassins n° 18 et 34 cette dernière aurait dû être inférieure à -25% (borne inférieure imposée). Le 30ème bassin (n° 34) en particulier est très mal simulé. Il est par contre intéressant de constater que le bassin n° 2 (Rupt/Moselle) qui avait une capacité étrange de 198 mm, est aussi bien simulé avec 50 millimètres, ce qui montre le peu d'importance de ce paramètre pour ce bassin très abondant.

- * *Corrections globales de pluie* (figure VI.4). Les corrections globales de pluies sont un peu moins dispersées et moins négatives. La correction globale médiane est de -12,5%, au lieu de -17,5%, mais pour certains bassins la différence est grande et peut atteindre 10%.
- * *Conclusions*. Le fait de fixer la capacité de la réserve superficielle à 50 millimètres au lieu de sa valeur optimale n'introduit pas une forte dégradation de l'ajustement à part pour quelques bassins particuliers. Un réajustement de la correction globale de pluie permet généralement de rattraper à peu près l'ajustement, sauf quand cette correction est en butée à -25% qui était la valeur minimale permise pour rester réaliste.

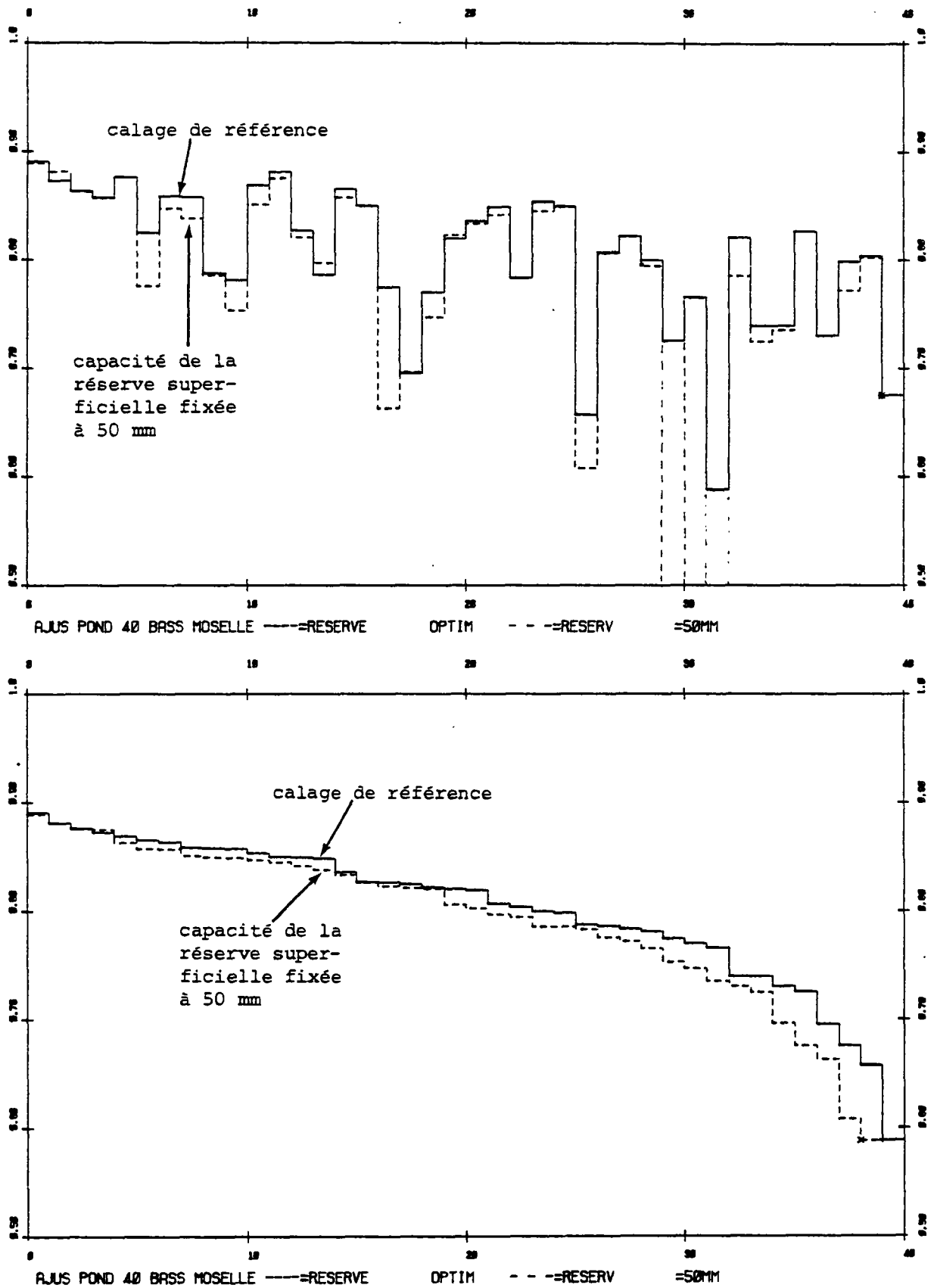


Figure VI.3 : Capacité de la réserve superficielle fixée à 50 mm (valeur médiane). Effet sur l'ajustement des 40 bassins

On constate un ajustement qui est peu dégradé sauf pour 2 ou 3 bassins.

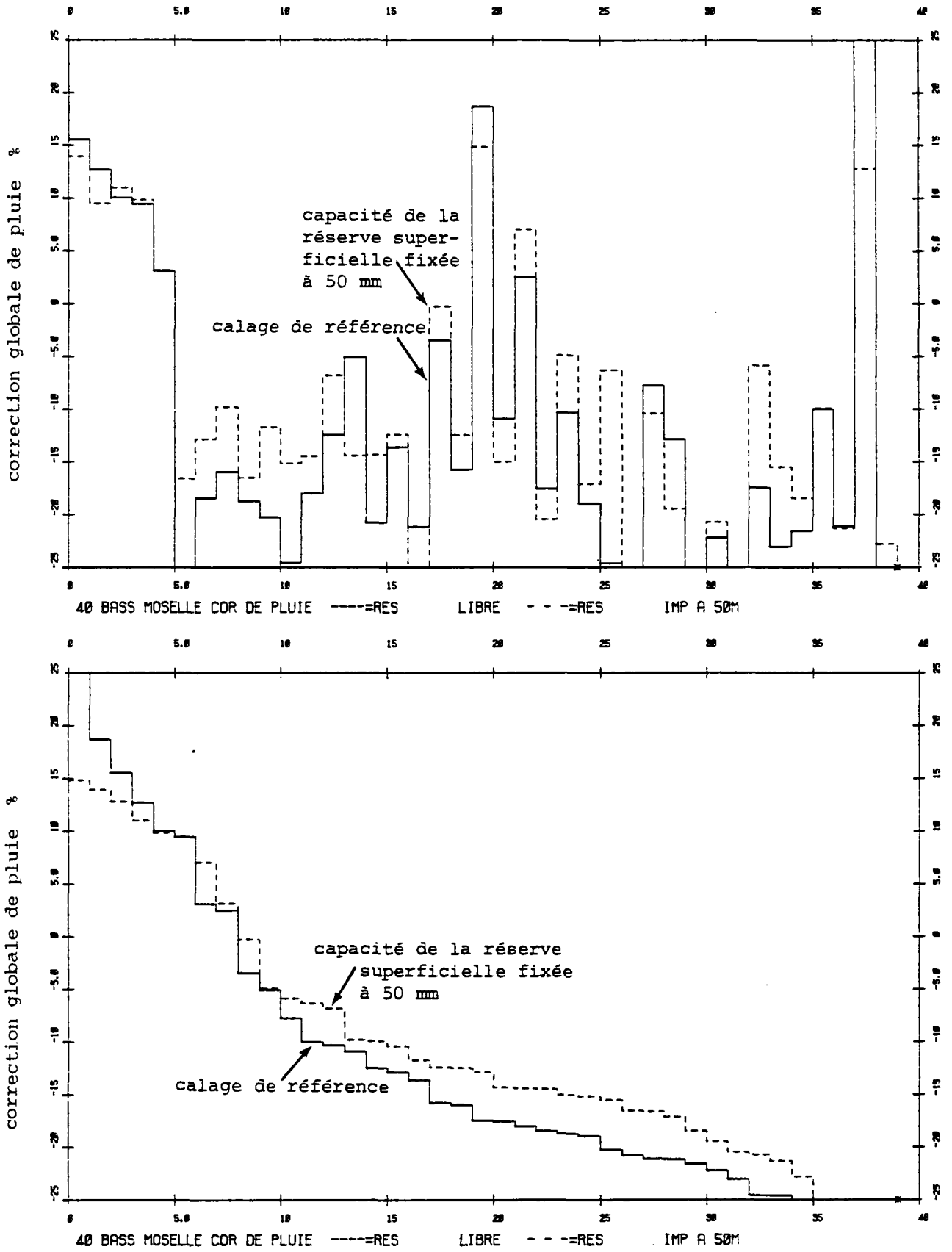


Figure VI.4 : Capacité de réserve superficielle imposée à 50 mm (médiane) : effet sur la correction globale de pluie

La correction de pluie est moins dispersée et moins négative (-12.5 % au lieu de -17.5 % pour la médiane) pour certains bassins la différence est très grande.

3. PAS DE CORRECTION DE PLUIE, NI D'ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE

Dans le but de voir si les trois paramètres :

- a) correction de pluie,
- b) correction d'évapotranspiration potentielle ETP,
- c) capacité de la réserve superficielle,

ne sont pas redondant pour ajuster la partie production du modèle, on a essayé une simulation simplifiée : sans correction de pluie et sans correction d'évapotranspiration potentielle, mais en ajustant la capacité de la réserve superficielle.

- * *Coefficient d'ajustement pondéré* (figure VI.5). Ils sont moins bons, surtout pour une dizaine de bassin, mais l'écart n'est pas trop grand pour les 30 meilleurs. La médiane du coefficient d'ajustement pondéré est de 0.76, au lieu de 0.82.
- * *Coefficient d'ajustement naturel* (figure VI.6). A part pour 5 bassins, les coefficients d'ajustements naturels sont pratiquement aussi bons (ce qui confirme leur insensibilité).
- * *Débit moyen simulé et observé* (figure VI.7). La reproduction des débits moyens est de qualité pratiquement équivalente à celle du calage de référence à part pour quelques bassins isolés (le 6 et le 11).
- * *Capacité de la réserve superficielle* (figure VI.8). Les capacités de réserves superficielles identifiées avec cette hypothèse sont beaucoup plus grandes. La médiane est de 130 millimètres, au lieu de 50 millimètres. Cette augmentation permet d'accroître l'effet de l'évapotranspiration potentielle et de produire une évapotranspiration réelle plus importante. En effet l'évapotranspiration potentielle était augmentée de +20% pour le calage de référence et la correction de pluie était généralement négative.
- * *Coefficient d'équi-ruissellement*. Ils sont pratiquement inchangés, ce qui prouve que l'ajustement de capacité de la réserve superficielle a permis de retrouver à peu près la lame de précipitation efficace du calage de référence. Ce paramètre semble donc avoir un sens intrinsèque indépendant des paramètres réglant la fonction production. Les paramètres obtenus, ainsi que les bilans annuels moyens, sont rassemblés dans les tableaux VI.1 et VI.2.

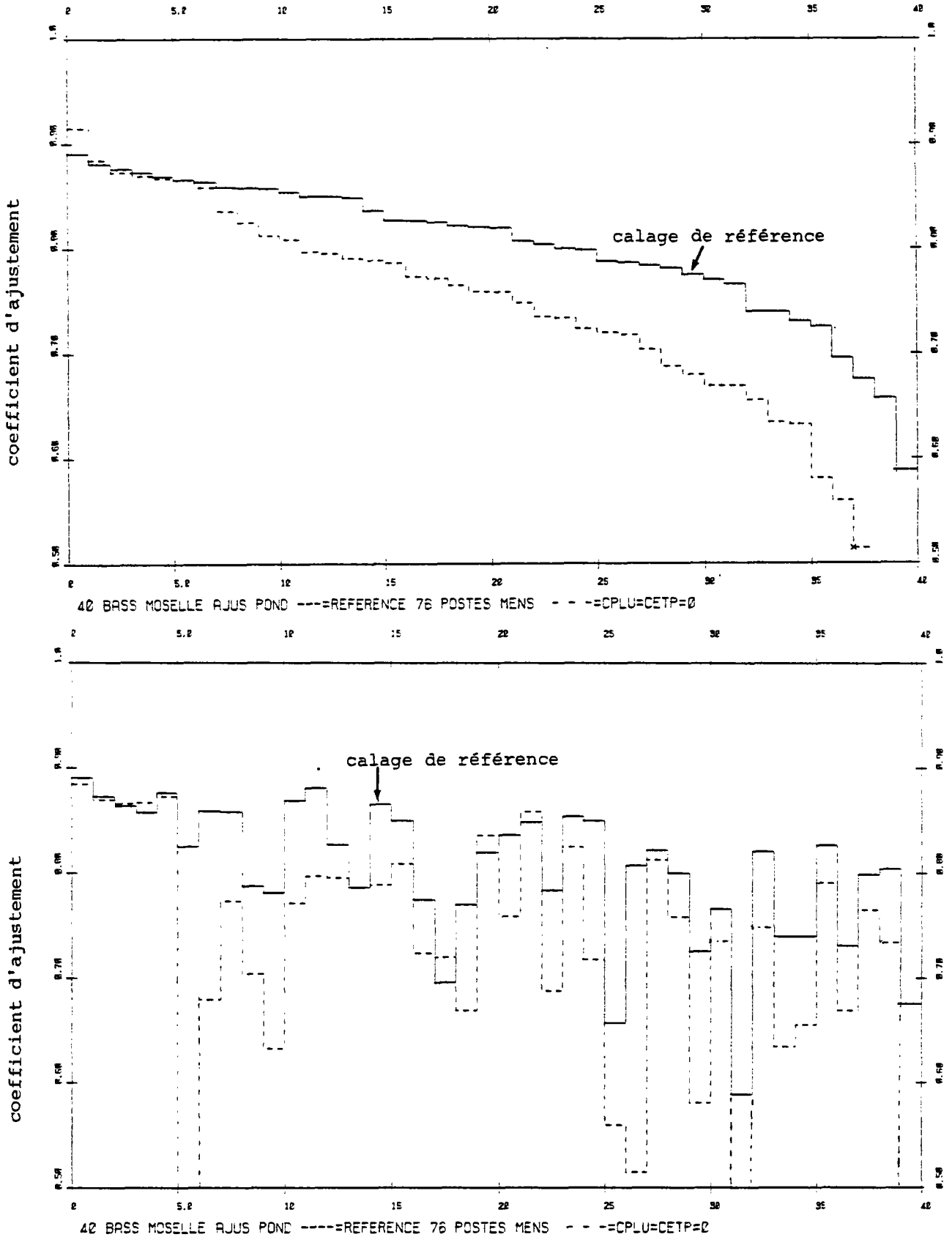


Figure VI.5 : Ajustement pondéré. Pas de correction de pluie ni d'ETP

Les ajustements pondérés sont moins bons surtout pour quelques bassins isolés mais l'écart n'est pas énorme pour 30 bassins sur 40. Cette hypothèse : pas de correction de pluie ni d'ETP permettrait donc une simulation à peu près acceptable.

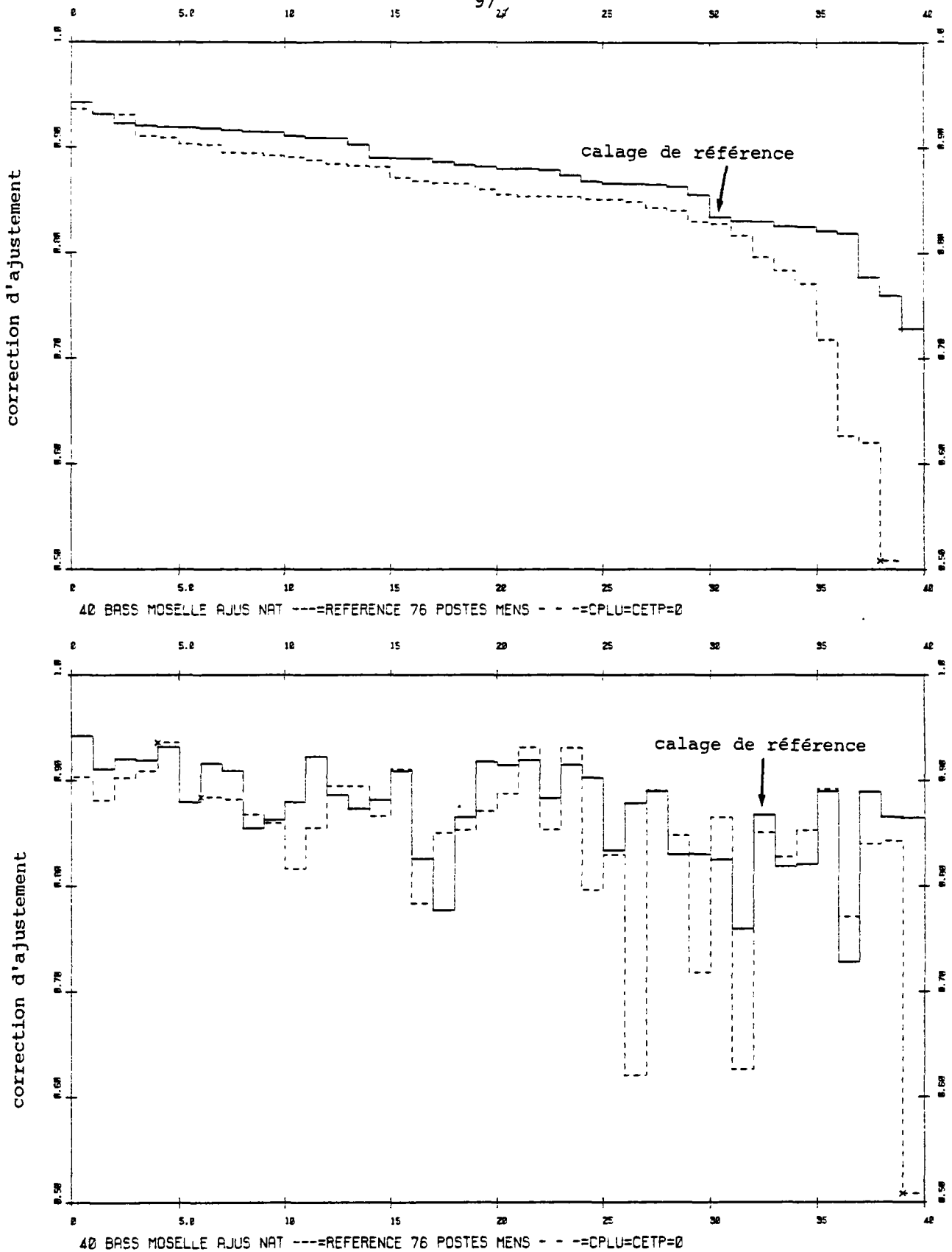


Figure VI.6 : Ajustement naturel. Pas de correction de pluie ni d'ETP

A part pour 5 bassins, les coefficients d'ajustement naturels sont pratiquement aussi bons.

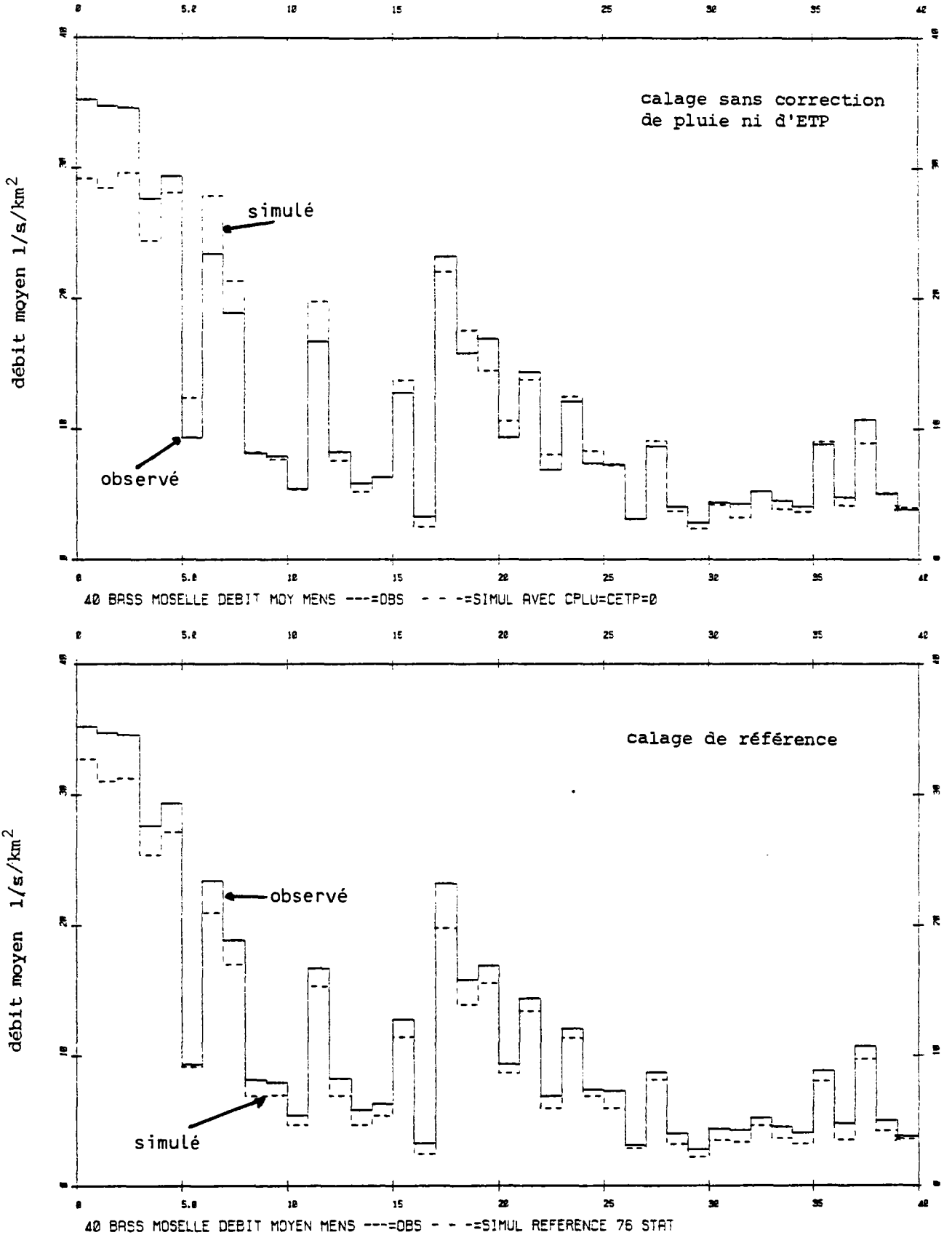


Figure VI.7 : Débit moyen observé et simulé : pas de correction de pluie ni d'ETP

La reproduction des débits moyens est de qualité à peu près équivalente à part en quelques bassins isolés (comme le n° 6 et le n° 11).

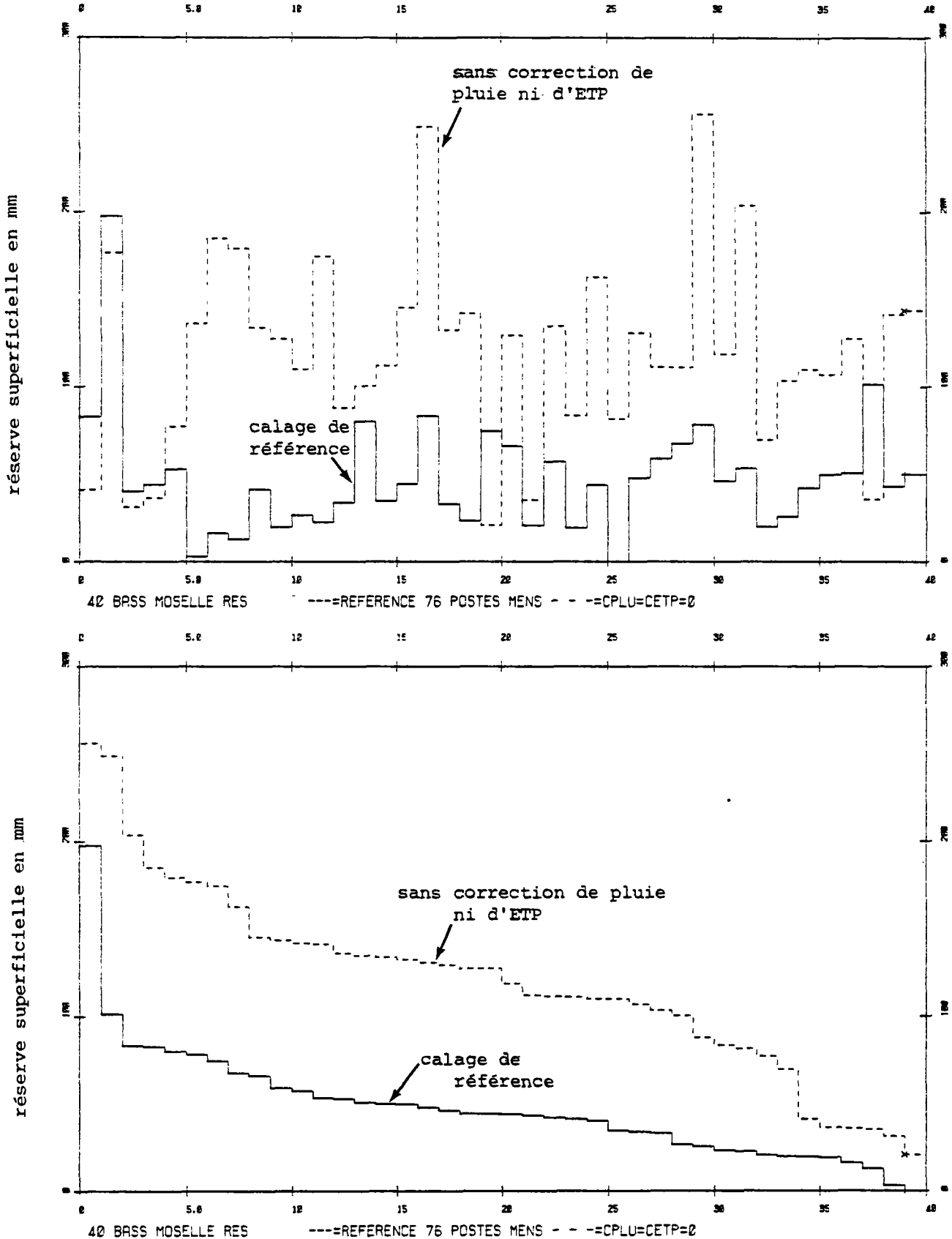


Figure VI.8 : Capacité de la réserve superficielle : pas de correction de pluie ni d'ETP

Les réserves superficielles identifiées quand on impose aucune correction de pluie ni d'ETP sont beaucoup plus élevées : la médiane est de 130 mm au lieu de 50 mm. Cette augmentation permet d'accroître l'effet de l'ETP (qui était augmentée de 20 % précédemment) et de compenser la correction de pluie (qui était généralement négative).

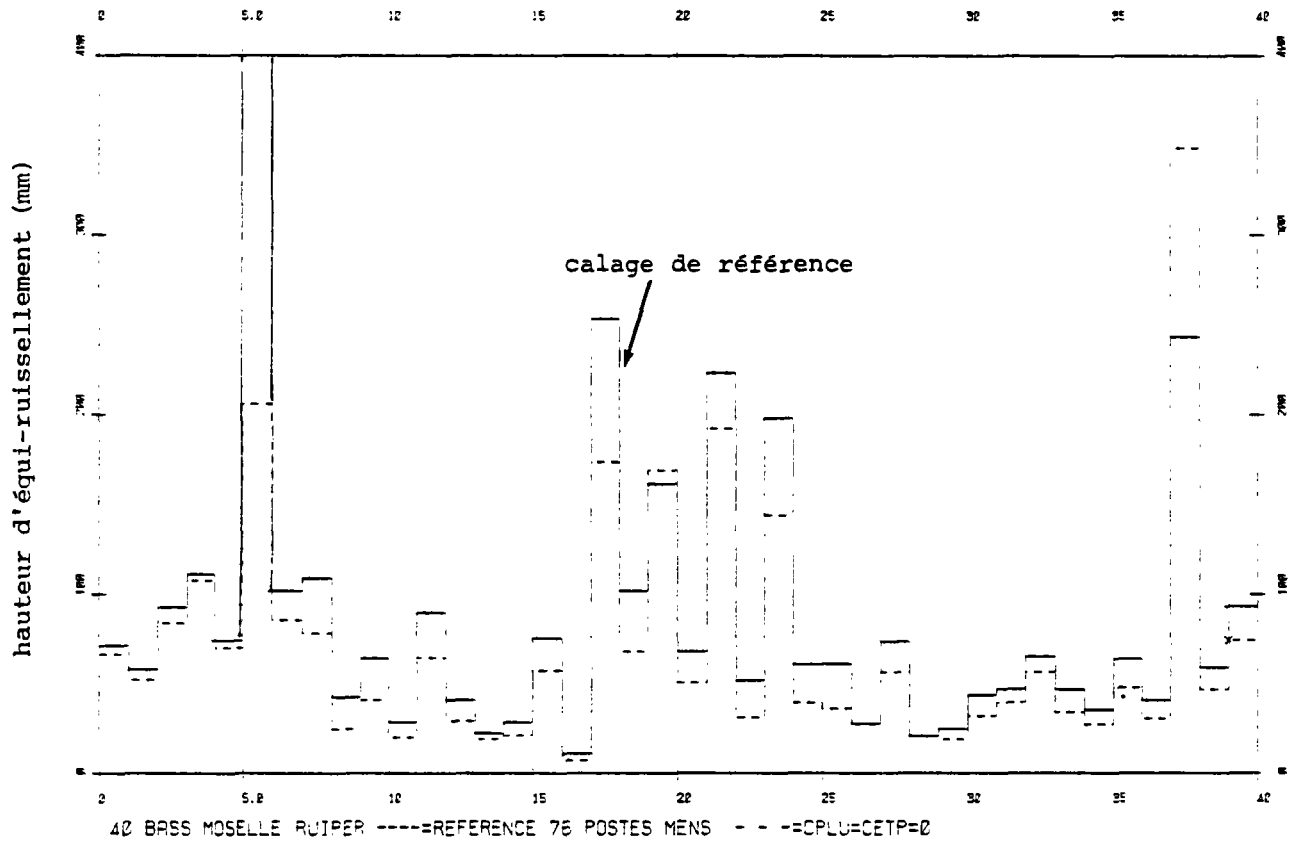


Figure VI.9 : Coefficient d'équi-ruissellement - pas de correction de pluie ni d'ETP

Les coefficients d'équi-ruissellements sont quasiment inchangés ce qui confirme l'hypothèse que ce paramètre a un sens intrinsèque indépendant des paramètres réglant la fonction production.

calage 1971/76 PAS de CORR de PLUIE ni d'ETP parametres

NUMERO ORDRE	NUMERO BASSIN	AJUST POND	AJUST NATUR	CORRECT PLUIE	RESERVE SUPERF. (mm)	EQUI-RUISS MM
1	1	0.884	0.903	0.0	41.	66.5
2	2	0.869	0.881	0.0	177.	52.3
3	3	0.866	0.902	0.0	31.	83.8
4	4	0.867	0.909	0.0	36.	107.7
5	5	0.873	0.936	0.0	77.	70.0
6	6	-0.915	-0.500	0.0	136.	205.9
7	7	0.680	0.884	0.0	185.	85.5
8	8	0.773	0.882	0.0	179.	78.1
9	9	0.704	0.868	0.0	134.	24.8
10	10	0.633	0.860	0.0	127.	41.1
11	11	0.771	0.817	0.0	110.	20.1
12	13	0.797	0.855	0.0	174.	64.5
13	14	0.795	0.895	0.0	88.	29.3
14	15	0.786	0.895	0.0	100.	19.5
15	16	0.789	0.866	0.0	112.	21.5
16	17	0.809	0.911	0.0	145.	57.2
17	18	0.724	0.784	0.0	249.	7.2
18	19	0.720	0.851	0.0	132.	173.4
19	20	0.669	0.853	0.0	142.	67.9
20	21	0.836	0.871	0.0	21.	168.7
21	23	0.759	0.888	0.0	129.	50.7
22	24	0.858	0.932	0.0	35.	192.2
23	25	0.688	0.854	0.0	135.	31.4
24	26	0.825	0.931	0.0	83.	143.9
25	28	0.718	0.796	0.0	163.	39.5
26	29	0.560	0.830	0.0	82.	36.3
27	30	0.515	0.620	0.0	131.	27.9
28	31	0.813	0.891	0.0	111.	56.6
29	32	0.758	0.848	0.0	111.	20.9
30	34	0.581	0.718	0.0	256.	19.2
31	35	0.735	0.865	0.0	119.	32.2
32	36	-0.064	0.626	0.0	204.	39.8
33	37	0.748	0.851	0.0	69.	56.6
34	38	0.634	0.828	0.0	103.	34.2
35	39	0.655	0.853	0.0	110.	27.3
36	40	0.791	0.892	0.0	107.	48.0
37	42	0.669	0.771	0.0	127.	30.7
38	43	0.765	0.840	0.0	36.	348.6
39	44	0.734	0.843	0.0	141.	47.0
40	45	-0.245	0.508	0.0	144.	74.4

TABLEAU VI.1 - Calage sans correction de pluie, ni d'ETP. Ajustement de la capacité de la réserve superficielle (et de la hauteur d'équi-ruissellement)

calage 1971/1976 PAS de CORR de PLUIE nid'ETP BILAN ANNUEL en MM/AN

NO ORD	PLUIE	ETR	PLUIE EFFICACE	ECOULEM. RAPIDE	ECOULEMENT LENT
1	1397.5	478.3	897.4	561.9	359.0
2	1409.9	517.9	870.5	581.0	316.7
3	1404.3	472.6	910.1	533.3	399.9
4	1254.2	485.6	758.1	385.5	384.5
5	1386.2	502.5	863.7	531.3	355.2
6	924.0	535.5	350.1	109.8	280.3
7	1403.3	531.5	859.4	496.5	382.4
8	1199.5	533.7	656.1	362.0	311.0
9	786.5	529.5	257.0	158.3	99.8
10	760.3	519.0	223.7	125.3	116.4
11	670.2	496.2	145.4	100.5	68.1
12	1154.7	536.5	607.3	354.2	269.2
13	721.4	481.7	239.7	137.7	101.9
14	643.7	478.6	165.1	99.3	64.5
15	707.3	500.2	172.2	121.4	78.0
16	968.8	537.2	431.6	238.6	195.1
17	637.6	565.9	78.8	56.8	22.1
18	1179.5	492.2	674.2	274.2	421.5
19	1071.3	522.7	540.2	296.4	257.1
20	907.8	450.2	451.3	154.8	301.9
21	872.3	538.5	333.8	176.7	158.8
22	916.1	474.5	411.3	133.4	302.0
23	795.9	542.9	253.0	145.1	108.2
24	907.5	515.4	392.1	141.1	252.1
25	807.1	543.7	226.0	140.3	122.0
26	730.7	502.5	228.2	119.4	107.6
27	605.6	506.3	94.3	49.1	47.0
28	822.9	529.7	265.2	137.6	149.4
29	613.0	494.2	118.8	65.3	51.4
30	631.0	565.6	73.7	40.9	32.9
31	626.5	491.4	135.1	66.9	65.4
32	661.3	564.4	101.3	44.9	56.6
33	630.7	463.9	166.8	67.2	98.4
34	614.3	491.6	122.7	56.6	64.4
35	614.2	497.6	116.7	57.8	57.3
36	814.4	521.6	255.8	145.1	139.6
37	629.0	495.5	133.5	67.5	62.7
38	705.4	419.8	285.6	51.4	229.7
39	680.5	515.8	164.7	74.0	86.5
40	652.5	523.3	117.3	42.9	82.6

Tableau VI.2 : Calage sans correction de pluie ni d'ETP.
Bilan annuel moyen en mm/an

- * *Conclusion.* Une simulation sans correction de pluie, ni d'évapotranspiration potentielle, c'est-à-dire avec seulement deux paramètres (capacité de la réserve superficielle et hauteur d'équi-ruissellement) permet une simulation moins bonne, mais cependant acceptable. Le coefficient d'équi-ruissellement est quasiment inchangé, ce qui confirme sa définition intrinsèque.

4. INFLUENCE DU PAS DE TEMPS DE LA PLUIE (calage sur les débits mensuels)

Il est apparu que les simulations avec un bilan mensuel (pluies mensuelles, évapotranspirations mensuelles) conduisaient à des simulations satisfaisantes, mais identifiaient des corrections globales de pluie négatives (-17% pour la médiane), et tendaient à sur-estimer les débits mensuels minimaux.

Dans le but de voir l'influence éventuelle du pas de temps mensuel qui est assez grossier, on a réalisé une simulation du débit mensuel avec un pas de temps de 5 jours. Il était évident qu'a priori avec ce pas de temps plus fin on obtiendrait plus d'écoulement pour la même lame d'eau donc que le modèle identifierait des corrections globales de pluie plus négatives.

- * *Coefficient d'ajustement pondéré* (figures VI.10 et VI.11). Le coefficient d'ajustement (pondéré) est généralement amélioré par un bilan pentadaire mais il y a un certain nombre d'exceptions. Le coefficient d'ajustement médian passe de 0.82 à 0.84. Les bassins pour lesquels on note une moins bonne simulation sont en particulier les n° 6, 10, 11, 32, 34 et 40. Il apparaît cependant que pour tous ces bassins le coefficient de correction de pluie est en butée à -25%. La légère dégradation de l'ajustement est donc due à un écoulement calculé trop abondant.
- * *Capacité de la réserve superficielle* (figure VI.12). Les capacités des réserves superficielles identifiées avec un bilan pentadaire sont très comparables à celles identifiées avec un bilan mensuel. La similitude est très grande, mais on note une exception très nette : le bassin n° 2 dont la capacité anormalement forte (198 mm soit 4 écart-types au dessus de la moyenne) passe à 42 mm, soit une valeur beaucoup plus conservatrice. La médiane de l'ordre de 45 mm est inchangée. Ce résultat est intéressant,

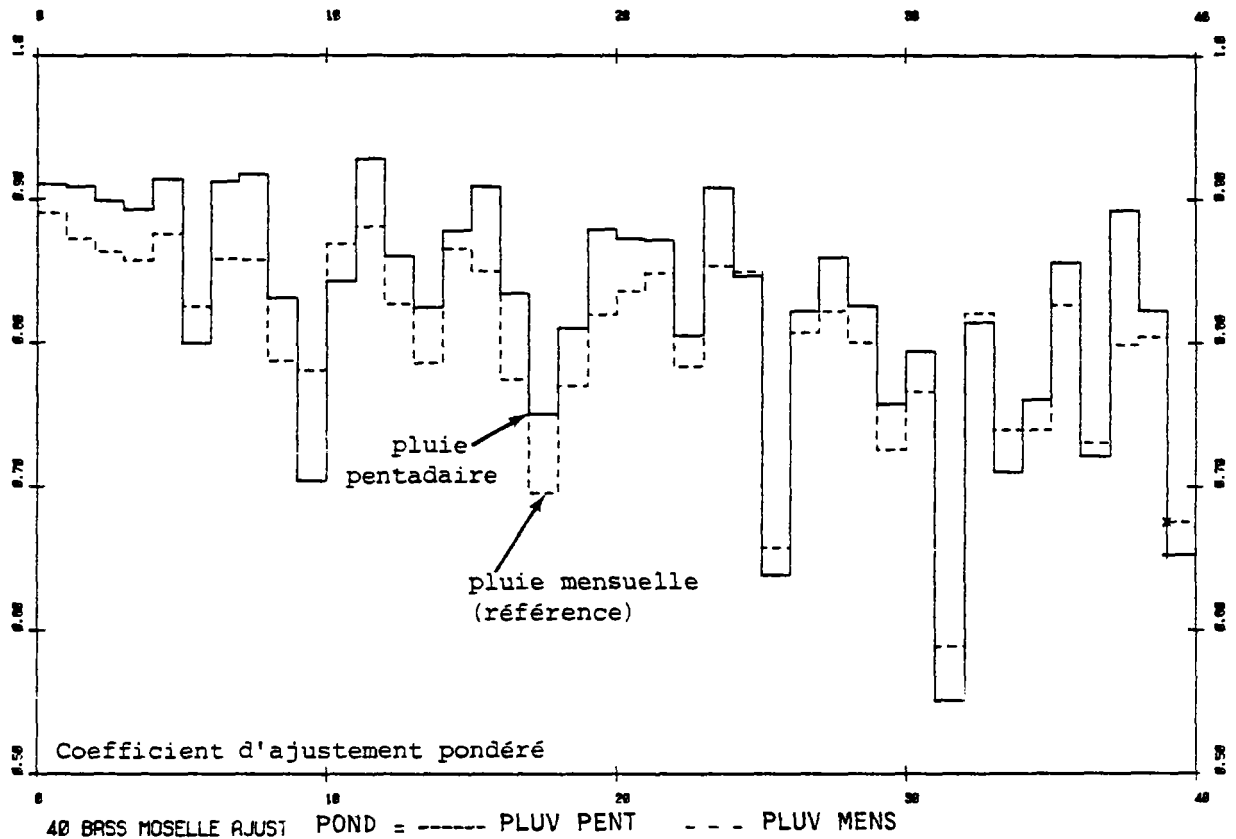


Figure VI.10 : Influence du pas de temps de la pluie : Simulation des débits mensuels

Le coefficient d'ajustement (pondéré) est généralement amélioré par un bilan pentadaire. Il y a cependant quelques exceptions : les bassins bien simulés restent bien simulés. Les bassins mal simulés restent mal simulés ce qui est important.

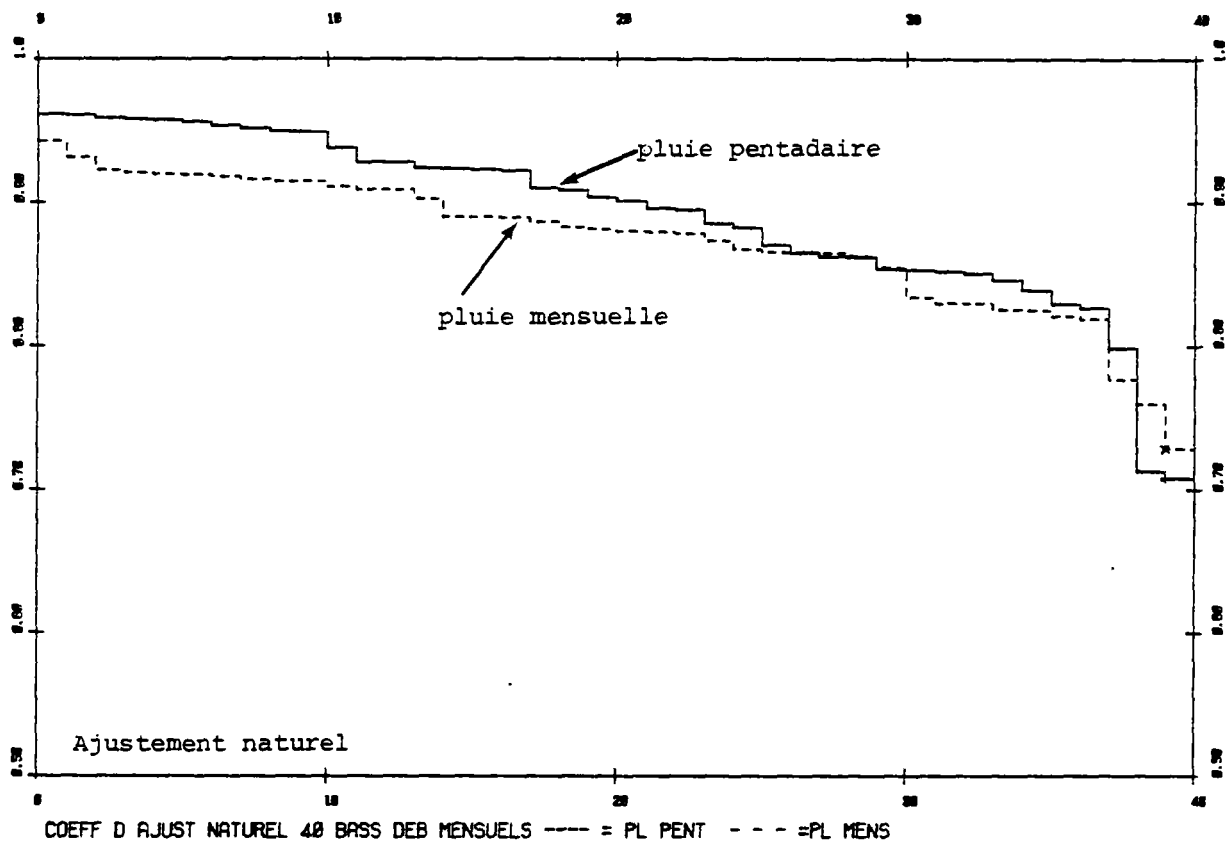
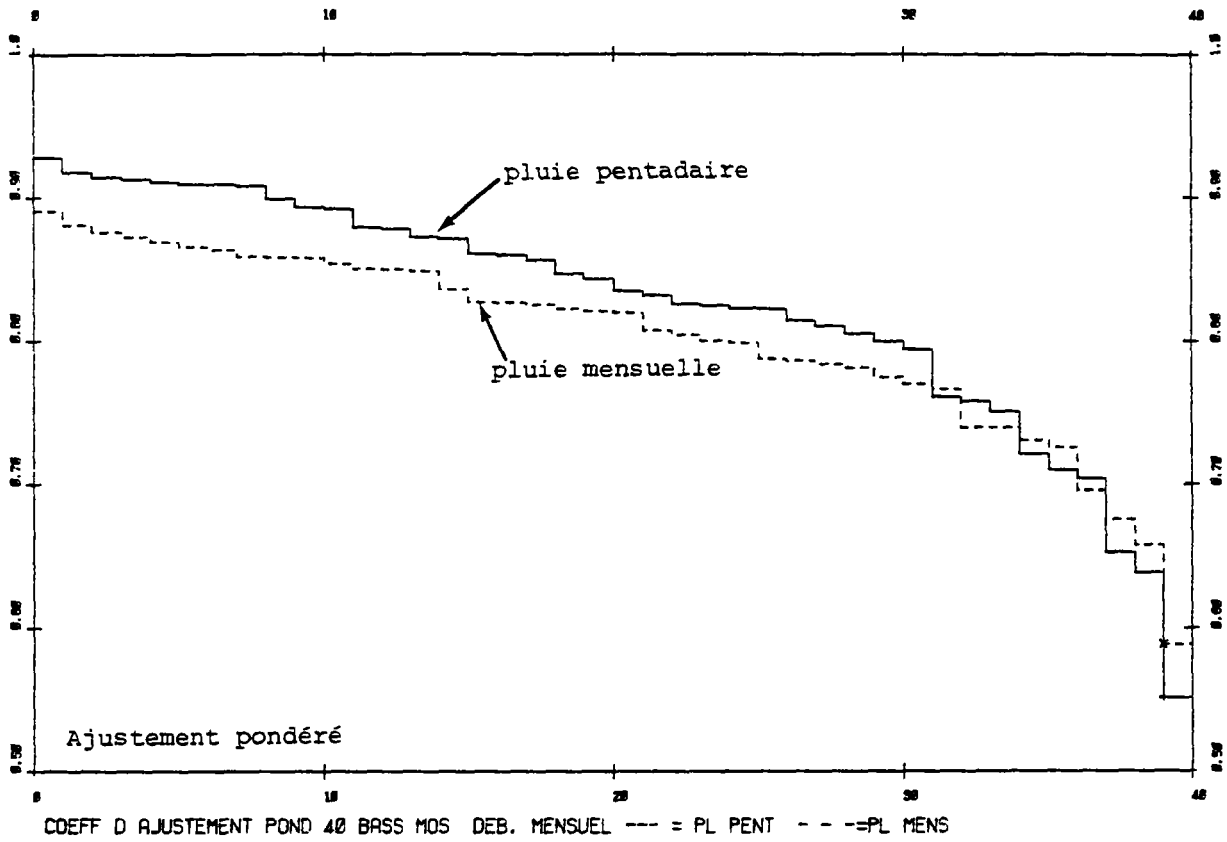


Figure VI.11 : Influence du pas de temps de la pluie - Simulation des débits mensuels

Le coefficient d'ajustement pondéré est nettement amélioré avec un bilan pentadaire (0.84 au lieu de 0.82 pour la médiane). Le coefficient d'ajustement naturel est également légèrement amélioré (0.90 au lieu de 0.88 pour la médiane).

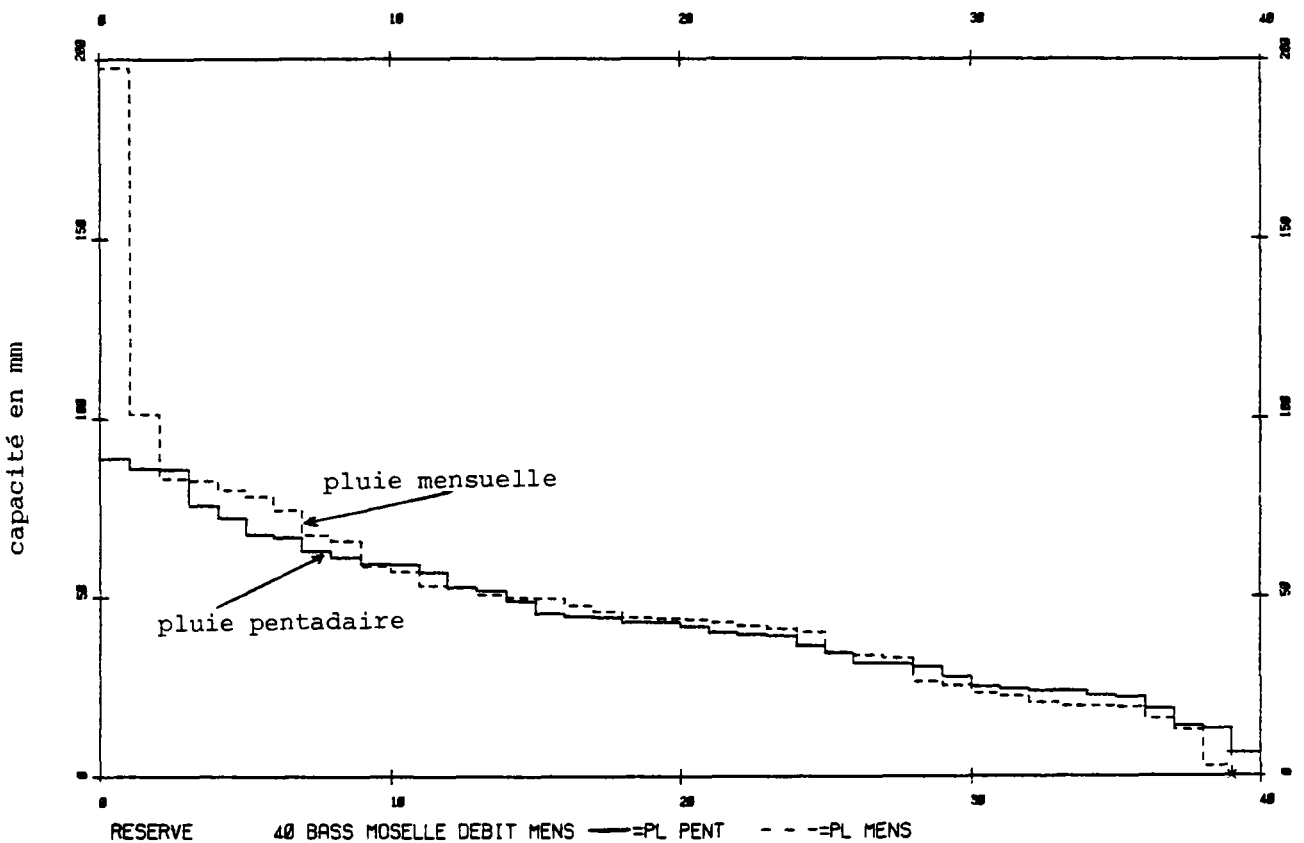
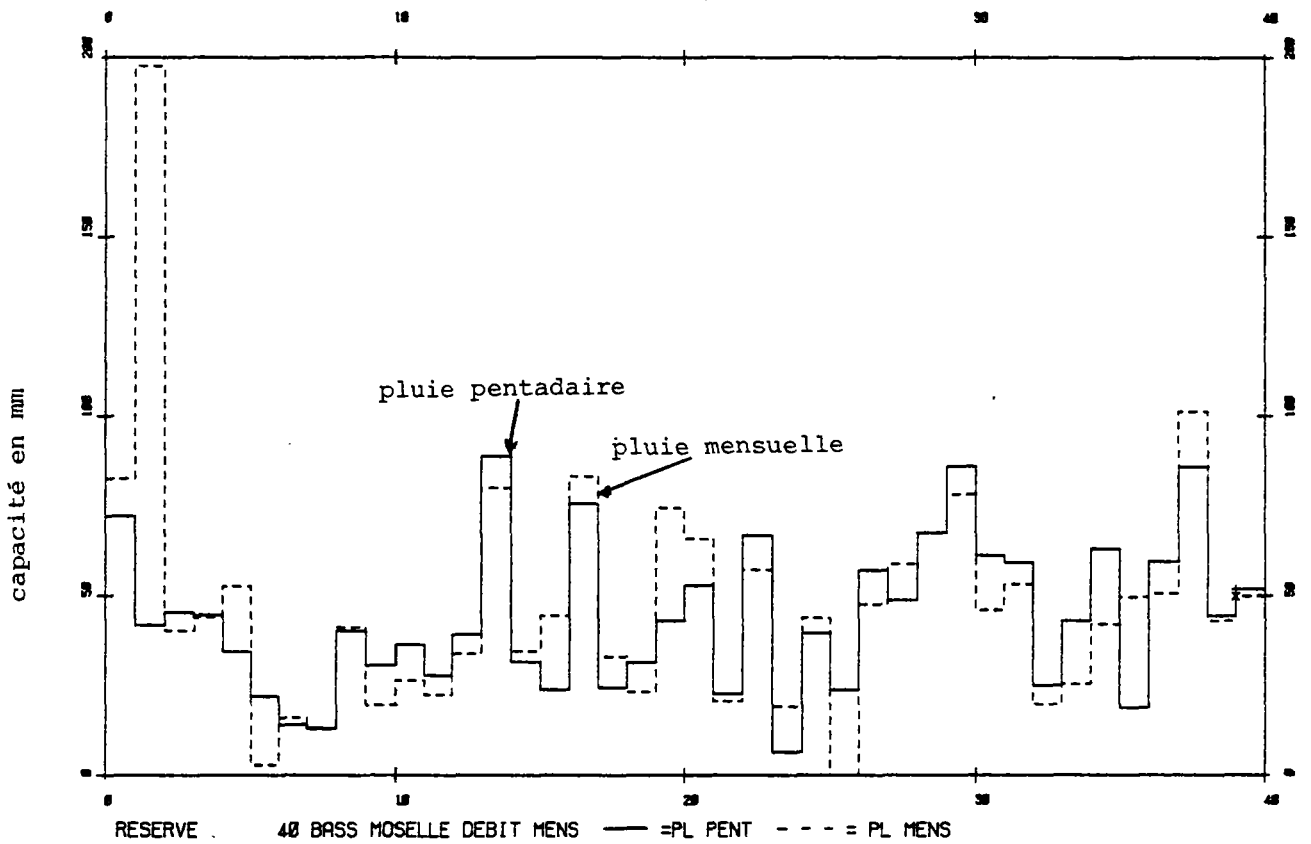


Figure VI.12 : Influence du pas de temps de la pluie - Simulation des débits mensuels

Les capacités des réserves superficielles identifiées avec un bilan pentadaire sont très comparables à celles identiques avec un bilan mensuel. Une exception : le bassin n° 2. On obtient une plus grande régularité. La médiane, de l'ordre de 45 mm est inchangée.

on aurait pu penser a priori que la capacité serait augmentée pour limiter la production lors des fortes pluies pentadaires isolées. Il n'en est rien, et on verra que l'équilibre est rétabli par une réduction globale de la lame d'eau.

- * *Coefficient de correction globale de la pluie* (figure VI.13). Les corrections globales de pluies identifiées avec un bilan pentadaire sont généralement plus négatives qu'avec un bilan mensuel.
- * *Hauteur d'équi-ruissellement* (figure VI.14). Les hauteurs d'équi-ruissellement identifiées avec un bilan pentadaire sont beaucoup plus faibles pour tous les bassins. Elles sont pratiquement toujours divisées par deux. Ce paramètre semble donc très dépendant du pas de temps de calcul.

Dans un but de comparaison des résultats en extension de données, on a également comparé les résultats obtenus à différents pas de temps avec les lames d'eau calculées avec les 48 stations pluviométriques observées continuellement pendant la période 1968-1977 (soit 10 ans). Pour cette lame d'eau :

- l'amélioration du coefficient d'ajustement (figure VI.15) est beaucoup plus nette : 0.84 au lieu de 0.80 pour la médiane,
- le coefficient de correction globale de la pluie (figure VI.16) est beaucoup plus négatif : médiane de -24% au lieu de -17% ; 50 % des bassins sont en butée avec une correction de -25% ;
- la proportion d'écoulement rapide est beaucoup plus importante avec un pas de temps pentadaire (figure VI.17) : 130 mm au lieu de 85 mm pour la médiane.

5. INFLUENCE DE LA REPARTITION DE LA PLUIE AU COURS DU PAS DE TEMPS (figure VI.18)

En conservant un pas de temps mensuel, on a examiné si on n'obtenait pas de meilleurs résultats en supposant que chaque pas de temps (de 1 mois) est découpé en deux parties :

- 75 % du pas pendant lesquels 100 % de la pluie tombent, suivis par :
- 25 % du temps sans pluie.

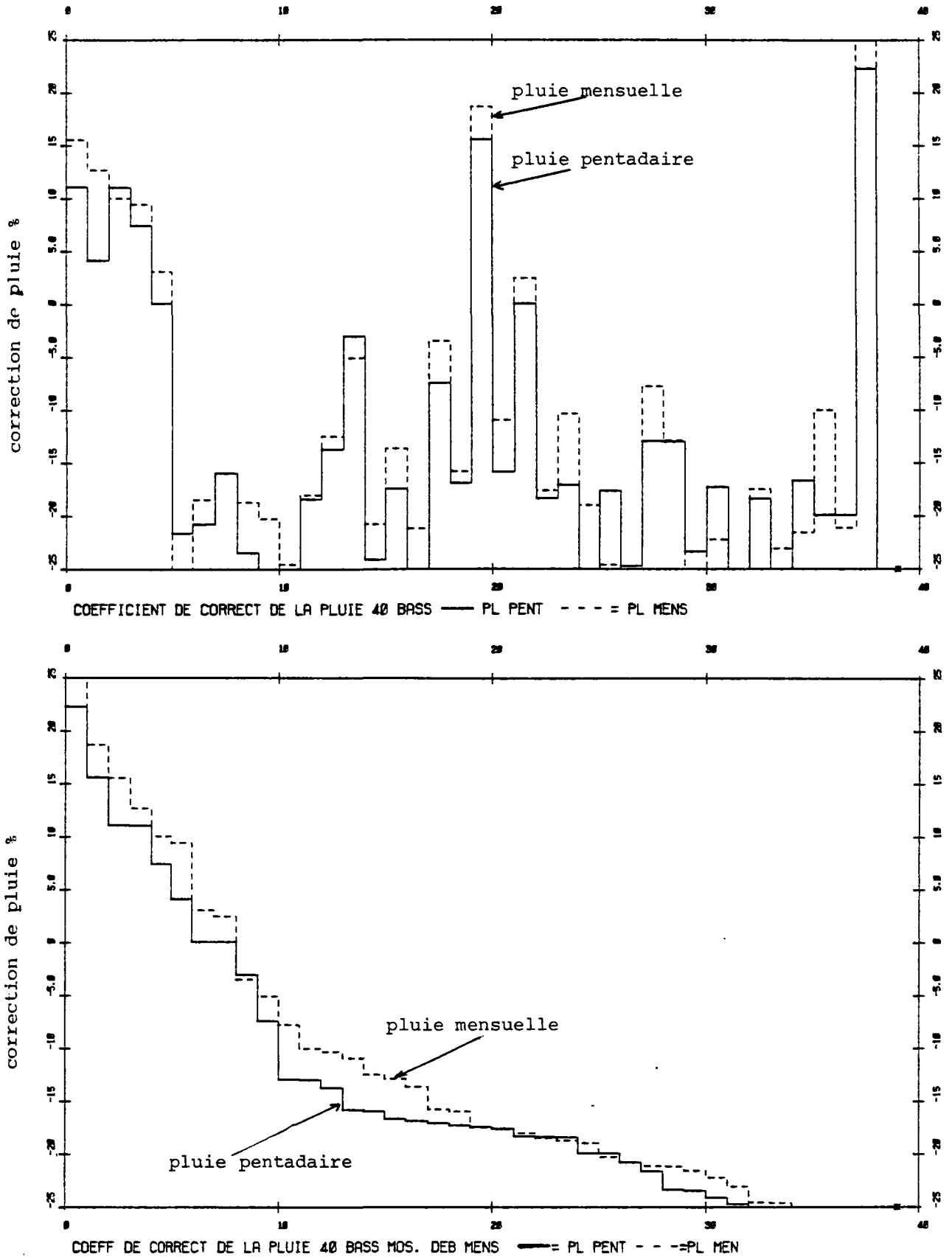


Figure VI.13 : Influence du pas de temps de la pluie sur les corrections globales de pluies - Simulation des débits mensuels

Les coefficients de correction de la pluie sont semblables (bien que légèrement plus négatifs avec une pluie pentadaire).

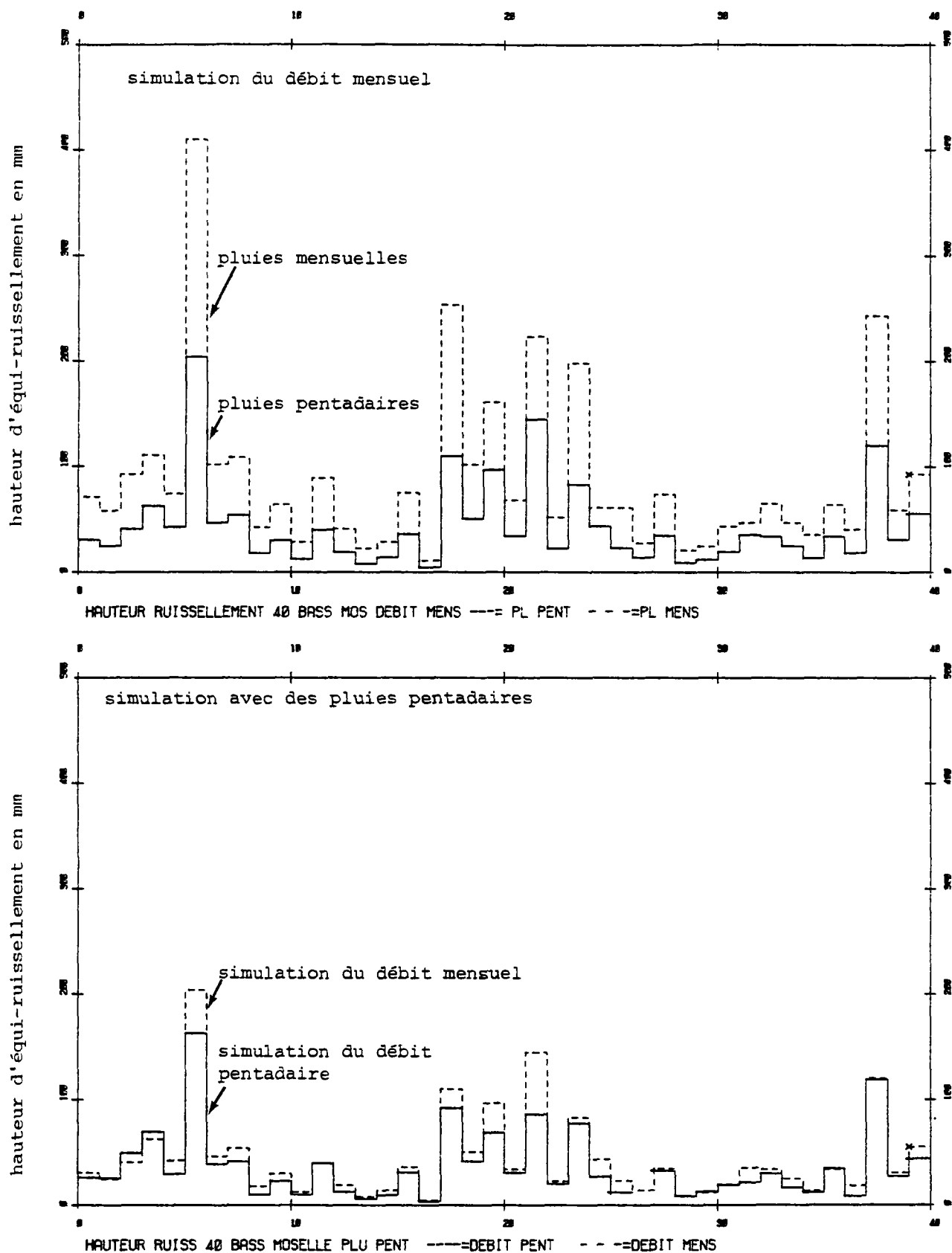


Figure VI.14 : Influence du pas de temps de la pluie - Simulation des débits mensuels

Les hauteurs d'équi-ruissellement sont pratiquement divisées par 2 avec un calcul pentadaire.

Nota : si on se cale sur les débits pentadaires (avec pluies pentadaires) les hauteurs d'équi-ruissellement sont à peu près les mêmes bien que légèrement diminuées.

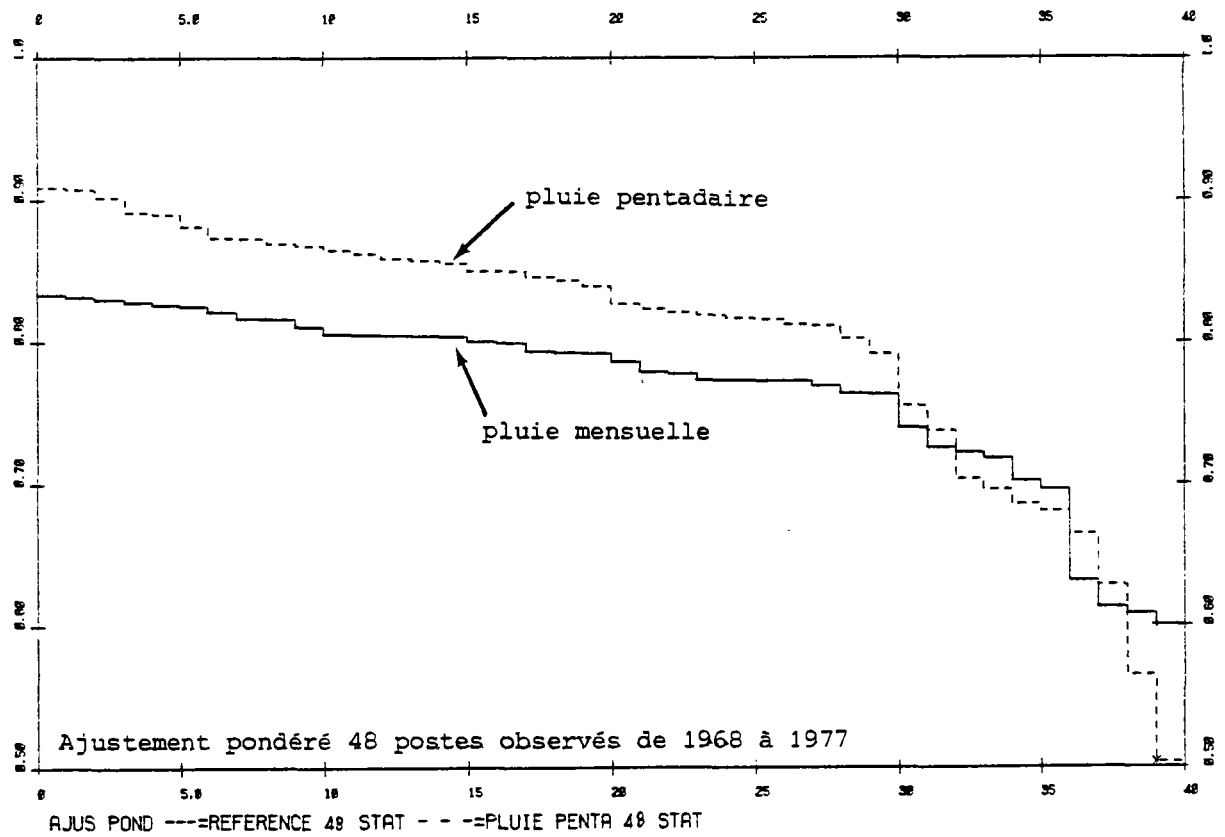
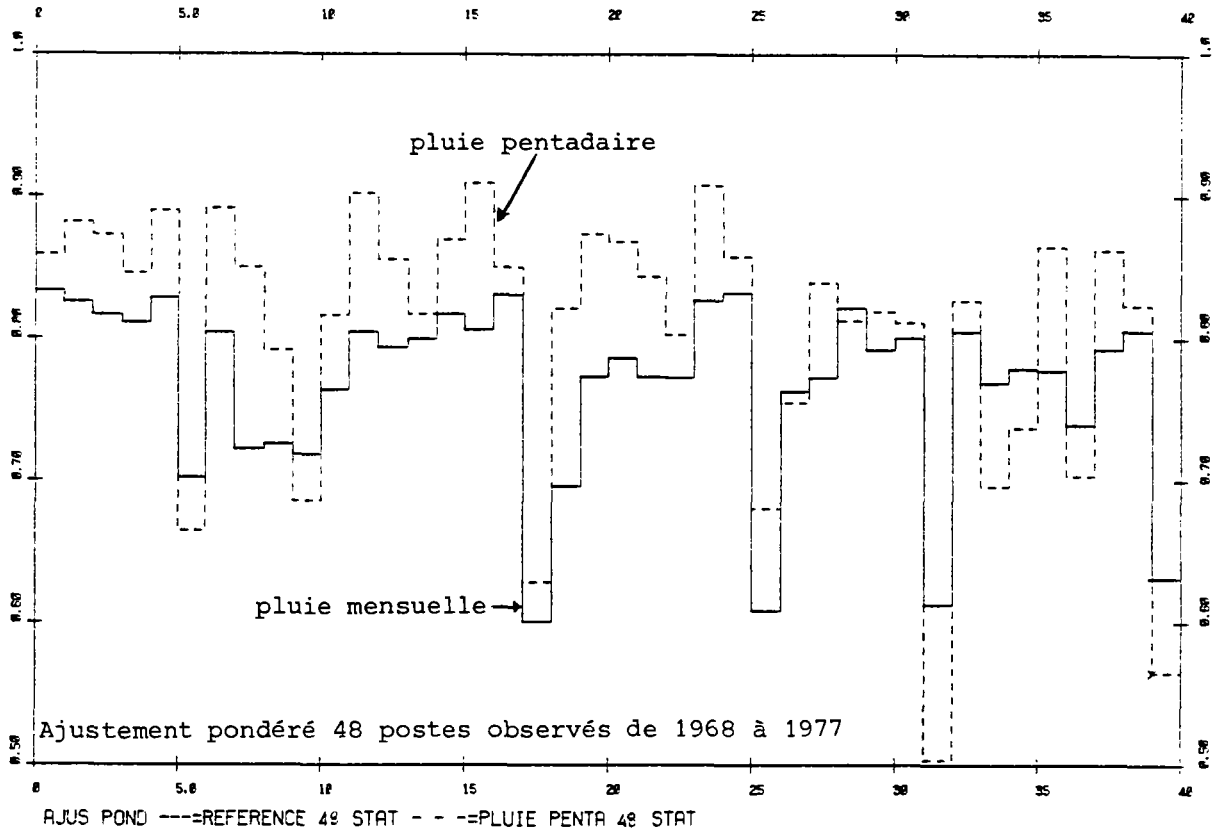


Figure VI.15 : Influence du pas de temps de la pluie : 48 stations observées de 1968 à 1977

La simulation au pas de temps pentadaire est nettement meilleure. L'ajustement pondéré a une valeur médiane de 0.84 au lieu de 0.80.

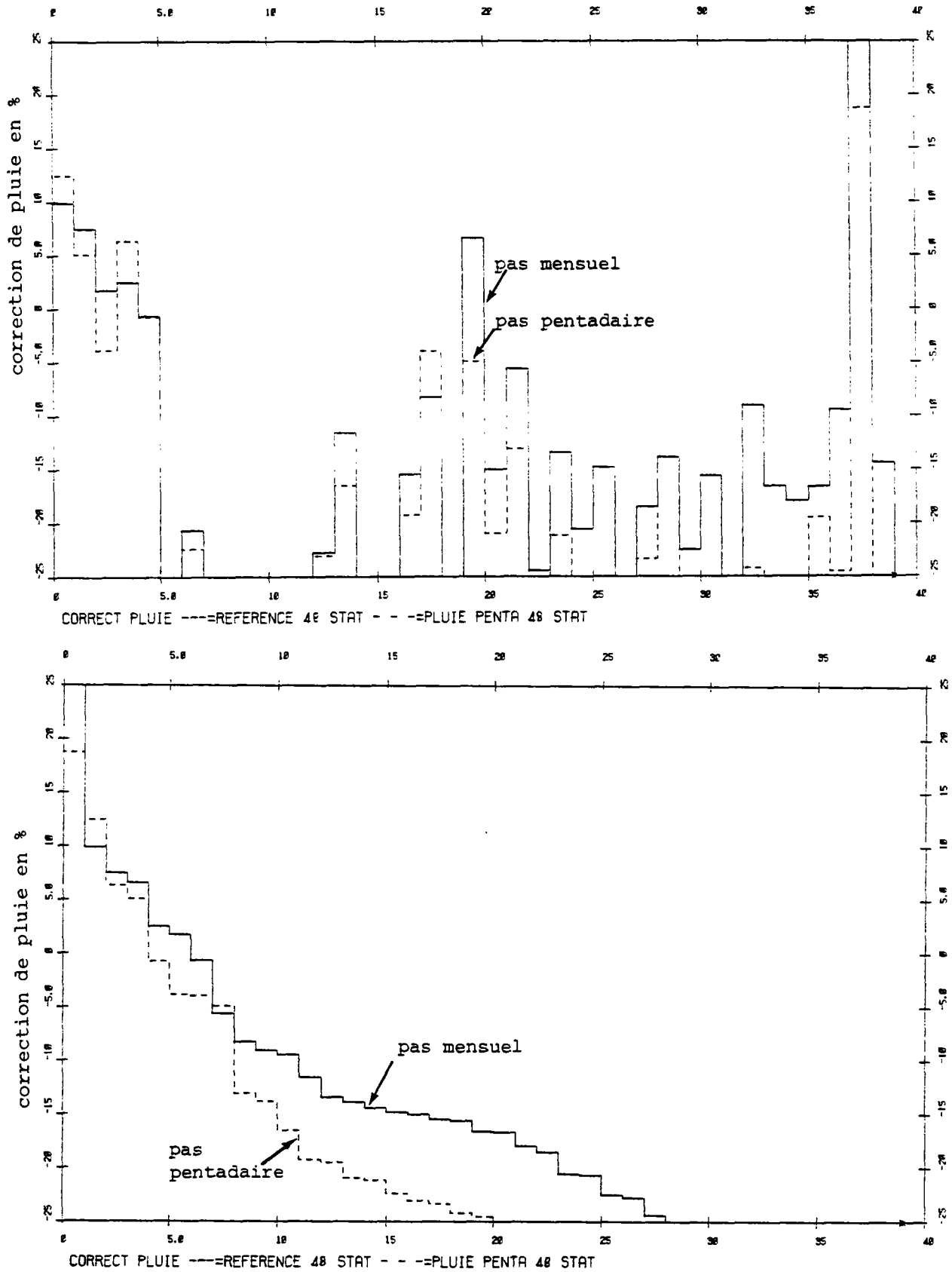


Figure VI.16 : Influence du pas de temps de la pluie : 48 stations observées de 1968 à 1977

Les calculs montrent que les corrections de pluies identifiées avec une lame d'eau pentadaire sont nettement plus négatives car un pas de temps pentadaire produit plus de pluie efficace (médiane de -24 % au lieu de -17 %).

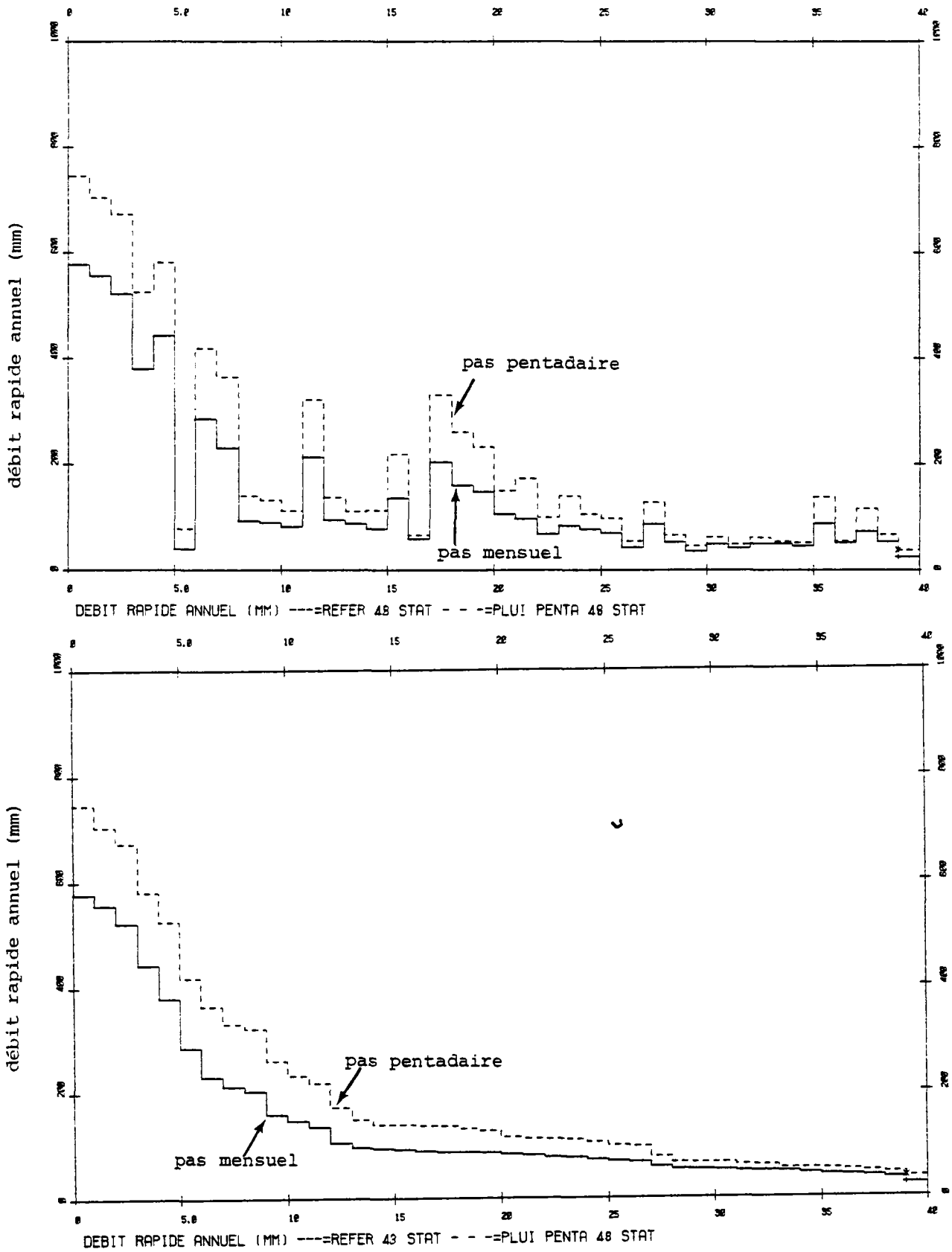


Figure VI.17 : Influence du pas de temps de la pluie : 48 stations observées pendant la période 1968/1977

Avec un pas de temps pentadaire le modèle produit plus de pluie efficace ce qui est compensé par la correction sur la pluie, mais la proportion d'écoulement rapide est nettement plus importante (médiane 130 mm au lieu de 85 mm).

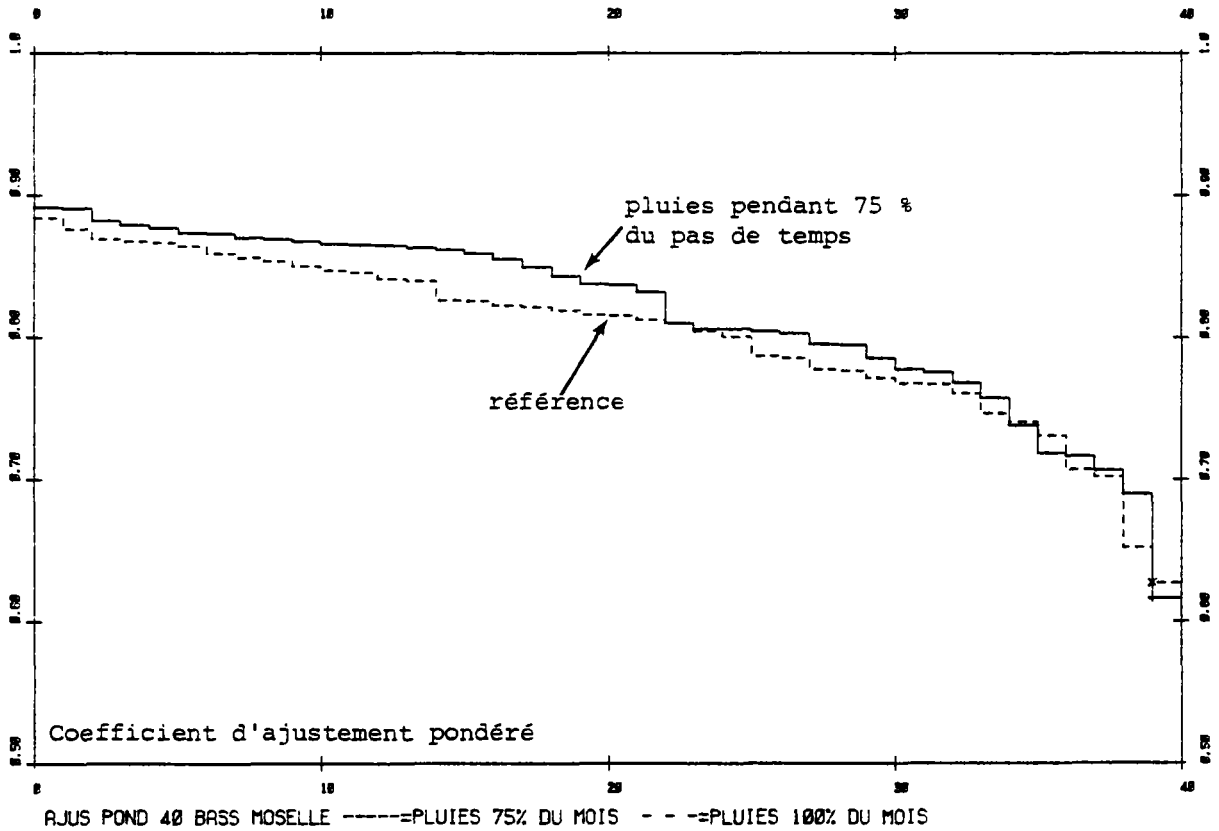
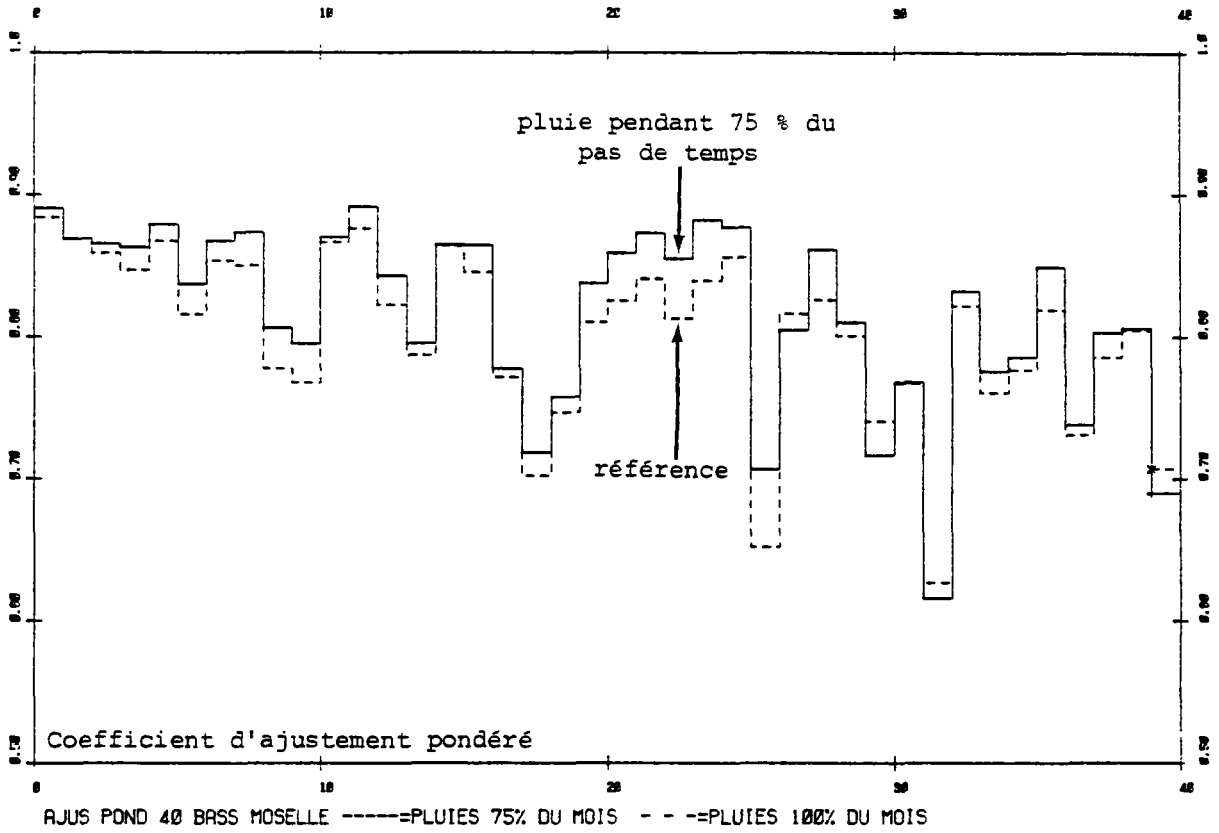


Figure VI.18 : Influence de la répartition de la pluie

En supposant que la pluie ne tombe que pendant 75 % de chaque mois (au lieu de 100 %) on améliore généralement la simulation mais la différence n'est pas très importante.

Il apparait que la simulation est généralement très légèrement améliorée, mais pas de manière significative.

6. INFLUENCE DU PAS DE TEMPS SELON LA CAPACITE DE LA RESERVE SUPERFICIELLE

Un pas de temps fin pour le bilan produit en moyenne une pluie efficace plus abondante qu'un pas de temps plus grossier. Cette augmentation de pluie efficace (c'est-à-dire de pluie restant après évapotranspiration) est cependant plus importante avec une petite capacité de réserve superficielle (COUDRAIN et THIERY, 1978). Pour quantifier cet effet, on étudie l'accroissement de pluie efficace entre un pas de temps mensuel et un pas de temps pentadaire pour chacun des 40 bassins modélisés, avec les paramètres de références, mais des capacités de réserves superficielles fixes : a) à 100 mm ; b) à 20 mm (figure VI.19).

Les résultats sont les suivants :

- * *Capacité de 100 mm.* L'augmentation annuelle de pluie efficace (ou d'écoulement) est dans 80 % des bassins comprise entre 3 et 18 mm avec une médiane de 12 mm. Pour les bassins abondants, cette augmentation est quasi-nulle, car la pluie est pratiquement toujours nettement supérieure à l'évapotranspiration potentielle.
- * *Capacité de 20 mm.* L'augmentation annuelle est dans 80 % des bassins comprise entre 12 et 39 mm, avec une médiane de 18 mm.

7. INFLUENCE DE LA CAPACITE DE LA RESERVE SUPERFICIELLE (selon le pas de temps)

Une capacité de réserve superficielle plus faible produit une pluie efficace (et donc un écoulement) plus important. En effet, à pluie identique, une réserve superficielle plus petite s'assèchera plus souvent et limitera donc plus l'évapotranspiration. L'effet d'une diminution de la réserve superficielle n'est pas du tout linéaire et dépend de la répartition de la pluie dans le temps. En particulier, il est évident qu'à condition de partir du même état (saturé par exemple) la différence de capacité ne jouera que si la réserve s'assèche. Pour analyser cet effet on a étudié l'accroissement de pluie efficace entre une capacité

de réserve superficielle de 100 mm et de 20 mm sur les 40 bassins modélisés avec un pas de temps mensuel ou pentadaire (figure VI.20). On constate les résultats suivants :

- * *Pas de temps mensuel.* Malgré une non-linéarité évidente, quand la capacité de la réserve superficielle passe de 100 mm à 20 mm, soit une diminution de 80 mm, on observe dans 90 % des bassins un accroissement annuel qui est compris entre 75 mm et 82 mm, c'est-à-dire extrêmement proche de la différence de capacité. Dans 15 bassins cependant, l'accroissement est inférieur à 80 mm, ce qui montre qu'en moyenne pour ces bassins (surtout pour les plus abondants) la réserve ne s'assèche un peu moins d'une fois par an.
- * *Pas de temps pentadaire.* Avec un pas de temps plus fin, on constate un plus grand accroissement quand la capacité de la réserve est diminuée de 100 à 20 mm. Cependant, pour 90 % des bassins, cet accroissement annuel est compris entre 80 mm et 100 mm, ce qui montre un peu plus d'un assèchement par an.
- * *Coefficient d'écoulement* (figure VI.21). En définissant le coefficient d'écoulement global comme le rapport de l'écoulement (annuel) moyen à la pluie (annuelle) moyenne, on observe que les écarts entre les valeurs obtenues avec une capacité de 100 mm ou 20 mm deviennent considérables pour les bassins peu abondants. Le coefficient d'écoulement passe pour ces bassins de 10 % environ (avec 100 mm) à 25 % (avec 20 mm) soit un rapport de 1 à 2,5. La capacité de la réserve superficielle est beaucoup mieux déterminée pour ces bassins que pour les bassins abondants (n° 1 à 5 par exemple) pour lesquels ce coefficient passe de 61 à 62 %.
- * *Influence de la régularité des pluies.* A titre de comparaison, on a analysé l'influence de la capacité de la réserve superficielle dans un climat méditerranéen : Montpellier Frejorgue de 1978 à 1983 (figure VI.22). Avec un climat méditerranéen, l'influence du pas de temps est considérable surtout pour de petites capacités de réserve superficielle. Avec une capacité de 10 mm, on note par rapport à un bilan JOURNALIER les sous-estimations suivantes :
 - . 10 % avec un bilan pentadaire,
 - . 21 % avec un bilan décadaire,
 - . 34 % avec un bilan mensuel.

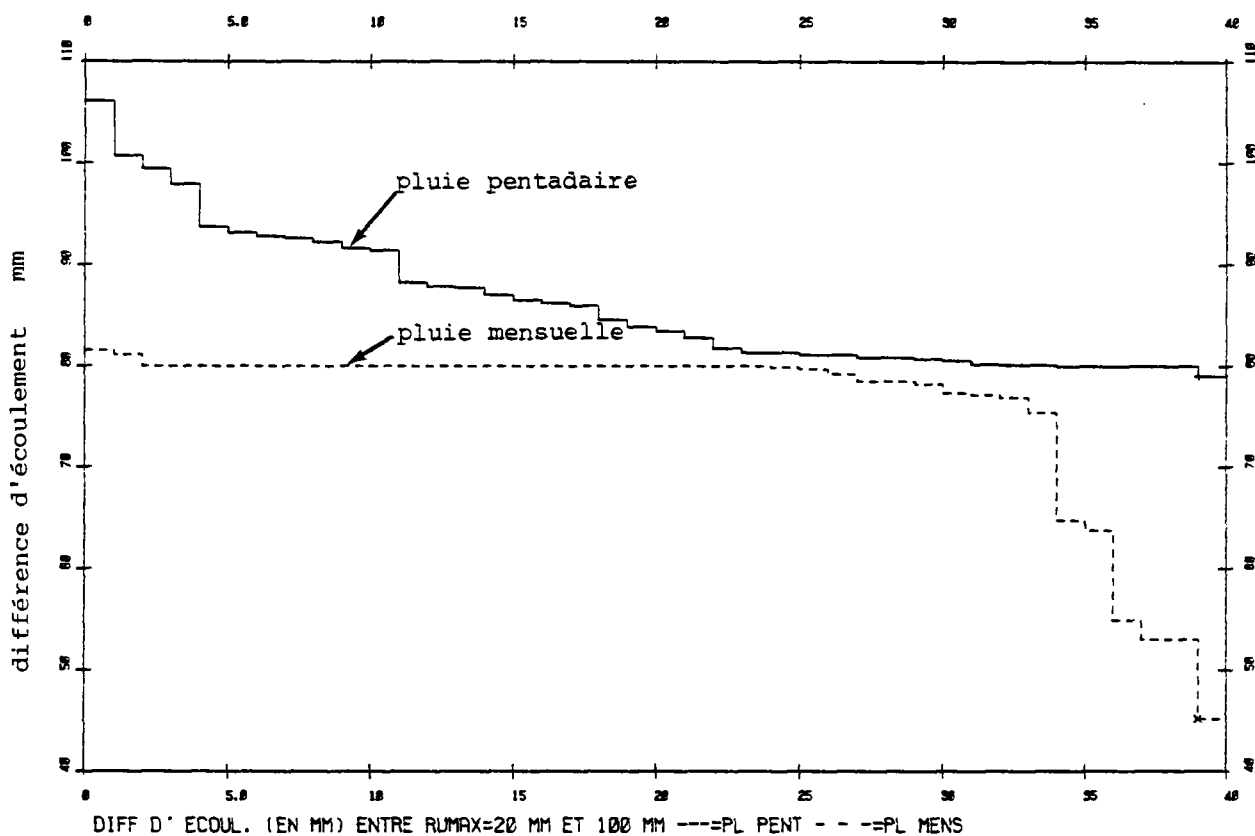
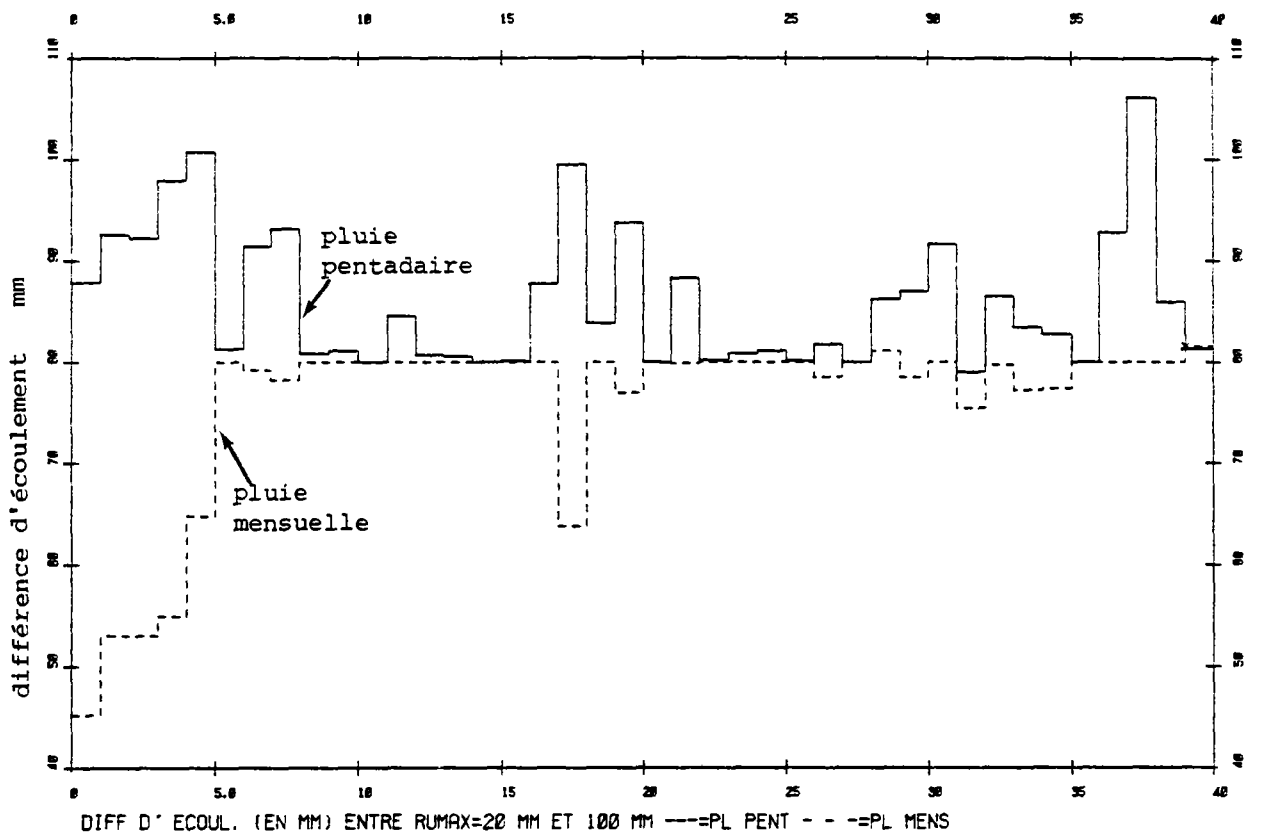


Figure VI.20 : 40 bassins de la Moselle : influence de la réserve utile selon le pas de temps

Quand la réserve utile passe de 100 mm à 20 mm (soit 80 mm de différence) malgré une non linéarité évidente on observe avec une pluie mensuelle un accroissement de pluie efficace de 75 à 82 mm dans 90 % des bassins et avec une pluie pentadaire de 80 à 100 mm dans 90 % des bassins. Avec une pluie mensuelle l'écart est en général inférieur à 80 mm car la réserve de 100 mm ne s'assèche pas chaque année surtout pour les bassins abondants.

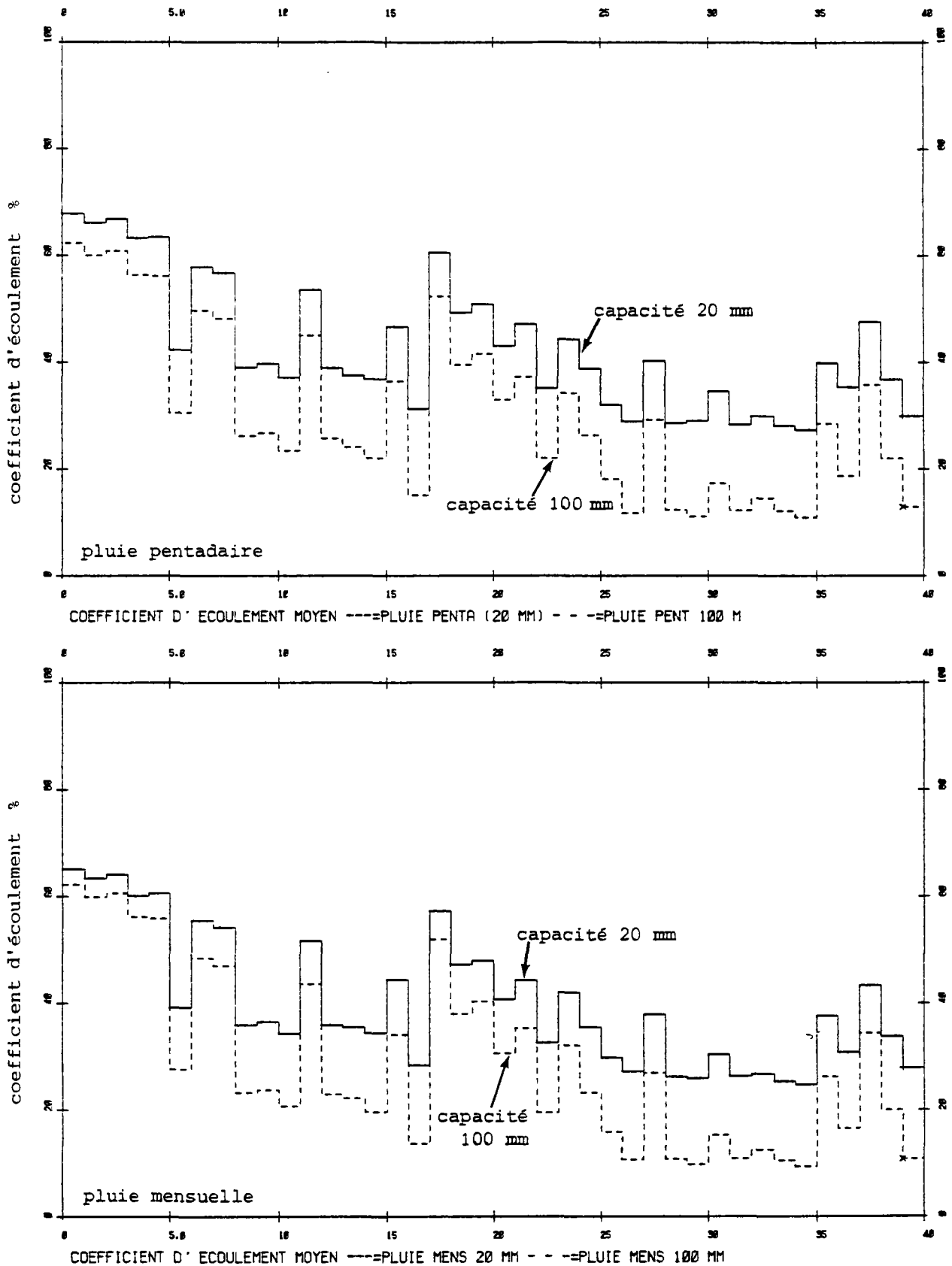


Figure VI.21 : 40 bassins de la Moselle : influence de la réserve superficielle selon le pas de temps

Le coefficient d'écoulement annuel est considérablement réduit quand la réserve utile passe de 20 mm à 100 mm, cette réduction est à peu près comparable avec une pluie mensuelle ou avec une pluie pentadaire. La réduction est beaucoup plus apparente pour les bassins ayant un faible écoulement car la diminution est d'environ 80 mm en moyenne ce qui représente un plus gros pourcentage pour les bassins qui coulent peu.

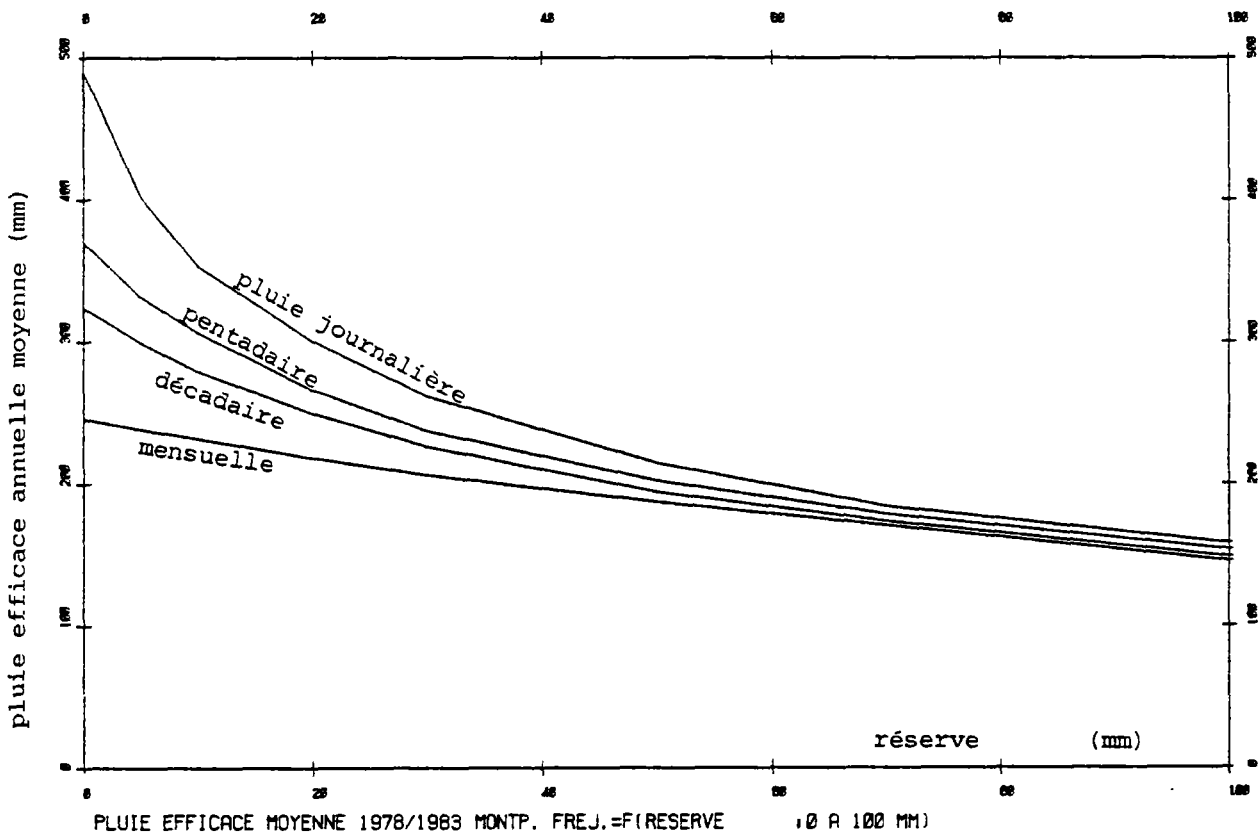
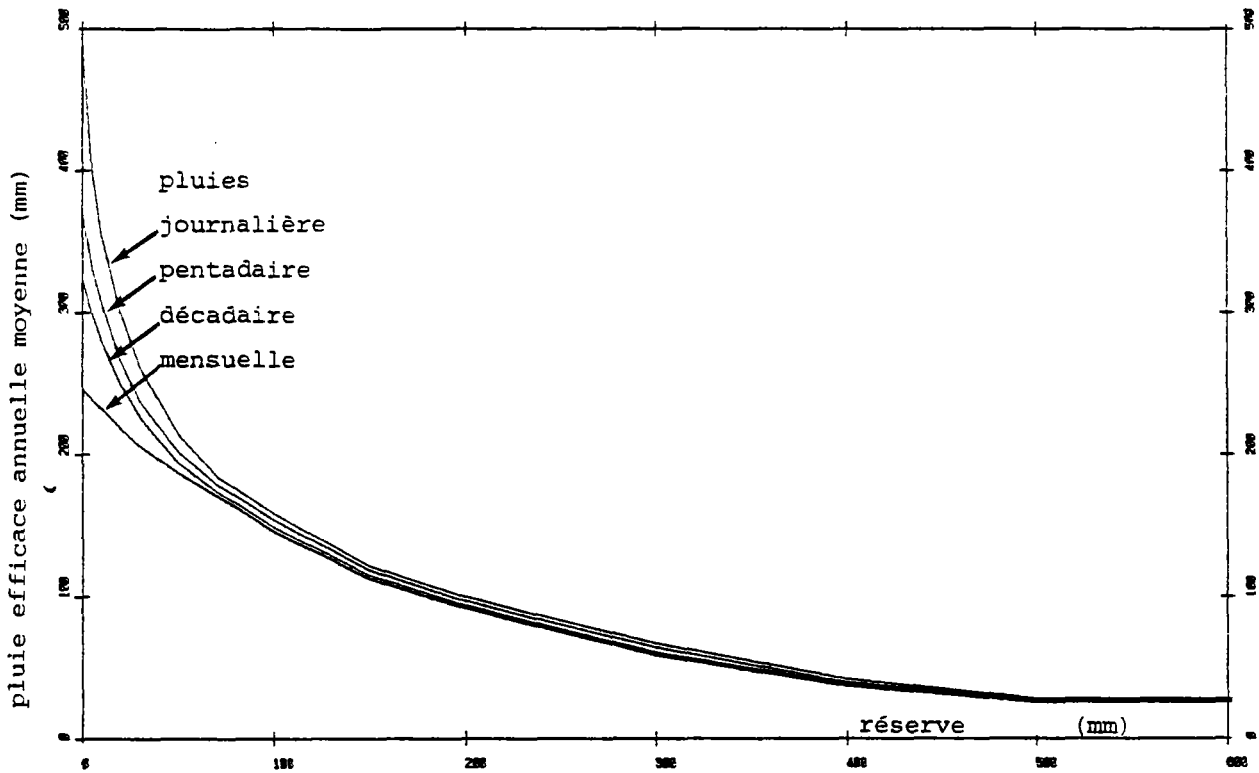


Figure VI.22 : Influence du pas de temps de calcul et de la réserve superficielle sur la pluie efficace en climat méditerranéen (Montpellier, 1978-1983)

Il apparaît que l'influence du pas de temps est considérable surtout pour les faibles valeurs de réserve utile jusqu'à environ 50 mm. Pour une réserve de 10 mm on note une sous-estimation de 13 % avec des pluies pentadaires, 21 % si elles sont décadaires et 34 % si elles sont mensuelles, avec une réserve de 50 mm les sous-estimations sont de 6 %, 10 % et 13 %.

Avec une capacité de 50 mm, ces sous-estimations sont réduites à :

- . 6 % avec un bilan pentadaire,
- . 10 % avec un bilan décadaire,
- . 13 % avec un bilan mensuel.

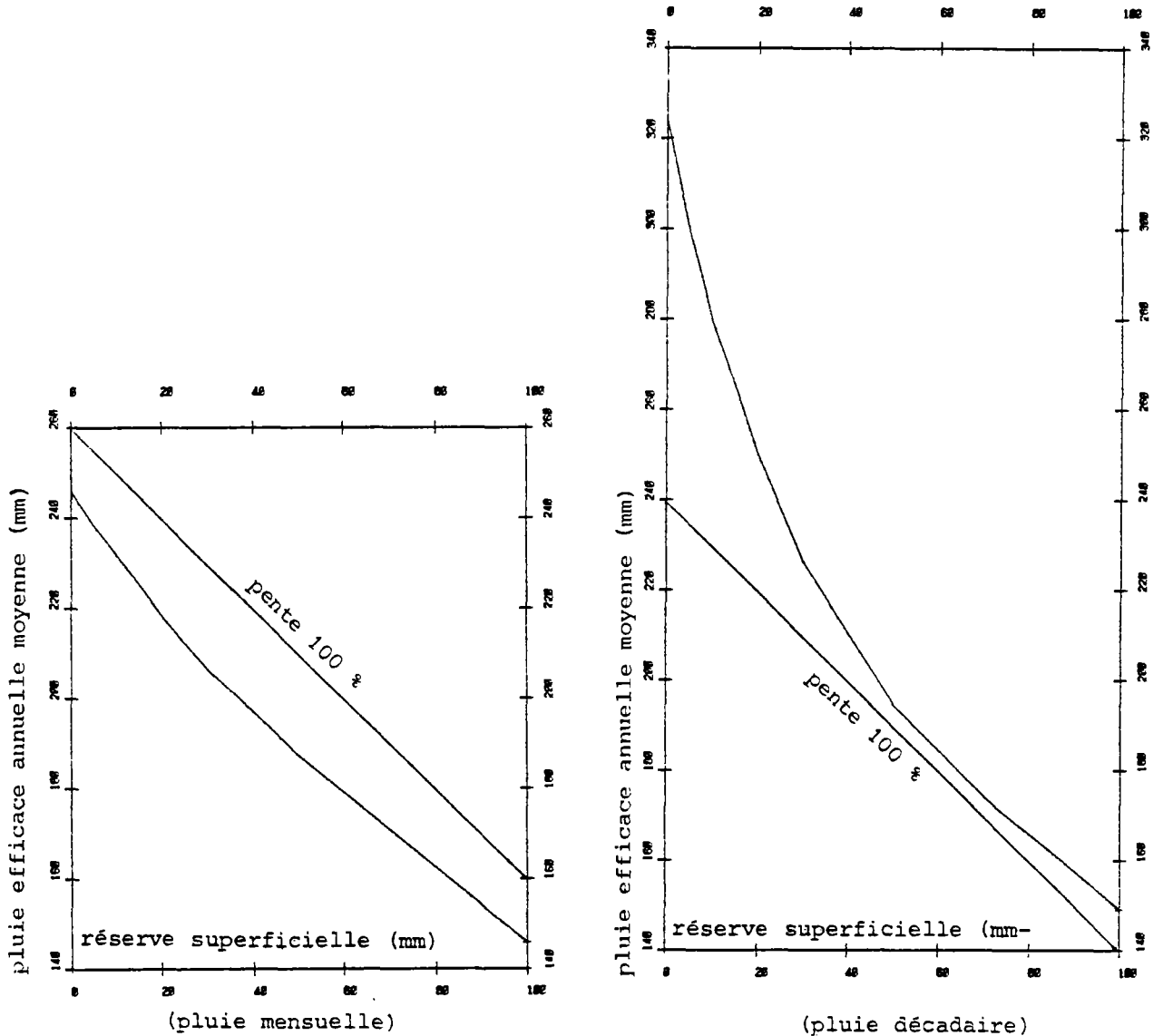
L'influence de la capacité de la réserve superficielle est surtout sensible avec un pas de temps fin. Avec un bilan journalier, on note une diminution de :

- . 15 % quand la capacité passe de 10 à 20 mm,
- . 7 % quand elle passe de 50 à 60 mm.

Avec un bilan pentadaire, ces diminutions sont de 13 % et 6 %.

Avec un bilan décadaire, elles sont de 11 % et 5 %.

Avec un bilan mensuel, elles sont de 6 % et 4 %.



Avec un pas mensuel, la diminution de pluie efficace est à peu près égale à l'augmentation de réserve utile, alors que cette diminution est beaucoup plus élevée avec une pluie décadaire (et encore plus avec une pluie pentadaire ou journalière) ; en effet, avec un pas de temps fin, la réserve superficielle s'assèche d'autant plus souvent qu'elle est petite et de toute façon plusieurs fois par an.

8. INFLUENCE DE LA PRISE EN COMPTE DE LA NEIGE.

La simulation de référence a été réalisée en prenant en compte l'influence de la neige. En fait, seul l'équivalent en eau des précipitations était connu et lors de la modélisation toute précipitation survenue pendant un mois où la température est inférieure à 0°C était considérée comme de la neige. La température est connue seulement en 11 postes situés à des altitudes relativement basses. Elle a donc été ajustée d'une constante pour tenir compte d'une différence systématique et aussi du pas de temps mensuel qui ne permet l'apparition de neige que si la température moyenne du mois est inférieure à 0°, ce qui est assez brutal.

Tous les bassins ont été simulés avec prise en compte éventuelle de la neige, mais on a comparé les résultats obtenus avec les 12 premiers (les plus hauts) avec et sans prise en compte de la neige.

* *Coefficient d'ajustement pondéré* (figure VI.23). Seuls les bassins les plus hauts (n° 1 à 8), donc les plus froids, ont une simulation qui est améliorée par la prise en compte de la neige. L'écart est parfois assez important : par exemple 0.86 à 0.91 pour le bassin n° 1, 0.85 à 0.90 pour le bassin n° 4, 0.71 à 0.76 pour le bassin n° 6. En fait, il apparaît que le modèle ne fait intervenir de la neige que pendant 2 mois en janvier et février 1973, avec fonte en mars et avril. Le reste du temps, la simulation est quasi-identique avec et sans neige.

* *Simulation de deux bassins* (figure VI.24 et VI.25)

a) bassin n° 1 : Fresse sur Moselle (altitude 803 m)

b) bassin n° 14 : Mirecourt sur Madon (altitude 527 m)

La simulation du bassin n° 1 (Fresse sur Moselle) montre nettement l'apparition et la fonte de la neige au début de 1973.

La simulation du bassin n° 14 (Mirecourt sur Madon) montre également des différences uniquement au cours des premiers mois de 1973. La neige

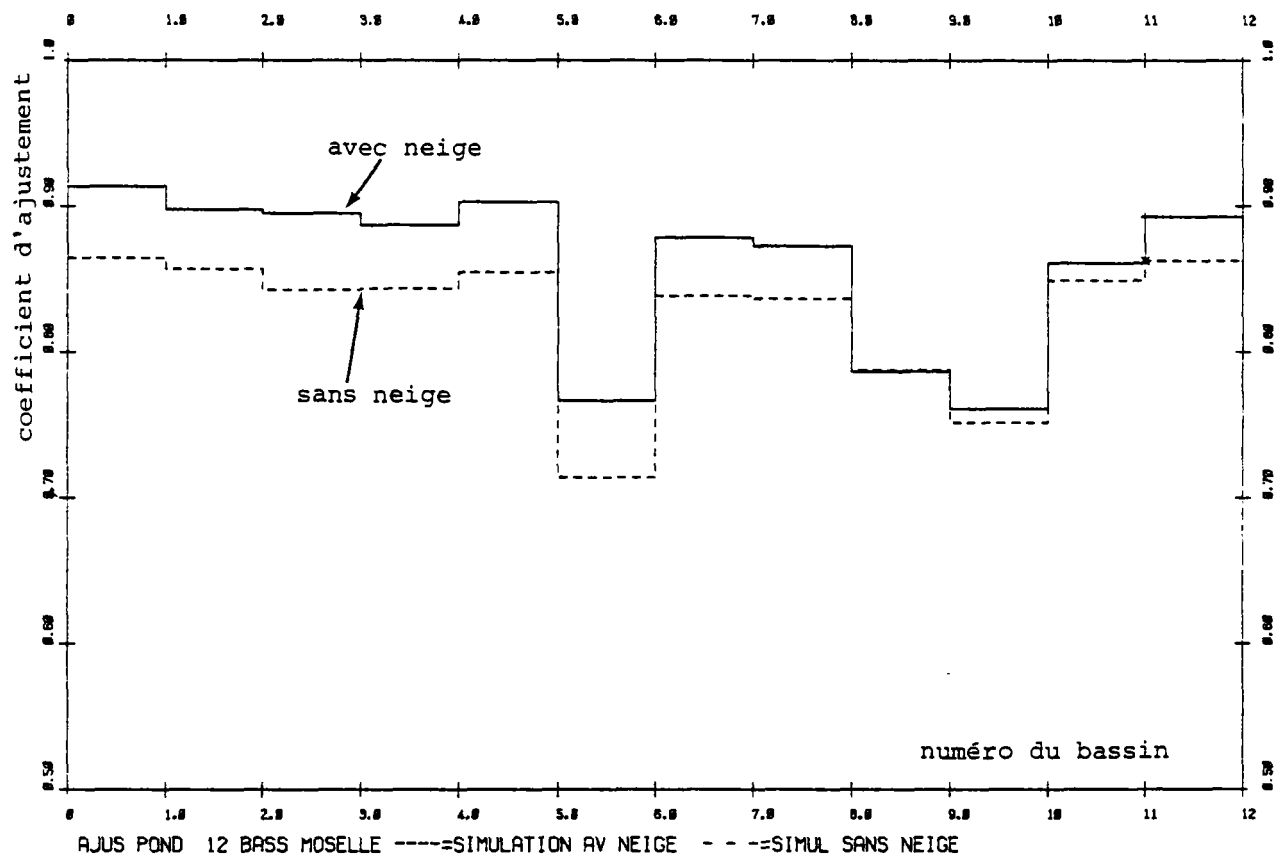


Figure VI.23 : influence de la neige sur l'ajustement pondéré

Le fait de tenir compte de la neige améliore significativement l'ajustement pour les bassins les plus hauts (n° 1 à 12) donc les plus froids. En fait, il apparaît que la neige n'intervient dans le modèle que pendant deux mois (janvier et février 1973).

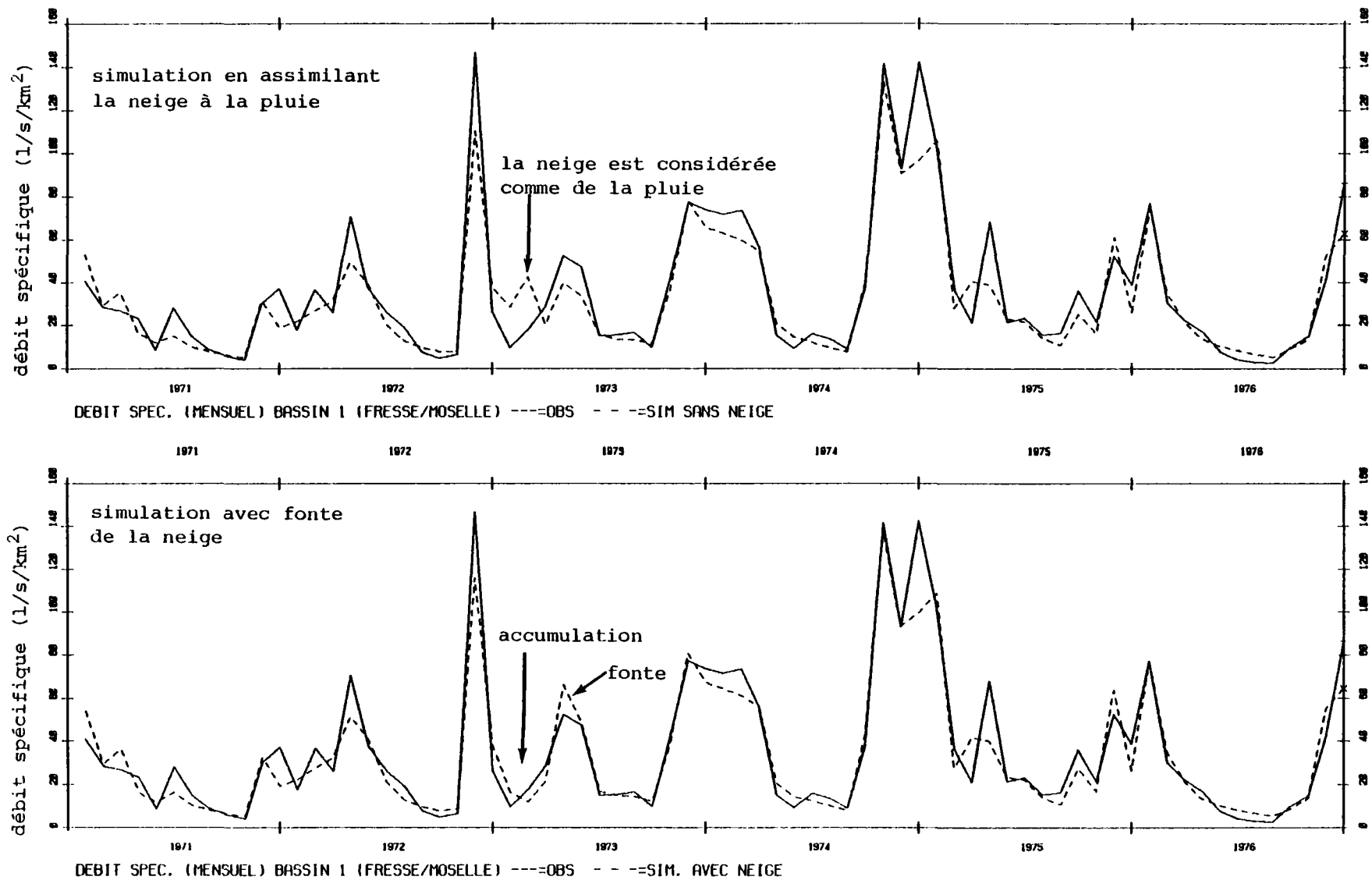


Figure IV.24 : Influence de la neige : simulation du bassin n° 1 Fresse/Moselle

Au pas de temps mensuel, la neige n'apparait qu'en janvier et février 1973 et fond surtout pendant le mois de mars 1973. Le reste du temps la simulation est absolument identique.

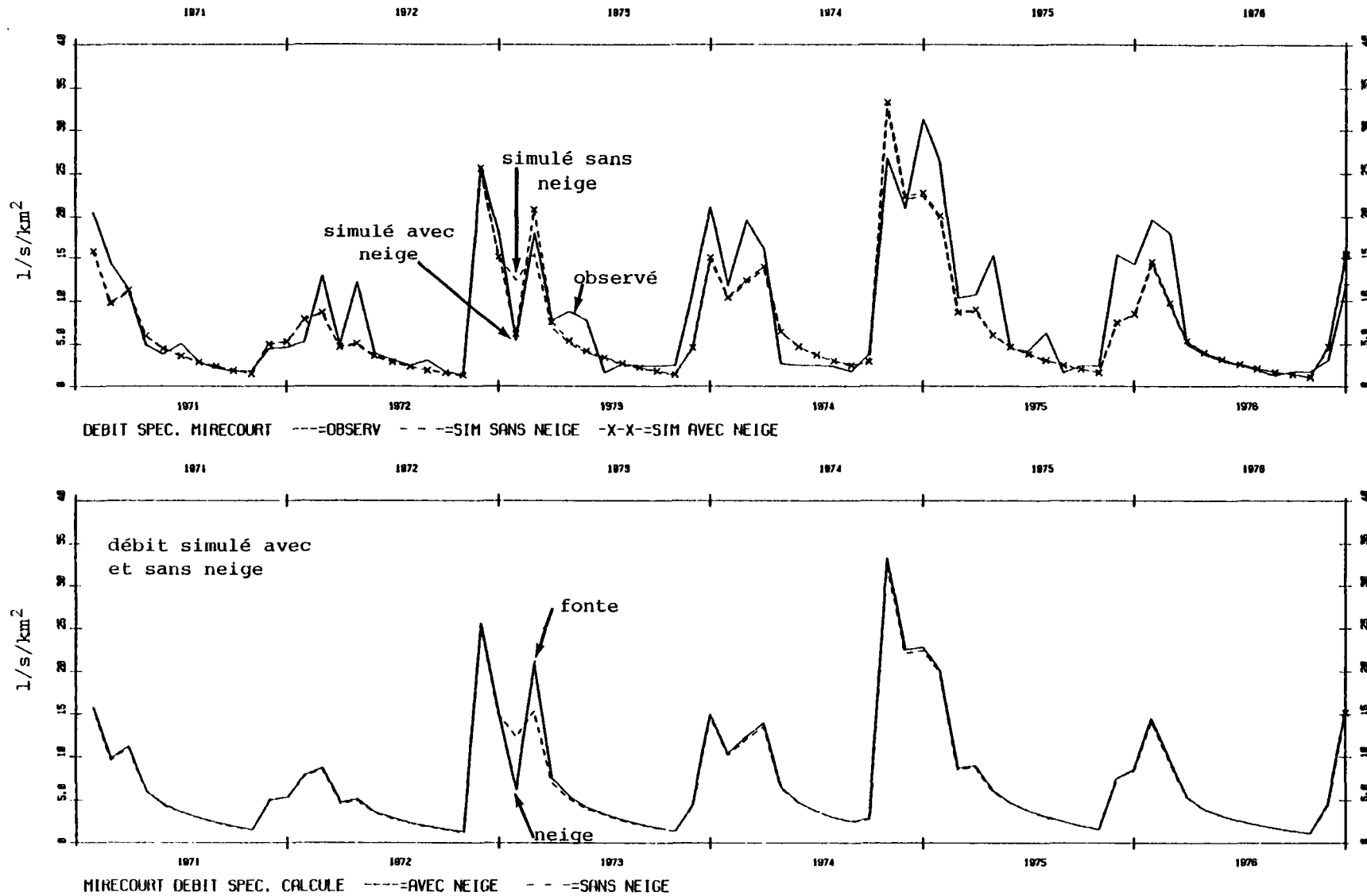


FIGURE VI.25 - Influence de la neige. Bassin du Madon à Mirecourt

Il apparait nettement que, au pas de temps mensuel, la prise en compte de la neige n'intervient que pendant deux mois : apparition de neige en janvier 1973 et fonte intégralement pendant le mois de février 1973. On remarque, pendant le mois de mars 1973, un débit sous estimé par le modèle qui correspond à la fonte de la neige des affluents.

n'apparaît qu'en Janvier 1973 et fond intégralement en février 1973. Par contre, en mars et avril, le modèle sous-estime le débit qui est plus élevé à cause de la fonte des affluents. Le pas de temps mensuel semble trop grossier pour simuler correctement la prise en compte de la neige. D'autre part la répartition spatiale de la température n'est pas assez bien connue. Une simulation séparée par sous-bassin permet de mieux prendre en compte la présence de neige, qui n'est pas la même suivant l'altitude et n'est pas homothétique.

9. UTILISATION D'UN RESEAU PLUVIOMETRIQUE REDUIT

Dans le but d'analyser l'influence de la densité du réseau pluviométrique, on a réalisé des simulations avec un réseau réduit. Il est bien évidemment impossible de réaliser des simulations avec un réseau plus dense, mais les différences obtenues entre un réseau réduit et le réseau actuel peuvent permettre d'estimer les différences qu'on pourrait observer avec un réseau plus dense. Le réseau réduit a été déterminé en ne retenant que 20 postes sur les 76 existants, soit 25 %. Ces postes n'ont pas été choisis au hasard, mais par un hydrologue ne participant pas l'étude. Son choix correspond donc à un réseau possible de 20 postes pluviométriques. Les résultats obtenus avec ce réseau sont décrits en détail dans ROCHE et THIERY (1984a). Les postes choisis sont identifiés sur la figure III.1, et les postes attribués pour chaque bassin sur le tableau VI.3.

* *Coefficient d'ajustement pondéré* (figure VI.26). En utilisant un réseau réduit à 20 postes au lieu de 76, on observe un coefficient d'ajustement pondéré qui n'est que très légèrement moins bon qu'avec le calage de référence. En fait cela est dû au fait que les lames d'eau calculées avec 20 postes (ou 76 postes) sont pratiquement homothétiques. La correction globale de pluie permettra alors par une homothétie inverse de retrouver une lame d'eau corrigée pratiquement identique à celle du calage de référence.

* *Correction globale de pluie* (figure VI.27). Avec le réseau réduit à 20 postes pluviométriques, on identifie des corrections du même ordre mais avec parfois de grandes différences. Suivant les cas, on obtient des corrections plus ou moins fortes et la correction médiane est de -15%, au lieu de -17,5% avec le réseau de référence, ce qui est du même

	POSTES	PLUVIO	ATTRIBUES	AUX	BASSINS (20 POSTES)		DIST MAX		5 NMIN	3 IOPT	2								
					N°	%	N°	%				N°	%						
BASSIN 1	NB	POSTES=	1	*	79	100%	*												
BASSIN 2	NB	POSTES=	2	*	62	50%	*	79	50%	*									
BASSIN 3	NB	POSTES=	2	*	66	50%	*	79	50%	*									
BASSIN 4	NB	POSTES=	3	*	79	50%	*	62	25%	*	66	25%	*						
BASSIN 5	NB	POSTES=	3	*	62	33%	*	79	33%	*	66	33%	*						
BASSIN 6	NB	POSTES=	3	*	23	33%	*	62	33%	*	72	33%	*						
BASSIN 7	NB	POSTES=	3	*	79	40%	*	62	33%	*	66	27%	*						
BASSIN 8	NB	POSTES=	3	*	62	37%	*	79	37%	*	66	25%	*						
BASSIN 9	NB	POSTES=	3	*	23	33%	*	72	33%	*	62	33%	*						
BASSIN 10	NB	POSTES=	2	*	69	75%	*	23	25%	*									
BASSIN 11	NB	POSTES=	3	*	23	50%	*	72	33%	*	69	17%	*						
BASSIN 12	NB	POSTES=	3	*	62	35%	*	79	35%	*	23	29%	*						
BASSIN 13	NB	POSTES=	3	*	23	33%	*	62	33%	*	79	33%	*						
BASSIN 14	NB	POSTES=	2	*	69	86%	*	23	14%	*									
BASSIN 15	NB	POSTES=	3	*	26	50%	*	69	37%	*	23	12%	*						
BASSIN 16	NB	POSTES=	3	*	69	50%	*	26	33%	*	23	17%	*						
BASSIN 17	NB	POSTES=	5	*	26	20%	*	69	20%	*	23	20%	*	62	20%	*	79	20%	*
BASSIN 18	NB	POSTES=	3	*	22	60%	*	26	30%	*	32	10%	*						
BASSIN 19	NB	POSTES=	3	*	79	50%	*	66	42%	*	62	8%	*						
BASSIN 20	NB	POSTES=	4	*	66	35%	*	79	29%	*	62	18%	*	20	18%	*			
BASSIN 21	NB	POSTES=	3	*	20	50%	*	62	25%	*	66	25%	*						
BASSIN 22	NB	POSTES=	3	*	79	33%	*	66	33%	*	20	33%	*						
BASSIN 23	NB	POSTES=	7	*	23	14%	*	72	14%	*	11	14%	*	62	14%	*	20	14%	*
					79	14%	*	66	14%	*									
BASSIN 24	NB	POSTES=	3	*	20	60%	*	62	20%	*	72	20%	*						
BASSIN 25	NB	POSTES=	3	*	11	37%	*	20	37%	*	72	25%	*						
BASSIN 26	NB	POSTES=	3	*	62	46%	*	72	31%	*	66	23%	*						
BASSIN 27	NB	POSTES=	3	*	23	33%	*	72	33%	*	62	33%	*						
BASSIN 28	NB	POSTES=	3	*	72	35%	*	62	35%	*	23	29%	*						
BASSIN 29	NB	POSTES=	3	*	11	45%	*	39	36%	*	20	18%	*						
BASSIN 30	NB	POSTES=	3	*	23	40%	*	6	40%	*	26	20%	*						
BASSIN 31	NB	POSTES=	6	*	72	17%	*	11	17%	*	62	17%	*	20	17%	*	79	17%	*
					66	17%	*												
BASSIN 32	NB	POSTES=	3	*	6	50%	*	22	30%	*	26	20%	*						
BASSIN 33	NB	POSTES=	10	*	26	10%	*	22	10%	*	69	10%	*	23	10%	*	72	10%	*
					11	10%	*	62	10%	*	20	10%	*	79	10%	*	66	10%	*
BASSIN 34	NB	POSTES=	4	*	22	55%	*	32	27%	*	26	9%	*	6	9%	*			
BASSIN 35	NB	POSTES=	3	*	32	60%	*	22	20%	*	17	20%	*						
BASSIN 36	NB	POSTES=	3	*	39	43%	*	6	29%	*	11	29%	*						
BASSIN 37	NB	POSTES=	4	*	6	36%	*	39	36%	*	11	14%	*	43	14%	*			
BASSIN 38	NB	POSTES=	3	*	39	40%	*	6	33%	*	11	27%	*						
BASSIN 39	NB	POSTES=	3	*	6	37%	*	39	37%	*	11	25%	*						
BASSIN 40	NB	POSTES=	13	*	32	8%	*	26	8%	*	22	8%	*	69	8%	*	6	8%	*
					23	8%	*	72	8%	*	11	8%	*	39	8%	*	62	8%	*
					20	8%	*	79	8%	*	66	8%	*						
BASSIN 41	NB	POSTES=	2	*	17	60%	*	32	40%	*									
BASSIN 42	NB	POSTES=	3	*	32	60%	*	17	30%	*	22	10%	*						
BASSIN 43	NB	POSTES=	2	*	17	62%	*	57	37%	*									
BASSIN 44	NB	POSTES=	3	*	32	35%	*	17	35%	*	57	29%	*						
BASSIN 45	NB	POSTES=	3	*	46	46%	*	37	31%	*	42	23%	*						

↑ ↑
numéro poids

Tableau VI.3 : Lame d'eau calculée d'après un réseau réduit à 20 postes

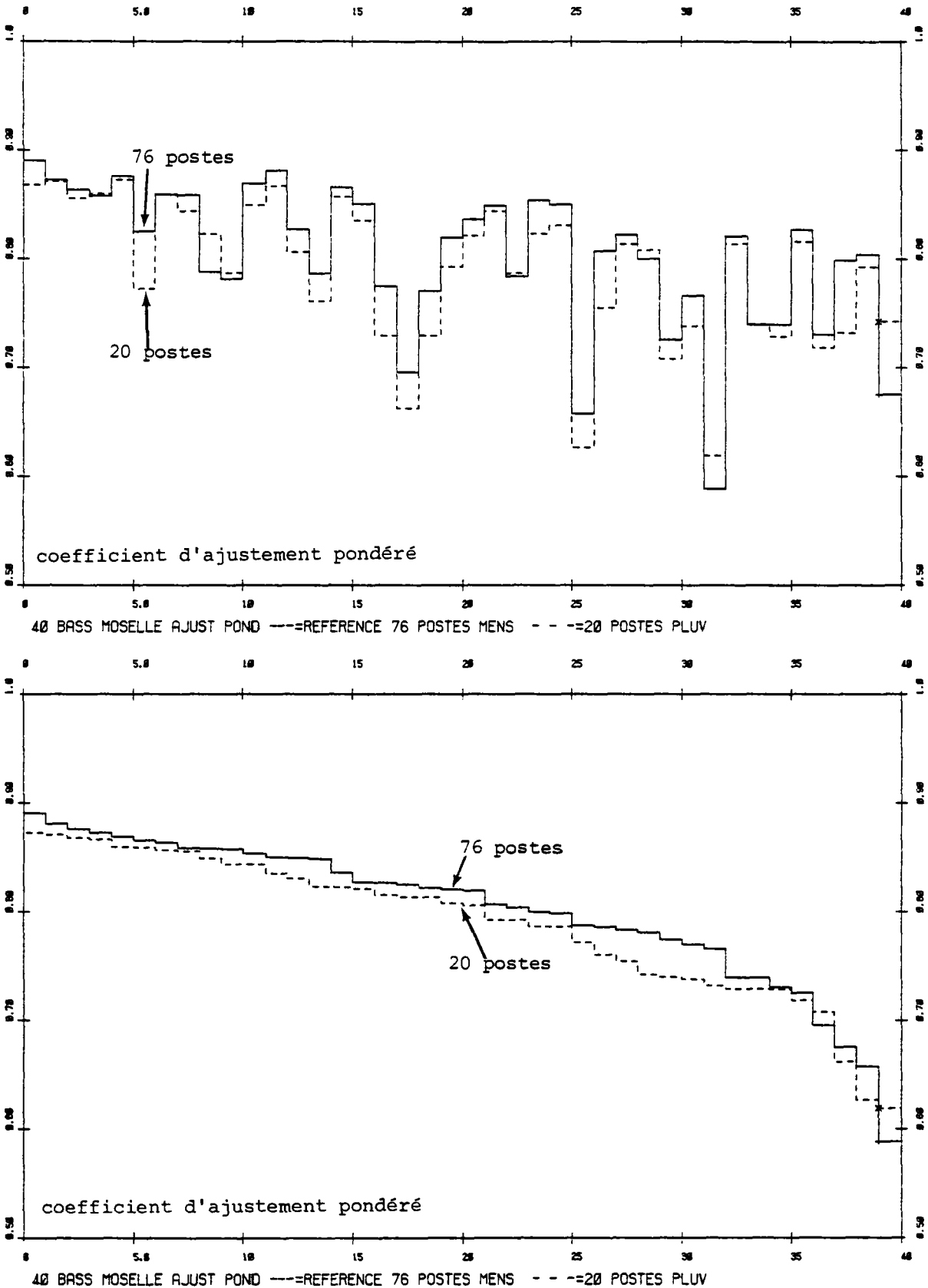


Figure VI.26 : Influence d'un réseau pluviométrique réduit (avec neige) sur le coefficient d'ajustement

En utilisant un réseau réduit à 20 postes au lieu de 76 (soit le quart) on observe un coefficient d'ajustement pondéré très légèrement moins bon mais la différence est très peu significative. Cela est dû au fait que les lames d'eau calculées avec 76 postes ou 20 postes sont pratiquement homothétiques. La correction pluviométrique permet donc de rattraper le coefficient d'homothétie.

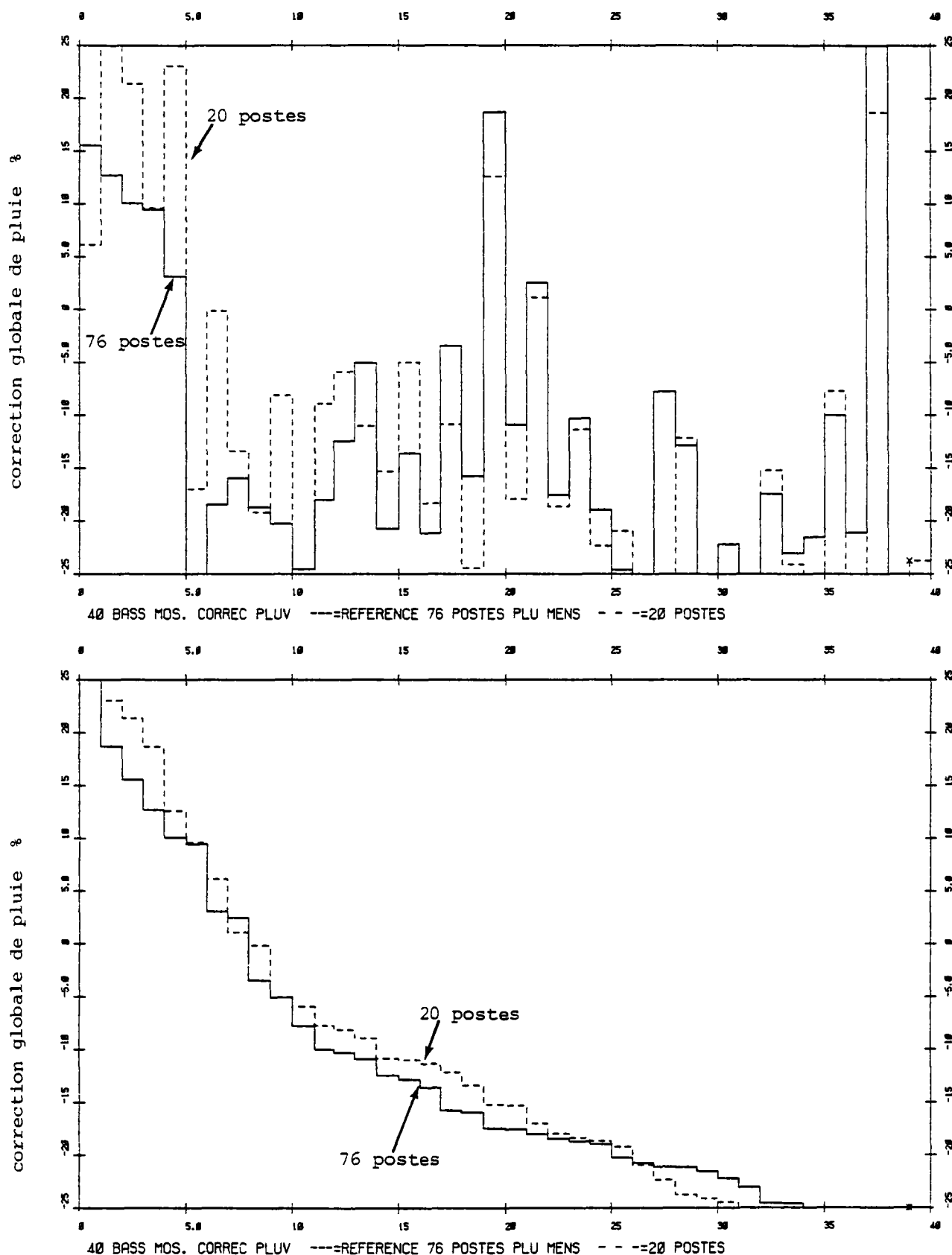


Figure VI.27 : Influence d'un réseau pluviométrique réduit sur la correction de pluie

En utilisant un réseau réduit à 20 postes au lieu de 76, on remarque des corrections pluviométriques parfois assez différentes qui tendent à corriger la lame d'eau qui est parfois sur-estimée et parfois sous-estimée. Globalement la médiane des corrections est de -15 % avec 20 stations au lieu de -17.5 % avec 76 stations.

ordre. Les bassins pour lesquels les différences sont les plus grandes, sont surtout les bassins situés en altitude (n° 1 à 8, 12, 13, 19...).

* *Capacité de la réserve superficielle* (figure VI.28). Les capacités de réserves superficielles du sol identifiées sont quasiment identiques à celles du calage de référence. Seule la capacité de la réserve du bassin n° 2 a été diminuée comme on l'avait remarqué lors d'autres simulations, et sa valeur anormalement élevée est alors ramenée à une valeur plus réaliste de 75 mm au lieu de 100. Il faut cependant remarquer que le coefficient de correction global de pluie était en butte à +25% ; une diminution de la capacité de la réserve superficielle permet donc d'augmenter la pluie efficace et d'obtenir dans ce cas particulier un résultat pratiquement aussi bon.

* *Lame d'eau corrigée* (figure VI.29). Avec le réseau réduit et les corrections globales de pluie un peu différentes, on retrouve des lames d'eau corrigées quasi-identiques à celles du réseau de référence. Il est bien évident que les lames mensuelles obtenues ne sont pas exactement semblables pour chacun des 120 mois, mais les coefficients d'ajustements ont montré qu'elles permettent des simulations quasi-identiques.

* *Hauteurs d'équiruisselement* (figure VI.29). Il apparaît que les hauteurs d'équi-ruisselement sont quasiment identiques, ce qui est logique car la lame d'eau corrigée est pratiquement identique à la lame d'eau corrigée du calage de référence.

* *Conclusion*. Avec un réseau pluviométrique réduit à 20 postes au lieu de 76, on obtient des simulations mensuelles quasiment identiques à celles du calage de référence, mais avec des coefficients de correction pluviométrique globaux différents. La simulation est donc aussi bonne, mais l'interprétation de ces coefficients de correction globale est rendue plus difficile, et on commettrait des erreurs pour simuler des bassins versants non jaugés.

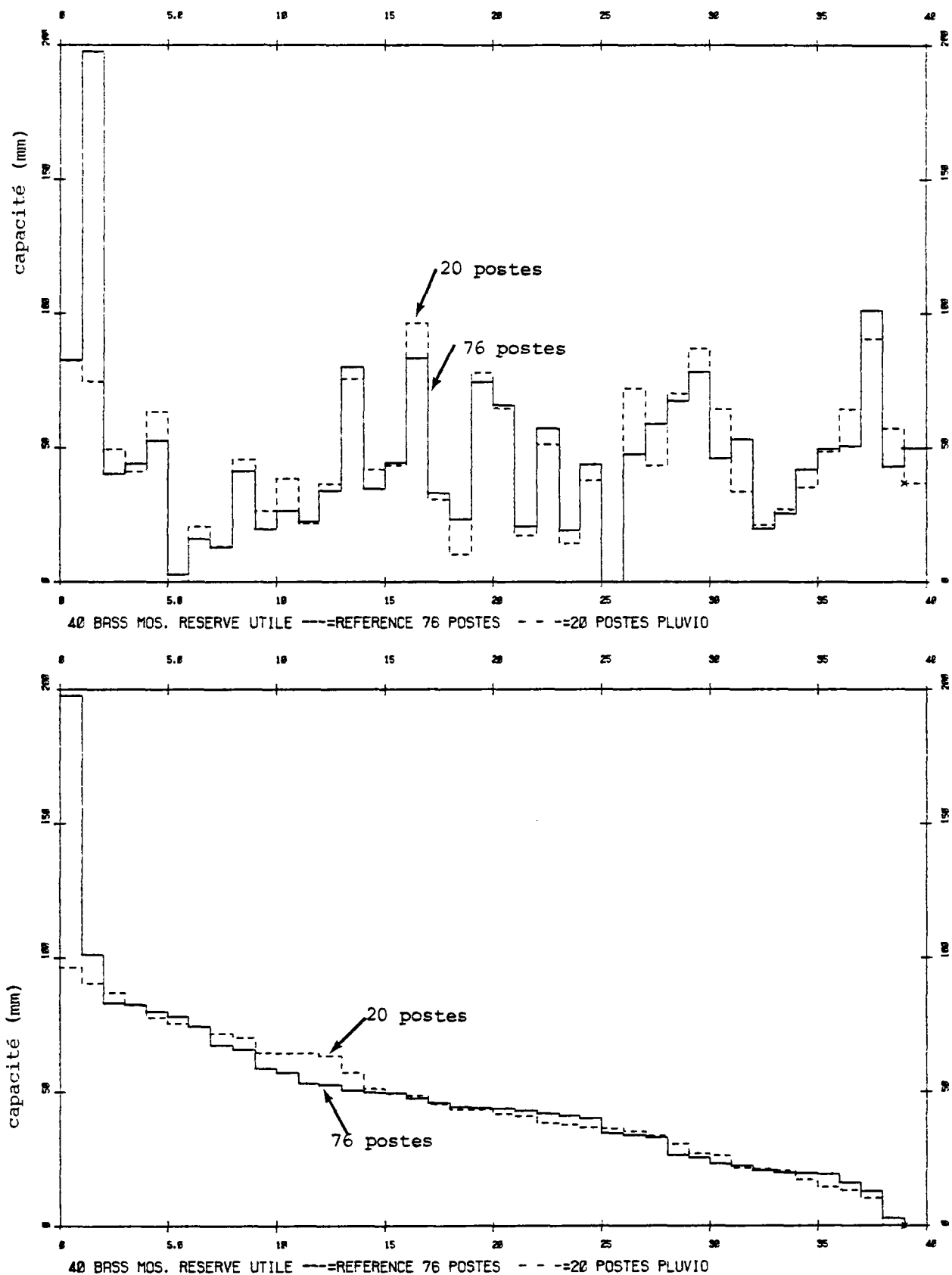


Figure VI.28 : Influence d'un réseau pluviométrique réduit sur la capacité de la réserve superficielle

En utilisant un réseau réduit à 20 postes au lieu de 76 (soit le quart) le modèle identifie des réserves superficielles quasiment identiques (sauf pour le bassin n° 2 comme on l'avait déjà remarqué). La correction des pluies permet donc de rattraper les différences.

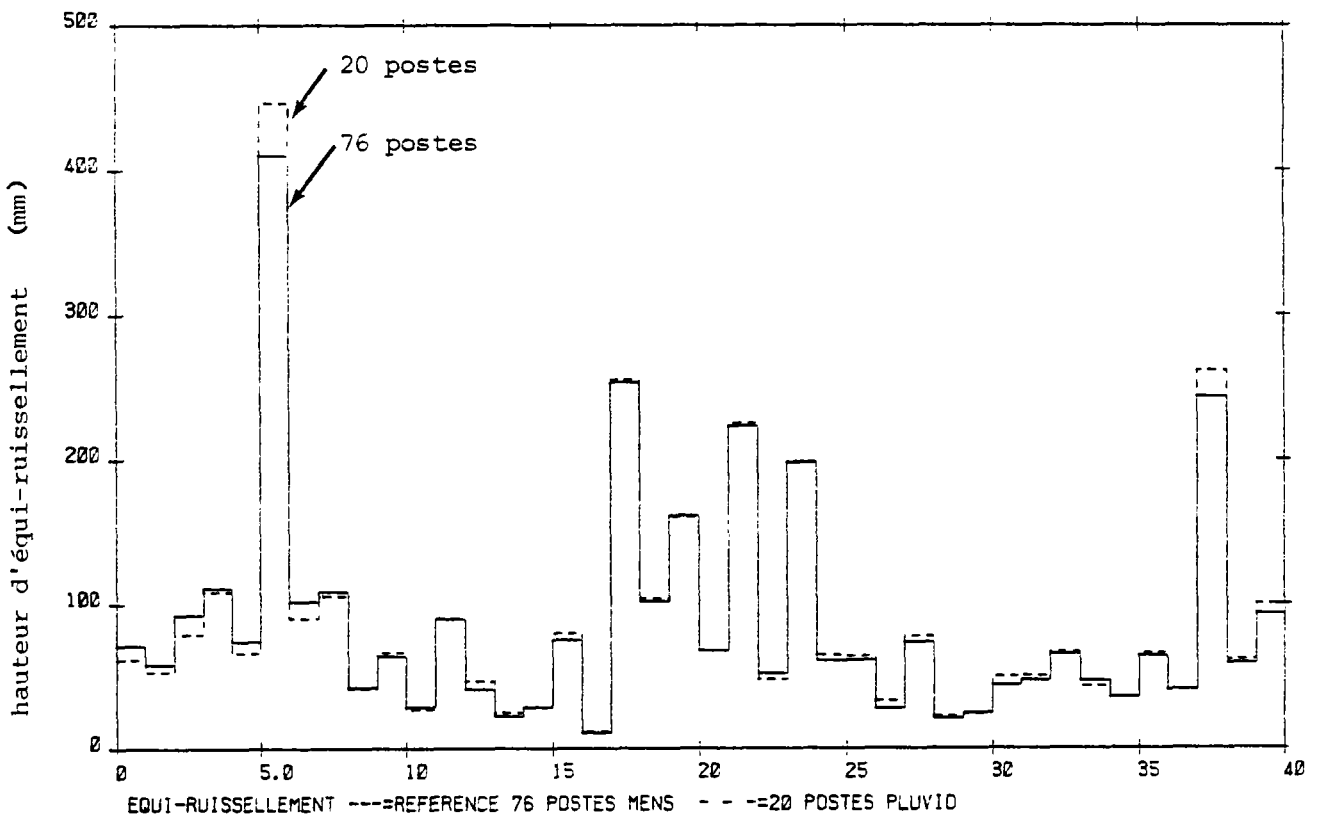
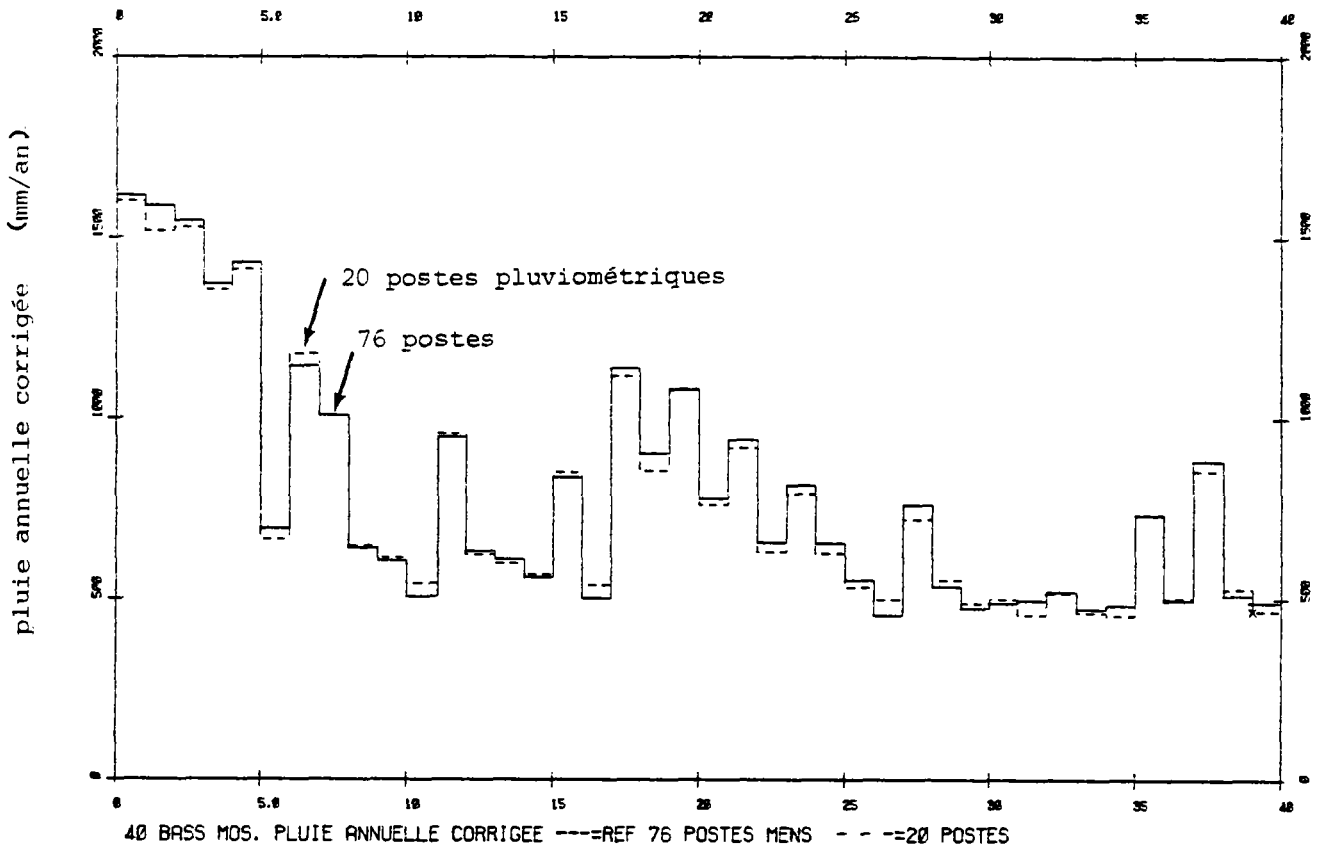


Figure VI.29 : influence d'un réseau pluviométrique réduit

En utilisant un réseau réduit à 20 postes pluviométriques au lieu de 76, le modèle ramène les lames d'eau annuelles à des valeurs pratiquement identiques aux valeurs précédentes. Les hauteurs d'équi-ruisellement sont quasiment inchangées ce qui est logique.

CHAPITRE 7

ANALYSE DES FACTEURS INFLUENÇANT
LA PARTIE "TRANSFERT" DU MODELE

1. AJUSTEMENT DU TEMPS DE DEMI-TARISSEMENT

Il est apparu que le calage de référence donnait de bons résultats, mais que les débits les plus bas ayant tendance à être sur-estimés (par le modèle), il était nécessaire d'effectuer une correction globale pour diminuer la pluie. La médiane des corrections (selon les bassins) était de -18%. On pouvait penser que ces corrections étaient rendues nécessaires par la fonction de transfert qui était imposée avec un temps de demi-tarissement égal à 3 mois pour tous les bassins. On a donc ajusté ce temps de demi-tarissement pour voir si on obtenait des modifications sensibles.

* *Coefficient d'ajustement pondéré* (figure VII.1). Il apparaît que les améliorations sont extrêmement faibles à part pour quelques bassins isolés : les bassins 26 (Sanon à Lagarde) et 32 (Seille à Vic-sur-Seille) qui étaient les deux plus mal simulés. On note une certaine amélioration pour ces bassins (tous deux avec des temps de demi-tarissement qui atteignent 6 mois), mais ils restent parmi les 3 plus mal simulés. Le coefficient d'ajustement pondéré du bassin 26 passe de 0.66 à 0.72 ; celui du bassin 32 de 0.59 à 0.65.

* *Temps de demi-tarissement (rapide)* (figure VII.2). Les temps de demi-tarissement optimisés sont très variables : de 1 à 6 mois (limite supérieure imposée). Pour 4 bassins (9, 10, 26 et 32), la limite supérieure de 6 mois est atteinte ; pour 14 bassins, le temps de demi-tarissement atteint 4,5 mois.

* *Correction globale de pluie* (figure VII.2). La correction globale de pluie identifiée est quasiment identique à celle identifiée lors du calage de référence. Il apparaît donc nettement qu'elle est indépendante du temps de demi-tarissement.

* *Conclusion*. D'une part, la valeur du temps de demi-tarissement a peu d'influence sur le coefficient d'ajustement, donc est mal déterminée. D'autre part, la correction globale de pluie semble indépendante du temps de demi-tarissement et n'a pas une valeur négative uniquement pour bien reproduire les tarissements donc les faibles débits.

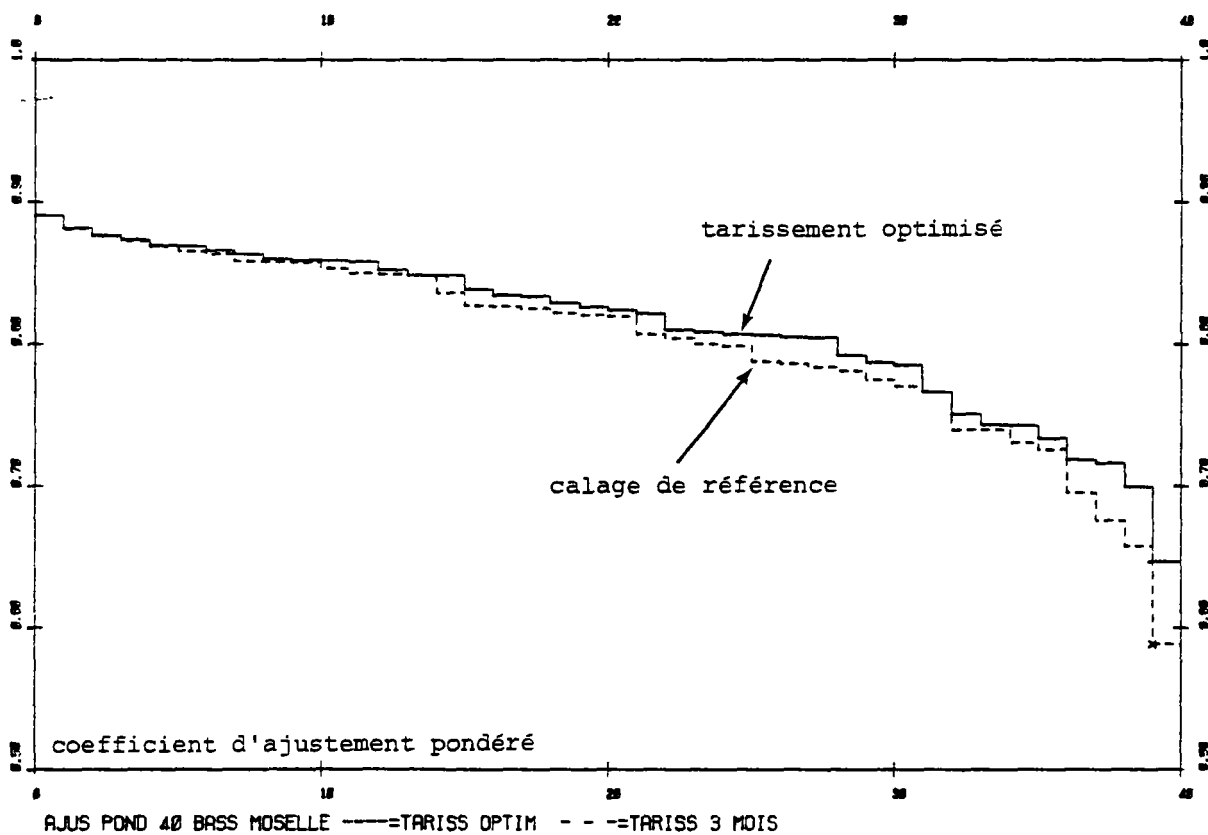
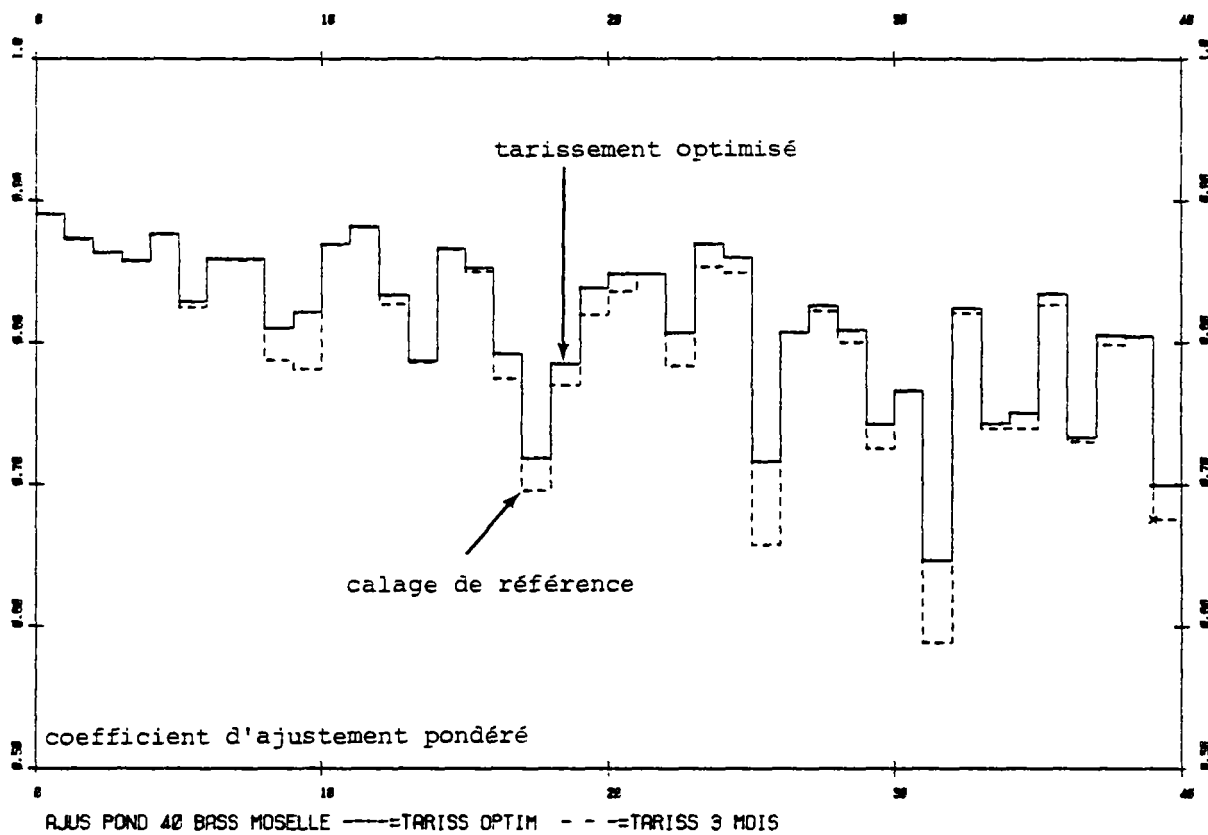


Figure VII.1 : influence du temps de demi-tarissement sur les coefficients d'ajustement

En laissant le libre le temps de demi-tarissement (qui était imposé précédemment à 3 mois) on n'améliore que très légèrement le calage. Seuls les bassins 26 et 32 (Sanon à Lagarde et Seille à Vic-sur-Seille) qui étaient très mal simulés sont améliorés mais restent parmi les 3 plus mal simulés.

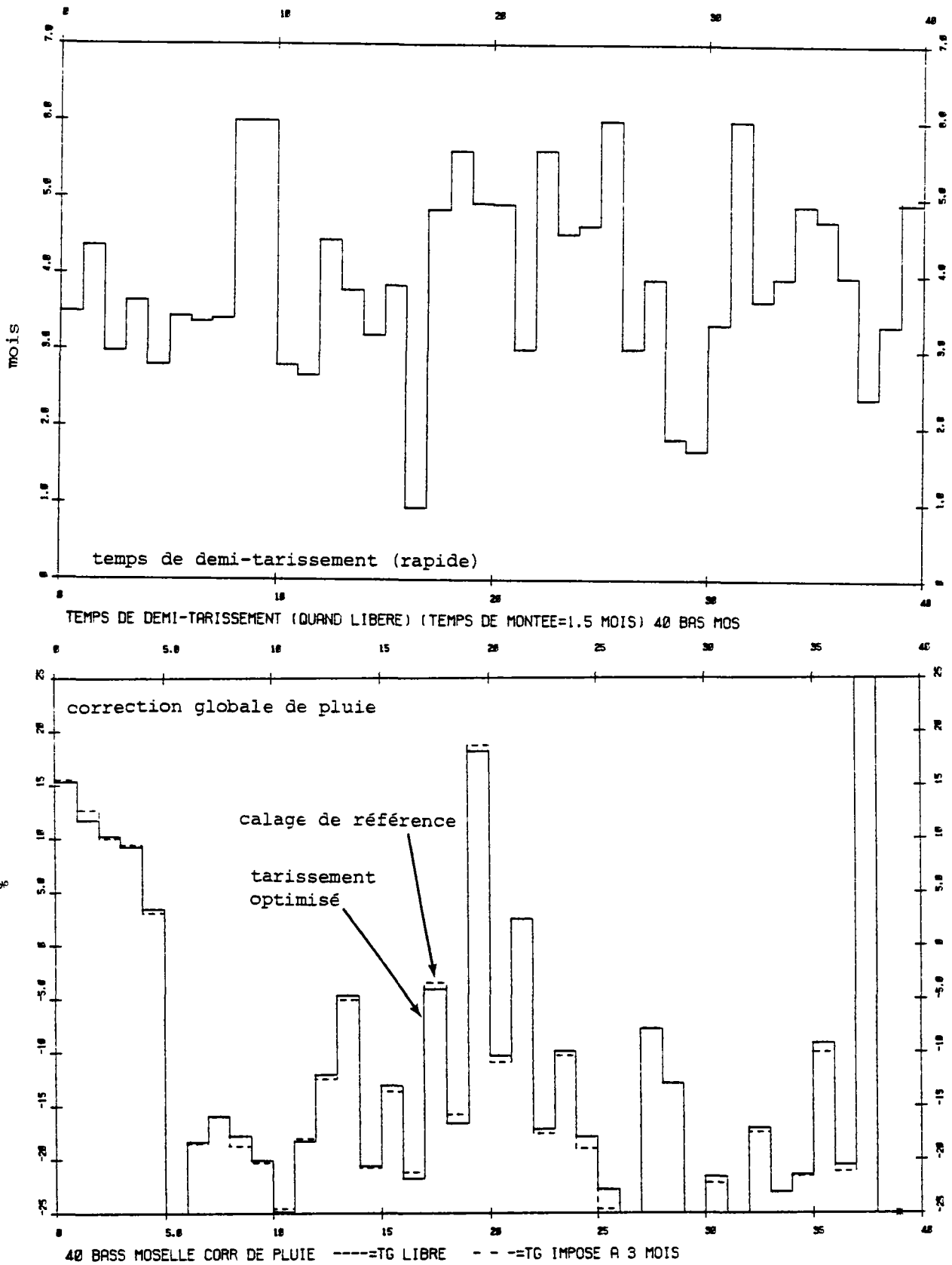


Figure VII.2 : influence du temps de demi-tarissement (seul)

En laissant libre le temps de demi-tarissement, on obtient des valeurs assez variables pour une amélioration de l'ajustement très faible. En particulier on note que la correction globale de pluie identifiée n'est quasiment pas changée ce qui confirme que ce n'est pas la fonction transfert qui est responsable des corrections de pluies qui semblent difficiles à expliquer.

2. UTILISATION DE DEUX COMPOSANTES SOUTERRAINES

Pour tenter une meilleure simulation des étiages, on a essayé un schéma avec deux composantes souterraines du débit.

* *Coefficient d'ajustement pondéré* (figure VII.3). Ce schéma avec deux composantes souterraines donne des coefficients d'ajustement quasi-identiques à ceux obtenus avec une seule composante et avec une optimisation du demi-temps de tarissement (rapide). La prise en compte d'une deuxième composante n'apporte aucune amélioration et le modèle plus simple est aussi performant et donc plus fiable.

3. SCHEMA DE TRANSFERT BI-LINEAIRE

Dans le but de voir si la non-linéarité introduite pour représenter le débit rapide a un intérêt, on a réalisé les mêmes simulations mais avec un schéma bi-linéaire. Dans ce but, on a imposé une hauteur d'équi-ruissellement égal à une valeur extrêmement grande, et on a utilisé un schéma avec deux composantes souterraines : la première correspondant en fait à l'écoulement rapide.

* *Coefficient d'ajustement pondéré* (figure VII.4). Le coefficient d'ajustement pondéré est tout-à-fait comparable à celui obtenu lors du calage de référence. On remarque cependant une exception pour le bassin n° 26 (Sanon à Lagarde) pour lequel ce coefficient d'ajustement est très amélioré. Il passe de 0.66 à 0.73.

* *Correction globale de pluie* (figure VII.5). Les corrections globales de pluie sont quasiment inchangées. La médiane passe de -17.5% à -16.5%. Cette correction est donc bien indépendante de la loi de transfert choisie.

* *Rapport débit spécifique minimal / débit spécifique moyen* (figures VII.6 et VII.7). Ce rapport est nettement sur-estimé par le modèle, c'est-à-dire que les débits minimaux sont nettement sur-estimés. La médiane observée est de 14 %, la médiane calculée est de 20 %. Les figures VII.6 et VII.7 montrent que ces résultats sont plus mauvais qu'avec le calage de référence pour lequel la médiane calculée était de 18 %.

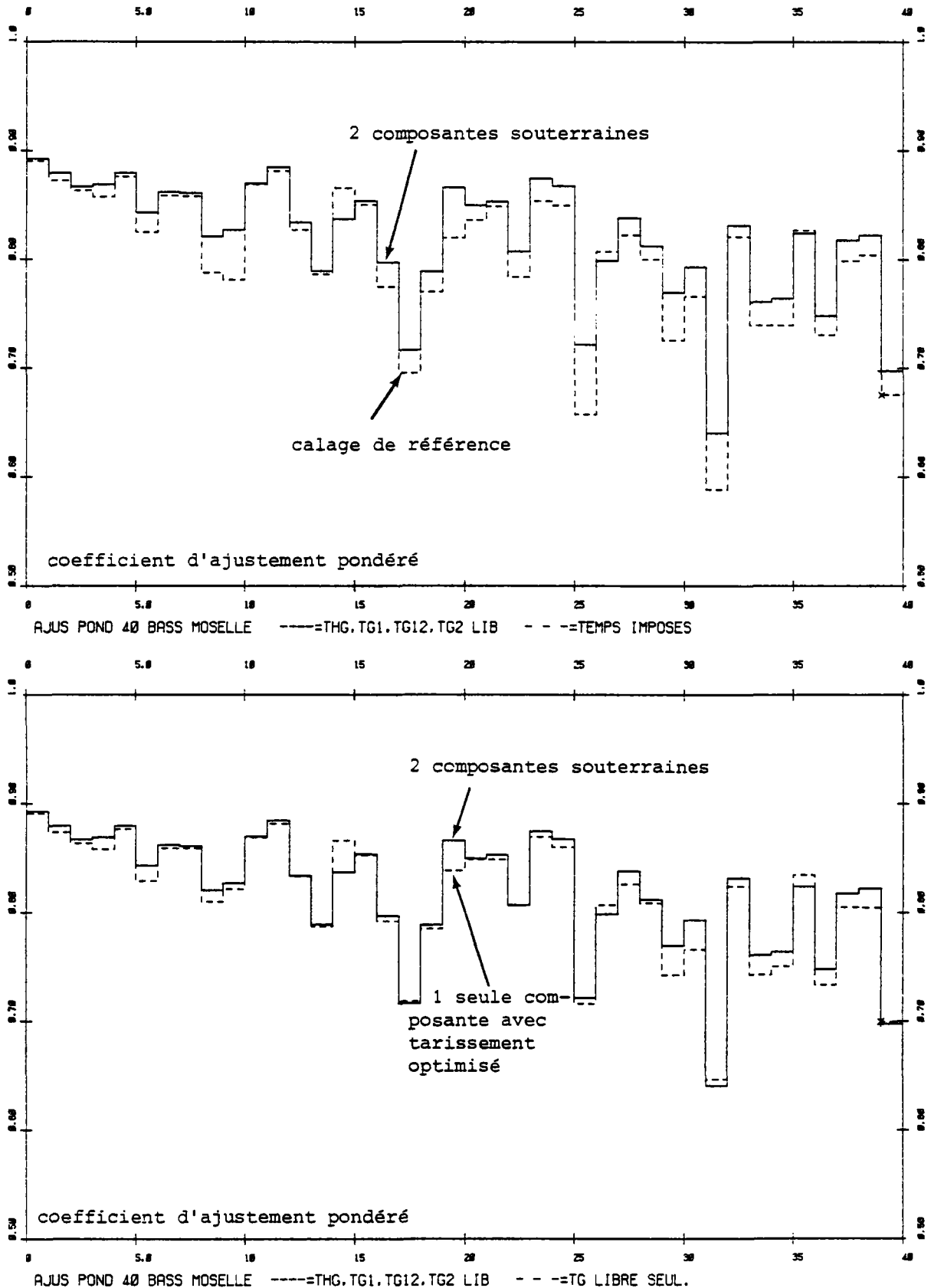


Figure VII.3 : influence d'une 2^{ème} composante d'écoulement souterrain

A condition d'avoir un temps de tarissement optimisé pour la première composante d'écoulement souterrain. La prise en compte d'une 2^{ème} composante n'apporte pratiquement aucune amélioration de l'ajustement. Le modèle plus simple est aussi performant.

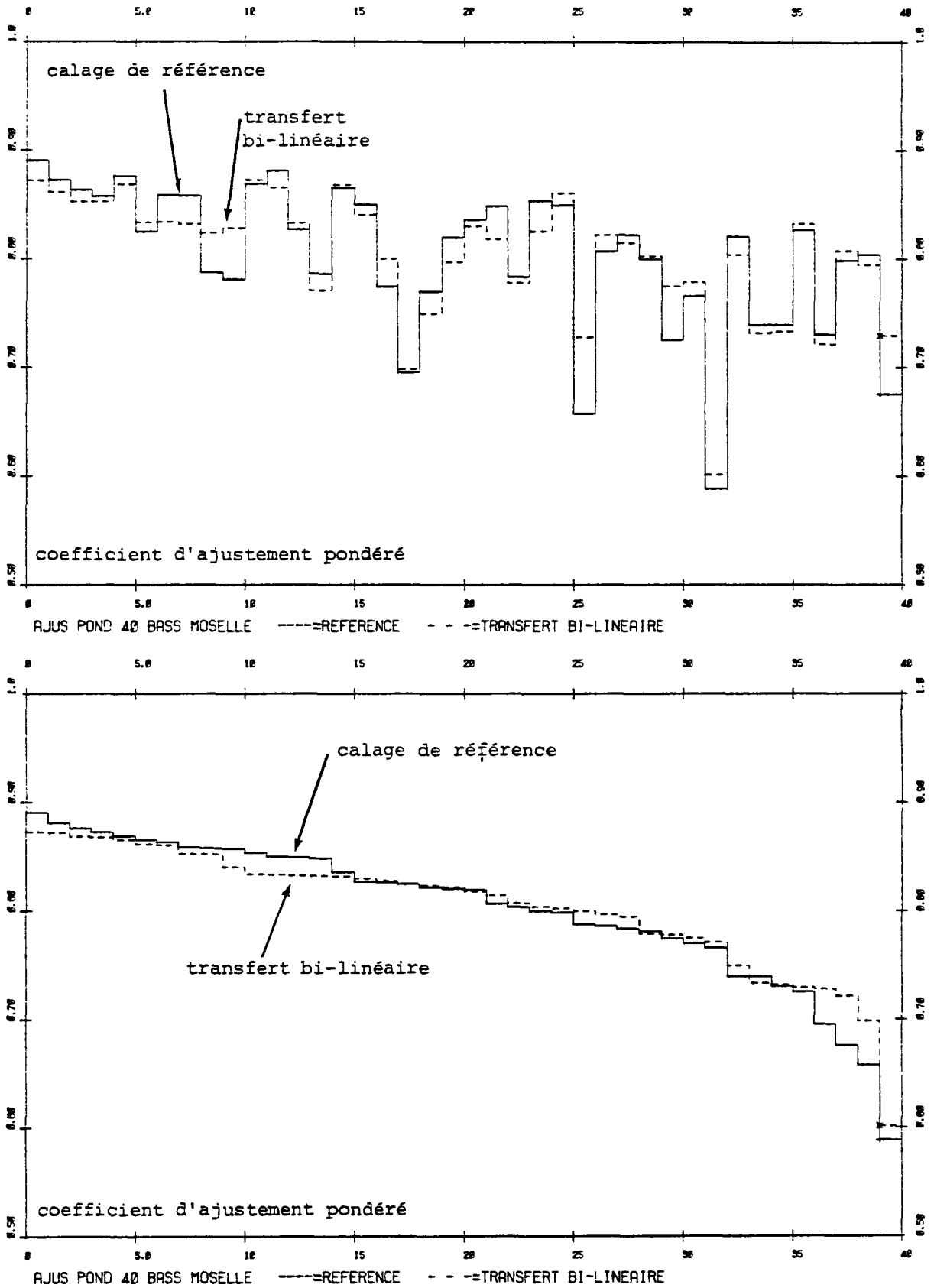


Figure VII.4 : fonction de transfert bi-linéaire : influence sur le coefficient d'ajustement

Le coefficient d'ajustement (pondéré) est comparable au coefficient de référence. Il est cependant nettement meilleur pour le 26ième bassin (le Sanon à Lagarde) où il atteint 0.73 au lieu de 0.66.

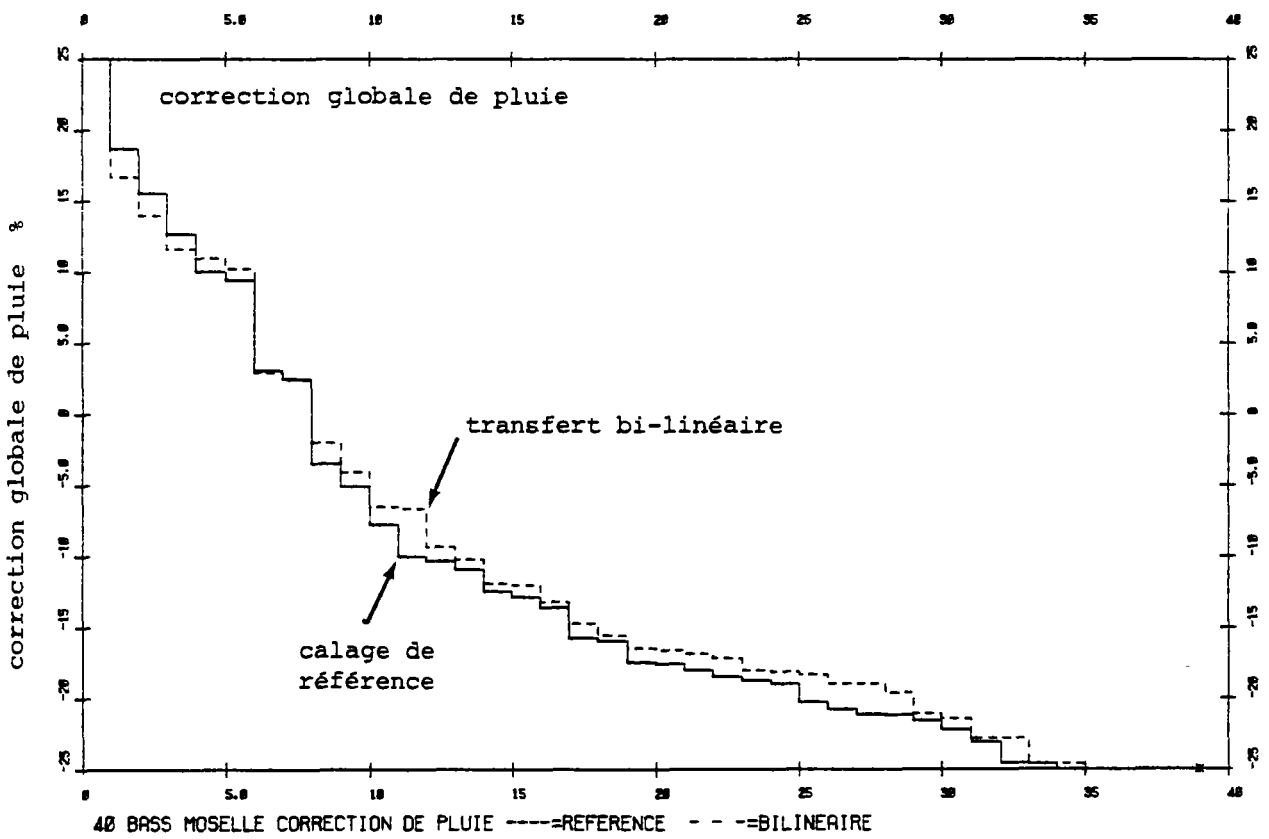
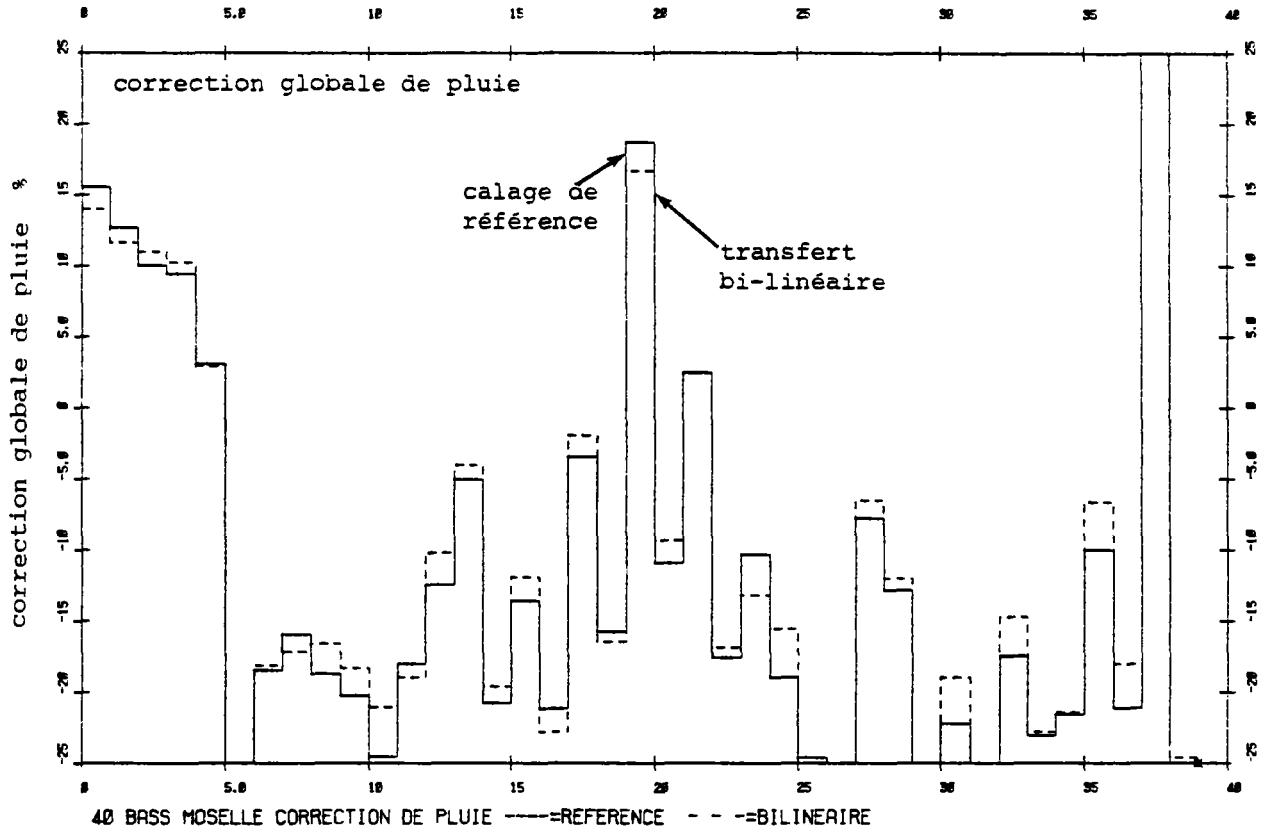


Figure VII.5 : fonction de transfert bi-linéaire : influence sur la correction globale de pluie

Les corrections de pluies obtenues sont très semblables (elles sont généralement légèrement moins négatives) : médiane -16.5 % au lieu de -17.5 %.

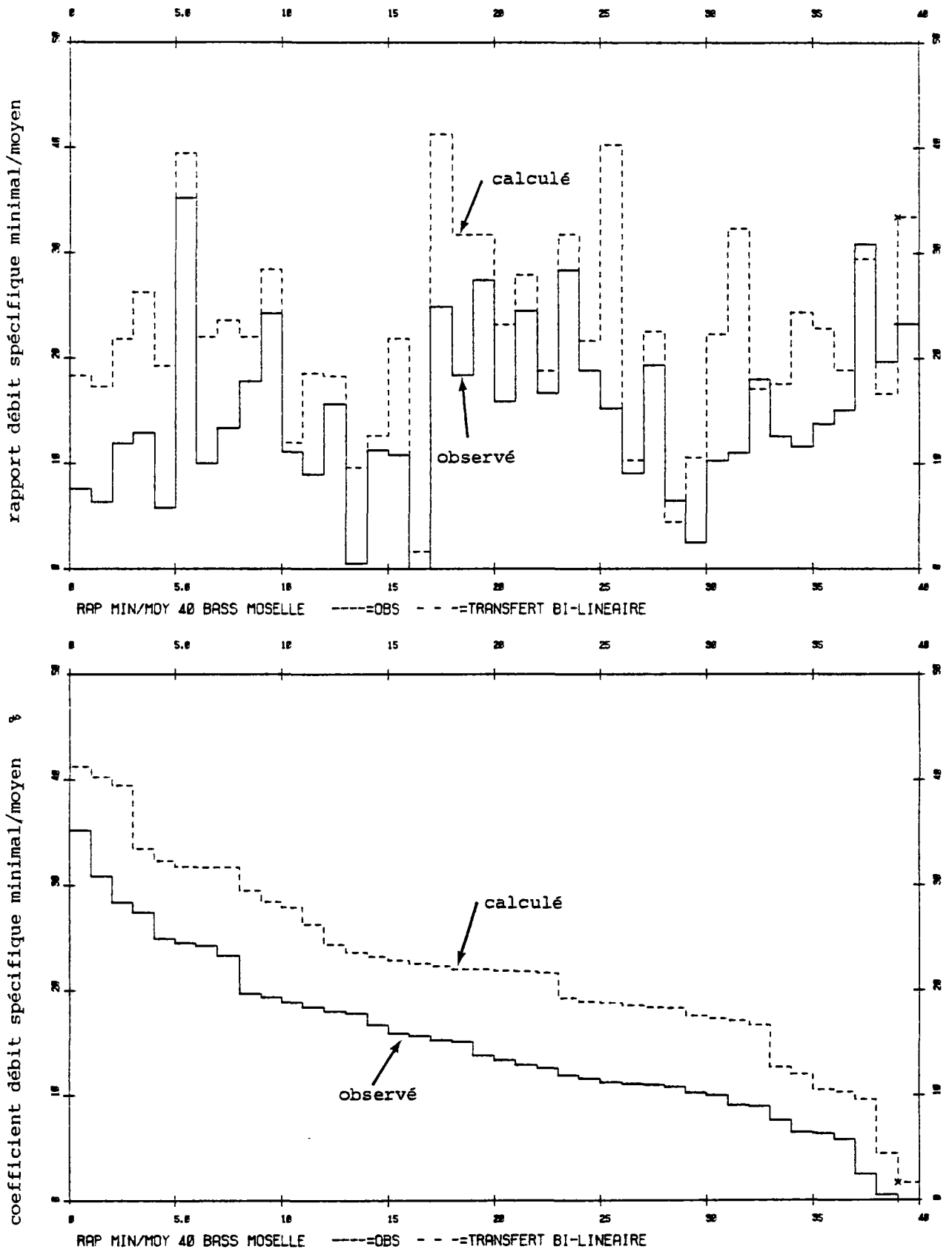


Figure VII.6 : fonction de transfert bi-linéaire : influence sur le débit spécifique minimal

Le rapport : débit spécifique minimal sur débit spécifique moyen est nettement plus surestimé qu'avec la simulation de référence. Ce schéma de transfert est donc moins performant pour les très bas débits.

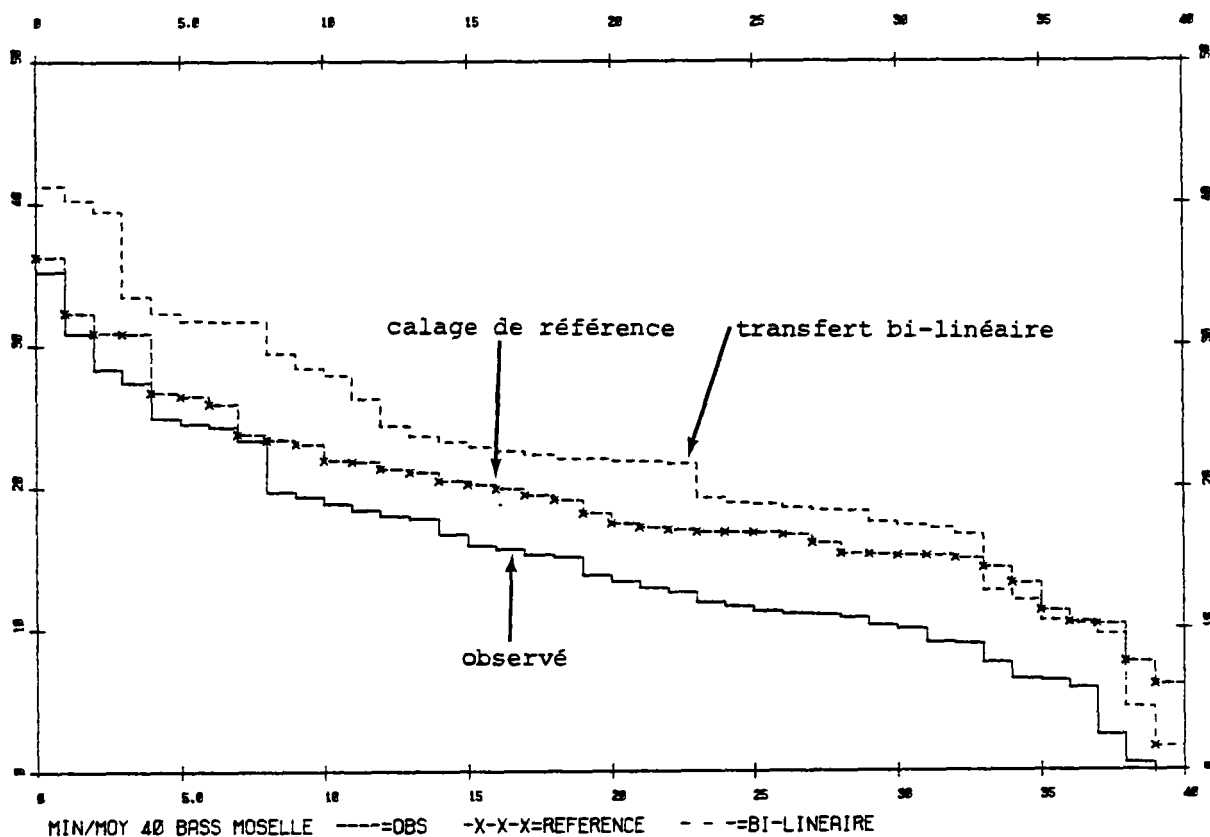


Figure VII.7 : fonction de transfert bi-linéaire : influence sur le débit spécifique minimal

Le rapport : débit spécifique (mensuel) minimal sur débit spécifique moyen est beaucoup plus surestimé par la simulation avec une fonction de transfert bi-linéaire.

médiane observée : 14 % du débit moyen

médiane calculée : 18 % avec la simulation de référence

: 22 % avec la simulation avec un transfert bi-linéaire.

* *Conclusion.* Ce schéma de transfert est donc moins performant que le schéma de référence, de plus il est moins facile à utiliser parce qu'il fait intervenir 3 constantes de temps.

4. INTRODUCTION D'UN DEBIT EXTERIEUR CONSTANT

Dans le but de voir si les corrections globales de pluies qui tendent à réduire les entrées ne correspondent pas à des transferts entre bassins on a essayé une simulation avec détermination d'un débit extérieur constant (positif ou négatif). Pour ce schéma, le temps de demi-tarissement (rapide) était optimisé.

* *Coefficient d'ajustement pondéré* (figure VII.8). Le coefficient d'ajustement pondéré n'est pratiquement pas amélioré par rapport à celui obtenu sans débit extérieur (mais avec un tarissement optimisé).

* *Débit extérieur constant* (figure VII.9). En laissant ajuster un débit extérieur constant, on obtient des valeurs comprises entre +3.5 l/s/km² et -6 l/s/km². La valeur médiane est de -0.9 l/s/km². 30 bassin sur 40 ont des débits extérieurs négatifs. Parmi les grands bassins, on note :

Numéro de travail	N O M	Superficie (km ²)	Débit extérieur (l/s/km ²)	Correction de pluie % (référence)	Débit extérieur / Débit moyen
17 (16)	Moselle à Toul	3 340	- 3.6	+ 5 (- 14)	28 %
31 (28)	Meurthe à Malzeville	2 914	- 0.2	- 6 (- 8)	2 %
39 (35)	Seille à Metz P.Loith	1 269	- 0.2	- 17 (- 22)	5 %
40 (36)	Moselle à Hauconcourt	9 387	- 0.5	- 5.5(- 10)	6 %

En fait, ces débits extérieurs dont la plupart sont compris entre -3.5 et +3.5 l/s/km² représentent un débit non négligeables pour un certain nombre de bassins, car le débit spécifique moyen est compris entre 4 et 20 l/s/km² dans 80 % des cas, et le débit spécifique mensuel minimal est compris entre 0.3 et 3.5 l/s/km² dans 80 % des cas. Un débit extérieur de -3.5 l/s/km correspond à une exportation de 110 mm/an.

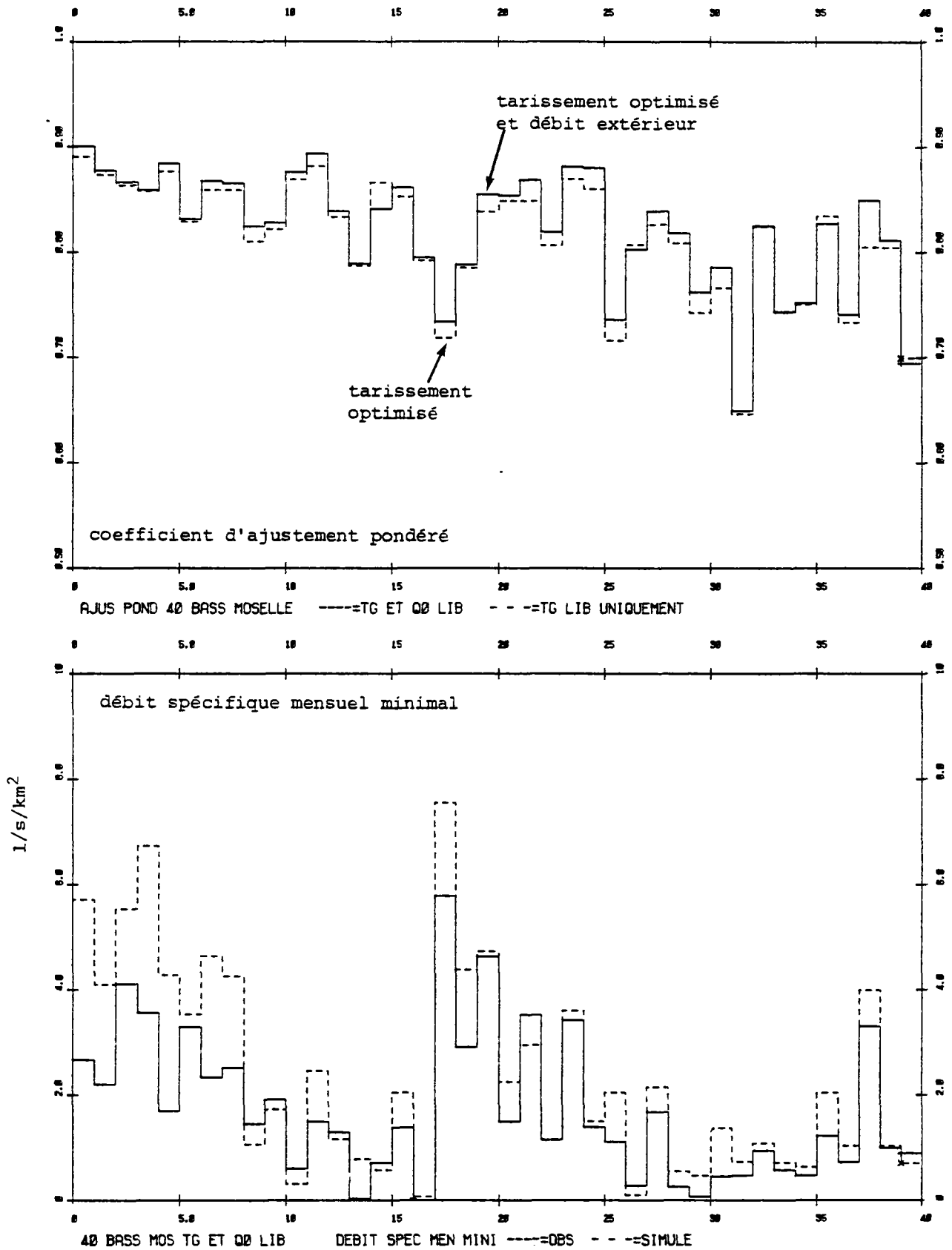


Figure VII.8 : influence d'un débit extérieur constant (tarissement ajusté) sur l'ajustement

Par rapport à la simulation avec un temps de tarissement libre, on note une très faible amélioration de l'ajustement. Les débits minimaux des hauts bassins sont toujours surestimés malgré un débit extérieur très négatif.

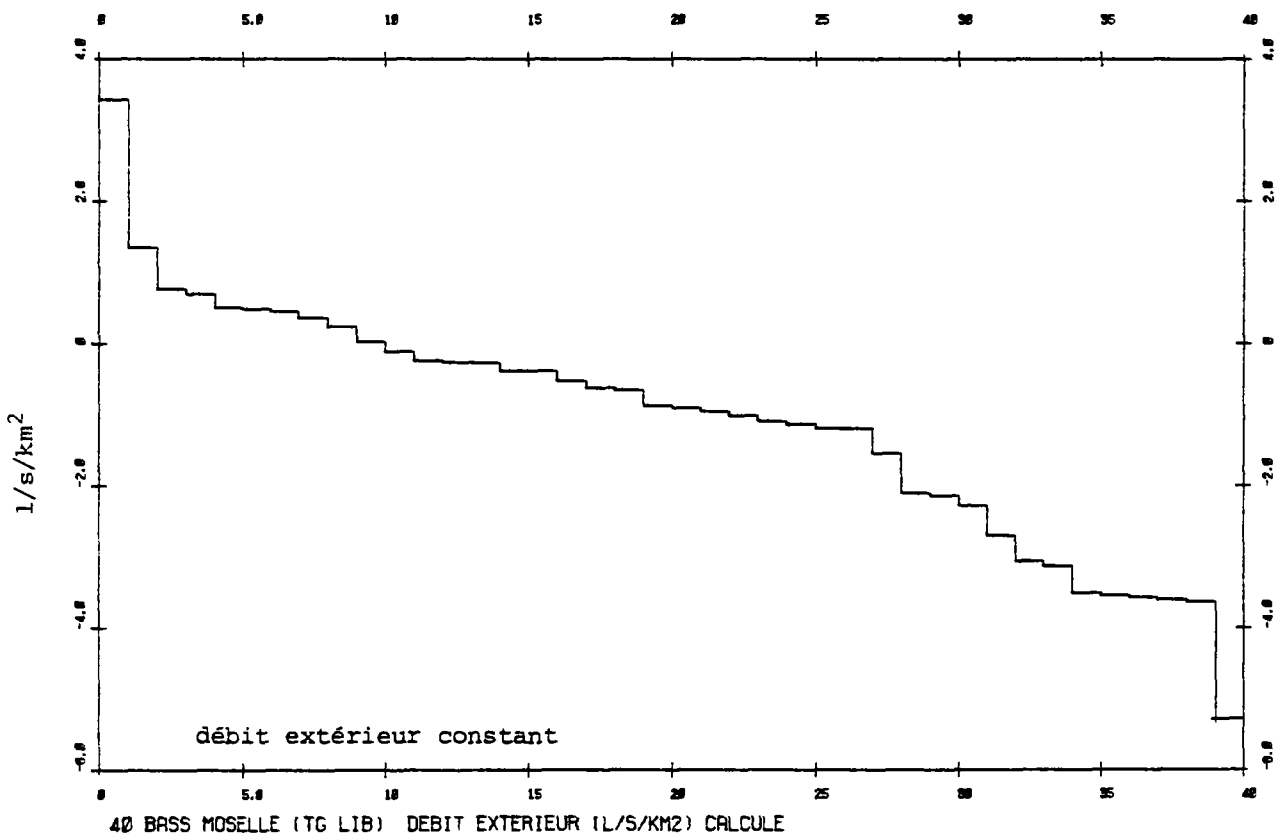
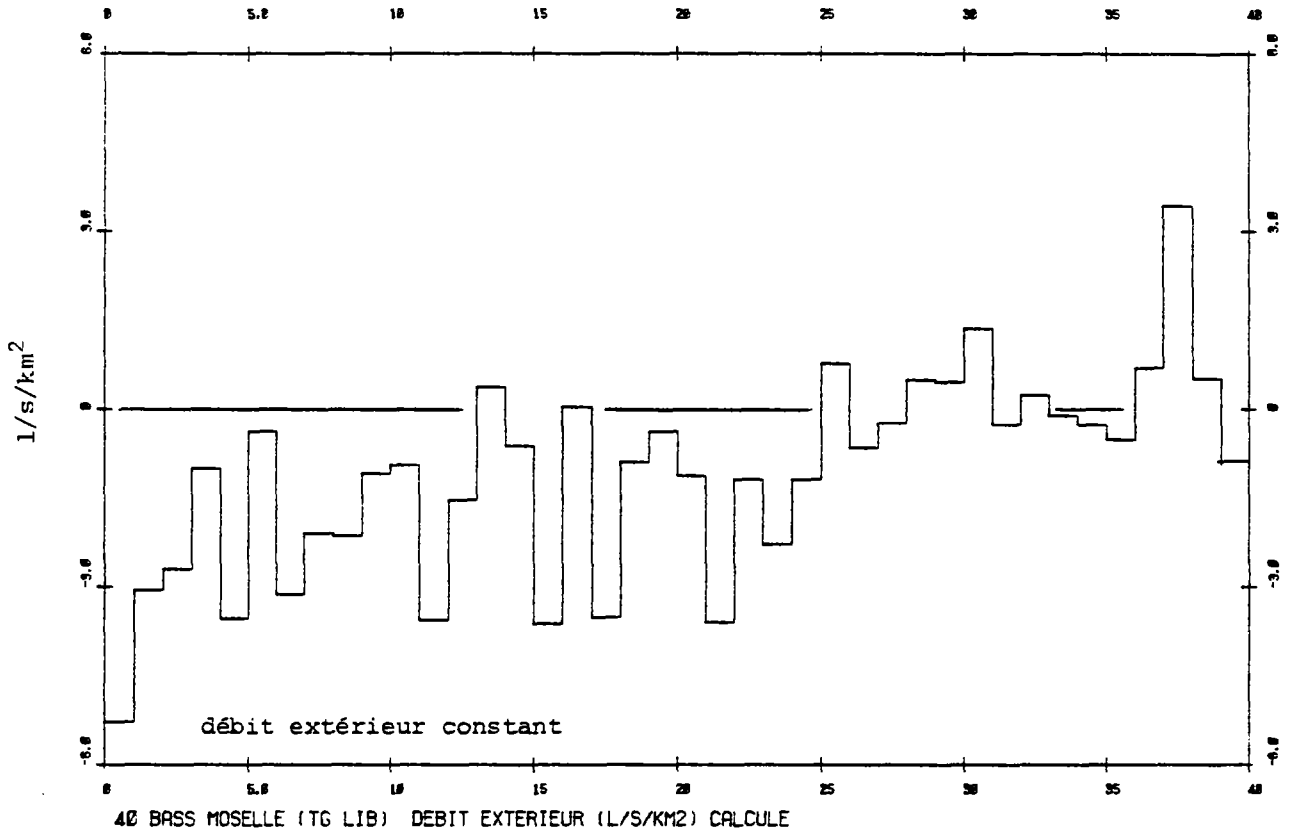


Figure VII.9 : débit extérieur constant (tarissement ajusté)

En laissant le modèle calculer un débit extérieur constant, on obtient des valeurs comprises entre +3.5 et -6 $l/s/km^2$ avec une médiane de -0.9 $l/s/km^2$. 30 bassins sur 40 ont des débits extérieurs négatifs.

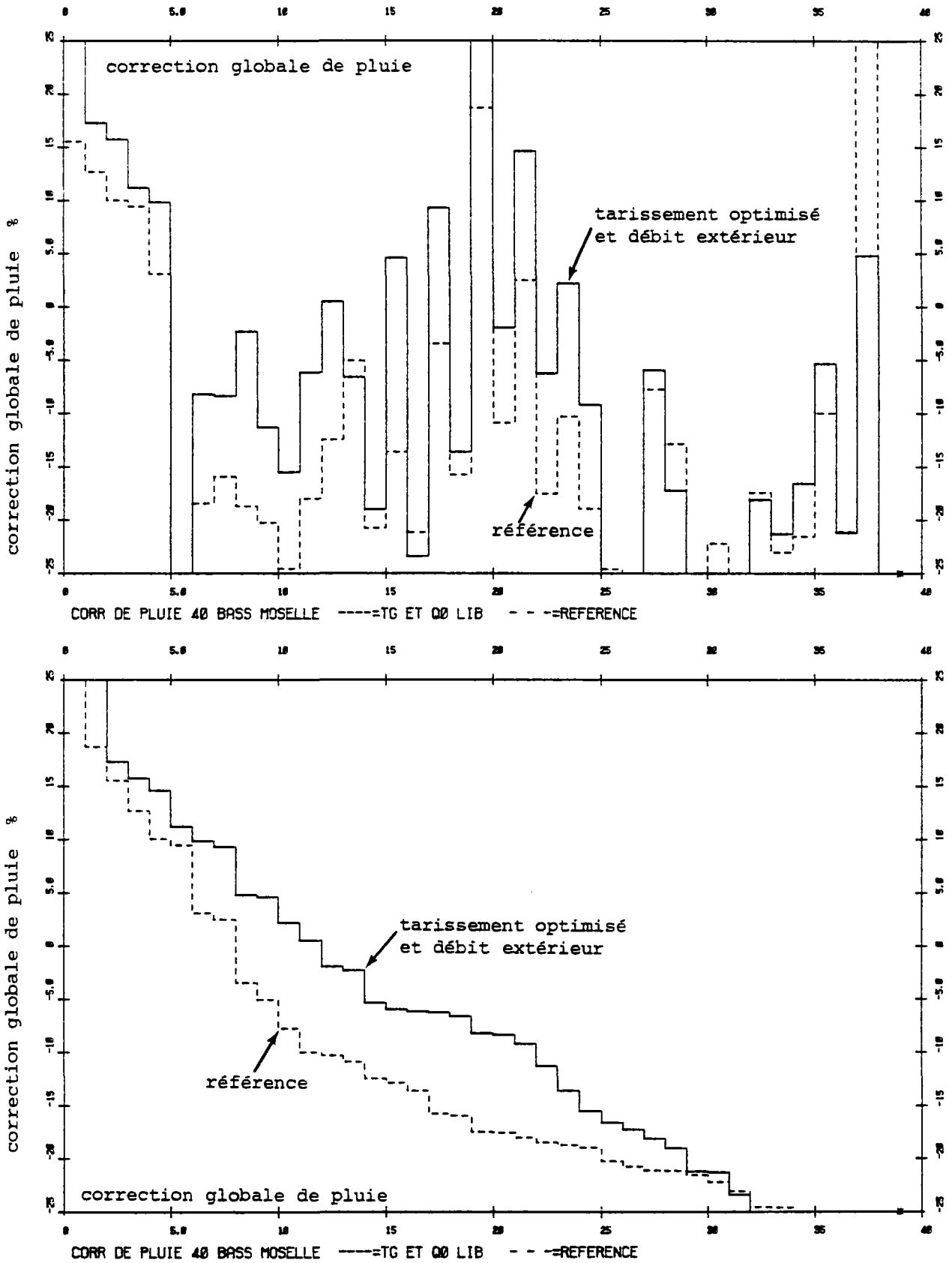


Figure VII.10 : influence d'un débit extérieur constant (tarissement ajusté) sur la correction globale de pluie

En permettant un débit extérieur constant on obtient des corrections de pluies moins négatives (et moins dispersées) car on évacue de l'eau à l'extérieur. La médiane est de -8 % au lieu de -17.5% ce qui est plus satisfaisant. (Cette amélioration n'est pas due à l'ajustement du tarissement qui n'induit pratiquement aucune variation).

* *Correction globale de pluie* (figure VII.10). Etant donné qu'on évacue de l'eau à l'extérieur du système, on obtient des coefficients de correction globale de pluie moins négatives et moins dispersées. La correction médiane est de -8% au lieu de -18%, ce qui est plus satisfaisant. Il reste à voir si ces exportations sont plausibles.

* *Débit spécifique mensuel minimal*. Par rapport à la simulation sans débit extérieur (mais avec un tarissement optimisé), on note des débits minimaux toujours sur-estimés malgré un débit extérieur très négatif. Ceci est obtenu par une correction des pluies moins négative.

* *Conclusion*. L'introduction d'un débit extérieur constant ne permet pas une meilleure simulation. Ces débits généralement compris entre -3.5 et +3.5 l/s/km² (-110 à +110 mm) ont une valeur médiane de -0.9 l/s/km². Les corrections de pluies identifiées sont cependant moins négatives (médiane de -8% au lieu de -18%).

5. INFILTRATION PROFONDE

L'hypothèse d'un débit extérieur constant étant assez brutale, on a tenté une simulation avec une infiltration profonde. On a donc choisi un schéma avec deux réservoirs souterrains, et on a supposé que le débit souterrain lent s'infiltrait vers des horizons plus profonds et n'était pas mesuré à l'exutoire.

* *Coefficient d'ajustement pondéré* (figures VII.11 et VII.12). En supposant qu'une composante souterraine du débit s'infiltre (et n'est pas mesurée à l'exutoire) on obtient une meilleure simulation. La médiane du coefficient d'ajustement passe de 0.82 à 0.85. Les 4 bassins qui étaient les plus mal simulés sont nettement améliorés :

Numéro de travail	N O M	Coefficient d'ajustement (référence)
19 (18)	Fraize / Meurthe	0.75 (0.70)
29 (26)	Lagarde / Sanon	0.72 (0.66)
36 (32)	Vic-sur Seille / Seille	0.69 (0.59)
45 (40)	Koenigsmacker / Canner	0.78 (0.68)

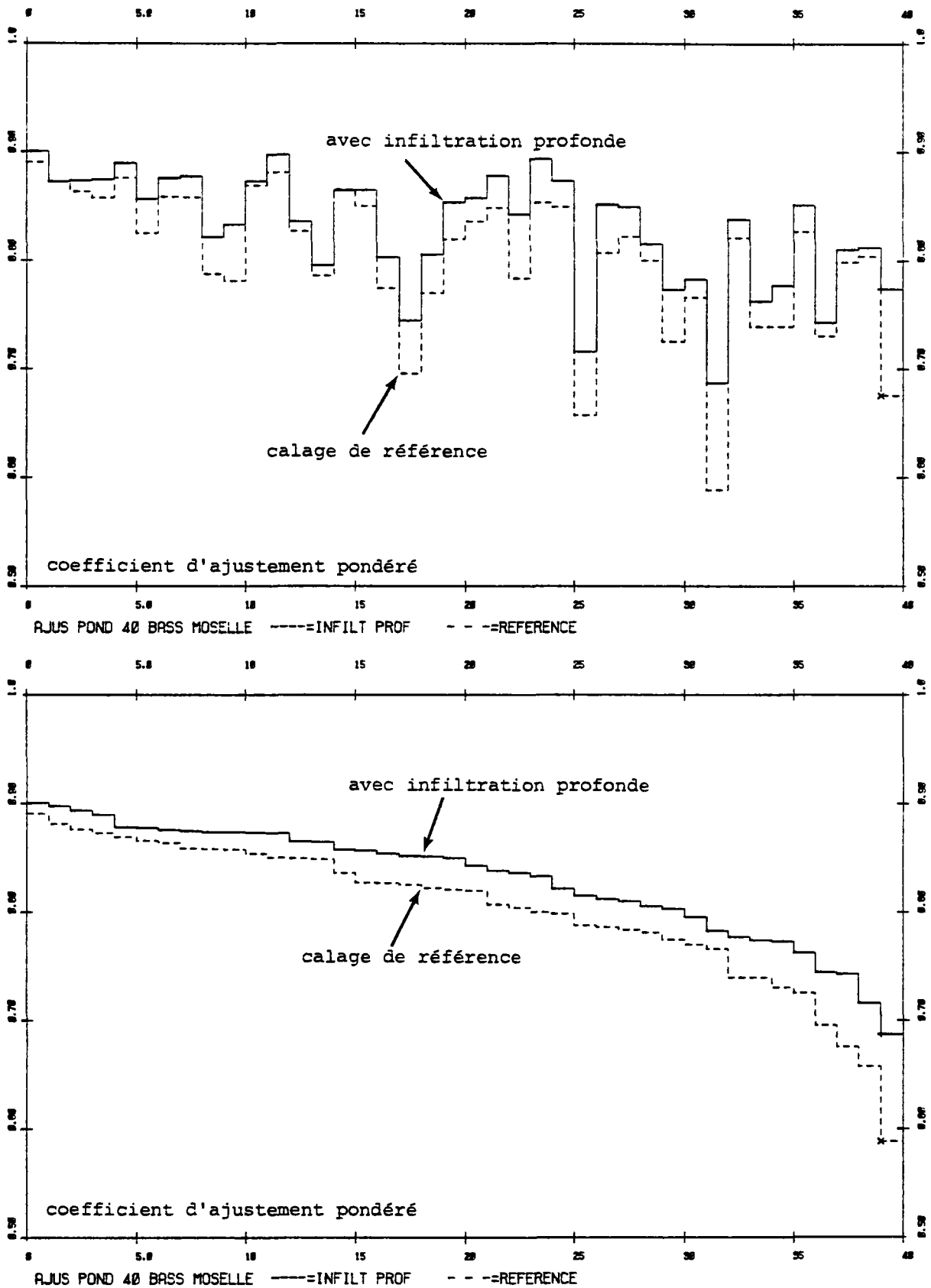


Figure VII.11 : influence de l'infiltration profonde sur le coefficient d'ajustement

En supposant que la 2^{ième} composante souterraine s'infiltré et n'est pas contrôlée à l'exutoire des bassins, on obtient un ajustement nettement meilleur qu'avec la simulation de référence. Il n'y a cependant aucun élément permettant de conforter cette hypothèse.

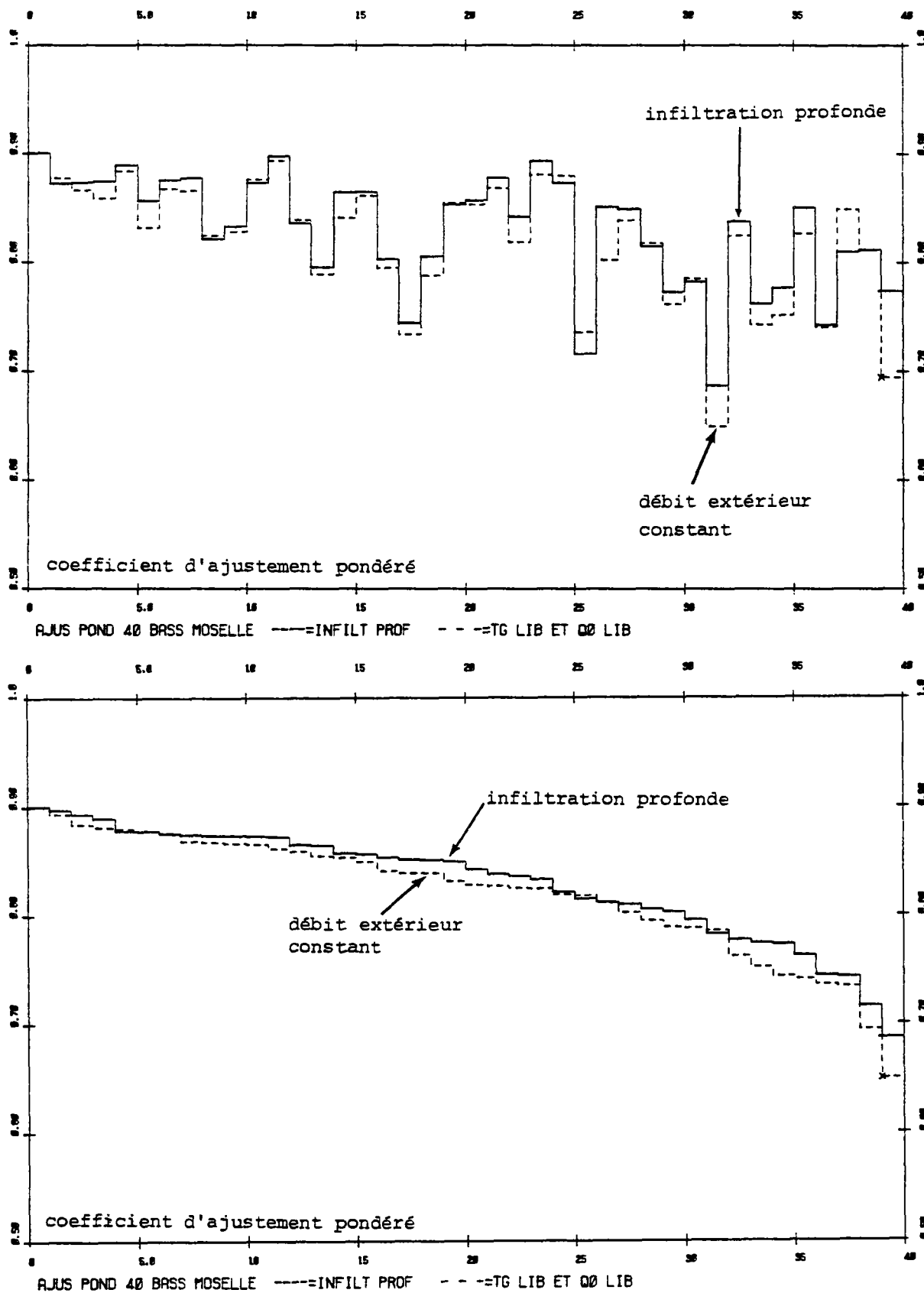


Figure VII.12 : influence de l'infiltration profonde sur le coefficient d'ajustement

En supposant que la 2^{ème} composante souterraine s'infiltré et n'est pas contrôlée à l'exutoire des bassins, on obtient un ajustement généralement légèrement meilleur qu'avec un débit extérieur constant.

En fait, la figure VII.12 montre qu'on obtient un coefficient d'ajustement légèrement meilleur qu'avec un débit extérieur constant.

* *Capacité de la réserve superficielle* (figure VII.13). Les capacités de réserve superficielle identifiées sont très semblables à celles identifiées précédemment, elles sont cependant légèrement plus grandes. Ce paramètre semble donc bien indépendant du schéma de transfert choisi.

* *Correction globale de pluie* (figures VII.14 et VII.15). En supposant que la composante souterraine lente s'infiltré, on identifie des corrections globales de pluies qui sont beaucoup moins négatives que celles du calage de référence, car on rétablit l'équilibre en permettant à une partie de l'écoulement de s'infiltrer. La correction médiane est de -4% au lieu de -17,5 % pour le calage de référence. Elle est également plus faible que pour le calage avec un débit extérieur constant pour lequel la médiane des corrections était -8 %.

* *Hauteur d'équi-ruissellement* (figures VII.16 et VII.17). La hauteur d'équi-ruissellement est nettement plus élevée que lors de la simulation de référence. La hauteur médiane est de 100 millimètres au lieu de 65 millimètres. Ceci est assez logique puisque les corrections globales de pluie étant moins négatives, les niveaux dans les réservoirs sont plus hauts. La hauteur d'équi-ruissellement est également plus élevée que celle obtenue lors de la simulation avec un débit extérieur constant pour laquelle la médiane était de 80 millimètres. Ceci s'explique également, car les corrections de pluies avec infiltration profonde sont moins négatives qu'avec un débit extérieur constant.

* *Débit spécifique moyen* (figure VII.18). Comme avec les autres simulations, le débit spécifique moyen est bien simulé. Il est pratiquement identique à celui obtenu lors de la simulation de référence. Il est également toujours légèrement sous-estimé.

* *Débit spécifique minimal* (figure VII.19). Le débit spécifique minimal (qui survient généralement au cours de l'été 1976) est systématiquement sur-estimé avec ce schéma avec infiltration profonde. Il n'est pas mieux simulé que lors de la simulation de référence.

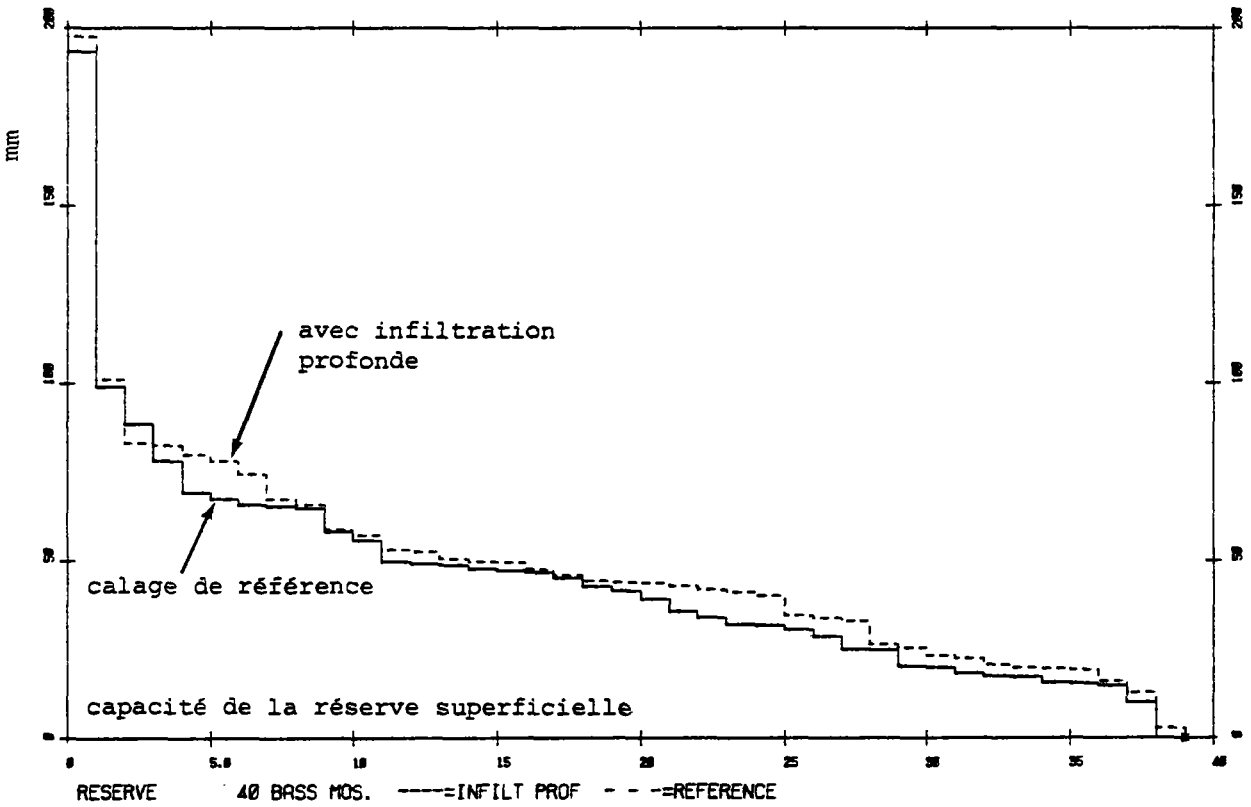
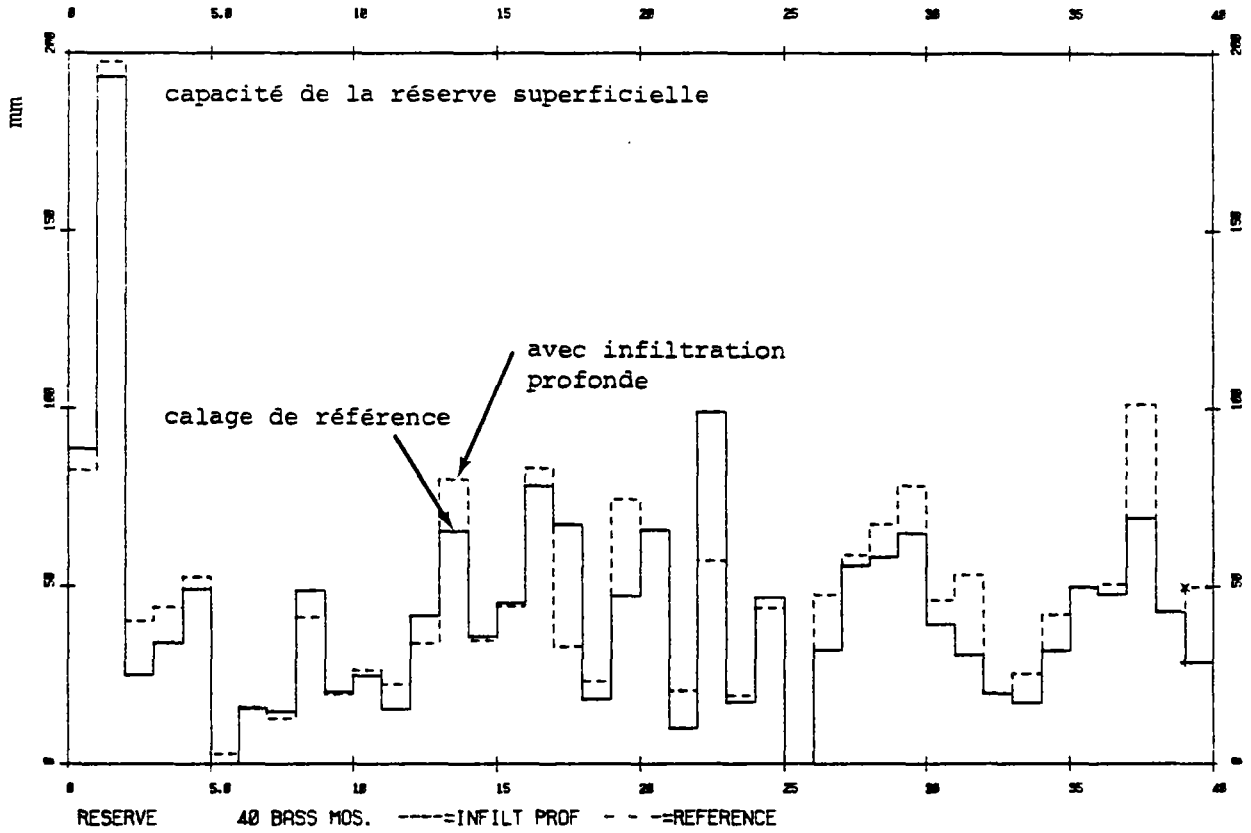


Figure VII.13 : influence de l'infiltration profonde sur la capacité de la réserve superficielle

La réserve superficielle identifiée est généralement légèrement plus grande que lors de la simulation de référence, mais la répartition est identique.

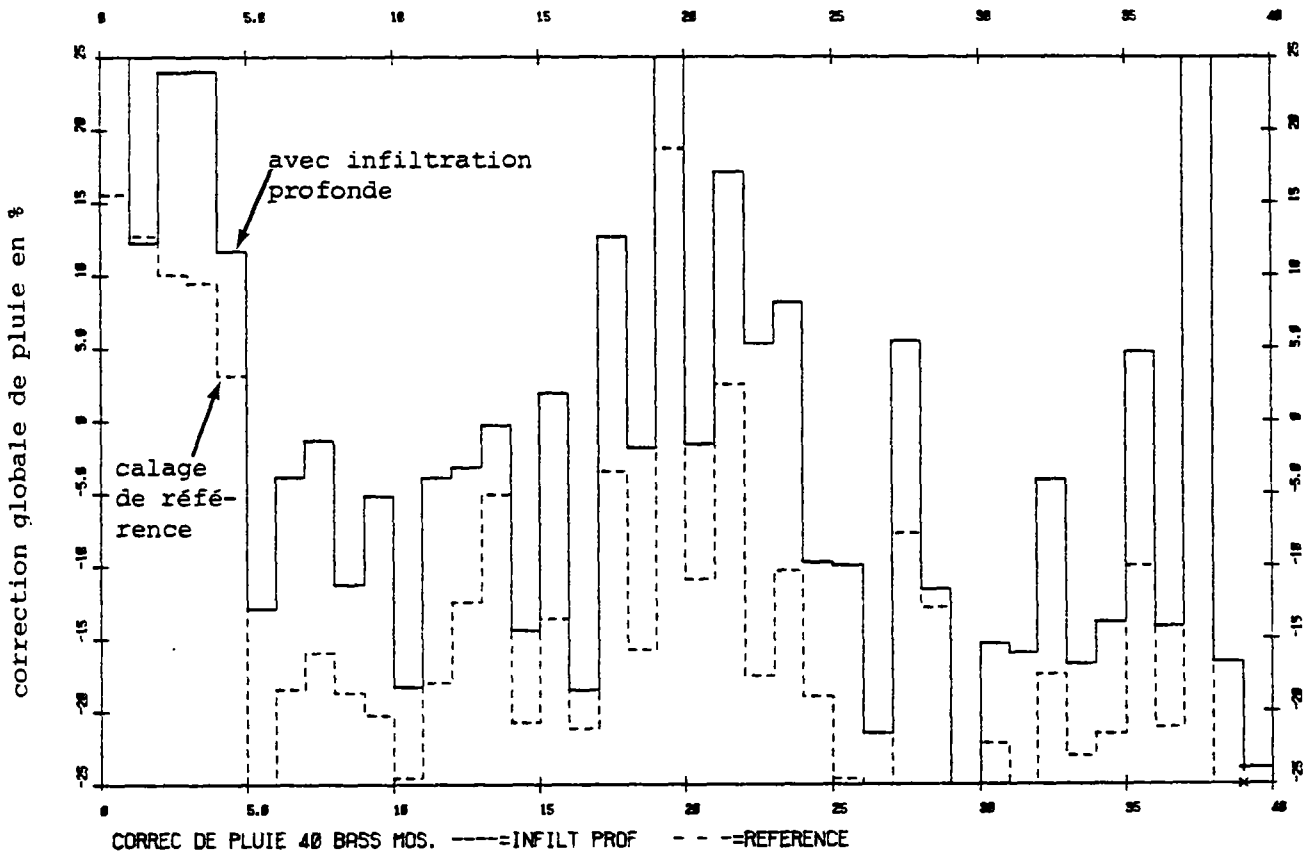


Figure VII.14 : influence de l'infiltration profonde sur la correction globale de pluie

En supposant que la 2ième composante souterraine s'infiltre et n'est pas contrôlée à l'exutoire, on obtient des corrections de pluies beaucoup moins négatives que lors de la simulation de référence. En effet, on rétablit ainsi en partie le bilan et d'autre part les faibles débits sont mieux simulés.

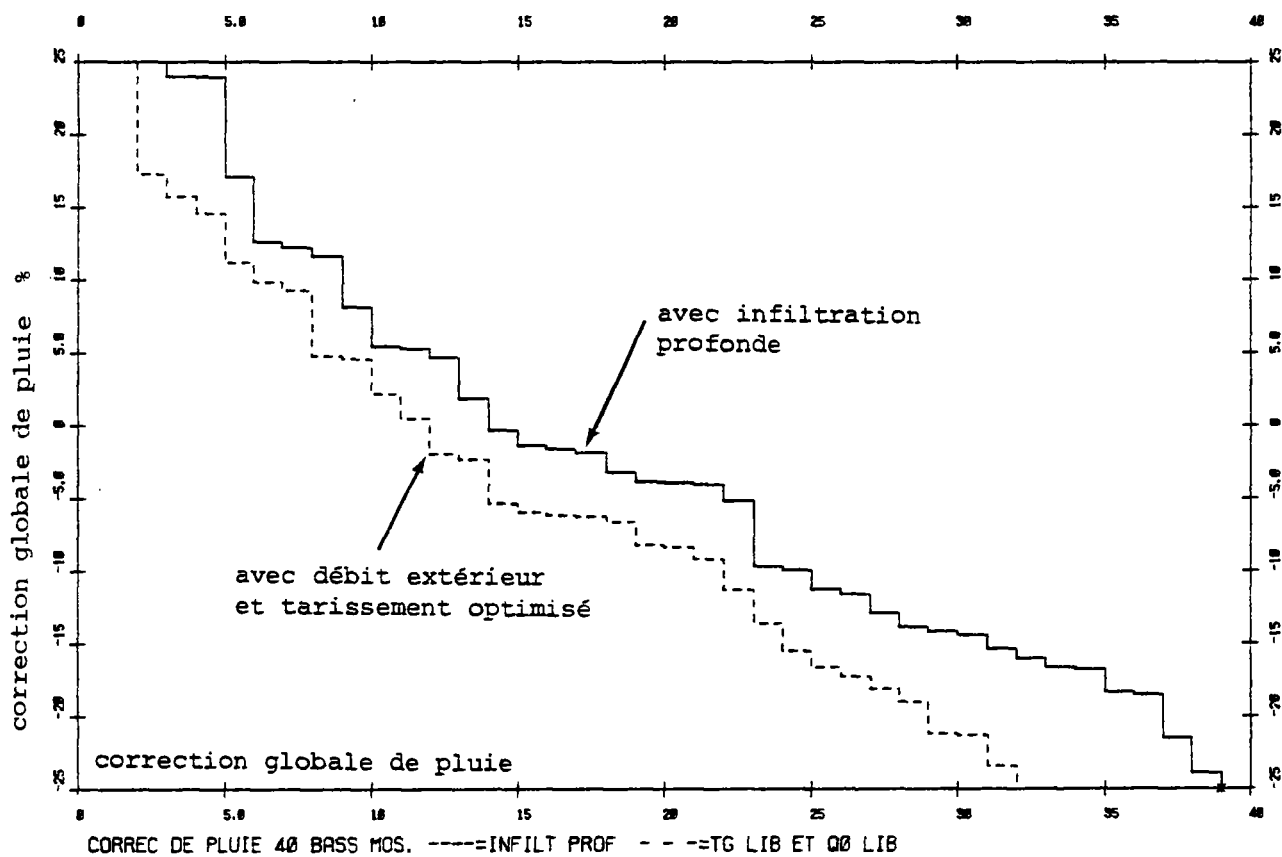
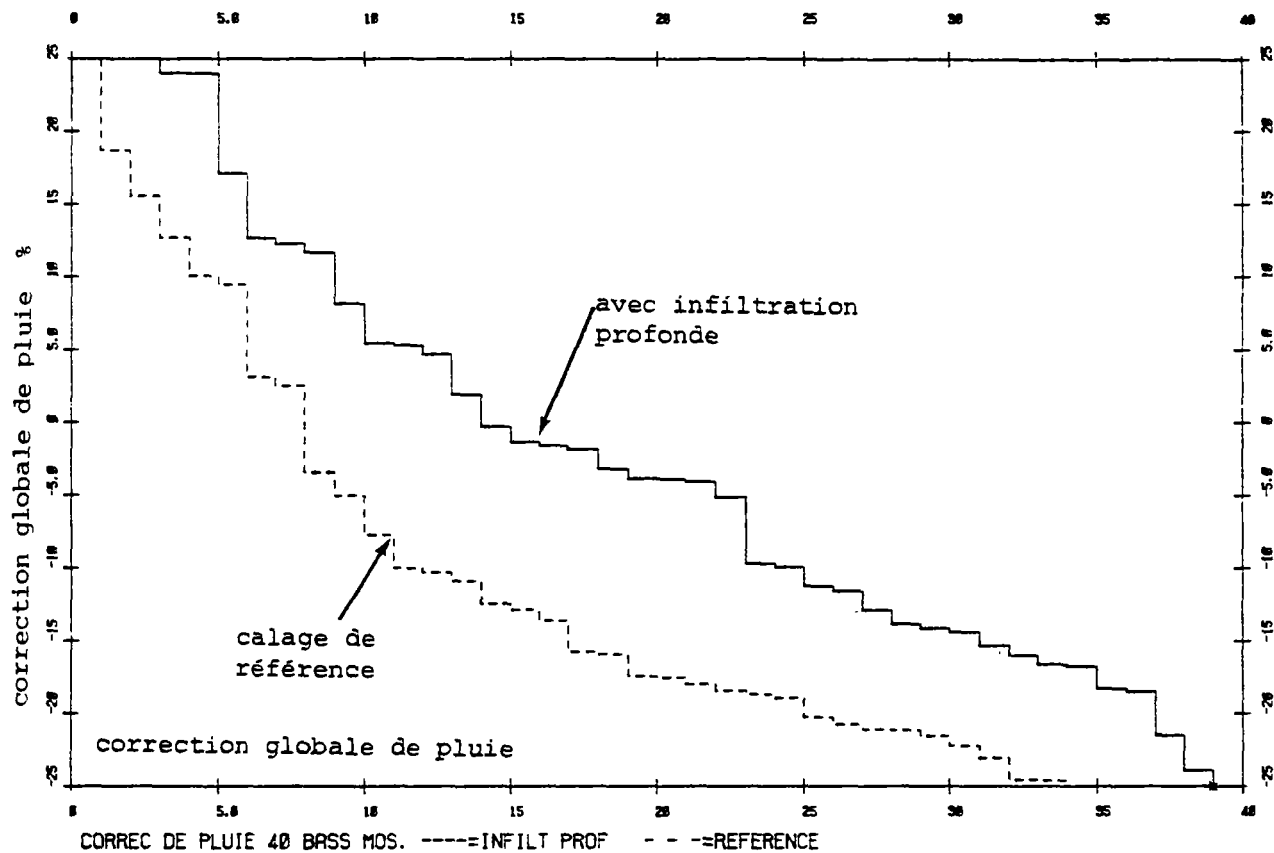


Figure VII.15 : influence de l'infiltration profonde sur la correction globale de pluie

En supposant que la 2ième composante souterraine s'infiltré et n'est pas contrôlée à l'exutoire, la correction de pluie indentifiée est beaucoup plus faible qu'avec la simulation de référence (la médiane est de -4 % au lieu de -17.5 %). (La correction est plus faible qu'avec un débit extérieur constant -4 % au lieu de -8 %, ce qui est plus réaliste).

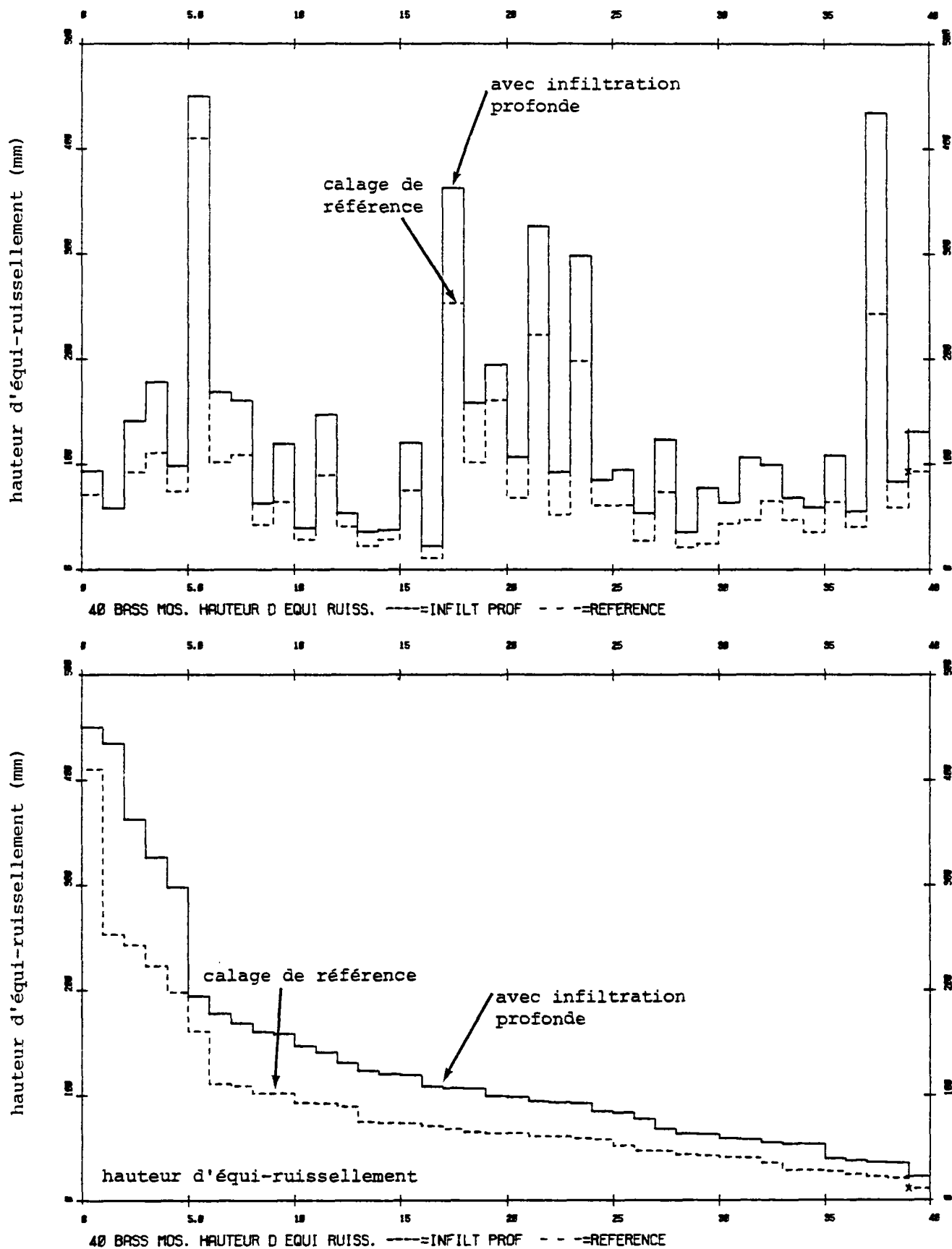


Figure VII.16 : influence de l'infiltration profonde sur la hauteur d'équi-ruisselement

La hauteur d'équi-ruisselement est nettement plus élevée que lors de la simulation de référence. (La médiane est de 100 mm au lieu de 65 mm). Ceci est assez logique car les corrections de pluies sont moins négatives donc les niveaux dans les réservoirs sont plus élevés.

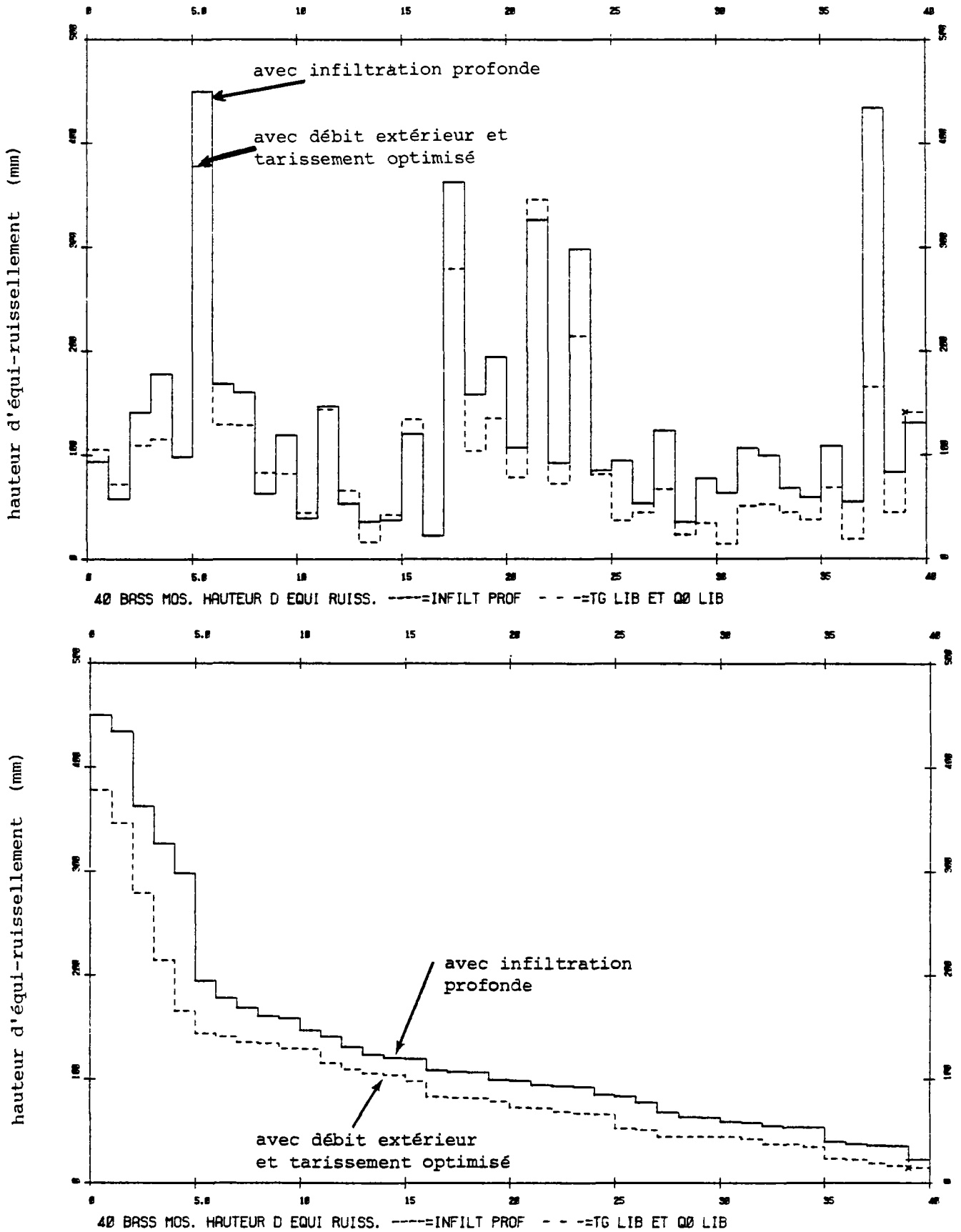


Figure VII.17 : influence de l'infiltration profonde sur la hauteur d'équi-ruisselement

La hauteur d'équi-ruisselement est plus élevée que lors de la simulation avec un débit extérieur. (La médiane est de 100 mm au lieu de 80 mm). En effet la correction de pluie est encore moins négative avec l'infiltration profonde.

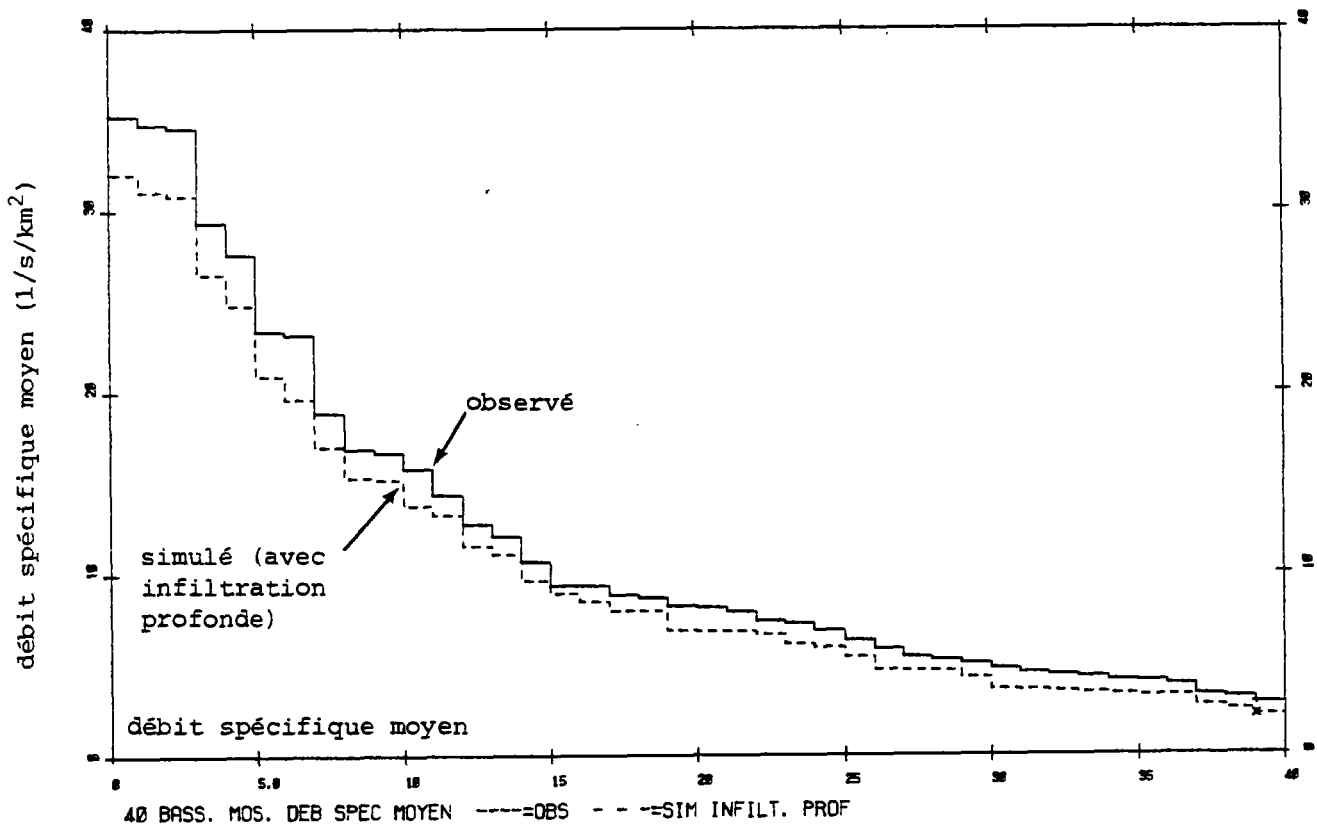
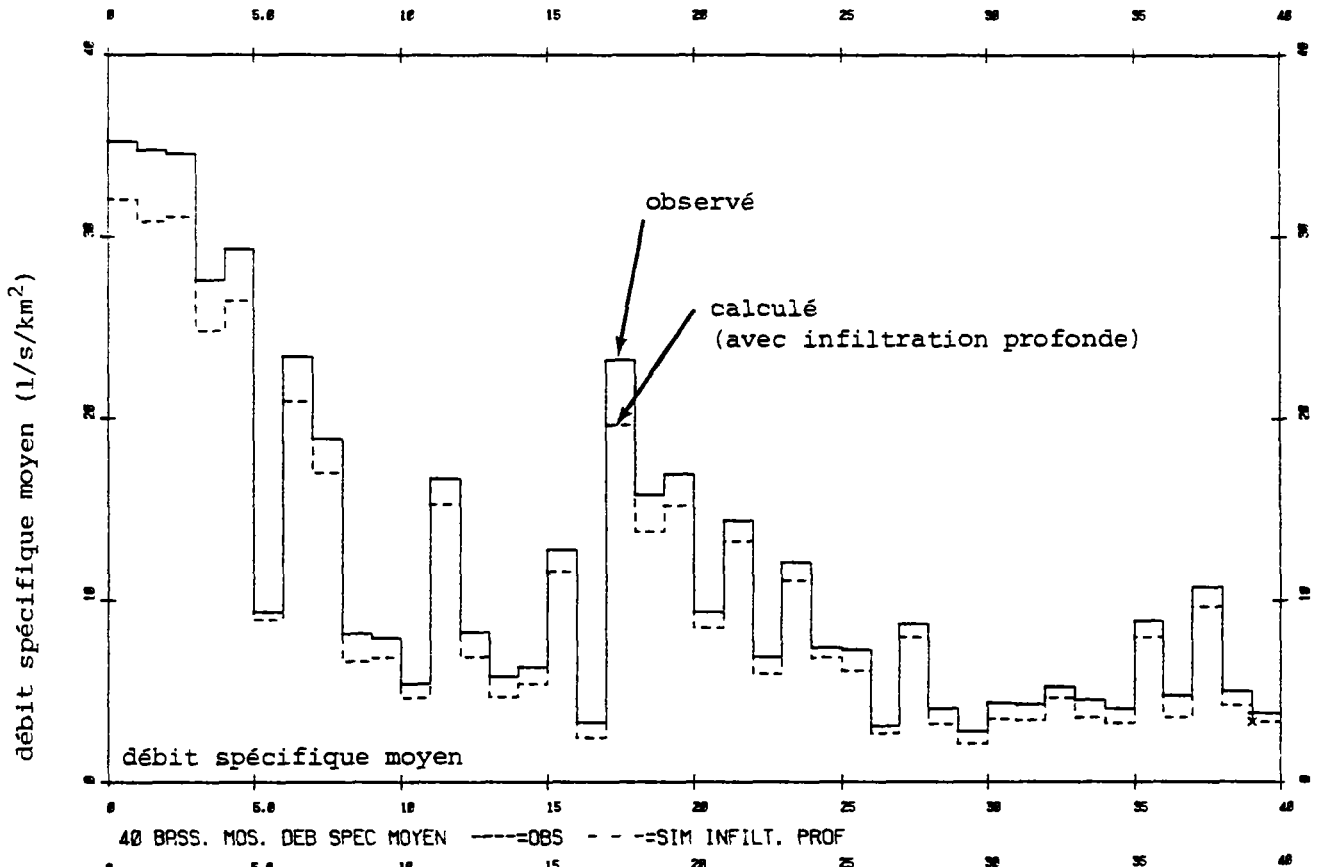


Figure VII.18 : influence de l'infiltration profonde sur le débit spécifique moyen

Comme dans les autres simulations le débit moyen est systématiquement légèrement sous estimé par le modèle. Il est très comparable au débit moyen obtenu lors de la simulation de référence.

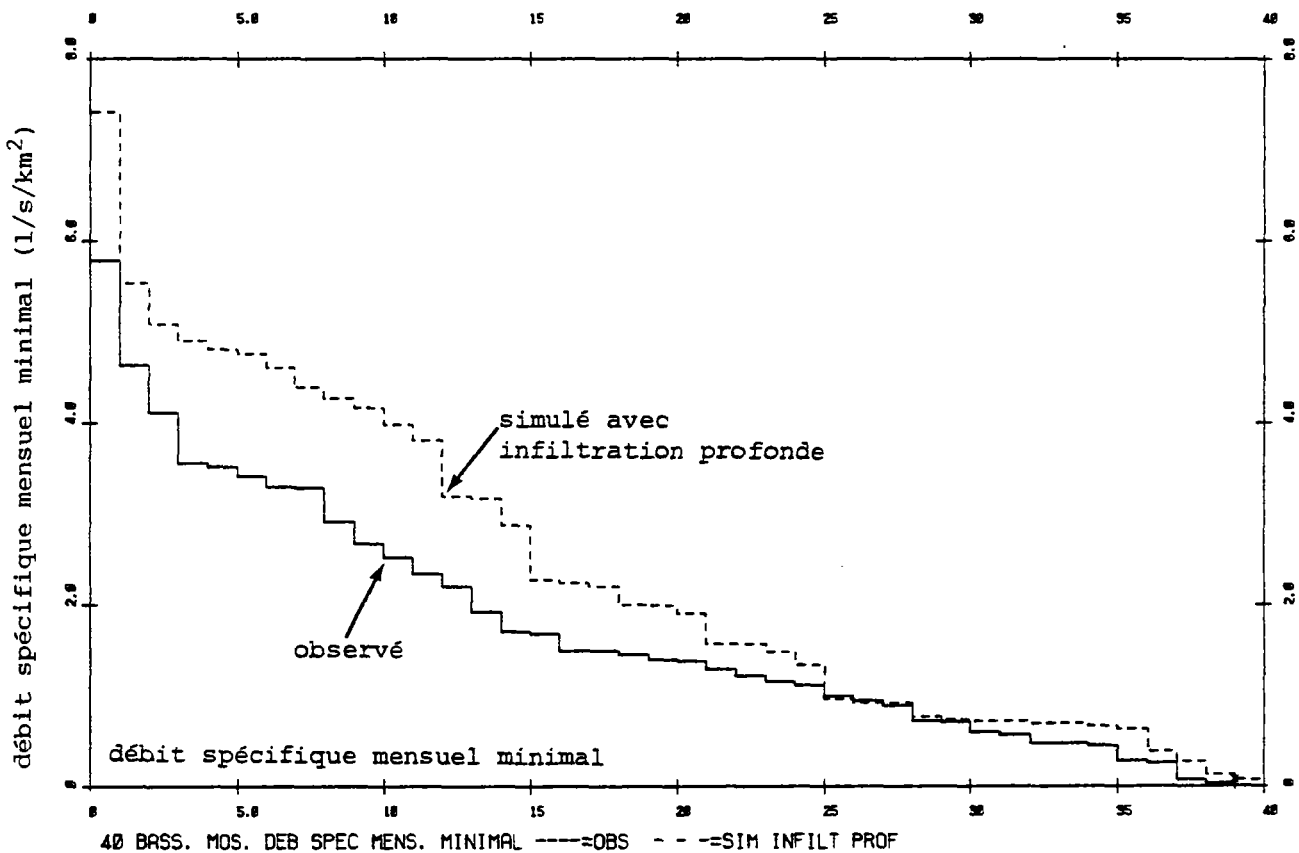
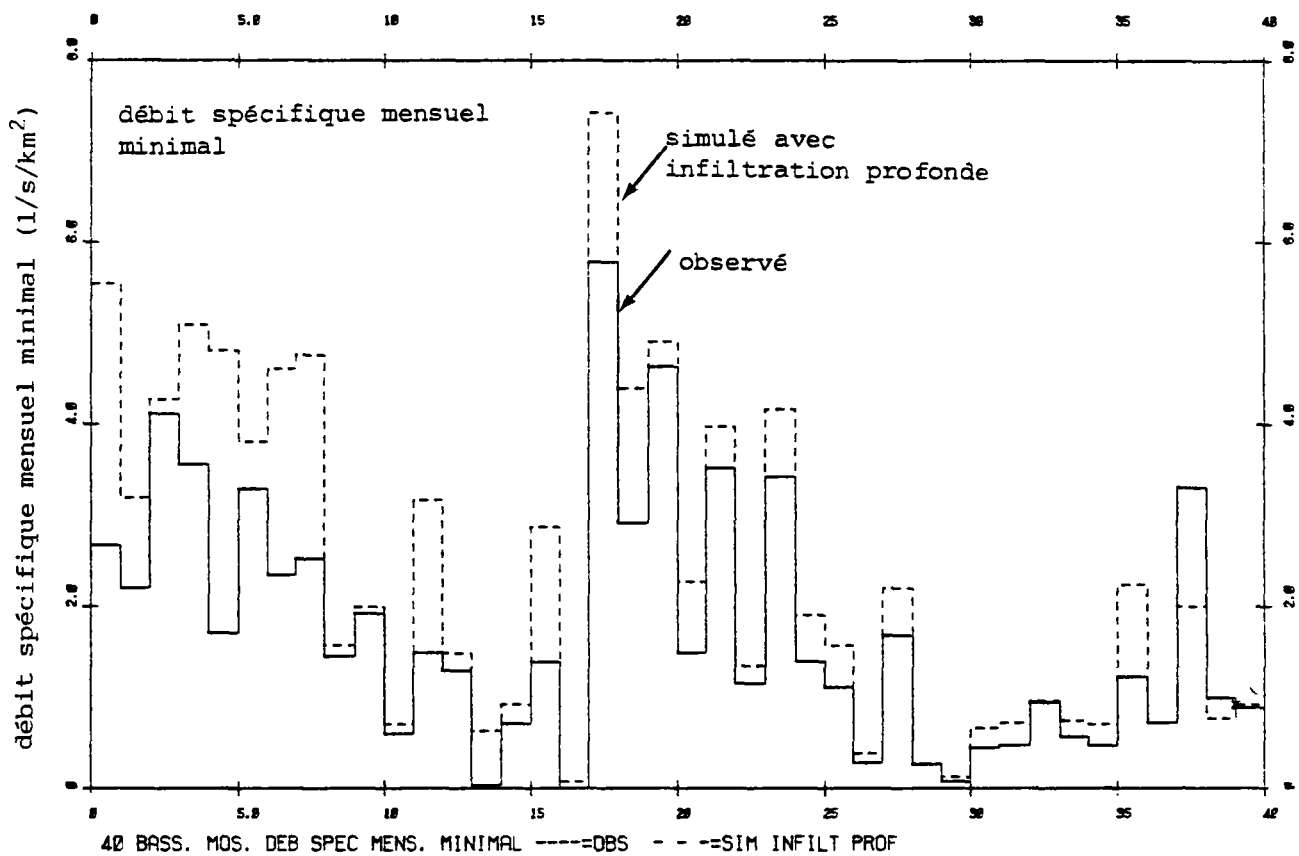


Figure VII.19 : influence de l'infiltration profonde sur le débit spécifique minimal

Débit spécifique mensuel minimal. Il est systématiquement surestimé. Il paraît un peu plus mal simulé qu'avec la simulation de référence (voir figure IV.14).

* *Temps de demi-percolation profonde* (figure VII.20). Les temps de demi-percolation profonde règlent la quantité d'eau qui passera dans la composante souterraine lente qui s'infiltrera. Pour cette simulation, ils étaient bornés à 20 mois. La médiane des temps identifiés étaient de 12.5 mois et 80 % des valeurs sont comprises entre 7.5 et 20 mois, ce qui montre que les débits de percolation ne sont pas très importants (car la percolation est lente).

* *Temps de demi-tarissement (rapide)* (figure VII.21). Dans un but d'analyse, on a libéré les demi-temps de tarissement (rapide) qui étaient auparavant fixés à 3 mois (on les a cependant contraint de rester entre 1.5 et 8 mois qui sont des valeurs raisonnables). La valeur médiane obtenue est de 5.7 mois ; ceci est assez logique, car il faut prendre en compte le fait que le débit souterrain (rapide) décroît plus vite que lors de la simulation de référence, car une partie s'infiltrer profondément.

Les temps de demi-tarissement identifiés ont été comparés avec ceux obtenus (figures VII.22 à VII.24) :

- a) lors de la simulation de référence mais en libérant le temps de demi-tarissement,
- b) lors de la simulation avec débit extérieur constant et temps de demi-tarissement optimisé,
- c) lors de la simulation avec deux composantes souterraines.

Bien que pour ces trois simulations de comparaison, le temps de demi-tarissement aient été bornés supérieurement à 6 mois, on note une assez bonne liaison surtout avec les cas b) et c), ce qui montre que ce paramètre est assez bien déterminé.

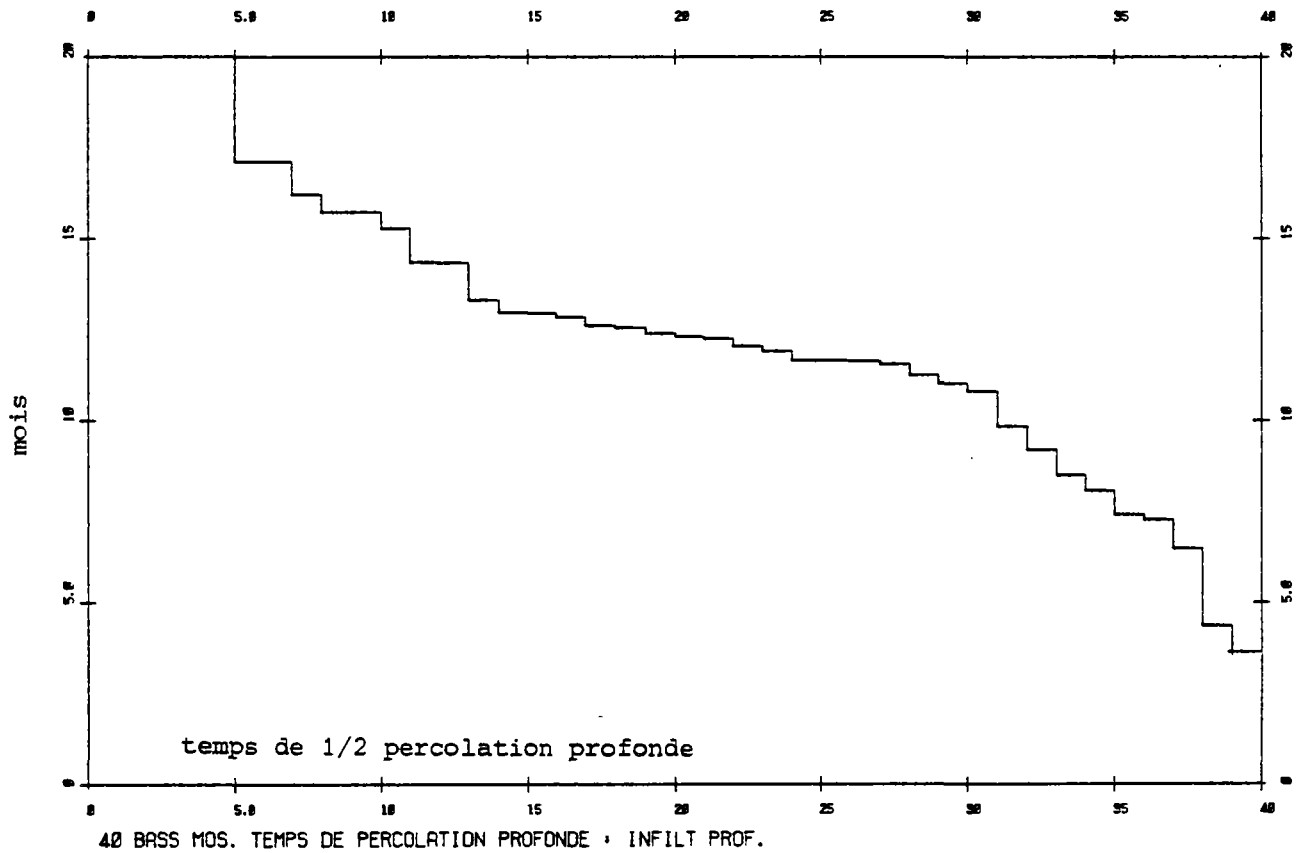
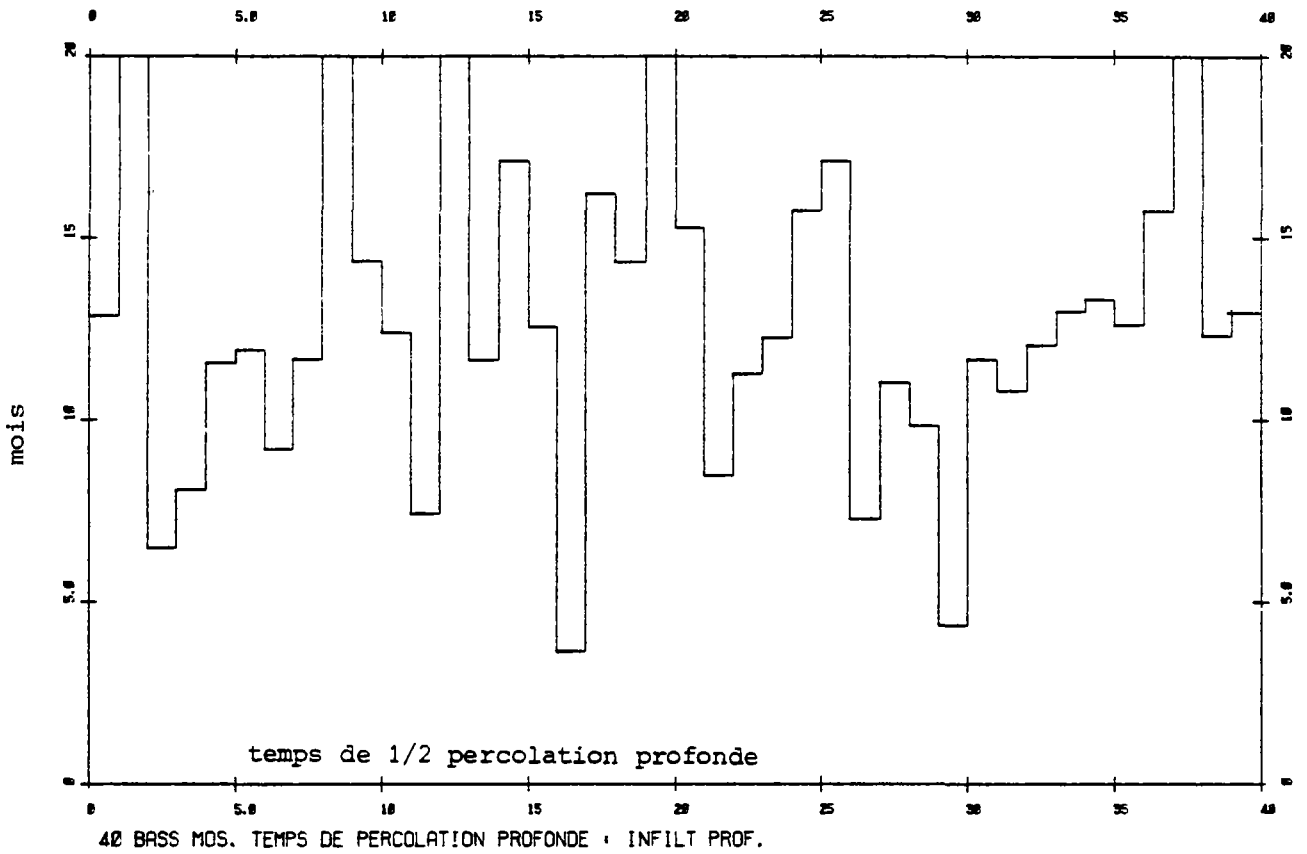


Figure VII.20 : influence de l'infiltration profonde sur le temps de demi-percolation profonde

Répartition statistique des temps de demi-percolation profonde. La valeur médiane est de 12.5 mois. Pour certains bassins, la valeur atteinte est de 20 mois qui était le maximum admis. Le débit de percolation n'est donc pas très élevé.

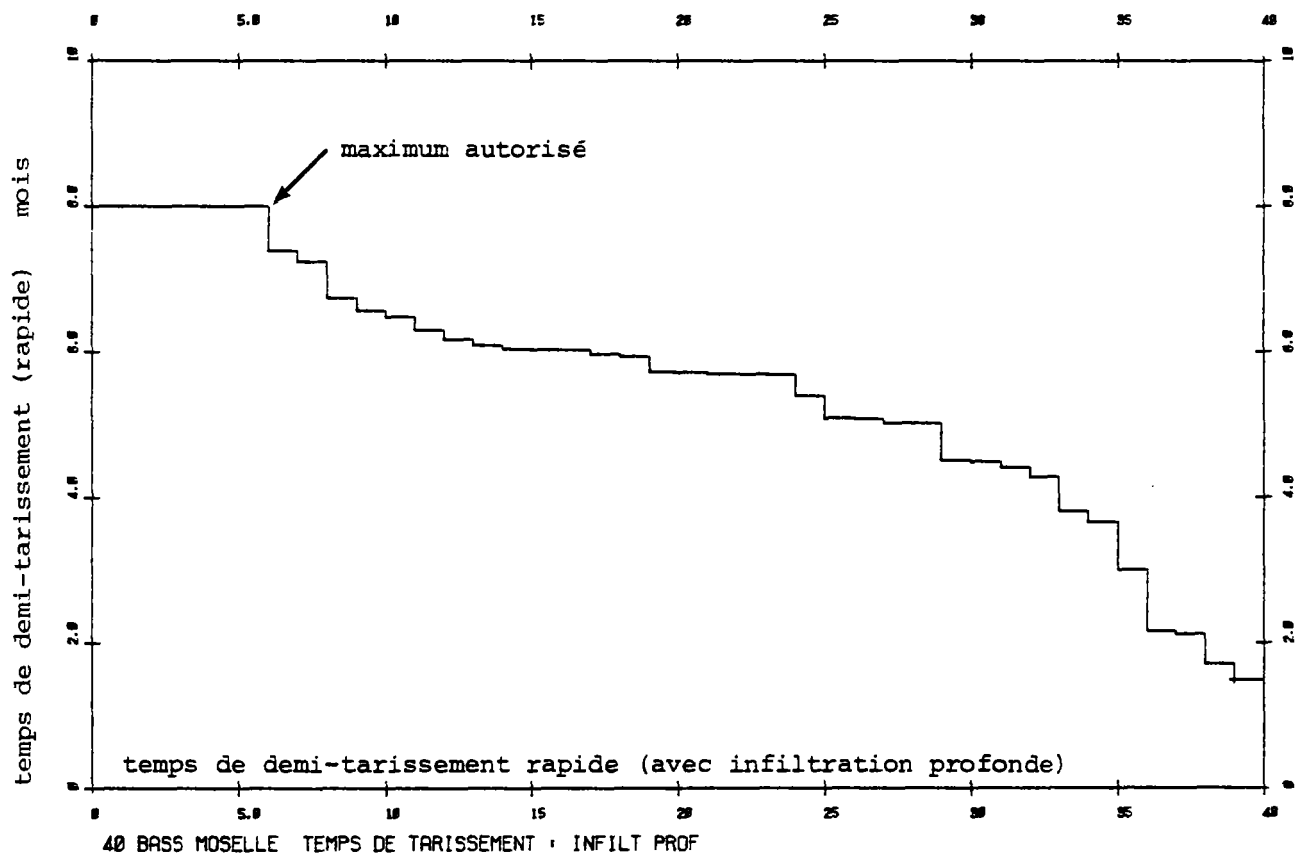
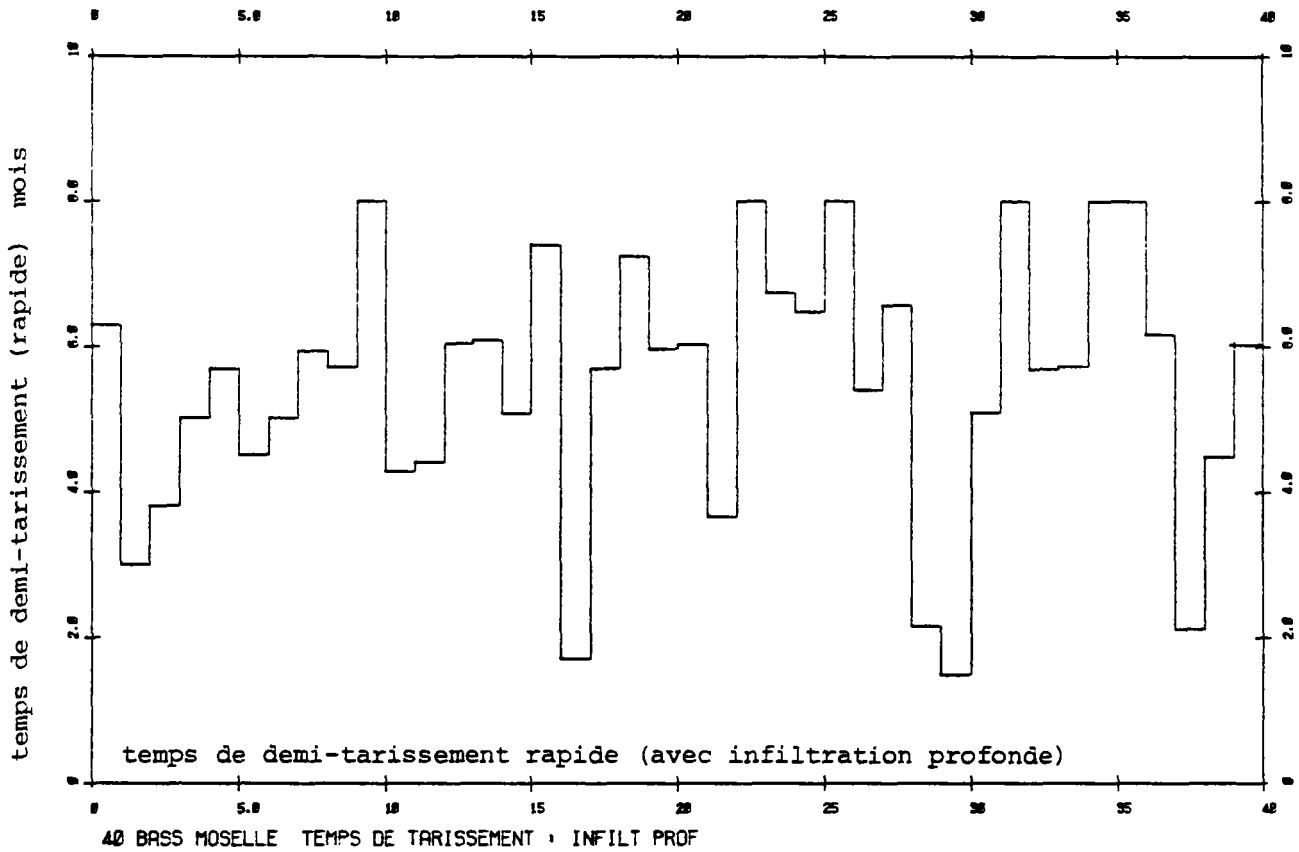


Figure VII.21 : influence de l'infiltration profonde sur le temps de demi-tarissement

Les temps de demi-tarissement de l'écoulement souterrain rapide (qui étaient fixés précédemment à 3 mois) ont été libérés mais contraints à rester compris entre 1.5 et 8 mois. La valeur médiane est de 5.7 mois. Il ne faut cependant pas oublier que le débit souterrain décroît plus vite car il y a une infiltration profonde.

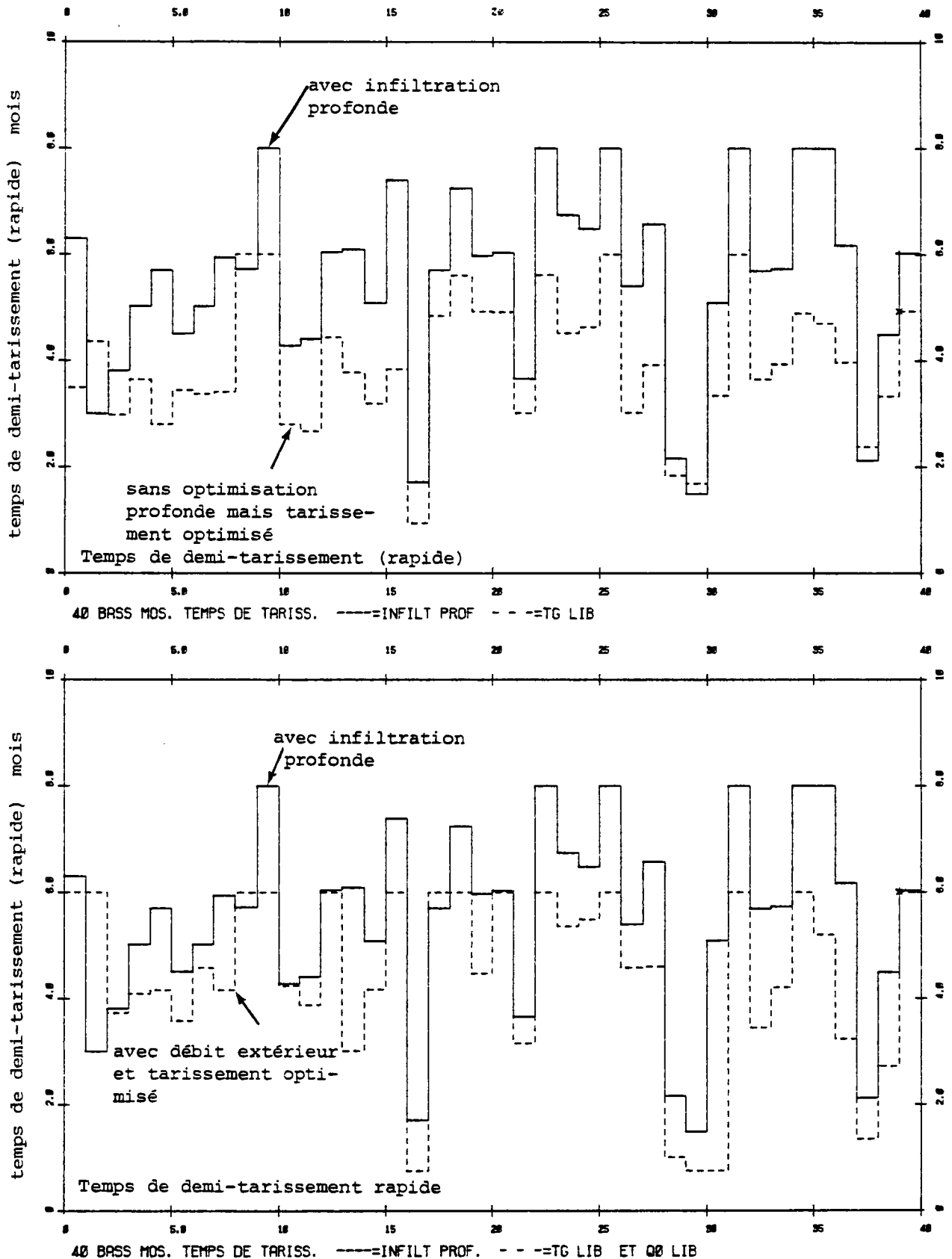


Figure VII.22 : influence de l'infiltration profonde sur le temps de demi-tarissement

Les temps de demi-tarissement rapide sont comparés à ceux obtenus lors des simulations :

- a) avec temps de demi-tarissement libre (maximum 6 mois)
 - b) avec temps de demi-tarissement (maximum 6 mois) et débit extérieur constant libres
- Les temps de demi-tarissement identifiés sont généralement comparables.

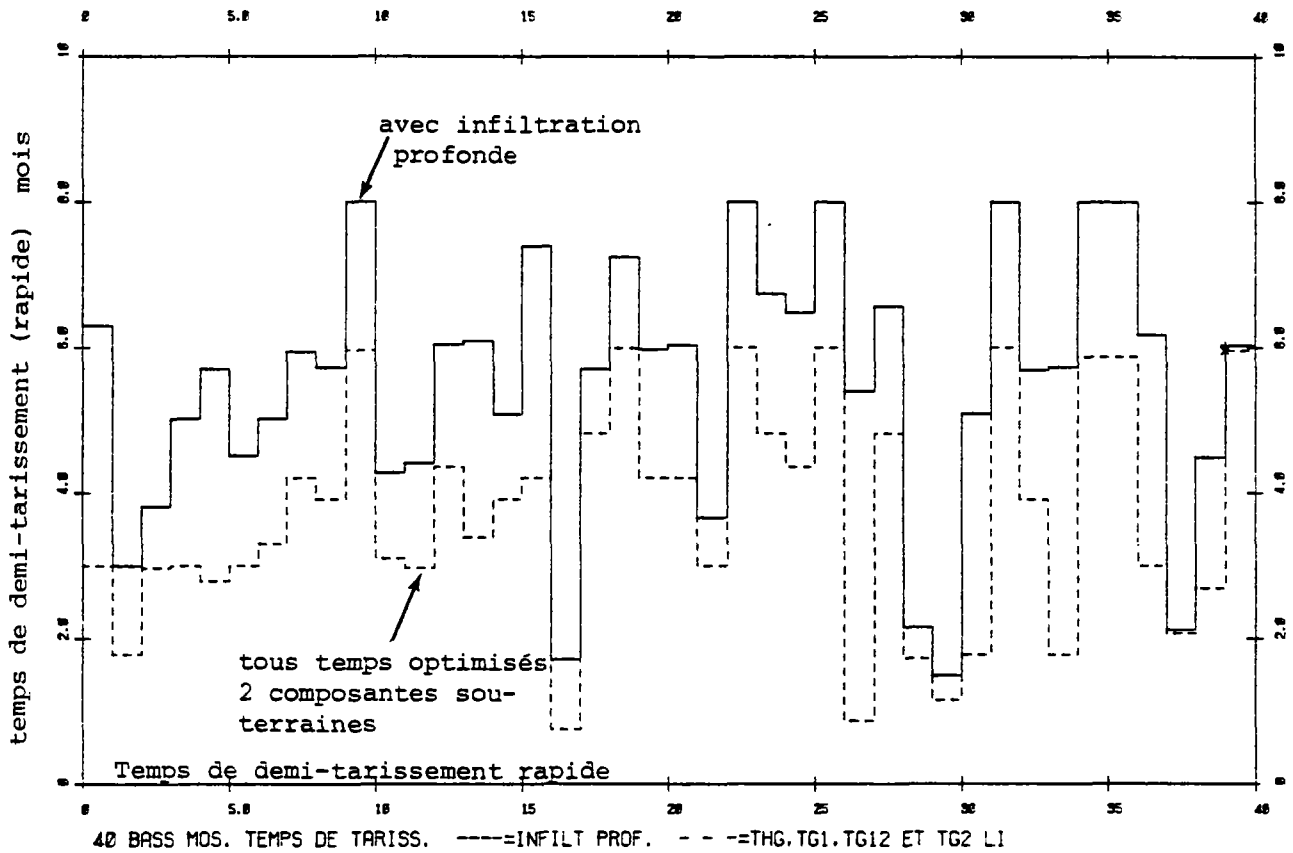


Figure VII.23 : influence de l'infiltration profonde sur le temps de demi-tarissement

Les temps de demi-tarissement sont comparés avec ceux obtenus lors de la simulation avec deux composantes souterraines (temps maximal 6 mois). On remarque une certaine liaison cependant assez floue.

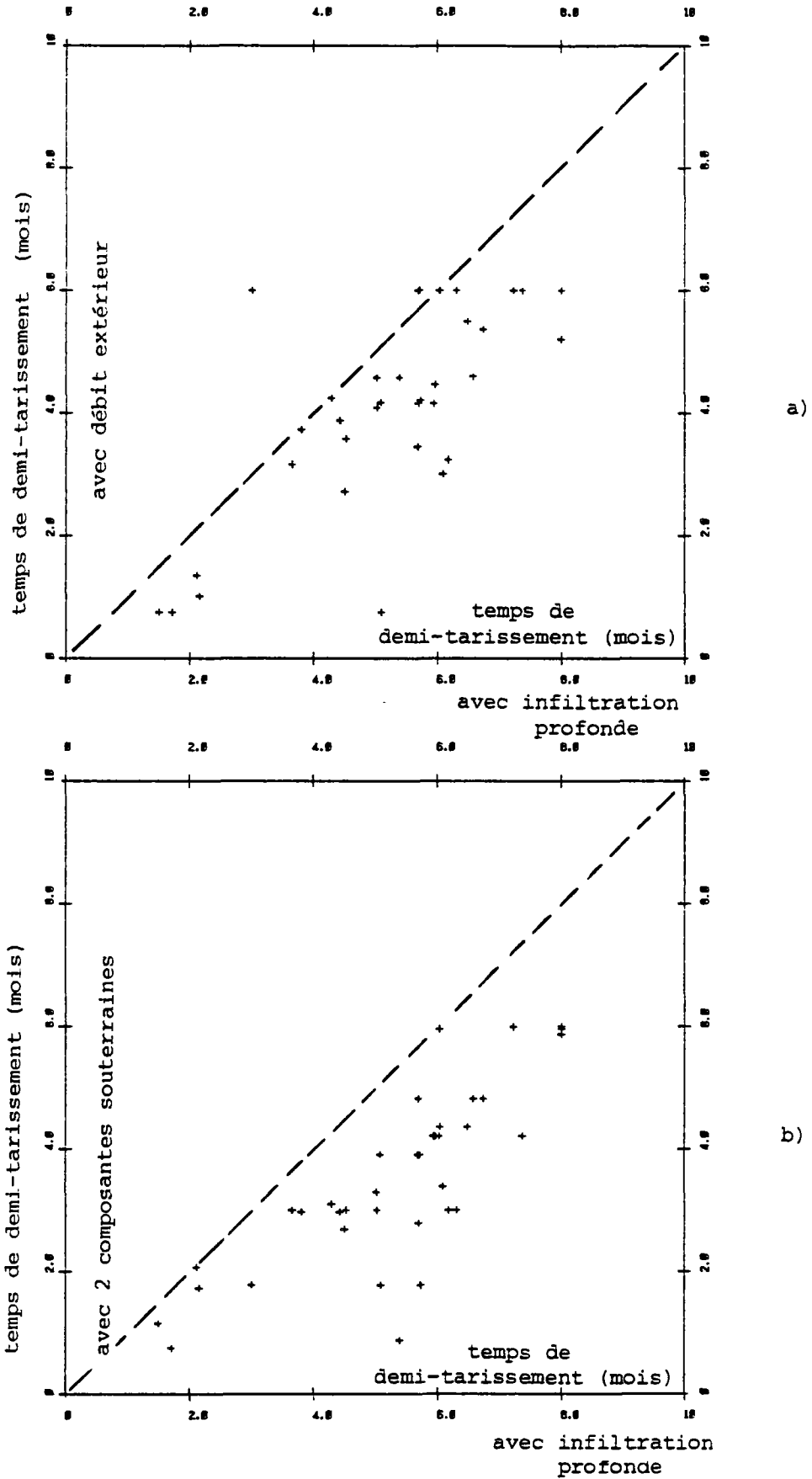


Figure VII.24 : influence de l'infiltration profonde sur le temps de demi-tarissement

Comparaison des temps de demi-tarissement avec ceux identifiés par les simulations :

a) avec débit extérieur constant

b) avec 2 composantes souterraines

On voit une liaison assez nette. Les temps identifiés avec infiltration profonde sont plus grands ce qui est logique.

CHAPITRE 8

ANALYSE DE SENSIBILITE DES PARAMETRES
SUR LE BASSIN DE LA MOSELLE A HAUCONCOURT (9 387 KM²)

TABLEAU VIII.1 - Paramètres identifiés pour le bassin de la Moselle à Hauconcourt

HYPOTHESE	Correction globale de pluie (%)	Correction d' ETP (%)	Capacité de la réserve superficielle (mm)	Hauteur d'équi-ruissellement (mm)	Coefficient d'ajustement pondéré
Calage de référence	- 10	+ 20	50	64	0.826
Vérification avec d'autres valeurs initiales	"	"	"	"	"
Correction d'évapotranspiration potentielle imposée à + 30 %	- 10	+ 30	45		0.820
Correction de pluie et d'évapotranspiration potentielle nulles	0	0	107	48	0.791
Tarissement optimisé	- 9.0	+ 20			0.835
2 composantes souterraines		+ 20			0.825
Transfert bi-linéaire	- 6.7	+ 20	70		0.832
Schéma avec infiltration profonde	+ 5.0	+ 20	50	110	0.850
Réseau réduit avec 20 postes pluviométriques	- 7.5	+ 20	49	64	0.815

Les paramètres *en italiques* ont une valeur imposée.

1. INTRODUCTION

Après avoir étudié en détail l'influence de l'imposition de contraintes sur les paramètres du modèle global GARDENIA, une analyse de sensibilité a été pratiquée sur le bassin de la Moselle à Hauconcourt, c'est-à-dire le plus grand bassin dont la superficie atteint 9387 km². Le but de cette analyse était de mieux visualiser comment l'ajustement se dégrade quand on s'éloigne du calage optimal et de préciser (dans une certaine mesure) l'inter-action entre les paramètres du modèle. Avant d'entreprendre cette analyse, il est intéressant de consulter le tableau VIII.1 qui résume tous les paramètres obtenus pour ce bassin au cours des différentes simulations. Ce tableau fait apparaître des coefficients d'ajustement pondérés de 0.825 à 0.835, des corrections globales de pluies de -7 à -10 %, des réserves superficielles de 45 à 70 mm, des hauteurs d'équi-ruisellement de 50 à 100 mm.

Pour cette analyse de sensibilité, on a utilisé le coefficient d'ajustement pondéré, car il est apparu que c'était ce coefficient qui était le meilleur indicateur d'un bon ajustement. L'analyse a été réalisée de la manière approchée suivante : on a calculé le coefficient d'ajustement pondéré en faisant varier successivement un paramètre sans réajuster les autres qui restaient fixés à leur valeur optimale.

2. FONCTION PRODUCTION

La fonction production qui règle la quantité de pluie qui sera efficace donc qui ressortira (au bout d'un certain temps) à l'exutoire du bassin dépend de 3 paramètres :

- la correction de pluie CORPLU
- la correction de l'évapotranspiration potentielle CETP
- la capacité de la réserve superficielle RUMAX

Si on laisse libre ces trois paramètres (contrairement aux calages précédents pour lesquels on avait imposé une correction de l'évapotranspiration potentielle de +20 %), on obtient l'optimum (supérieur à 0.840) pour une capacité de réserve superficielle égale à 80 mm.

* *Analyse de la relation entre la correction globale de pluie et d'évapotranspiration potentielle (figures VIII.1 à VIII.3).*

Il apparaît nettement une bande dans laquelle le coefficient d'ajustement est pratiquement aussi bon. Cette bande est différente selon si on fixe la capacité de la réserve superficielle à la valeur optimale à 80 ou 120 mm (+ 50 %) (figure VIII.2) ou à 40 mm (- 50 %) (figure VIII.3).

On voit donc apparaître une nette relation linéaire entre ces 2 paramètres car avec une capacité de réserve superficielle de 80 mm, l'ajustement est pratiquement aussi bon (de 0.83 à 0.845 environ) sur un segment allant de (-36 % de pluie, - 50 % d'ETP) à (- 10 % de pluie, - 0 % d'ETP), soit l'équation (en %) : $CORPLU = 0.52 CETP - 10$.

Ceci n'était pas évident a priori car l'effet d'une augmentation de la pluie n'est en principe pas compensé par une augmentation de l'évapotranspiration potentielle. En effet l'évapotranspiration potentielle n'est forte que pendant une petite partie de l'année (l'été), alors que la pluie est abondante toute l'année et de toute façon plutôt l'hiver que l'été.

Avec une capacité de réserve superficielle de 120 mm, la relation est : $CORPLU = 0.81 CETP - 4$.

Avec une capacité de réserve superficielle de 40 mm, la relation est : $CORPLU = 0.31 CETP - 21$.

Il apparaît nettement que quand la capacité de la réserve superficielle est plus petite (40 mm), une variation d'évapotranspiration potentielle est plus facile à rattraper, car elle a moins d'influence. Avec une grande réserve superficielle, c'est le contraire, car l'évapotranspiration potentielle peut agir plus longtemps, cette réserve s'asséchant plus tard.

C'est justement pour tenir compte de cette relation que nous avons fixé la valeur de la correction d'évapotranspiration potentielle dans toutes les simulations précédentes, de façon à déterminer la correction de pluie de manière plus stable.

* *Analyse de la relation entre la correction globale de pluie et la capacité de la réserve superficielle (figure VIII.4).*

On voit apparaître une certaine relation entre une capacité élevée de la réserve superficielle (donc une forte évapotranspiration réelle) et une augmentation globale de pluie. En fait, cette relation est moins nette qu'entre la correction de pluie et la correction d'évapotranspiration potentielle. On obtient des coefficients d'ajustement qui atteignent

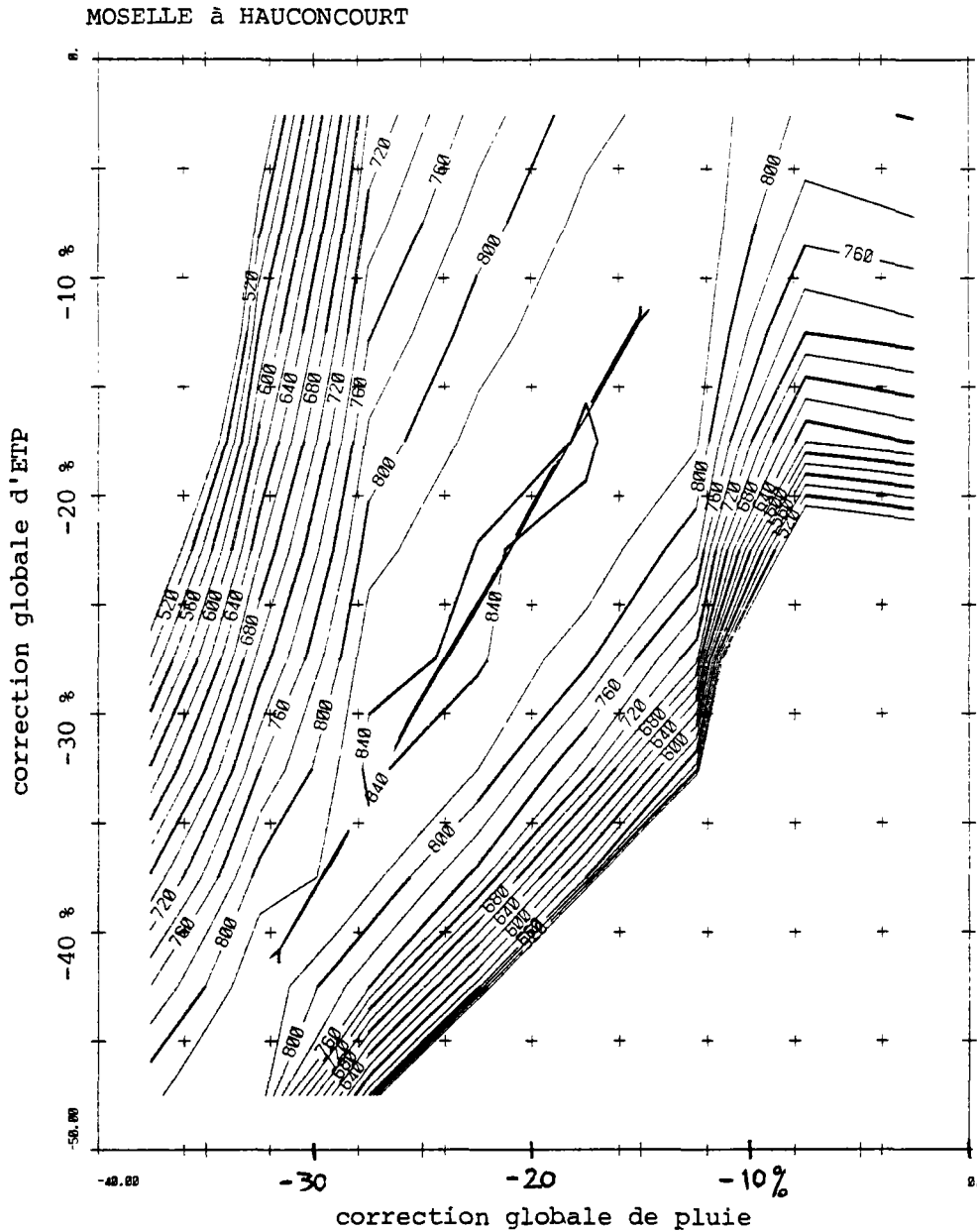


Figure VIII.1 : relation entre la correction de pluie et d'ETP
(réserve superficielle optimale : 80 mm)

Il existe une très large zone dans laquelle le coefficient d'ajustement (pondéré) est de l'ordre de 0.84.

L'ajustement est pratiquement aussi bon sur un segment allant de :
(-36 % de pluie, -50 % d'ETP) à (-10 % de pluie, -0 % d'ETP).

Bien que l'effet d'une correction sur la pluie ou sur l'ETP ne soit pas identique car les périodes de forte ETP ne durent qu'une partie de l'année (en été), une correction de +26 % de pluie est à peu près compensée par une correction de +50 % d'ETP (tout à fait irréaliste d'ailleurs).

Nota : les graduations sur les isocourbes sont les valeurs du coefficient d'ajustement pondéré multipliées par 1000.

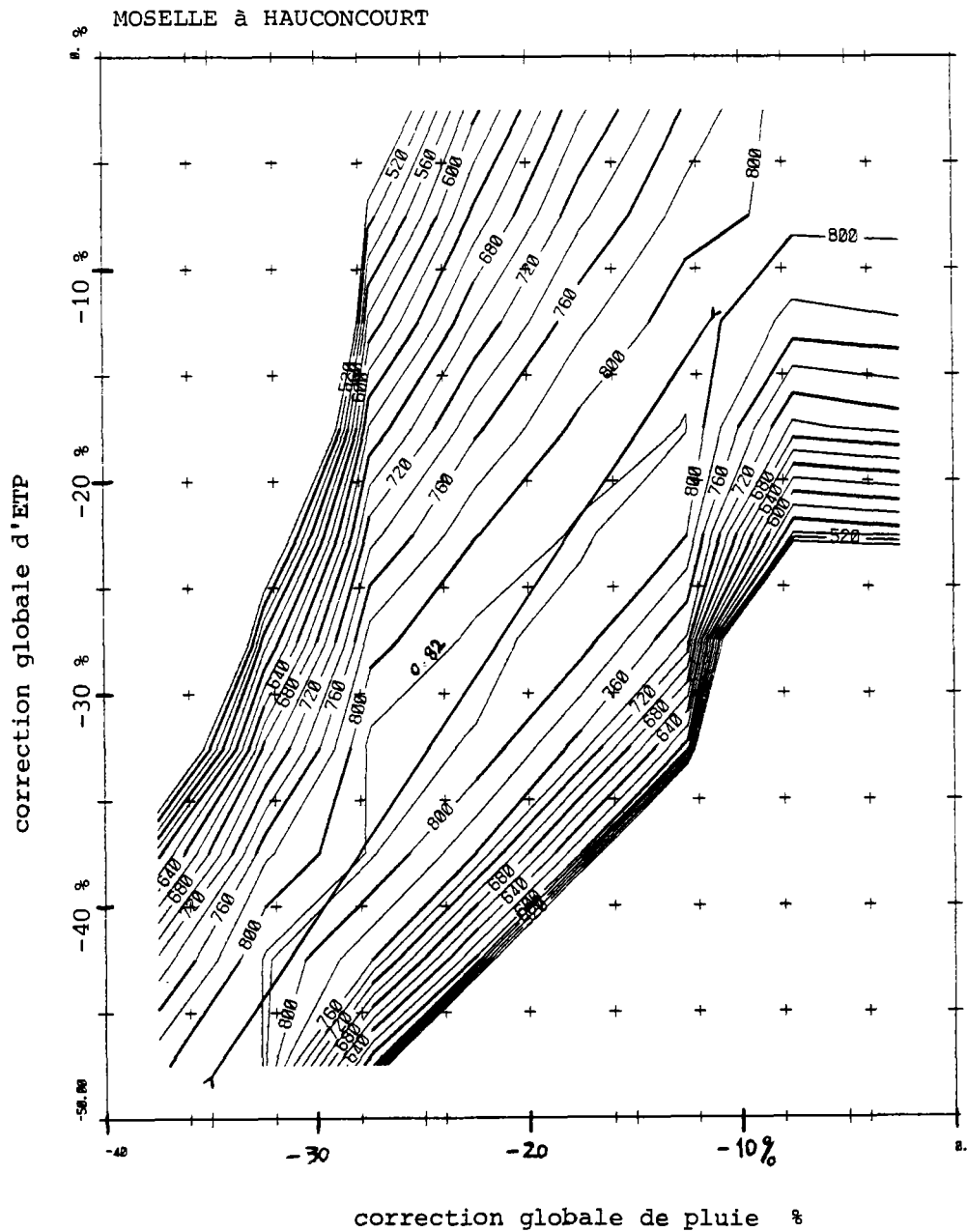


Figure VIII.2 : relation entre la correction de pluie et d'ETP
(réserve superficielle : 120 mm)

En augmentant la réserve superficielle (par rapport à sa valeur optimale de 80 mm) on obtient un ajustement pratiquement aussi bon. Il existe une large zone avec un coefficient d'ajustement de l'ordre de 0.82 qui est à peu près la même qu'avec une réserve superficielle de 80 mm.

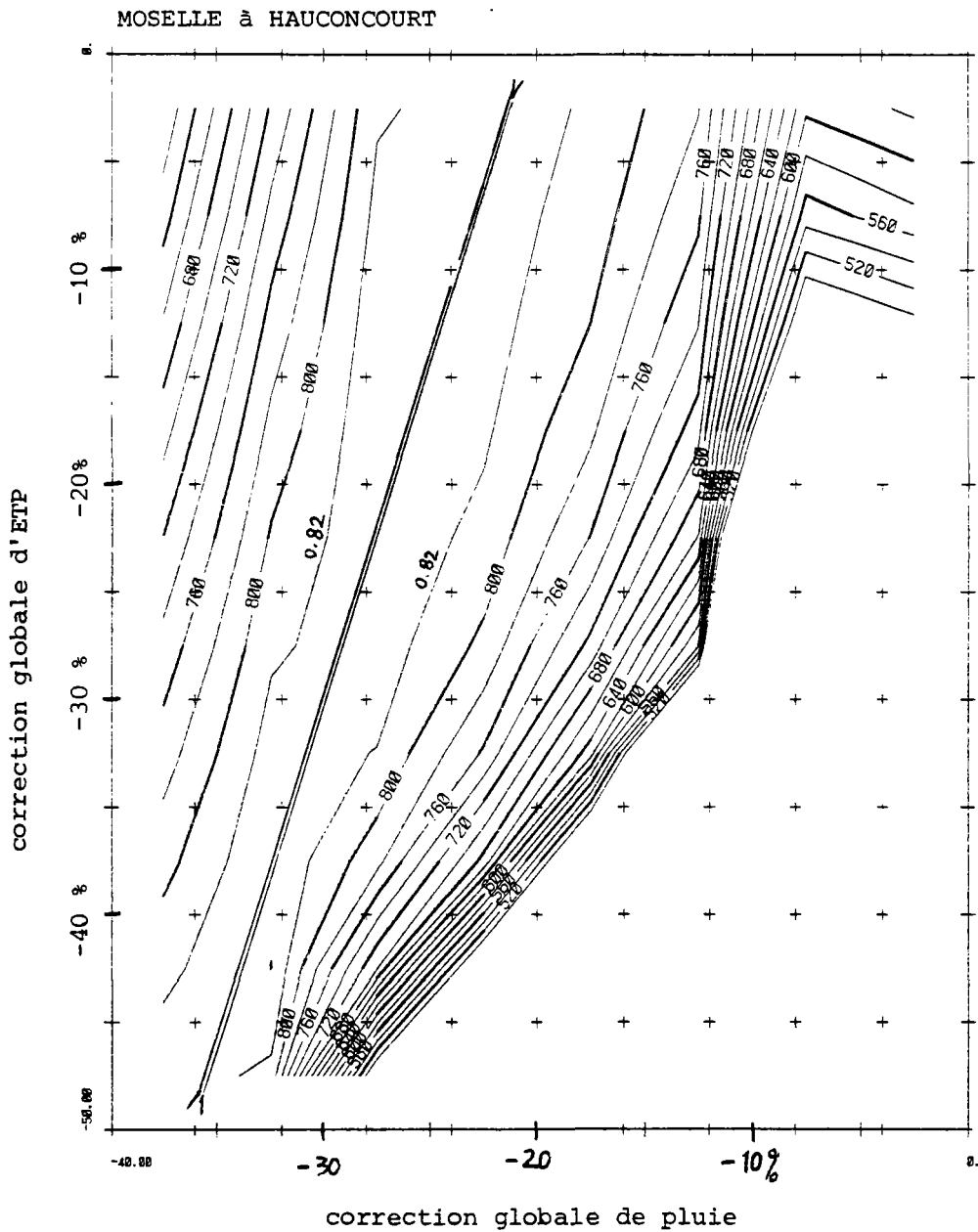


Figure VIII.3 : relation entre la correction globale de pluie et d'ETP (réserve superficielle : 40 mm)

En diminuant la réserve superficielle, on obtient également un ajustement de l'ordre de 0.82 à 0.83 dans une large zone qui s'étend de : (-36 % de pluie, -50 % d'ETP) à (-20 % de pluie, -0 % d'ETP).

Une variation de +16 % de pluie est à peu près compensée par une variation de +50% d'ETP. La réserve superficielle étant plus faible que précédemment, une variation de pluie est plus difficile à rattraper par l'ETP.

MOSELLE à HAUCONCOURT

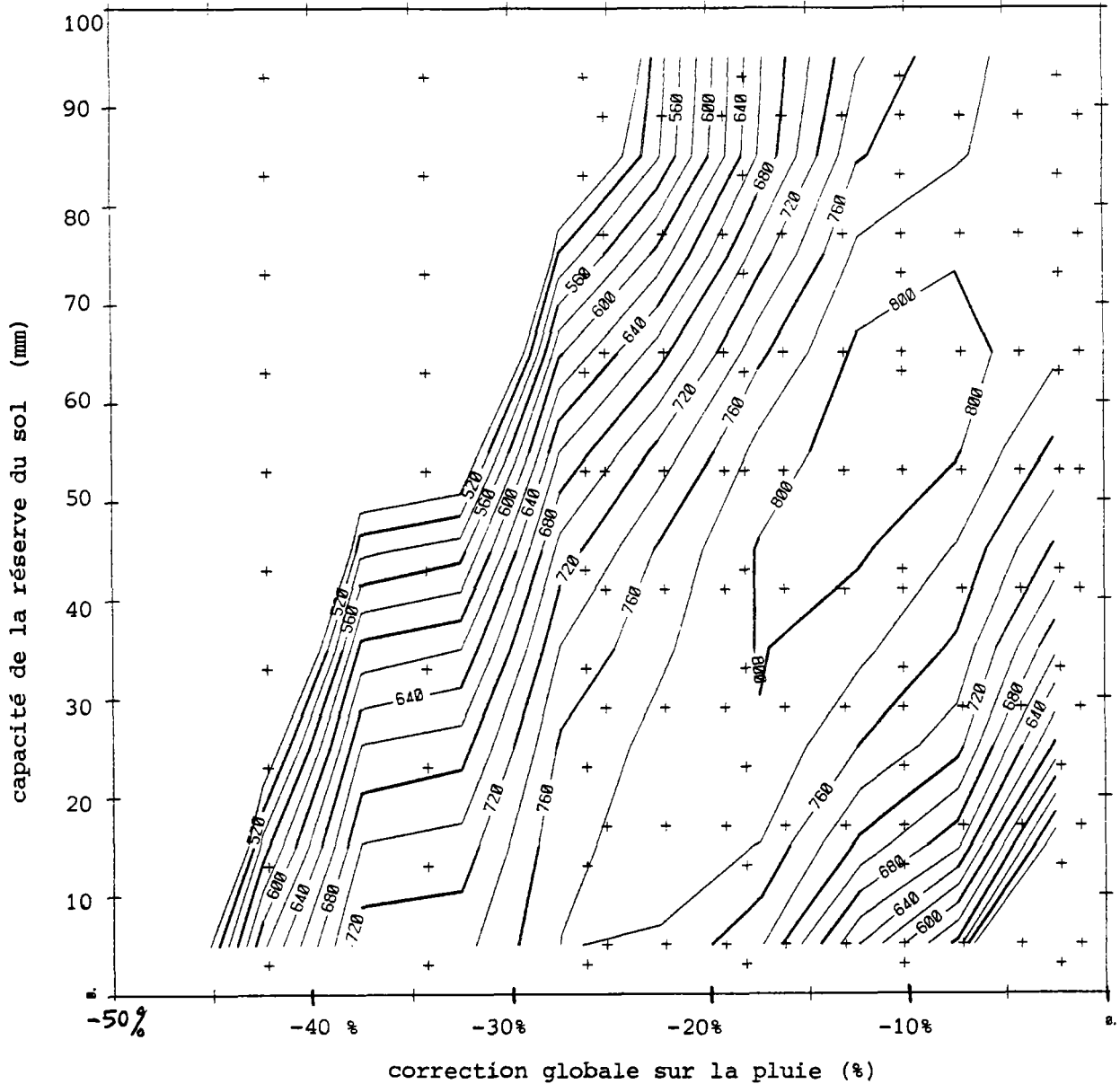


Figure VIII.4 : relation entre la correction globale de pluie et la capacité de la réserve superficielle

Il existe une certaine plage où une correction globale sur la pluie, peut être rattrapée par une augmentation de la capacité de la réserve superficielle du sol. En particulier avec une réserve superficielle de 30 mm et une correction de pluie de -20 %, on arrive à un ajustement qui n'est pas beaucoup moins bon qu'avec une réserve superficielle de 55 mm et une correction de pluie de -10 %.

0.80 avec les valeurs extrêmes suivantes :

30 mm et - 20 % de pluie,

ou 70 mm et - 7 % de pluie.

Les coefficients d'ajustements restant malgré tout assez globaux pour caractériser un ajustement. On a donc dessiné les débits mensuels observés et calculés pour 5 simulations différentes (figures VIII.5 et VIII.6). La meilleure simulation a un coefficient d'ajustement pondéré de 0.88, mais des paramètres iréalistes : - 36 % de pluie et - 52 % d'évapotranspiration potentielle. La plus réaliste a un coefficient d'ajustement pondéré de 0.79 (mais un coefficient de corrélation de 0.92 au lieu de 0.91). Elle ne paraît visuellement pas moins bonne, mais elle fait intervenir que deux paramètres : une capacité de réserve superficielle de 108 mm et une hauteur d'équi-ruissellement de 49 mm. Les différentes simulations résumées dans le tableau VIII.2 montrent que suivant les jeux de paramètres (certains totalement irréalistes), on obtient des lames d'eau corrigées de 517 à 814 mm/an associées à des évapotranspirations réelles (ETR) de 264 à 541 mm/an, mais qui conduisent à des pluies efficaces (PLUI - ETR) quasi-identiques comprises entre 251 et 287 mm/an

En ne laissant libre qu'un seul paramètre de la fonction "production" (correction pluie ou correction ETP ou réserve superficielle), on obtient un coefficient d'ajustement (pondéré) plutôt plus bas, mais des paramètres réalistes (réserve utile 107 mm ou correction pluie - 6% ou correction ETP + 12 %).

En laissant tous les paramètres de production libres, le coefficient d'ajustement est meilleur, mais le coefficient de corrélation est inchangé. Par contre, les paramètres sont irréalistes (-36 % de pluie, et - 50 % d'ETP).

3. FONCTION DE TRANSFERT

* *Relation entre la correction globale de pluie et la hauteur d'équi-ruissellement* (figure VIII.7). Il était intéressant de détecter une éventuelle relation pour voir si une diminution de la pluie, donc une diminution des niveaux dans les réservoirs ne pouvait pas être compensée par une diminution de la hauteur d'équi-ruissellement. En fait, au moins pour ce bassin, il n'en est rien et une variation de production (pluie) ne peut être corrigée par une variation de transfert (équi-ruissellement) comme le montrent les courbes qui sont des ellipses à

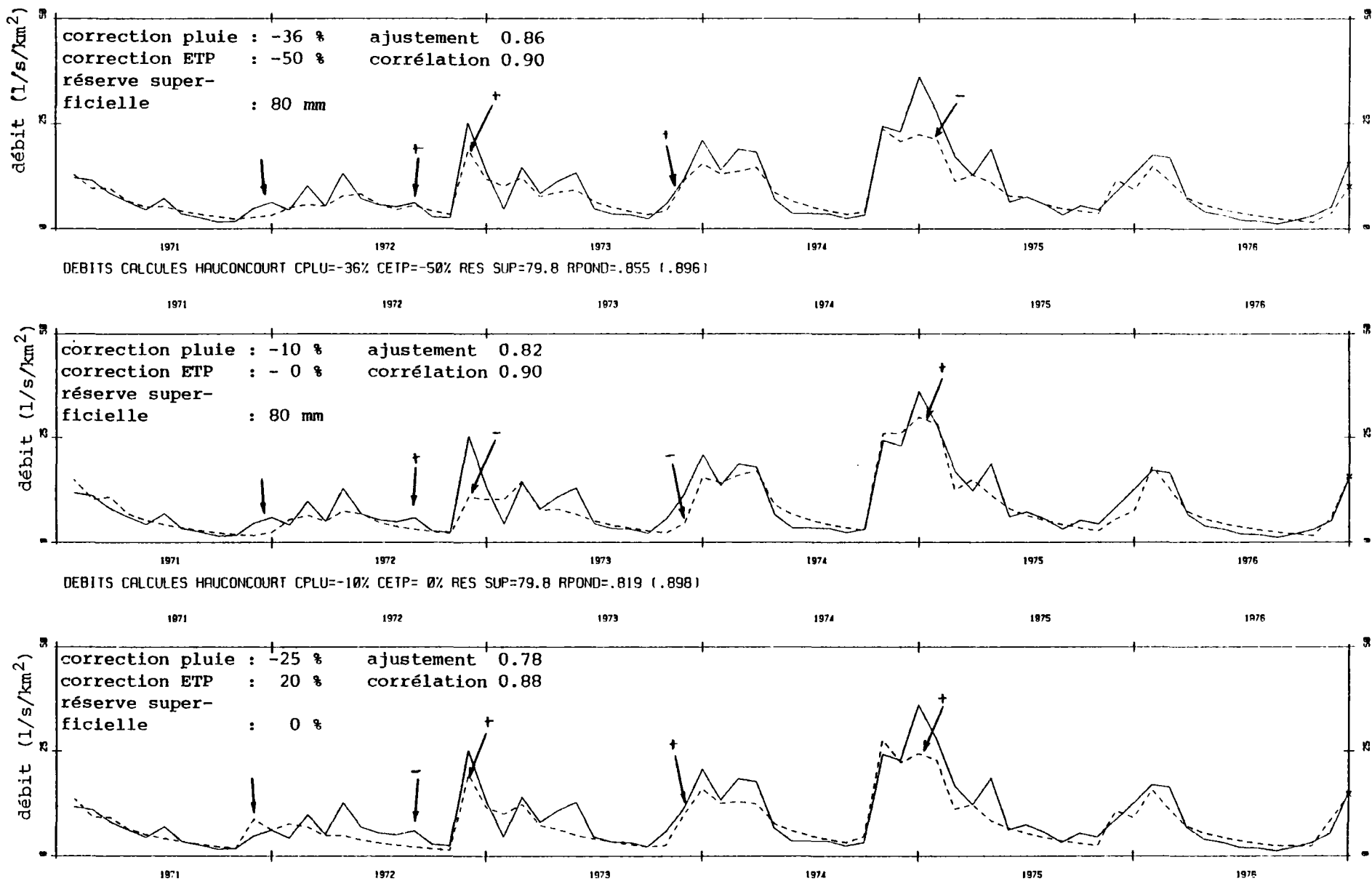


Figure VIII.5 : simulation du débit mensuel à Hauconcourt avec des pluies mensuelles

3 calages très différents donnent des graphiques assez peu différents (bien que les ajustements pondérés s'échelonnent de 0.78 à 0.86). Le meilleur ajustement (le premier) correspond à des paramètres irréalistes.

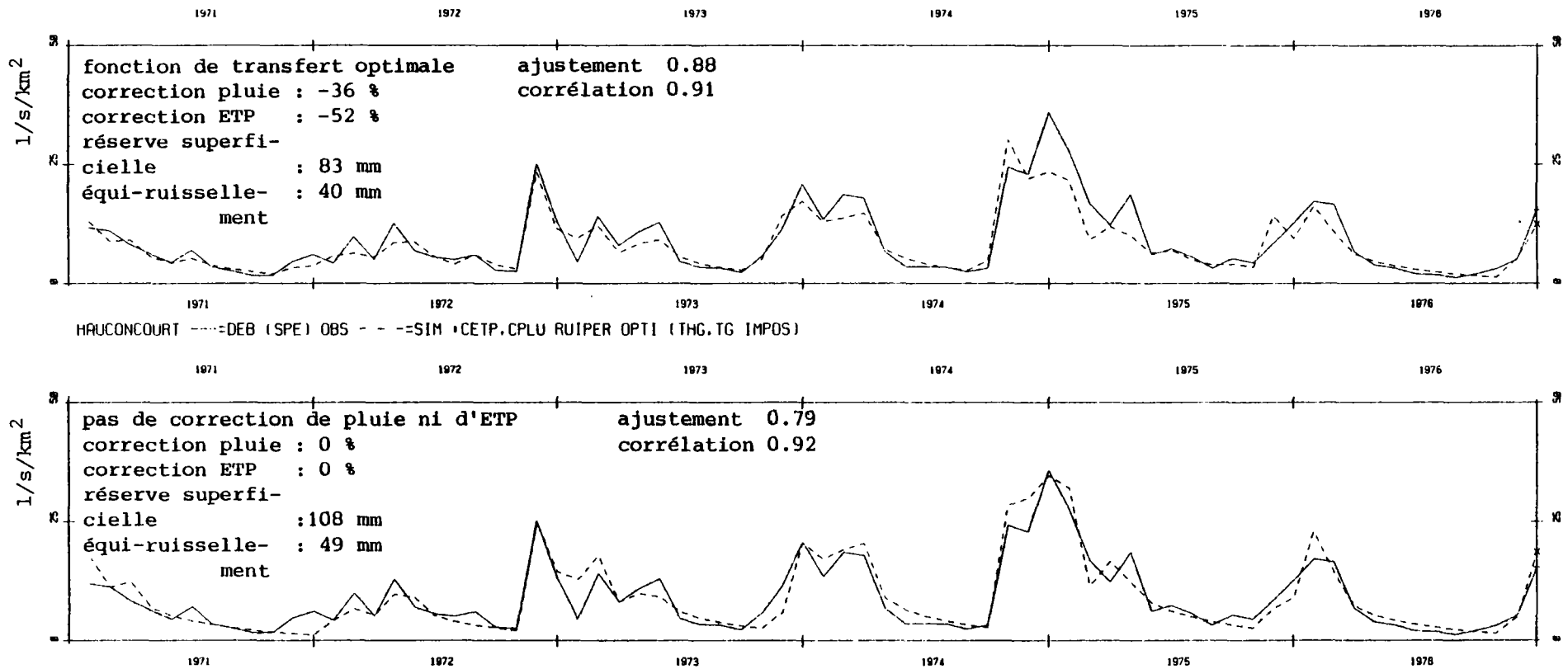


Figure VIII.6 : simulation du débit mensuel à Hauconcourt avec des pluies mensuelles

Une simulation en ajustant uniquement la réserve superficielle donne un coefficient d'ajustement pondéré nettement plus bas (0.79 au lieu de 0.88) avec des coefficients de corrélations semblables. Le graphique de la simulation n'est pas moins bon et les paramètres sont beaucoup plus réalistes.

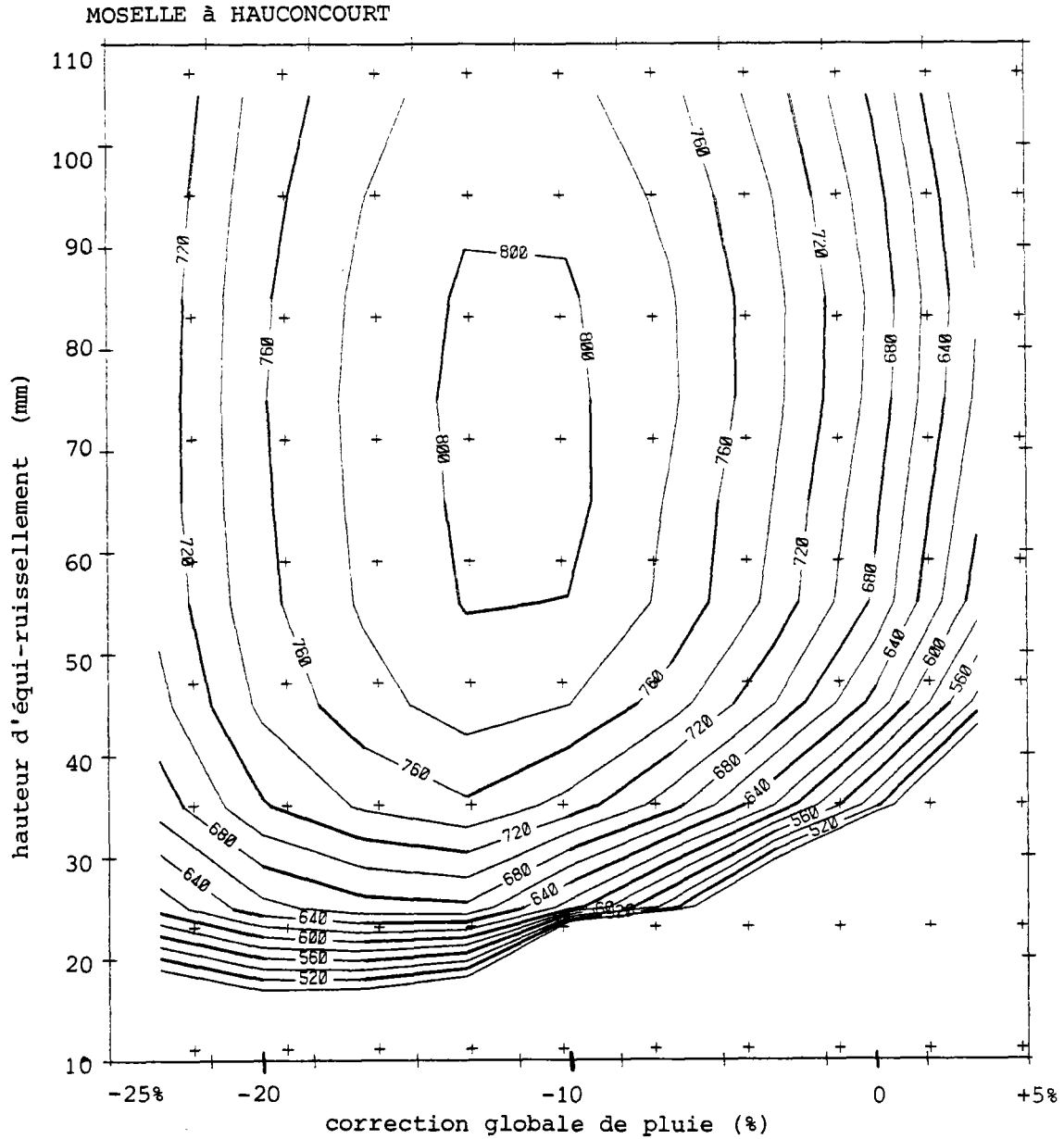


Figure VIII.7 : relation entre la hauteur d'équi-ruisselement et la correction globale de pluie

Il est intéressant et rassurant d'observer qu'une variation de production (correction de pluie) ne peut pratiquement pas être corrigée par une variation de transfert (RUIPER).

Nota : les graduations sur les isocourbes sont les valeurs du coefficient d'ajustement pondéré multipliées par 1000.

axes principaux verticaux et horizontaux. Ceci s'explique par le coefficient d'ajustement qui est extrêmement sensible à un déséquilibre de bilan.

* *Relation entre le temps de demi-percolation THG et le temps de demi-tarissement TG* (figure VIII.8). Il apparait nettement qu'il n'y a qu'un optimum situé pour :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{temps de demi-percolation } 1,5 \text{ mois} \\ \text{temps de demi-tarissement } 5 \text{ mois} \end{array} \right.$$

En particulier, il est important de noter qu'on ne peut pas échanger ces deux constantes de temps comme ce serait le cas s'il n'y avait pas de hauteur d'équi-ruissellement. Il est intéressant également de remarquer que le temps de demi-tarissement peut être augmenté considérablement (jusqu'à plus de 10 mois) sans que l'ajustement ne se dégrade sensiblement. Il est donc assez mal défini. Seule sa borne inférieure qui est d'environ 3 mois est bien définie.

* *Relation entre la hauteur d'équi-ruissellement et le temps de demi-tarissement* (figure VIII.9). La hauteur d'équi-ruissellement est pratiquement indépendante du temps de demi-tarissement, pour ce bassin au moins. En effet, les courbes d'isovaleurs du coefficient d'ajustement sont proches de cercles avec les unités choisies, c'est-à-dire quelles que soient les unités, d'ellipses à axes principaux verticaux et horizontaux. Une diminution du temps d'équi-ruissellement (en dessous de 45 mm), ou une augmentation (au dessus de 80 mm) ne peut pas être compensée par une modification du temps de demi-tarissement (dont l'optimum est ici de 5 mois).

* *Relation entre la hauteur d'équi-ruissellement et le temps de demi-percolation* (figures VIII.10 et VIII.11). Il était important de vérifier les éventuelles relations entre ces deux paramètres du modèle, car le schéma de transfert choisi associe ces deux paramètres dans le même réservoir H :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Débit non linéaire sortant de H : } dH_1 = - H \cdot dt / \text{THG} \\ \text{Percolation sortant de H : } dH_2 = - H^2 dt / (\text{THG} \cdot \text{RUIPER}) \end{array} \right.$$

avec :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{THG} & \text{Constante de temps de percolation} \\ \text{RUIPER} & \text{Hauteur d'équi-ruissellement} \\ \text{H} & \text{Hauteur d'eau dans le réservoir H} \\ \text{dt} & \text{Pas de temps.} \end{array} \right.$$

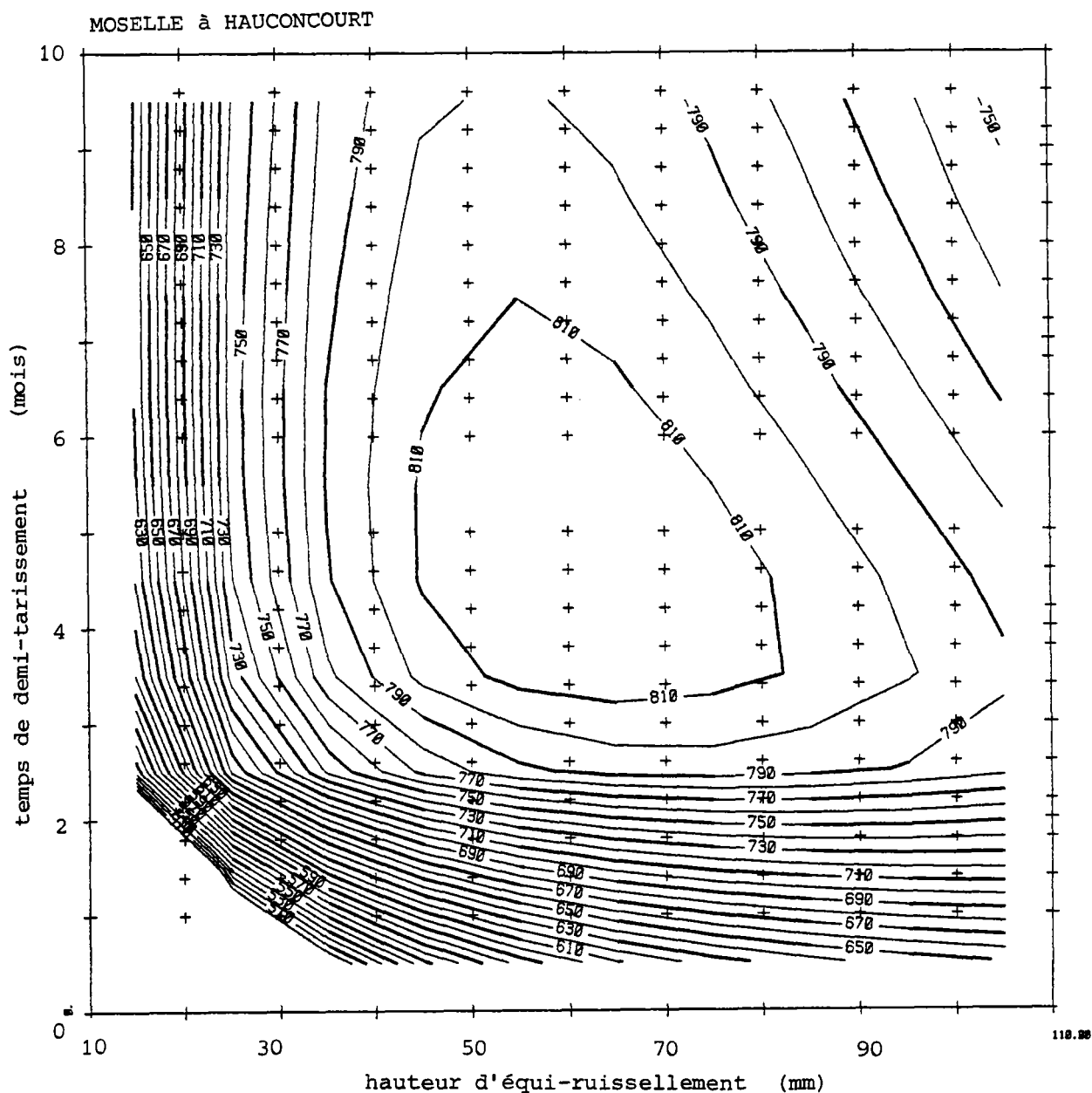


Figure VIII.9 : relation entre la hauteur d'équi-ruissellement et le temps de demi-tarissement

Il apparait nettement que, pour ce bassin au moins, la hauteur d'équi-ruissellement est pratiquement indépendante du temps de demi-tarissement. En effet une diminution de la hauteur d'équi-ruissellement (en-dessous de 45 mm) ou une augmentation (au-dessus de 80 mm) ne peut pas être compensée par une modification du temps de demi-tarissement (dont l'optimum est de 5 mois). (Le temps de demi-percolation était maintenu à sa valeur de référence : 1.5 mois).

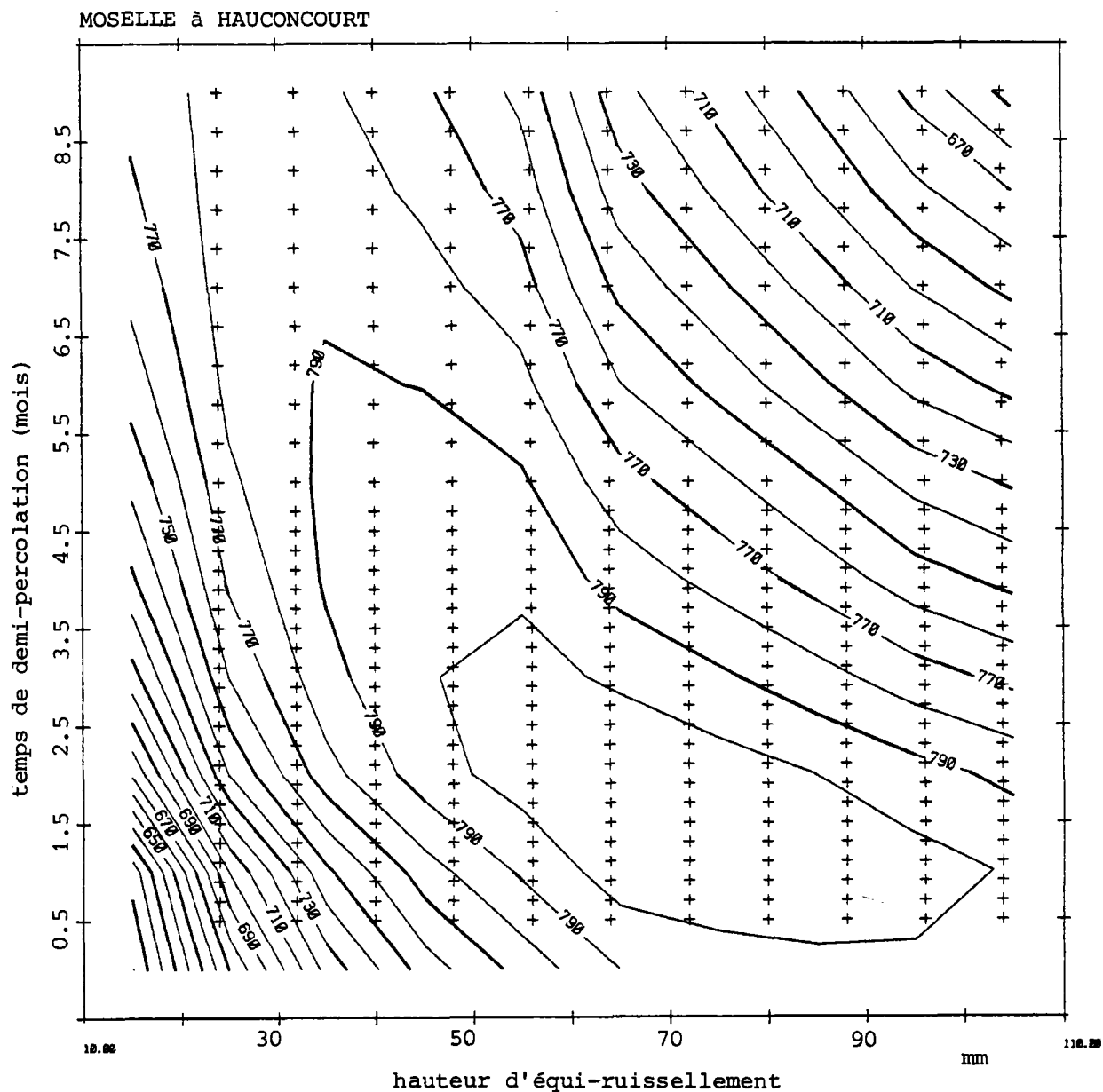


Figure VIII.10 : relation entre la hauteur d'équi-ruisellement et le temps de demi-percolation (demi-tarissement : 3 mois)

La forme des isocourbes montre nettement qu'une certaine compensation se produit et qu'une augmentation du temps de demi-percolation (à 6.5 mois par exemple) peut être compensée par une diminution de la hauteur d'équi-ruisellement (à 30 mm). Dans une plage importante c'est le produit de ces deux paramètres qui joue. L'équation serait $(THG+3.6).RUIPER = 367$. (THG = constante de temps de percolation, RUIPER = hauteur d'équi-ruisellement).

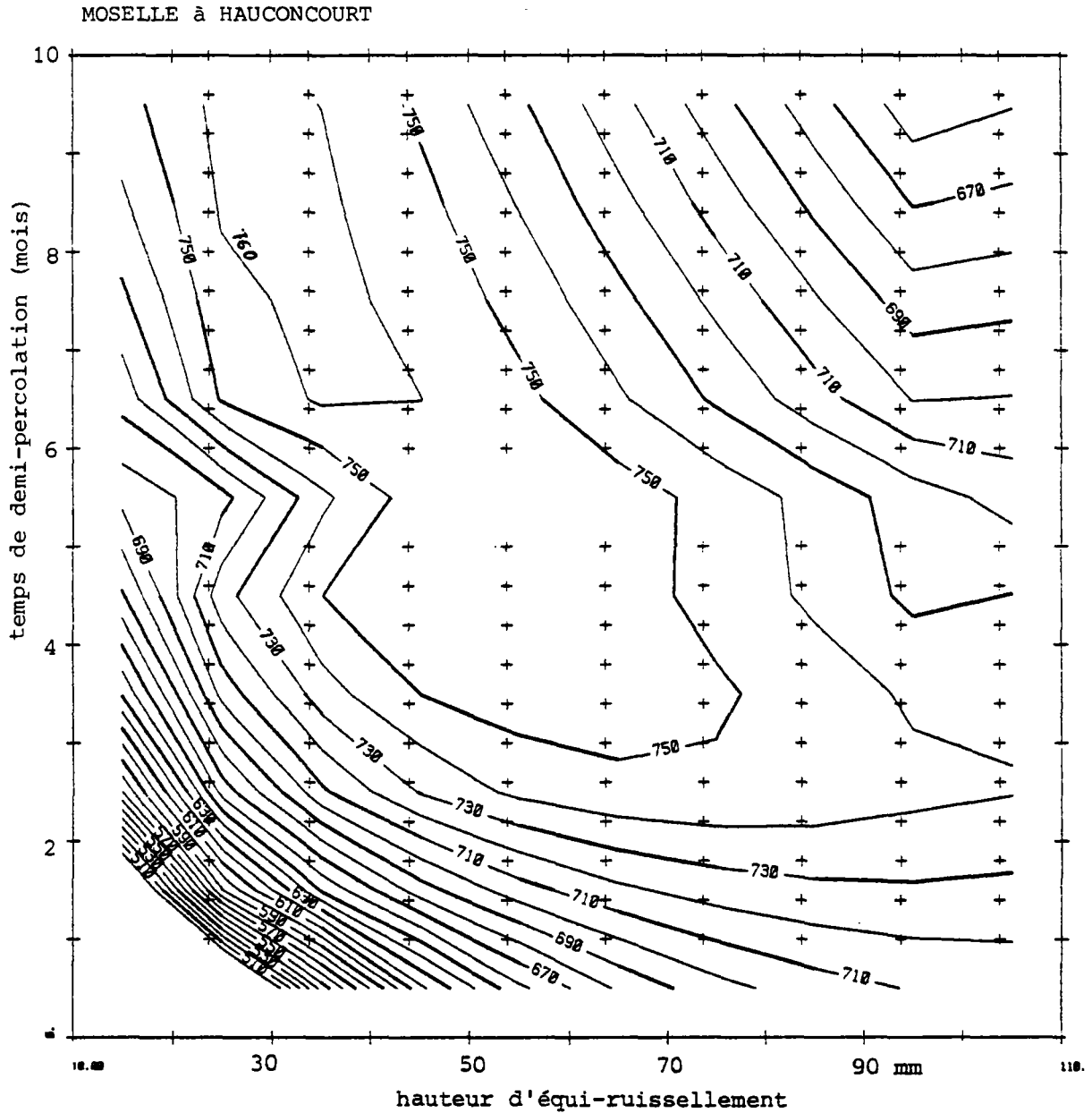


Figure VIII.11 : relation entre la hauteur d'équi-ruissellement et le temps de demi-percolation (temps de demi-tarissement imposé à 1.5 mois)

On note également une certaine compensation mais le calage est moins bon qu'avec un temps de demi-tarissement de 3 mois : le meilleur coefficient d'emmagasinement est de 0.76 au lieu de 0.80).

L'équation décrivant les meilleurs couples est :

$$\text{THG.RUIPER} = 250 \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{THG} = \text{temps de demi-percolation} \\ \text{RUIPER} = \text{hauteur d'équi-ruissellement} \end{array} \right.$$

Deux analyses ont été faites :

- en fixant le temps de demi-tarissement à sa valeur optimale de 3 mois (figure VIII.10),
- en fixant le temps de demi-tarissement à une valeur plus faible de 1,5 mois pour voir si une certaine compensation peut s'établir (figure VIII.11).

La forme des isocourbes montre nettement une certaine compensation entre une augmentation du temps de demi-percolation et une diminution de la hauteur d'équi-ruissellement. C'est le produit de ces deux paramètres qui est bien défini. La meilleure plage est définie par la relation :

$$(THG + 3.6) \cdot RUIPER = 367$$

Si on fixe le temps de demi-tarissement à une valeur trop faible, il n'est pas possible de retrouver un aussi bon ajustement, en augmentant le temps de demi-percolation. Cependant, même en dehors de l'optimum, on trouve une certaine relation de compensation :

$$THG \cdot RUIPER = 250.$$

Les deux paramètres THG et RUIPER sont donc assez liés, ce qui confirme notre choix de fixer le temps de demi-percolation THG et de n'optimiser que la hauteur d'équi-ruissellement RUIPER.

4. CONCLUSION

Cette analyse de sensibilité pratiquée sur le bassin de la Moselle à Hauconcourt fait apparaître les résultats suivants :

- * Il existe une relation très nette entre la correction globale de pluie et celle d'évapotranspiration potentielle. Cette relation est d'autant plus nette qu'on est proche de la valeur optimale et une variation de pluie est d'autant plus facile à rattraper par une variation d'évapotranspiration potentielle que la capacité de la réserve superficielle est grande.
- * Il existe une relation, moins nette, entre la correction globale de pluie et la capacité de la réserve superficielle.

- * Il est possible de simuler à peu près correctement ce bassin en n'ajustant qu'un seul paramètre : la capacité de la réserve superficielle.
- * Les paramètres de la fonction production et ceux de la fonction transfert sont indépendants.
- * Il n'est pas possible d'échanger simplement le temps de demi-percolation et le temps de demi-tarissement, comme ce serait le cas s'il n'y avait pas de composante non linéaire réglée par la hauteur d'équi-ruisselement.
- * On note une certaine compensation entre le temps de demi-percolation et la hauteur d'équi-ruisselement, ce qui conforte notre choix de fixer le demi-temps de percolation et de ne pas l'optimiser.

CHAPITRE 9

RELATIONS ENTRE LES PARAMETRES DU MODELE GARDENIA
ET LES CARACTERISTIQUES PHYSIOGRAPHIQUES
DES BASSINS DE LA MOSELLE

1. INTRODUCTION

L'étude des relations entre les paramètres du modèle et les caractéristiques physiographiques a pour but évident l'analyse des possibilités de transposition du modèle à des bassins versants non jaugés. En effet, si de telles relations peuvent être mises en évidence, connaissant les caractéristiques physiographiques d'un bassin, il sera possible d'en déduire un jeu de paramètres de modèle. On pourrait ainsi, sans calage, c'est-à-dire sans disposer d'une série de débits observés, transformer une (longue) série de pluie (et d'évapotranspiration potentielle) en une (longue) série de débits.

2. LE FICHER PHYSIOGRAPHIQUE

Le fichier physiographique disponible, mis au point par l'ORSTOM et l'Agence de Bassin Rhin-Meuse, a été décrit dans le premier rapport d'avancement (note technique n° 84/31). La zone à étudier a été divisée en 538 mailles de 5 kilomètres de côté, appelées carreaux (soit 13 450 km²).

Chaque carreau est repéré par les coordonnées Lambert (zone I) de son centre. Pour chacun, les paramètres suivants ont été définis à partir des cartes au 1/25 000 :

- * *Altitude moyenne ALTI*. Cette altitude, exprimée en mètres, correspond à la moyenne des altitudes des centres de cinq cercles tracés en quinconce dans le carreau. Chaque cercle a un diamètre de quatre centimètres sur la carte.
- * *Pente PENT*. Il s'agit d'un indice de relief plutôt que de pente. Dans chaque cercle, on trace selon la plus grande pente un diamètre et l'on compte le nombre de courbes de niveau, d'équidistance 10 m, recoupées par ce diamètre. L'indice de pente est la moyenne du nombre maximal de courbes coupées dans les 5 cercles.
- * *Occupation du sol*. Elle est définie par les paramètres suivants exprimés en pourcent de la surface du carreau : feuillus (FEUI), conifères (CONI), prairies (PRAI), cultures (CULT).
- * *Perméabilité - Lithologie*. Cinq classes de perméabilité ont été définies :
 - . zone perméable à aquifère drainé : ce sont surtout les grès et con-

glomérats du permo-trias (notation GRES) ;

- . zone à perméabilité moyenne ou faible : alternance de marnes, argiles, grès ou calcaires du jurassique inférieur et du crétacé inférieur (notation ALTE) ;

- . zone karstique du Jurassique supérieur notamment (notation KARS) ;

- . zone marneuse (notation MARN) ;

- . le socle cristallin et cristallophyllien du primaire des Vosges (notation CRIS).

Deux paramètres d'occupation du sol, obtenus par regroupement d'autres paramètres, ont été ajoutés au fichier ; ce sont :

- . forêt : feuillus + conifères (FORE),

- . champs : prairies + culture (CHAM).

Deux paramètres précisant la différence entre l'altitude moyenne du bassin et l'altitude moyenne des postes pluviométriques attribués ont également été ajoutés :

- . différence d'altitude DIFALT : c'est la différence d'altitude (en mètres) entre l'altitude moyenne du bassin et celle des postes pluviométriques,

- . différence d'altitude DIFLIS : c'est la différence d'altitude (en mètres) entre l'altitude moyenne du bassin et l'altitude LISSEE des postes pluviométriques, c'est-à-dire l'altitude du carreau dans lequel est situé le poste.

Les moyennes et les écarts-types de toutes ces variables sont rassemblés dans le tableau IX.1.

Pour chaque paramètre, on a réalisé des cartes d'isovaleurs avec le logiciel LUCAS du BRGM. Ces cartes sont rassemblées sur les figures A.1 à A.3 placées en annexe (pages 220 à 222).

3. HAUTEUR D'EQUI-RUISSELLEMENT RUIPER

Deux valeurs ont été choisies :

- la valeur du calage de référence : notée RUIREF,
- la valeur du calage sans correction de pluie, ni d'évapotranspiration potentielle : notée RUINAT.

La hauteur d'équi-ruissellement ayant une répartition statistique très asymétrique à cause d'un petit nombre de fortes valeurs, on a utilisé la transformation racine carrée. D'autre part, deux bassins ont été éliminés :

- le bassin n° 6 qui est mal simulé et fait apparaître une valeur très grande égale à 205 mm pour RUINAT et 410 mm pour RUIREF ;

TABIEAU IX.1 - Moyenne et écart-type des paramètres des 538 mailles du bassin de la Moselle française

VARIABLE	ABREVIATION	MOYENNE	ECART-TYPE	UNITE
Altitude	ALTI	347	168	m
Pente	PENT	4.53	3.86	-
Feuillus	FEUI	25.3	19.0	%
Conifères	CONI	10.8	20.6	%
(Friche	FRIC	1.9	3.1	%)
Prairies	PRAI	35.0	14.7	%
Cultures	CULT	21.2	13.3	%
Forêts	FORE	39.4	22.5	%
Champs	CHAM	56.2	22.7	%
Grès	GRES	24.8	32.0	%
Altérations	ALTE	15.4	29.6	%
Karst	KARS	14.2	30.0	%
Marnes	MARN	32.5	36.6	%
Cristallin	CRIS	12.8	31.7	%
Différence d'altitude (*)	DIFALT	65	19	m
Différence d'altitude lissée (*)	DIFLIS	19	51	m

(*) pour 38 bassins modélisés

NUM	SURF	ALTI	FENT	FEUI	CONI	PRAI	CULT	FORE	CHAM	GRES	ALTE	KARS	MARN	CRIS	GRCR	KAAL	RUM	RUIPER	TG1	CFLU	DIFA	DIFAL
1	69	803	15	29	36	27	1	66	28	4	0	0	0	95	99	0	41	67	10	16	206	90
2	153	746	14	26	28	35	2	54	37	0	0	0	0	99	99	0	177	52	9	13	191	73
3	183	819	13	19	34	33	1	55	34	0	0	0	0	99	99	0	31	84	12	10	248	135
4	66	703	10	13	40	34	5	53	39	3	0	0	0	96	99	0	36	108	15	9	167	55
5	621	720	12	18	34	34	3	53	37	3	0	0	0	96	99	0	77	70	11	3	186	67
6*	21	396	3	60	8	21	8	69	30	82	0	0	18	0	99	0	136	204	30	-25	44	2*
7	1219	652	10	22	31	31	8	53	40	22	0	0	1	76	99	0	105	85	15	-18	85	-30
8	369	637	8	16	35	32	12	52	44	29	0	0	0	70	99	0	179	78	18	-16	54	-52
9	144	347	2	35	10	38	13	46	51	77	0	0	23	0	99	0	134	25	15	-19	30	7
10	104	366	3	37	1	38	16	43	54	91	0	0	8	0	99	0	127	41	21	-20	56	32
11	92	309	3	25	2	44	21	33	65	28	0	0	71	0	99	0	110	20	15	-25	37	25
12	1947	531	7	27	20	34	11	50	45	38	0	0	14	47	99	0					76	5
13	1975	527	7	27	20	34	11	49	45	38	0	0	15	46	99	0	174	64	17	-18	58	-20
14	383	346	3	26	0	47	19	31	67	57	4	0	40	0	97	4	88	29	16	-12	40	10
15	142	342	3	21	1	49	19	28	68	10	53	16	22	0	32	69	100	20	12	-5	62	38
16	941	332	3	21	1	50	21	27	70	35	27	2	35	0	70	29	112	22	14	-21	22	-4
17	3340	441	5	27	12	38	15	43	53	34	11	6	22	27	83	17	145	57	18	-14	37	-19
18	169	252	2	30	2	41	19	37	59	6	0	18	76	0	82	18	249	7	11	-21	-14	-12
19	69	917	13	7	58	26	1	65	28	0	0	0	0	99	99	0	132	173	30	-3	342	220
20	369	655	11	5	46	35	5	52	41	3	1	0	0	95	98	1	142	68	19	-16	150	50
21	151	531	11	3	64	24	5	67	29	27	22	0	10	41	78	22	21	169	26	19	195	115
22	727	567	10	6	49	32	6	56	38	21	14	0	2	63	86	14					88	-17
23	2288	408	6	21	30	33	10	53	44	49	7	0	23	21	93	7	129	51	20	-11	55	0
24	116	520	15	10	78	9	1	88	10	71	27	0	2	0	73	27	35	192	30	3	189	125
25	559	314	4	27	16	38	14	46	52	60	1	0	39	0	99	1	135	31	20	-18	28	-15
26	98	444	9	9	64	18	6	74	25	77	1	0	1	21	99	1	83	144	30	-10	52	-12
27	478	356	5	27	24	34	11	52	46	67	0	0	27	5	99	0					41	8
28	495	353	4	27	23	35	12	52	46	66	0	0	29	5	99	0	163	40	20	-17	38	5
29	72	259	2	25	4	47	19	30	66	19	0	0	80	0	99	0	82	36	22	-25	-3	-16
30	21	273	3	10	0	49	25	23	74	32	1	0	67	0	99	1	131	28	19	-25	40	25
31	2914	375	6	21	24	35	13	48	49	43	10	0	30	16	89	10	111	57	21	-8	46	-3
32	85	256	4	22	1	39	26	32	65	10	68	3	20	0	30	71	111	21	16	-13	21	13
33	6829	399	5	25	16	36	15	45	51	36	11	5	27	20	83	16					53	4
34	229	266	2	36	4	24	31	42	55	2	0	60	38	0	40	60	256	19	19	-25	15	1
35	372	263	3	32	2	32	27	37	59	0	0	41	59	0	59	41	119	32	23	-22	32	20
36	371	236	2	19	1	47	26	23	72	4	1	0	94	0	98	1	204	40	26	-25	1	-8
37	143	251	3	16	1	44	32	22	76	17	4	0	80	0	97	4	69	57	30	-17	22	14
38	923	241	3	18	1	45	29	23	74	12	25	0	63	0	75	25	103	34	24	-23	16	5
39	1269	234	2	17	1	44	32	21	76	14	40	0	46	0	60	40	110	27	21	-22	14	5
40	9387	357	5	24	12	36	19	40	56	30	16	9	30	15	75	25	107	48	20	-10	34	-9
41	412	230	2	26	2	45	21	30	66	0	0	25	75	0	75	25					-21	-32
42	377	242	2	22	1	45	24	27	70	0	0	24	75	0	75	24	127	31	21	-21	11	-4
43*	76	273	3	19	1	39	36	22	75	0	0	92	7	0	7	92	36	349	30	25	-25	13*
44	1226	246	2	24	1	41	28	28	69	0	0	47	52	0	52	47	141	47	26	-25	-38	-30
45	110	236	5	44	2	23	25	49	47	25	20	0	55	0	80	20	144	74	30	-25	-32	-3

Tableau IX.2 : fichier physiographique des 45 bassins de la Moselle

- le 38ème bassin (n° 43 : Woigot à Briey) qui a un comportement très particulier et une hauteur d'équi-ruissellement de 349 mm pour RUINAT et 243 mm pour RUIREF.

Il reste donc 38 observations ayant les caractéristiques suivantes :

	Moyenne	Ecart-type	Asymétrie
$\sqrt{\text{RUINAT}}$	7.25	2.56	0.9
$\sqrt{\text{RUIREF}}$	8.20	2.80	1.0

soit en variable naturelle les valeurs suivantes :

	RUINAT	RUIREF
Médiane	53 mm	67 mm
Intervalle contenant 80 % des valeurs	5.0 à 151 mm	7.3 à 187 mm

Les deux valeurs RUINAT et RUIREF sont très liées. La relation linéaire est :

$$\sqrt{\text{RUIREF}} = 1.049 \sqrt{\text{RUINAT}} + 0.59$$

avec un coefficient de corrélation sans biais de 0.974.

Variables explicatives potentielles.

* Variables morphologiques. Les coefficients de corrélation sont :

	$\sqrt{\text{RUINAT}}$	$\sqrt{\text{RUIREF}}$
$\sqrt{\text{ALTI}}$	0.66	0.64
PENT	0.78	0.72
log SURF	-0.13	-0.09

* Variables lithologiques.

	$\sqrt{\text{RUINAT}}$	$\sqrt{\text{RUIREF}}$
CRIS	0.54	0.50
MARN	-0.59	-0.58

* Variables d'occupation des sols.

	$\sqrt{\text{RUINAT}}$	$\sqrt{\text{RUIREF}}$
FEUI	-0.56	-0.51
CONI	0.89	0.87
FORE	0.80	0.80
CHAM	-0.80	-0.79

Entre ces variables, on note les coefficients de corrélation suivants :

$$(\sqrt{\text{ALTI}}, \text{CONI}) = 0.75$$

$$(\sqrt{\text{ALTI}}, \text{CULT}) = -0.90$$

$$(\sqrt{\text{ALTI}}, \text{FORE}) = 0.72$$

$$(\sqrt{\text{ALTI}}, \text{CHAM}) = -0.79$$

$$(\sqrt{\text{ALTI}}, \text{CRIS}) = -0.94$$

$$(\text{FORE}, \text{CONI}) = 0.91 \text{ (il est évident que } \text{FORE} = \text{CONI} + \text{FEUI})$$

$$(\text{PENT}, \text{CONI}) = 0.86$$

$$(\text{PENT}, \sqrt{\text{ALTI}}) = 0.91$$

(voir figure A.I)

Equations de régression (figure IX.1).

$$\sqrt{\text{RUINAT}} = 0.1067 \cdot \text{CONI} + 5.227$$

$$\sqrt{\text{RUIREF}} = 0.1128 \cdot \text{CONI} + 6.057$$

38 observations	$\sqrt{\text{RUINAT}}$	$\sqrt{\text{RUIREF}}$
R multiple sans biais	0.89	0.87
t Student	11.7	10.8 (*)

(*) donc très significatif

D'autres régressions ont été tentées en ajoutant une deuxième variable explicative. Il est apparu qu'aucune des variables : ALTI, MARN ou CRIS n'était significative en présence de la variable CONI. Ces équations donnaient les valeurs suivantes pour les t de Student dont la valeur absolue, rappelons-le, doit être supérieure à 2 pour qu'une variable ait un effet significatif sur la régression :

	Variable	CONI, $\sqrt{\text{ALTI}}$		CONI, MARN		CONI, CRIS	
RUINAT	t Student	7.8	-0.2	8.8	0.9	9.2	-0.1
RUIREF	t Student	7.3	-0.4	8.1	0.9	8.8	-0.5

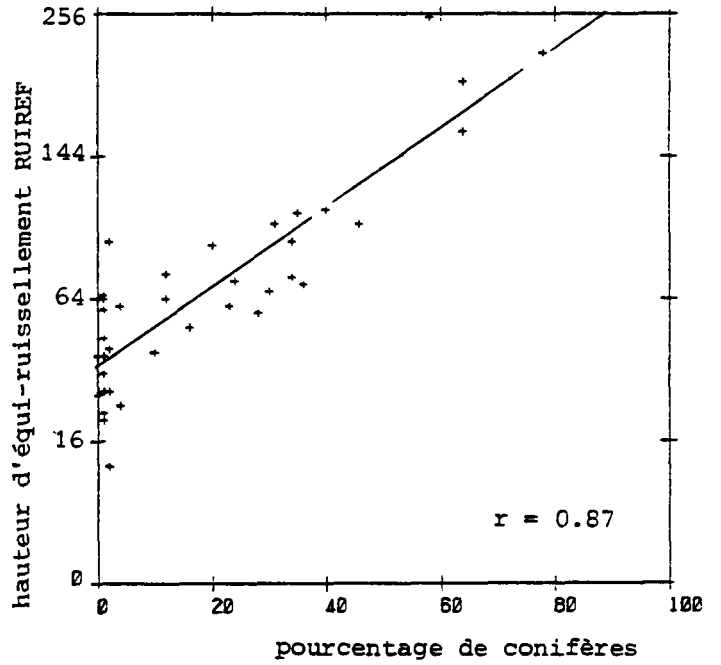
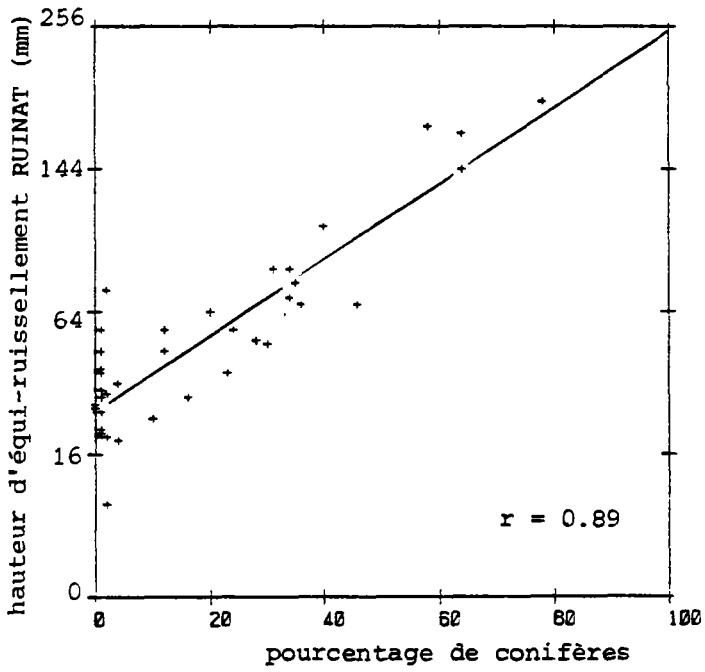
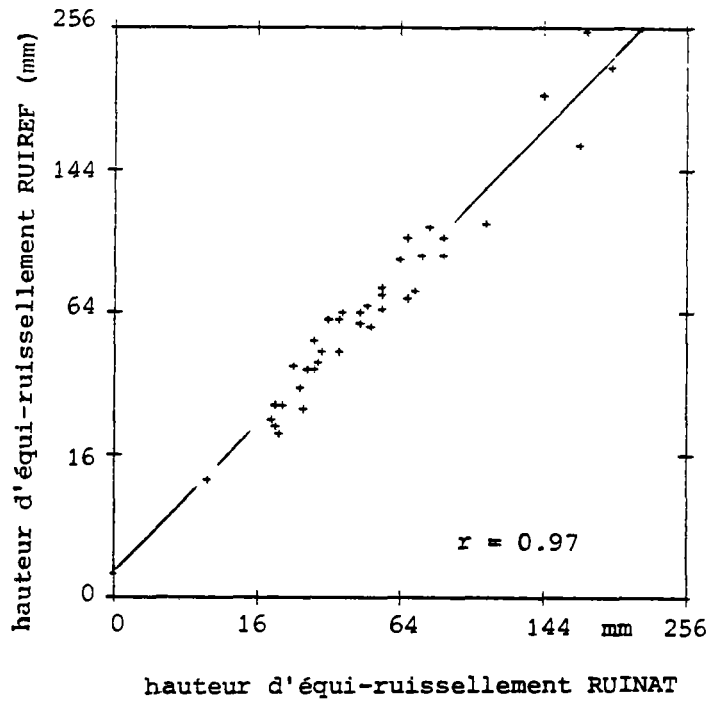


Figure IX.1 : relation entre paramètres physiographiques et paramètres de modélisation

Une autre régression avec 2 variables significatives est la suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{RUINAT} = 0.300 \sqrt{\text{ALTI}} - 0.1045 \text{ FEUI} + 3.49 \quad R = 0.72 \\ r \quad \quad \quad 0.66 \quad \quad \quad -0.56 \\ r \text{ partiel} \quad \quad 0.57 \quad \quad \quad -0.42 \\ t \text{ Student} \quad \quad 4.3 \quad \quad \quad -3.0 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{RUIREF} = 0.318 \sqrt{\text{ALTI}} - 0.0986 \text{ FEUI} + 3.94 \quad R = 0.70 \\ r \quad \quad \quad 0.64 \quad \quad \quad -0.51 \\ r \text{ partiel} \quad \quad 0.54 \quad \quad \quad -0.35 \\ t \text{ Student} \quad \quad 4.0 \quad \quad \quad -2.4 \end{array} \right.$$

Donc dans les deux cas, les deux variables sont significatives, mais ont des résultats moins bons qu'avec le pourcentage des conifères.

4. CORRECTION GLOBALE DE PLUIE

La correction globale de pluie analysée CORPLU est celle obtenue lors du calage de référence. Cette variable a les caractéristiques suivantes pour les 38 bassins précédents :

	Moyenne	Ecart-type	Asymétrie
CORPLU	-12,6 %	12,5 %	1.1

Les variables explicatives potentielles sont :

- * des variables morphologiques :
 - . (CORPLU, DIFALT) = 0.82
 - . (CORPLU, DIFLIS) = 0.70
- * des variables d'occupation des sols qui pourraient prendre en compte une évapotranspiration réelle dépendant de la végétation :
 - . (CORPLU, FEUI) = -0.38
 - . (CORPLU, CONI) = 0.68
 - . (CORPLU, FORE) = 0.65
- * des variables lithologiques (pour la même raison) :
 - . (CORPLU, GRES) = 0.13
 - . (CORPLU, CRIS) = 0.68

Les équations de régression (figure IX.2) sont :

$$\text{CORPLU} = 0.121 \cdot \text{DIFALT} - 21.1 \%$$

38 observations

$$R \text{ multiple sans biais} = 0.81$$

$$t \text{ Student} = 8.4$$

D'autres équations moins intéressantes faisant intervenir les altitudes lissées seraient :

$$* \text{ CORPLU} = 0.085 \text{ DIFLIS} + 0.103 \text{ CRIS} + 0.165 \text{ CONI}$$

$$r \quad \quad \quad 0.69 \quad \quad \quad 0.67 \quad \quad \quad 0.68$$

$$r \text{ partiel} \quad 0.44 \quad \quad \quad 0.38 \quad \quad \quad 0.33$$

$$t \text{ Student} \quad 2.9 \quad \quad \quad 2.4 \quad \quad \quad 2.0$$

$$R \text{ multiple sans biais} = 0.81$$

ou encore :

$$* \text{ CORPLU} = 0.089 \text{ DIFLIS} + 0.108 \text{ CRIS} + 0.220 \text{ FORE}$$

$$r \quad \quad \quad 0.69 \quad \quad \quad 0.67 \quad \quad \quad 0.65$$

$$r \text{ partiel} \quad 0.47 \quad \quad \quad 0.41 \quad \quad \quad 0.35$$

$$t \text{ Student} \quad 3.1 \quad \quad \quad 2.6 \quad \quad \quad 2.2$$

$$R \text{ multiple sans biais} = 0.81$$

En fait, seule la première équation avec une seule variable explicative est fiable. La correction de pluie à introduire dans le modèle est donc bien prévue par la différence entre l'altitude moyenne du bassin et l'altitude moyenne pondérée des postes pluviométriques.

Toutes choses étant égales par ailleurs, une augmentation de 100 mètres de la différence d'altitude entraîne une augmentation de 12 % de la pluie à introduire dans le modèle. Quand la différence d'altitude est nulle, la correction est de -21 %.

Il convient de remarquer que cette formulation ne correspond pas à un "gradient pluviométrique", car pour les bassins élevés, la pluie de 1200 mm est augmentée de 140 mm pour 100 m de différence, alors que pour les bassins peu élevés la pluie de 500 m est augmentée de 60 mm pour 100 mètres de différence d'altitude.

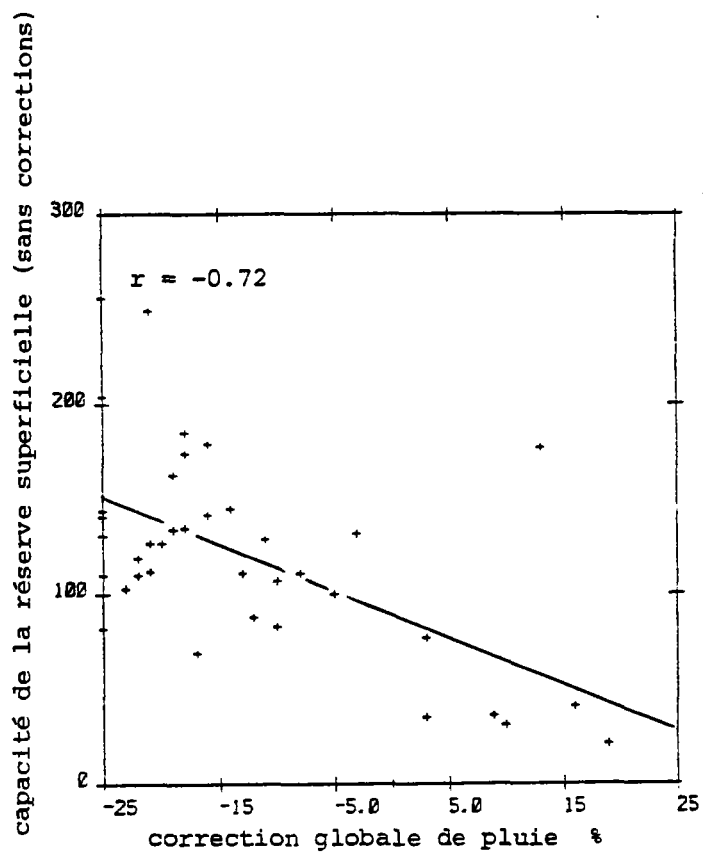
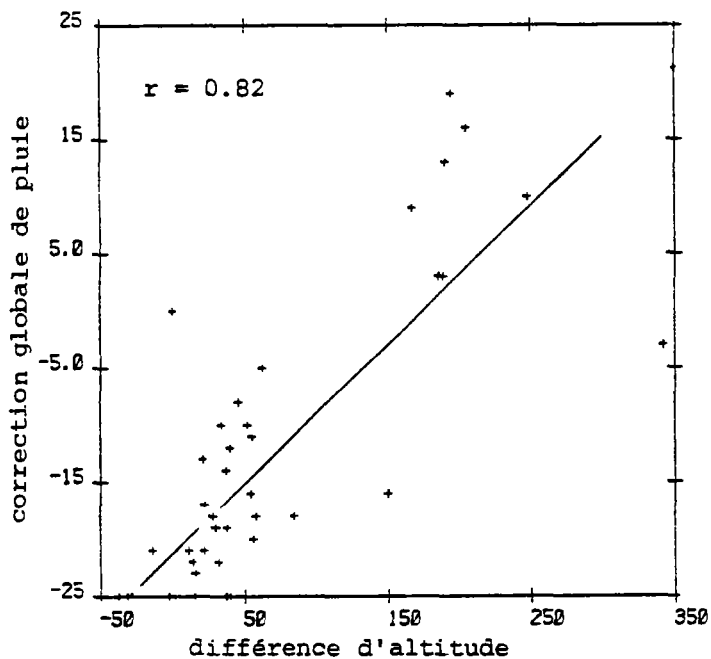
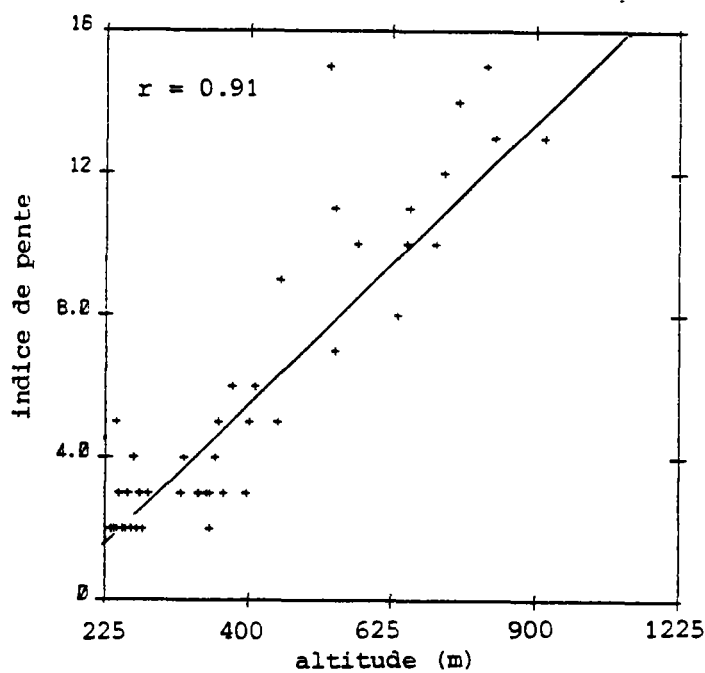
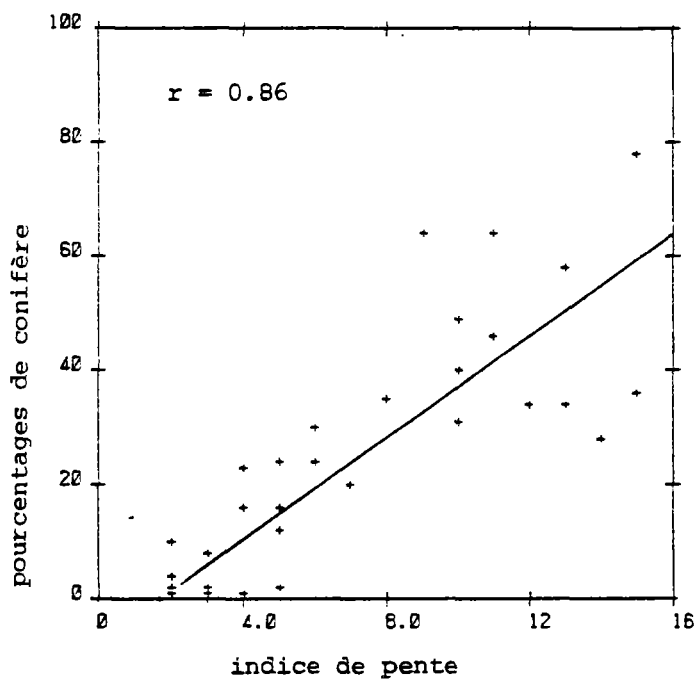


Figure IX.2 : relation entre paramètres physiographiques et paramètres de modélisation

5. CAPACITE DE LA RESERVE SUPERFICIELLE

Deux valeurs ont été choisies successivement :

- * la valeur obtenue lors du calage de référence, notée RUREF,
- * la valeur obtenue en n'imposant pas de correction de pluie, ni de correction d'évapotranspiration potentielle : il n'y a alors qu'un seul paramètre pour régler la fonction production. Cette valeur de la capacité de la réserve superficielle a été notée RUMAX.

Nombre d'observations : Le bassin n° 2 ayant une valeur très exceptionnelle pour RUREF, a été éliminé. Il reste donc 37 observations pour RUREF et 38 observations pour RUMAX.

La relation entre les deux estimations, RUREF et RUMAX, de la capacité de la réserve superficielle est décrite comme suit :

	RUREF	RUMAX
Moyenne (mm)	46	122
Ecart-type (mm)	22	53
Coefficient d'asymétrie (-)	0.5	0.3

Entre ces deux variables, on obtient le coefficient de corrélation r suivant :

$$r (RUREF, RUMAX) = 0.08$$

On note donc aucune relation entre ces deux estimations.

Les variables explicatives potentielles sont :

- * des variables d'occupation du sol qui pourraient avoir une importance par la profondeur d'enracinement et les besoins particuliers des plantes ; on note les coefficients de corrélation suivants :

	RUREF	RUMAX
FEUI	-0.15	0.42
CONI	-0.22	-0.38
FORE	0.21	-0.26
PRAI	0.05	0.14
CULT	0.12	0.32
CHAM	0.10	0.26

En conclusion, pour RUREF : pas de relation ; pour RUMAX : légère relation avec feuillus et cultures (en basse altitude) opposés à conifères (en haute altitude).

* des variables lithologiques

	RUREF	RUMAX
ALTER	0.21	-0.28
KARST	0.39	0.37
GRES	-0.37	-0.09
CRIST	-0.16	-0.18

En conclusion, pas de relations.

* des variables de pentes ou d'altitude qui pourraient corriger une évapotranspiration potentielle mal estimée, et dans une certaine mesure prendre en compte des pluies mal estimées :

	RUREF	RUMAX
$\sqrt{\text{ALTI}}$	-0.17	-0.27
PENT	-0.12	-0.39
DIFALT	0.09	-0.43
DIFLIS	0.02	-0.48

En conclusion :

- . pas de relation pour RUREF,
- . pour RUMAX, quand les postes pluviométriques sont trop bas (DIFLIS positif), la lame d'eau qui est sous-estimée est en partie compensée par une diminution de la capacité.

Pour les équations de régression, les relations obtenues dans les deux cas sont très lâches :

$$* \text{RUREF} = -0.389 \text{GRES} - 0.182 \text{CRIST} + 61$$

$$r \quad \quad \quad -0.37 \quad \quad -0.16$$

$$r \text{ partiel} \quad -0.45 \quad \quad -0.31$$

$$t \text{ Student} \quad -2.9 \quad \quad -1.9$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 37 \text{ observations} \\ R \text{ multiple sans biais} = 0.47 \end{array} \right.$$

* RUMAX = -0.367 DIFLIS + 1.60 FEUI + 95

r	-0.48	0.42
r partiel	-0.37	0.28
t Student	-2.4	1.7 (tout juste significatif)

{ 38 observations
R multiple sans biais = 0.54

Les deux relations sont assez lâches. La deuxième relation fait intervenir la différence d'altitude entre le bassin et les postes pluviométriques. En effet, le paramètre RUMAX est obtenu en n'imposant aucune correction de pluie. Il est évident que quand les postes pluviométriques sont trop bas, la lame d'eau est sous-estimée (la relation obtenue pour la correction de pluie CORPL au paragraphe 4 le montre bien). Une réduction de la capacité de la réserve superficielle RUMAX permet de limiter l'évapotranspiration réelle ETR, et donc dans une certaine mesure de rétablir un peu l'équilibre du bilan. Toutes choses étant égales par ailleurs, cette capacité RUMAX serait un peu plus forte dans les bassins couverts de forêts de feuillus.

Conclusion. La capacité de la réserve superficielle ne peut pas être déterminée par régression à partir des paramètres physiographiques du bassin. Ce paramètre est en effet très global et intègre peut-être plusieurs effets dont une mauvaise détermination de la lame d'eau. Une analyse des relations avec la capacité (RUMAX) obtenue en n'imposant aucune correction de pluie, ni d'évapotranspiration potentielle (donc a priori plus stable... mais intégrant plusieurs phénomènes) n'a pas donné de meilleurs résultats. On note les coefficients de corrélations suivants avec les corrections globales de pluies :

* r (RUREF, CORPLU) = 0.18

Les deux paramètres sont indépendants.

* r (RUMAX, CORPLU) = -0.723

Il y a une relation assez nette. Pour diminuer la pluie efficace, donc l'écoulement, on peut :

- . soit diminuer CORPLU sans changer la réserve utile RUMAX,
- . soit augmenter RUMAX sans effectuer de correction de pluie.

Les deux actions se compensent dans une certaine mesure, c'est ce qu'a fait apparaître les comparaisons des ajustements dans ces deux cas.

6. TEMPS DE DEMI-TARISSEMENT

Dans la simulation de référence, Les temps de demi-percolation THG et de demi-tarissement TG étaient imposés (respectivement à 1,5 et 3,0 mois). Cependant une simulation a été réalisée avec un schéma bi-linéaire avec un temps de demi-percolation de 1,5 mois, un temps de demi-tarissement lent égal à 3 mois, pas d'écoulement rapide non linéaire, mais un tarissement rapide linéaire contrôlé par le temps de demi-tarissement TG1.

* Variables explicatives potentielles.

. Occupation du sol. Les coefficients de corrélation sont les suivants :

- (TG1, FEUI) = -0.25
- (TG1, CONI) = 0.19
- (TG1, FORE) = 0.10

. Lithologie du bassin :

- (TG1, GRES) = 0.21
- (TG1, MARN) = 0.26
- (TG1, CRIS) = -0.36

* Equation de régression.

L'équation de régression obtenue s'écrit (en mois) :

	TG1 = -0.0282 FEUI - 0.0078 CRIS + 2.8		
moyenne	1.9	22 %	27 %
écart-type	0.6	9 %	38 %
asymétrie	0.3	0.0	1.1
r		-0.25	-0.35
r partiel		-0.43	-0.48
t Student		-2.8	-3.3

R multiple sans biais = 0.49

Les tarissements SERAIENT légèrement plus rapides sur les formations cristallines (et couvertes de feuillus), sans qu'une explication simple puisse être donnée.

* Conclusion. Le temps de demi-tarissement ne peut pas être prédéterminé par la nature géologique, ni par la superficie du bassin. Ceci confirme l'observation que les débits calculés étant assez peu sensibles à la valeur du temps de demi-tarissement, ces derniers sont mal identifiés.

CHAPITRE 10

VERIFICATION DU CALAGE
SUR DES DONNEES DE CONTROLE

1. INTRODUCTION

Pour vérifier la stabilité du calage et ses performances sur une période de contrôle, on a tout d'abord pensé utiliser des données pendant des années n'appartenant pas à la séquence 1971-1976. En fait, il est apparu que seulement 48 postes pluviométriques étaient disponibles et les calages ne pouvaient donc pas être comparés directement.

On a donc choisi de procéder de la manière suivante : 6 calages ont été réalisés successivement sur 5 années de la période 1971-1976, la sixième année servant au contrôle. On a ainsi obtenu :

- . 6 jeux de coefficients d'ajustement sur 5 ans,
- . 6 jeux de 3 paramètres obtenus sur 5 ans,
- . 6 jeux de débits calculés sur la sixième année.

2. STABILITE DU CALAGE (figure X.1)

Pour comparer ces six jeux, on a superposé sur un même graphique relatif à chaque paramètre la valeur minimale (en pointillé) et la valeur maximale (en trait continu) des six calages.

* Coefficients d'ajustement. Ils sont relativement stables à quelques exceptions près : les 26ème et 32ème bassins (n° 29 : Sanon à Lagarde, et n° 39 : Seille à Vic-sur-Seille).

* Paramètres de modélisation.

- . La correction globale de pluie est stable.
- . La capacité de la réserve superficielle est assez variable et l'intervalle compris entre le minimum et le maximum atteint souvent un facteur 2, ce qui confirme qu'elle est mal définie et peut difficilement être prévue.
- . La hauteur d'équi-ruissellement est extrêmement stable (à part pour le bassin n° 5 où elle a une valeur anormalement élevée).

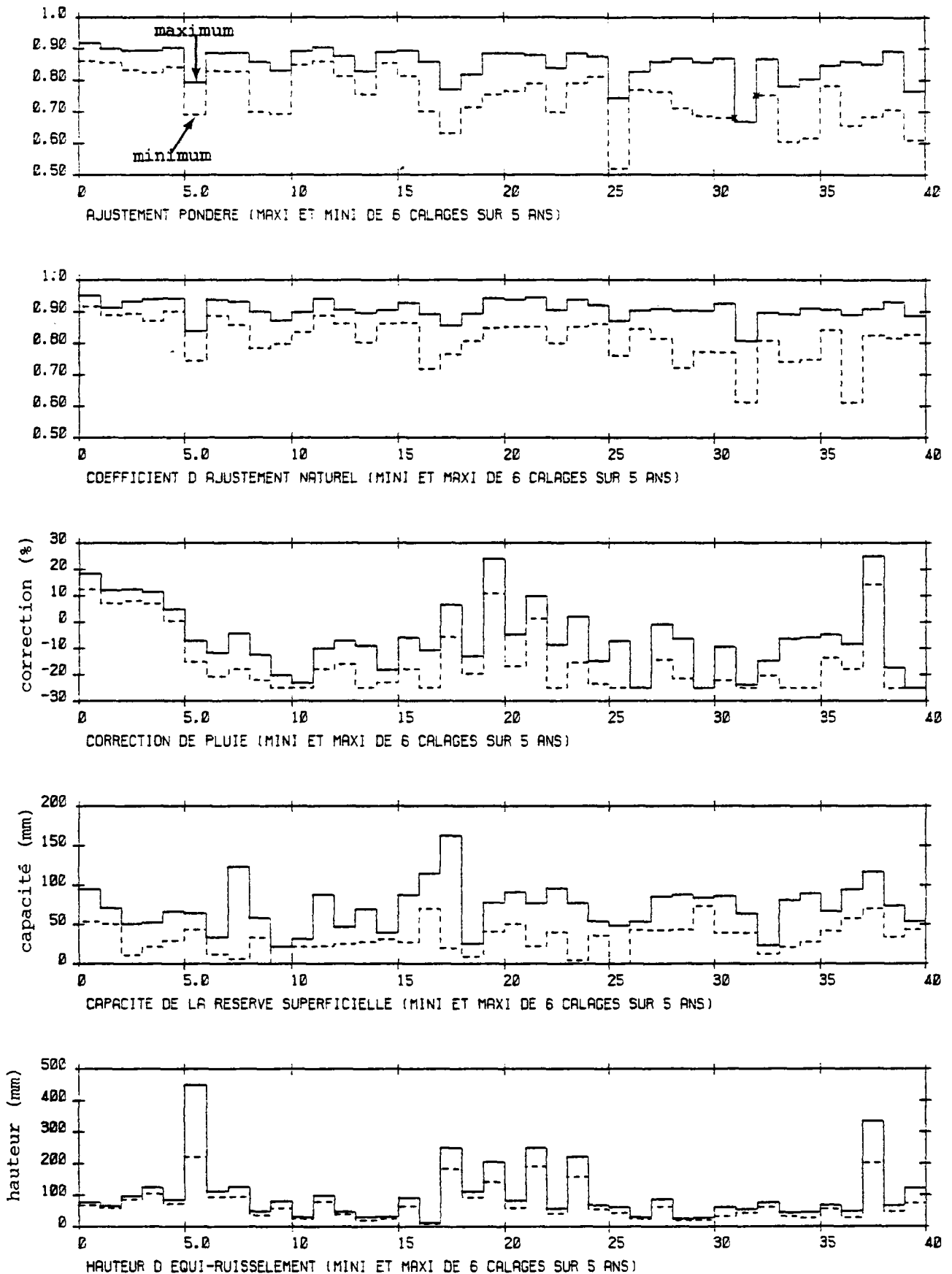


Figure X.1 : contrôle de la stabilité par 6 calages sur 5 ans

Le coefficient d'ajustement pondéré est assez sensible à la période de calage. Les deux paramètres les plus stables sont la correction globale de pluie et surtout la hauteur d'équi-ruisselement. Par contre, la capacité de la réserve superficielle est mal définie.

3. CONTROLE DE L'EXTRAPOLATION

3.1. DEBITS ANNUELS

Chacun des 6 calages a été réalisé sur 5 ans. On a donc comparé les débits calculés et observés sur la sixième année. La figure X.2 montre que les débits calculés sont très proches des débits observés. Les moins bons résultats sont obtenus en 1972 pour les bassins 31 à 45. Mais ces bassins étaient de toute façon mal simulés en 1972 lors du calage de référence sur 6 ans. Pour analyser les performances du modèle en extrapolation d'une manière plus objective et plus sévère, on a procédé de la manière suivante : on a considéré qu'on connaissait le débit moyen Q_M du débit pendant 5 ans (les 5 années du calage) et qu'on essayait de déterminer avec le modèle la variation relative VR du débit Q_6 de la sixième année : $VR = (Q_6 - Q_M) / Q_M$, en %.

La figure X.3 montre que les résultats obtenus sont bons, sauf en 1972 où le modèle sous-estime les débits. Les variations prévues suivent assez bien les variations observées et ont à peu près la même amplitude.

On a comparé les résultats obtenus avec une méthode, sans modèle, qui serait pratiquée par les hydrologues traditionnels :

$$Q_6 = (P_6/PM) \cdot Q_M$$

avec $\left\{ \begin{array}{l} P_6 \text{ pluie annuelle de la sixième année} \\ PM \text{ pluie annuelle observée pendant 5 ans} \end{array} \right.$

c'est-à-dire une hypothèse de proportionnalité des débits annuels aux pluies annuelles. La figure X.4 montre que les résultats obtenus ne sont pas si mauvais qu'on pourrait le penser. Les écarts calculés par cette méthode ne sont pas toujours plus mauvais que ceux calculés avec le modèle (ils sont même meilleurs en 1972). On remarque cependant que les écarts prévus sont pratiquement constants une année donnée (en 1975 par exemple), puisque les pluies annuelles sont pratiquement homothétiques, alors que les écarts observés sont beaucoup plus variables (de 0 % à + 55 % cette même année). Le modèle reproduit mieux cette diversité, mais commet des erreurs plus importantes pour certains bassins particuliers (figure X.5 - a et b).

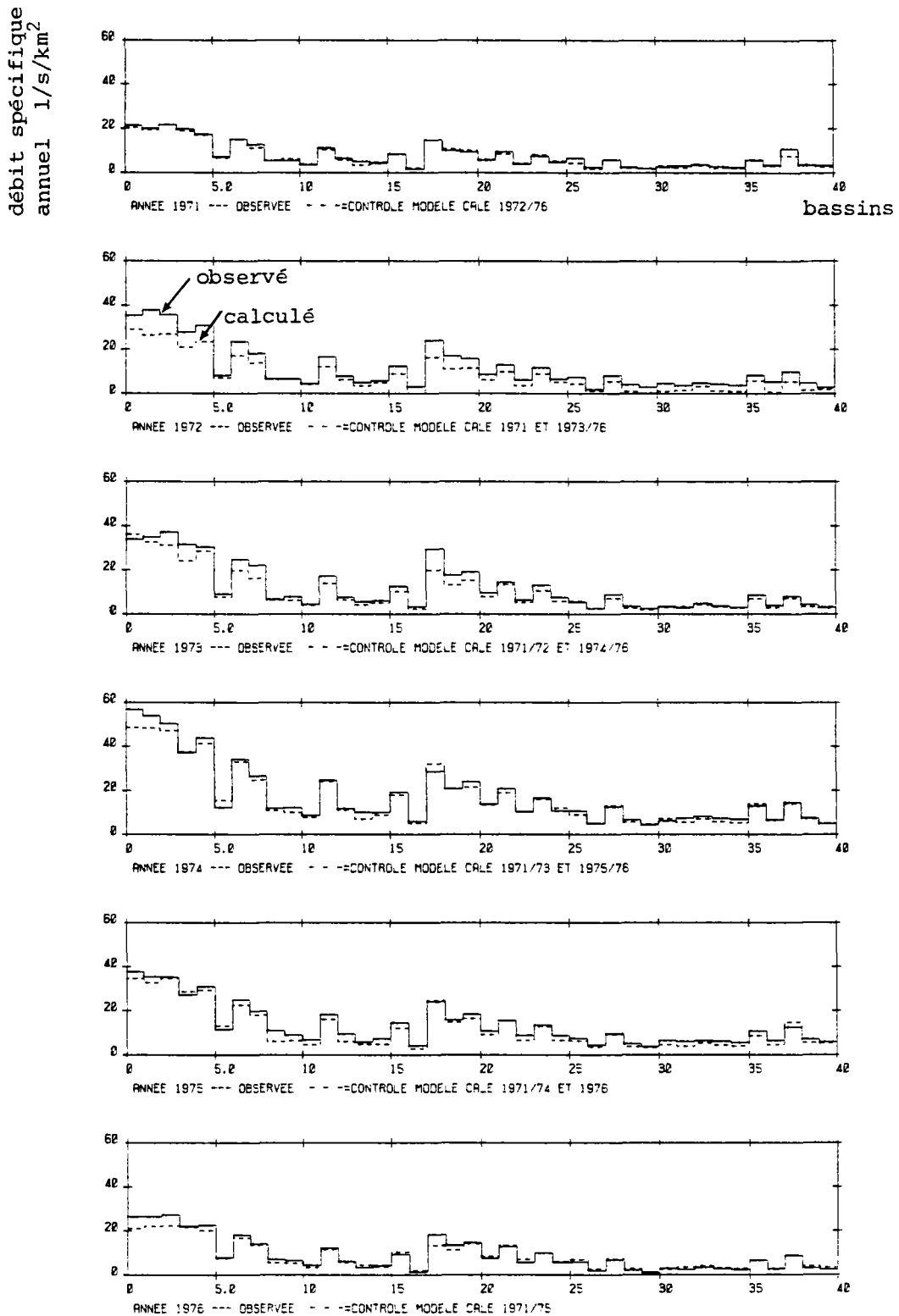


Figure X.2 : contrôle sur une année du calage du modèle sur 5 ans

Il apparaît que les débits moyens annuels sont simulés correctement. En 1972, on note une sous-estimation qui apparaissait également sur la simulation de référence calée sur 1971/76.

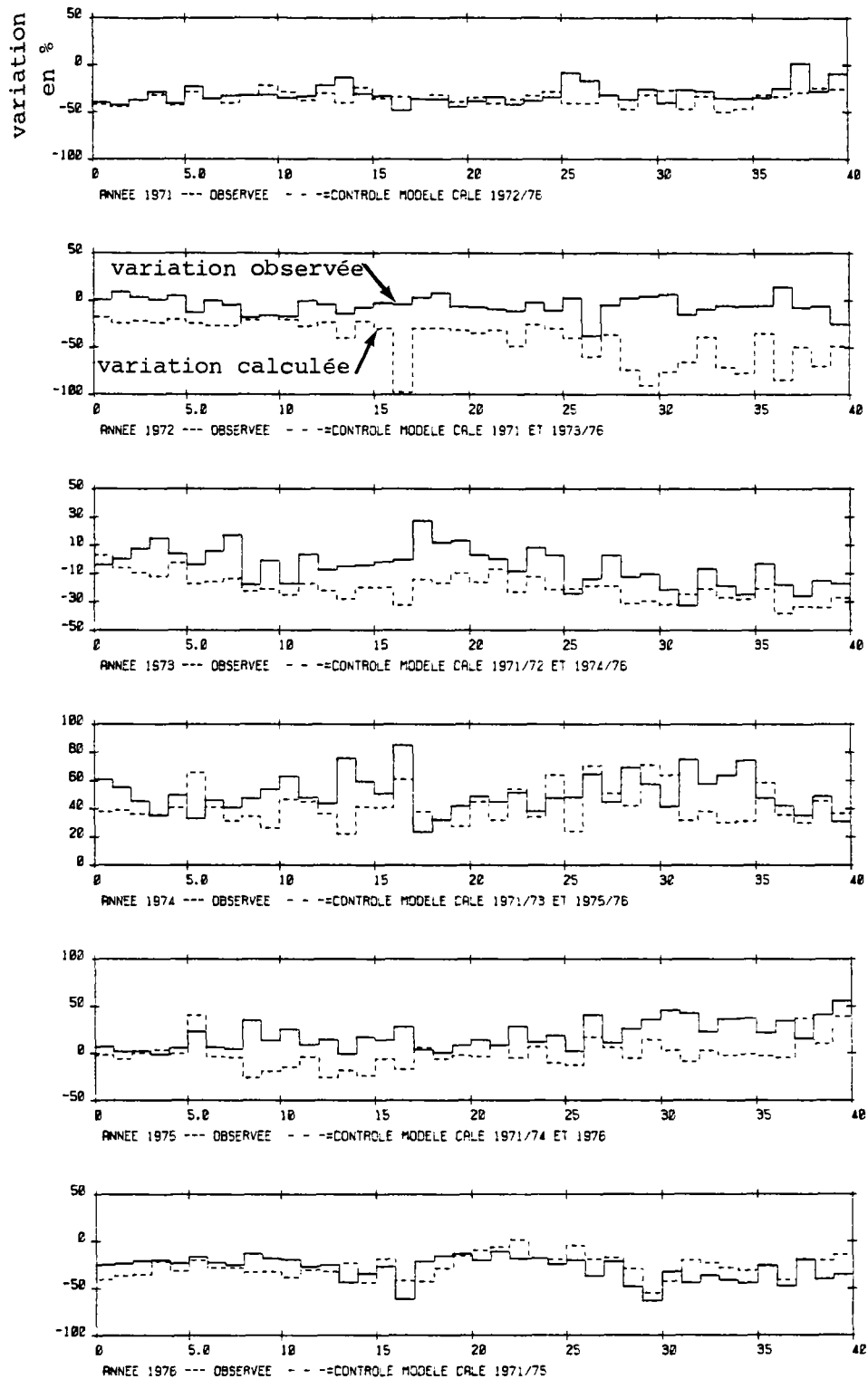


Figure X.3 : contrôle sur une année du calage du modèle sur 5 ans

Cette figure montre les variations relatives entre la moyenne observée sur 5 ans et le débit spécifique annuel de la 6ème année. Ces variations sont bien prévues en 1971, 1974, 1975 et 1976. Les résultats sont acceptables en 1973 et mauvais en 1972 qui est toujours mal simulée.

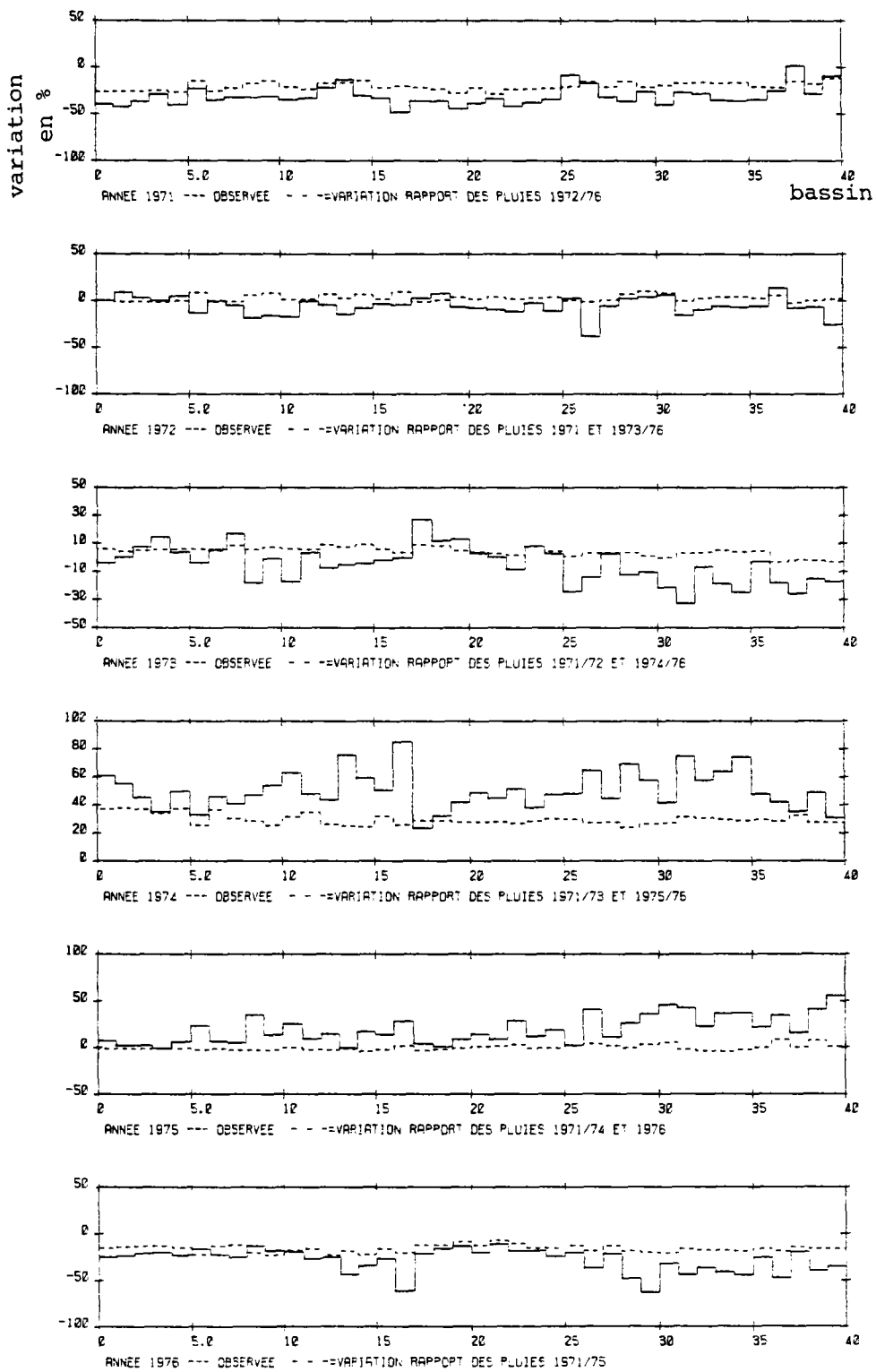
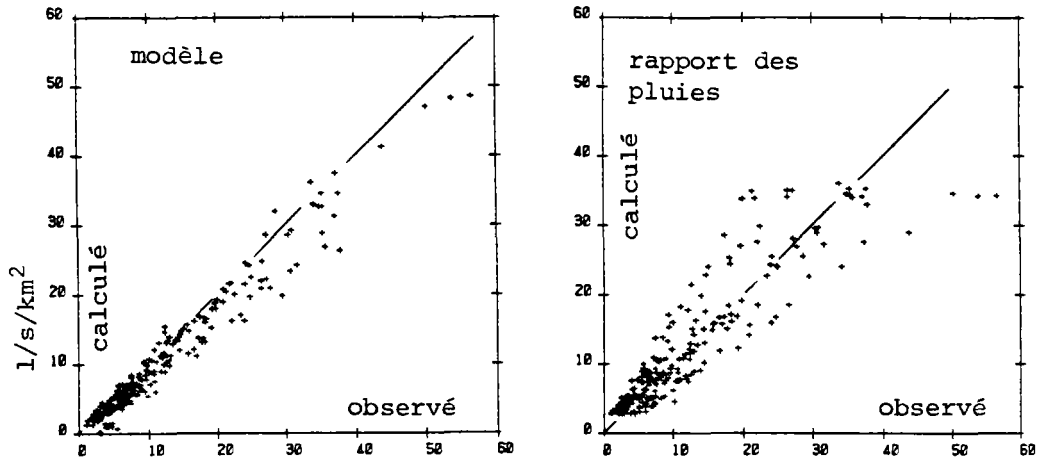
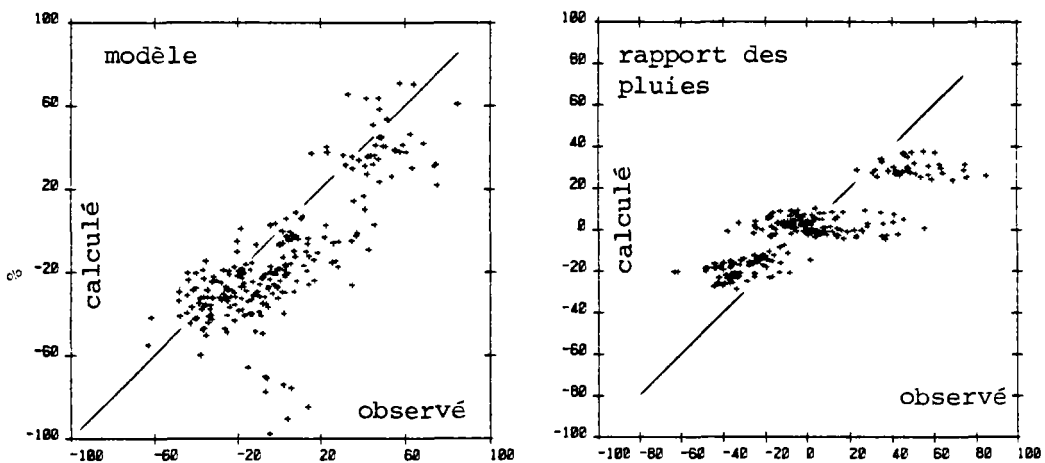


Figure X.4 : débit spécifique annuel calculé par le rapport des pluies annuelles

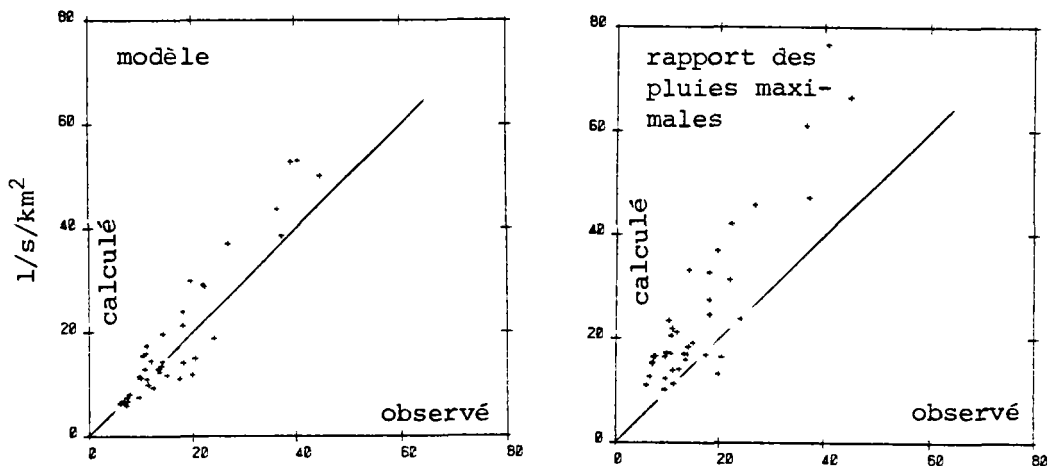
Il apparaît qu'avec cette méthode grossière les débits spécifiques annuels sont assez bien prévus mais, pour une année donnée la variation prévue est quasi constante (exemple en 1975) et généralement soit trop haute soit trop basse.



a) débit spécifique annuel des 40 bassins 6 contrôles



b) variation relative du débit annuel



c) débit mensuel maximal de l'année 1971 extrapolée

Figure X.5 : contrôle du calage du modèle, comparaison avec la méthode du rapport des pluies

- le modèle prévoit mieux les débits annuels, surtout pour les fortes valeurs
- les variations relatives prévues par le modèle et observées sont assez dispersées, mais le modèle donne le même intervalle de variation (-60 %, +80 %) alors que le rapport des pluies réduit considérablement cet intervalle à -30 %, +40%
- le débit mensuel maximal de 1971 est bien simulé par le modèle mais nettement surestimé par le rapport des pluies (pratiquement de 100%)

3.2. DEBIT MENSUEL MAXIMAL

Il est évident que le but du modèle n'est pas de reproduire uniquement le débit moyen annuel, mais surtout de reproduire la variabilité des débits. On a donc étudié comment le modèle permettait, après calage sur 5 ans, de prévoir le débit mensuel maximum des 12 mois de la sixième année. On a comparé les résultats obtenus avec une méthode de base sans modèle :

$$QM6 = (PM6 / PMM) \cdot QMM$$

avec PM6 pluie mensuelle maximale de la sixième année
 PMM pluie mensuelle maximale des 5 années de calage
 QM6 débit mensuel maximal de la sixième année
 QMM débit mensuel maximal des 5 années de calage

La figure X.5.c montre que certaines années, comme en 1971, le modèle reproduit bien le débit maximal, alors que la méthode de référence conduit à une sur-estimation de l'ordre de 100 %.

4. EXTENSION DE DONNEES SUR LE BASSIN DE LA MOSELLE A HAUCONCOURT

On a réalisé :

* Pluies mensuelles :

- . Un calage sur la période 1971-1976 et un contrôle sur les années 1968-1970 et 1977 (figure X.6). Les débits sont bien simulés, y compris en année sèche (1976) et en année humide (1977). Par contre 1968 et 1969 sont sous-estimées.
- . Un calage sur la période 1968-1970 et 1977, et contrôle sur les années 1971-1976 (figure X.7). On note une légère sous-estimation en 1969, pendant la période de calage. Par contre les résultats en extrapolation de 1971 à 1976 sont bien simulés.

* Pluies pentadaires :

- . Un calage (sur les débits mensuels) avec des pluies pentadaires sur la période 1968-1970 et 1977 (figure X.8) donne une bonne simulation sur toute la période 1968-1977, en particulier les années 1968 et 1969 sont mieux simulées qu'avec des pluies mensuelles.

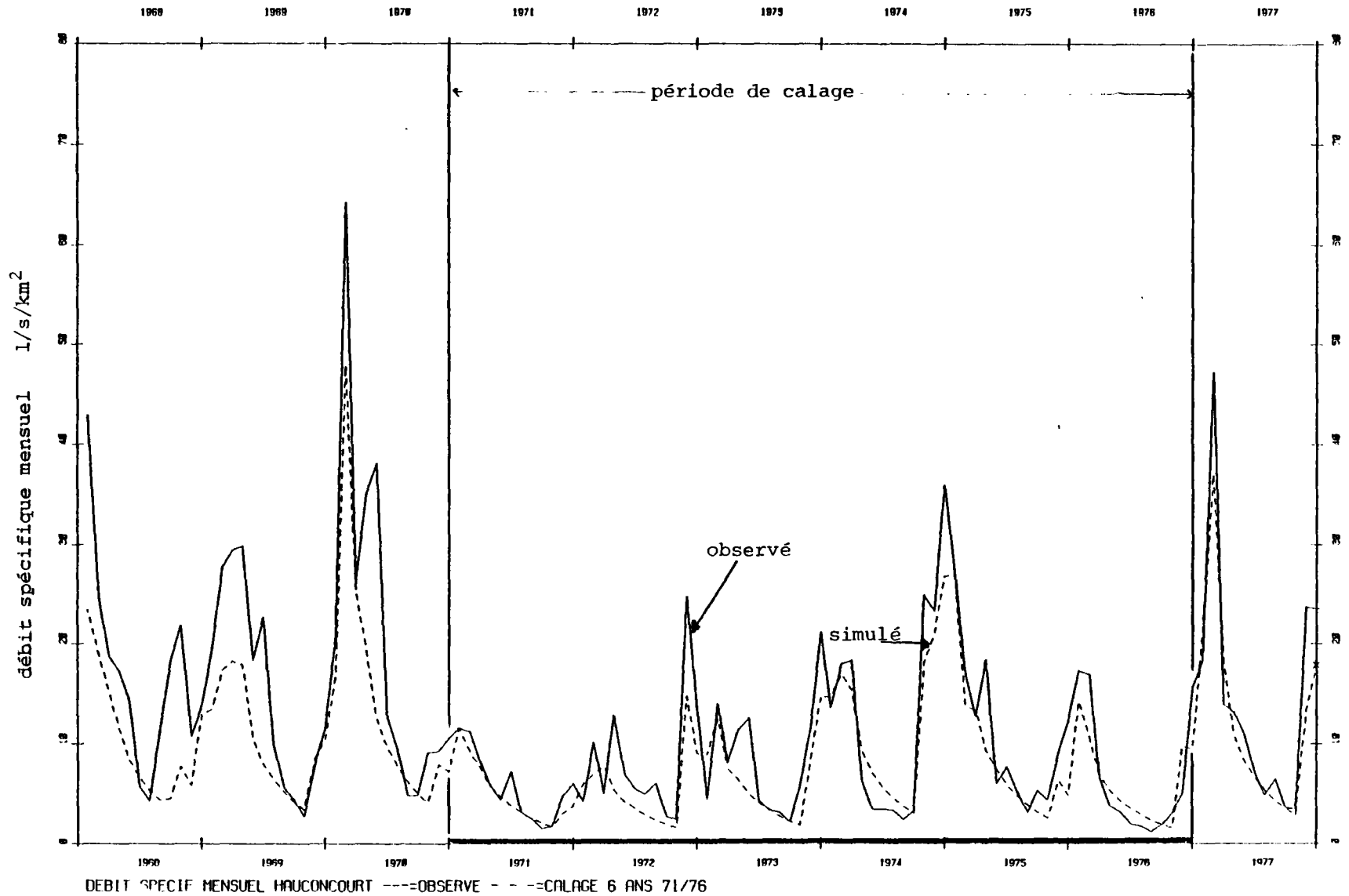


Figure X.6 : simulation du débit mensuel à Hauconcourt : calage avec des pluies mensuelles sur les six années 1971/1976

On remarque une bonne simulation de cette période y compris en 76 ainsi qu'en 1977. En extrapolation 1968 et 1969 sont sous-estimées.

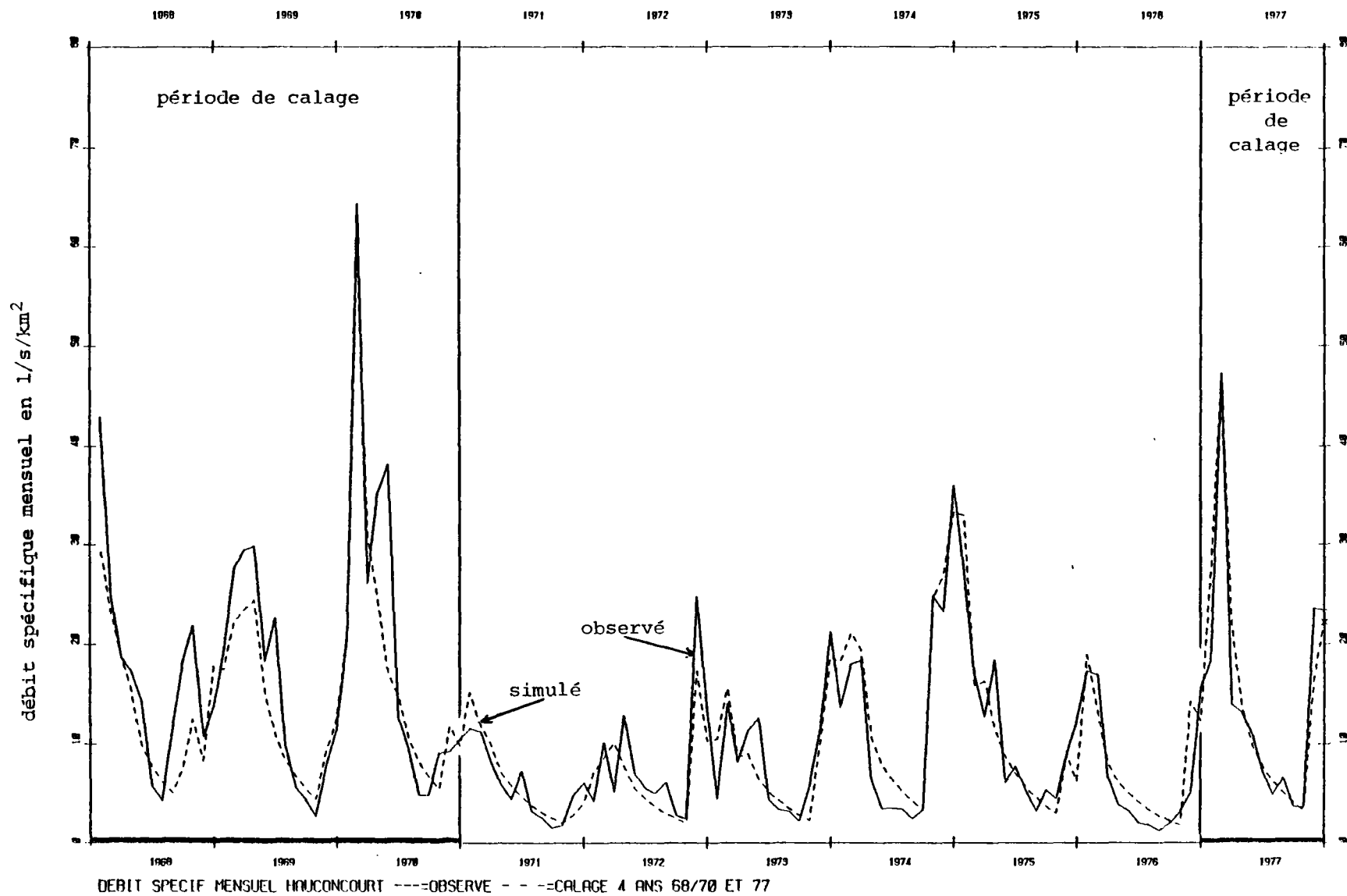


Figure X.7 : simulation du débit mensuel à Hauconcourt : calage avec des pluies mensuelles sur les 4 années 1968/70 et 1977

On remarque une légère sous estimation sur la période de calage. Par contre, en extrapolation la période 1971/1976 est bien simulée.

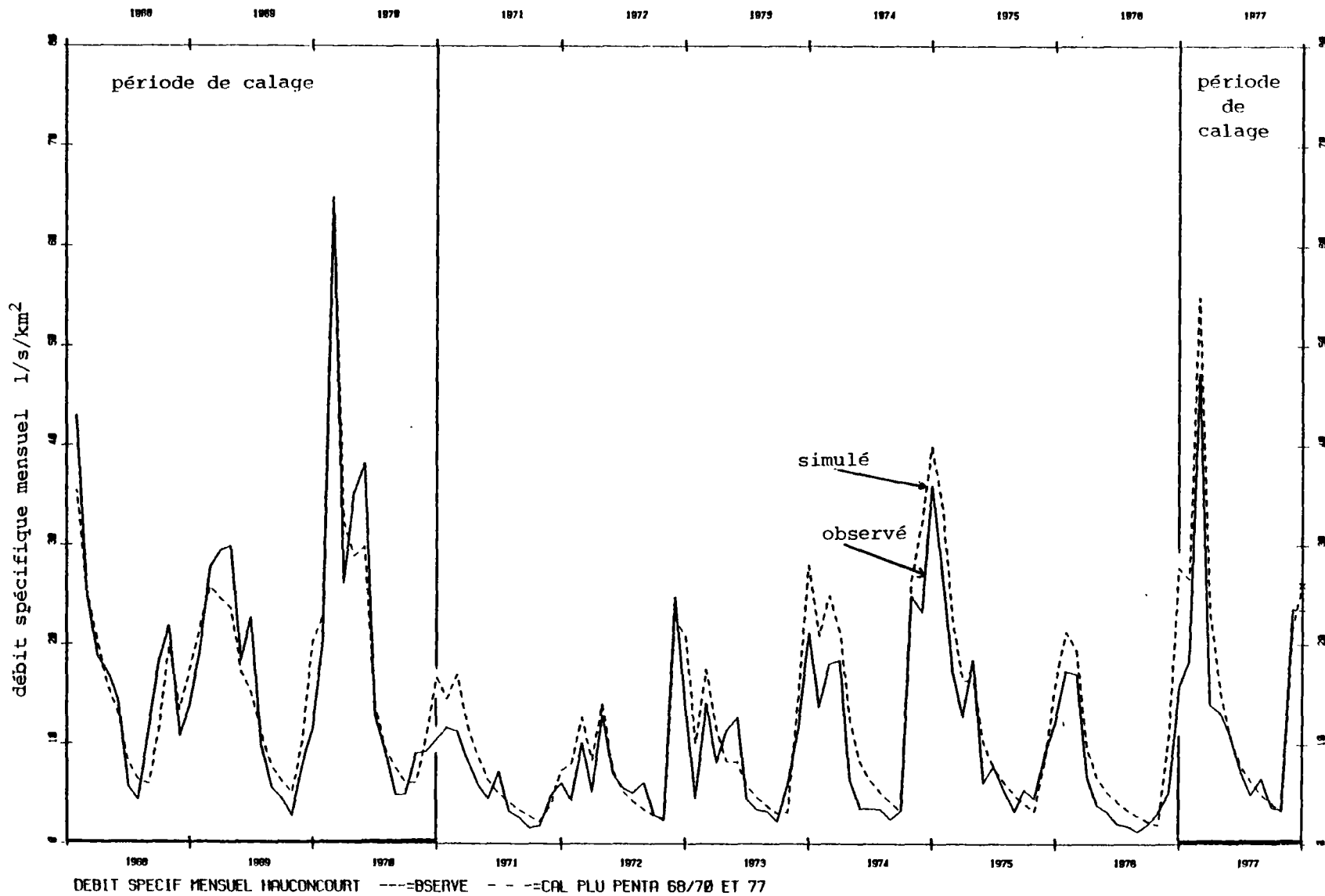


Figure X.8 : simulation du débit mensuel à Hauconcourt : calage avec des pluies pentadaires 1968/70 et 1977

On remarque une bonne simulation de la période de calage (y compris 68 et 69 qui sont moins sous-estimées qu'avec un pas mensuel). L'extrapolation sur la période 1971/76 est bien simulée.

. Un calage sur les débits pentadaires, avec des pluies pentadaires sur la période 1971-1976 (figure X.9), permet de bien reproduire la séquence totale 1968-1977, et en particulier les étiages.

5. CONCLUSION

L'étude de la stabilité en comparant 6 calages sur 5 ans, a montré que la correction globale de pluie, et surtout la hauteur d'équi-ruisselement sont stables et indépendants de la période de calage. Le contrôle des débits calculés en extrapolation sur un an montre que les débits annuels sont relativement bien reproduits par le modèle (à part l'année 1972 qui est souvent mal simulée) avec des pluies mensuelles. L'étude du plus grand bassin, la Moselle à Hauconcourt, montre qu'un calage sur 4 ou 6 ans permet de reproduire correctement toute la séquence de 10 ans de 1968 à 1977, les meilleurs résultats étant obtenus avec des pluies pentadaires.

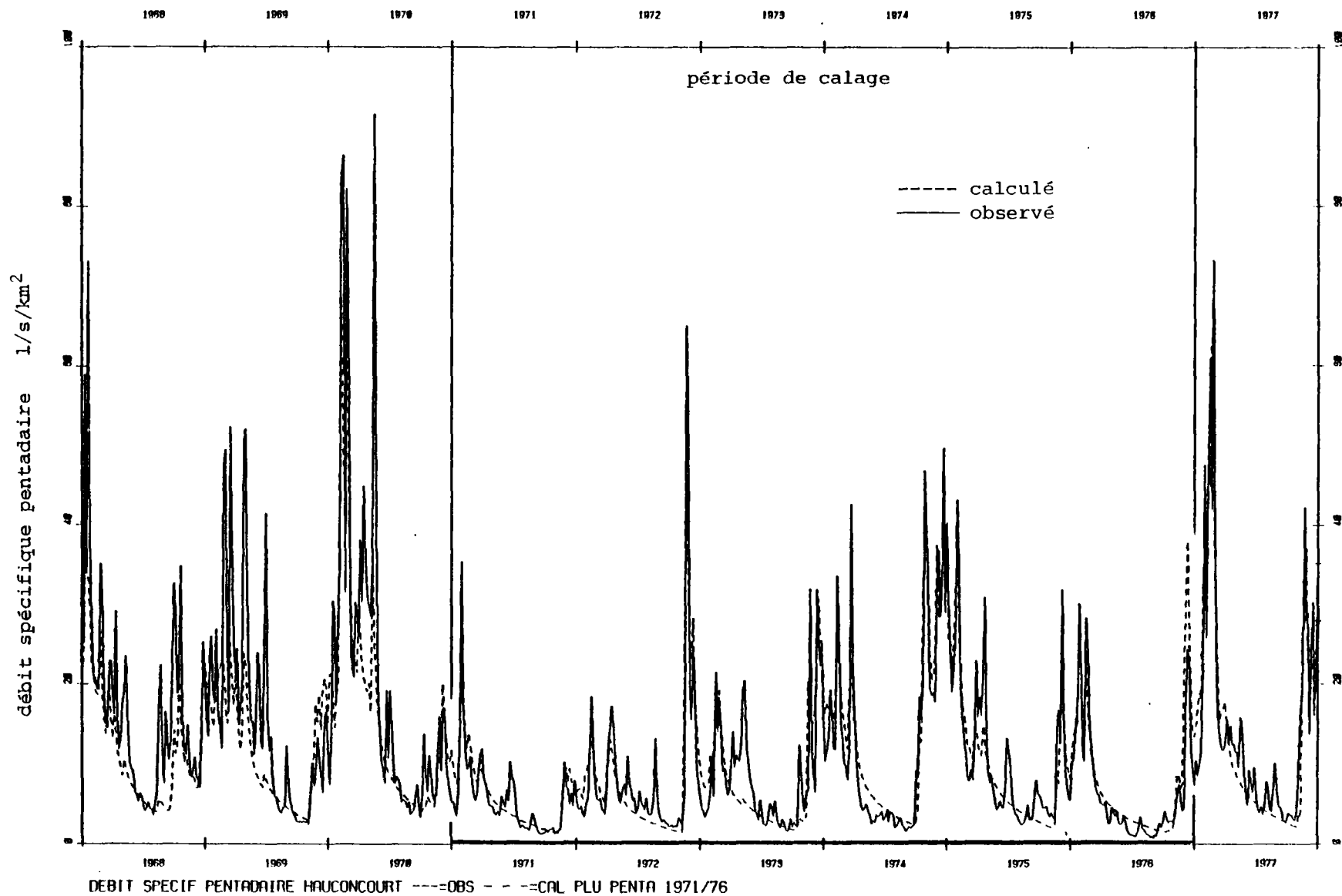


Figure X.9 : simulation du débit pentadaire à Hauconcourt - calage 1971/76

Le calage (avec des pluies pentadaires) sur la période 1971/1976 montre une bonne simulation sur toute la période avec en particulier une bonne reproduction des ETIAGES.

CHAPITRE 11

CONCLUSIONS

Parmi tous les résultats obtenus, on peut citer en particulier les suivants :

- * Le modèle global au pas de temps mensuel permet de simuler correctement, avec 3 paramètres pour chaque bassin, les débits mensuels de 75 % des bassins sur la période 1971-1976, cependant l'année 1972 est souvent difficile à simuler. Il convient d'ailleurs de noter que cette période 1971-1976 est en moyenne extrêmement sèche par rapport aux années antérieures et postérieures.
- * Le critère d'ajustement le plus sensible et permettant une simulation correcte des débits, y compris des étiages, est un coefficient d'ajustement pondéré. Ce coefficient donne plus de poids aux écarts observés sur les faibles débits.
- * Les paramètres du modèle sont déterminés de manière stable. Quelque soient les valeurs initiales on retrouve après optimisation les mêmes valeurs.
- * Les capacités de réserve du sol sont souvent assez mal déterminées, surtout sur les bassins humides (situés en altitude) pour lesquels cette réserve ne s'assèche quasiment jamais.
- * Les corrections globales de pluies à introduire sur les lames d'eau calculées sont généralement négatives (sauf pour les bassins en altitude). La médiane des 40 bassins est une diminution de 18 %. Cette diminution est difficile à expliquer, et il n'a pas été possible de la compenser en augmentant l'évapotranspiration potentielle (ETP) qui n'est connue qu'approximativement. Deux hypothèses restent possibles :
 - . une partie non négligeable de la pluie efficace s'infiltrer vers des nappes profondes et n'est pas contrôlée par l'exutoire,
 - . le schéma de transfert du modèle tend à avoir une décroissance trop lente des débits. Les débits d'étiages calculés (qui ont un rôle important dans l'ajustement) sont sur-estimés. Le modèle diminue donc les entrées pour mieux simuler ces étiages. Les débits moyens sont alors légèrement sous-estimés par le modèle.

- * Les calculs au pas de temps pentadaire (5 jours) donnent des résultats significativement meilleurs que les calculs au pas de temps mensuel.
- * L'analyse de sensibilité, sur le bassin de Hauconcourt (le plus grand), montre que :
 - . Les paramètres de la fonction production et ceux de la fonction transfert sont indépendants ;
 - . Une certaine compensation peut s'établir entre les 3 paramètres de la fonction production (correction globale de pluie, correction globale d'évapotranspiration potentielle, capacité de la réserve superficielle) ;
 - . Les temps de demi-percolation et de demi-tarissement ne peuvent pas être échangés simplement ;
 - . La hauteur d'équi-ruissellement est assez liée au temps de demi-percolation ; il faut donc fixer un des deux paramètres ;
 - . Le temps de demi-tarissement n'est pas déterminé très précisément.
- * L'étude des relations entre les paramètres du modèle et les paramètres physiographiques montre qu'il est possible de prédéterminer correctement :
 - . la hauteur d'équi-ruissellement (nettement),
 - . la correction globale de pluie (un peu moins nettement) ;par contre la capacité de la réserve superficielle ne peut pas être prédéterminée.
- * Le contrôle du calage sur des données extérieures montre que le modèle se comporte correctement, mais il resterait à compléter cette analyse sur de longues séries de données (qui seront disponibles plus tard).
- * Les principaux résultats de cette recherche, décrits dans les trois rapports d'avancements, sont résumés dans le rapport BRGM 85 SGN 290 EAU.

ANNEXE

CARTES D'ISOVALEURS DES PARAMETRES
DU FICHER PHYSIOGRAPHIQUE
DU BASSIN DE LA MOSELLE

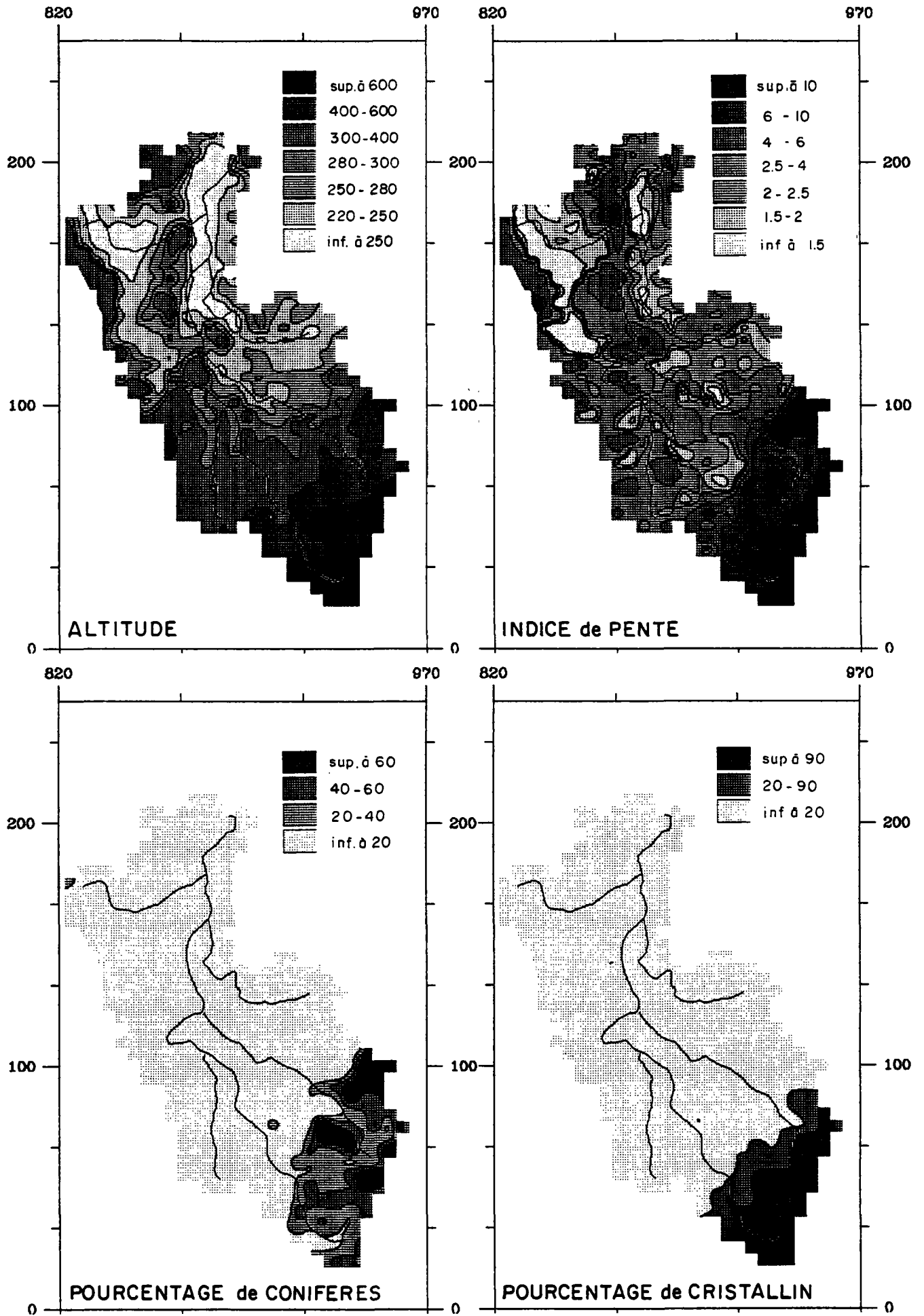


FIGURE A.1 - Fichier physiographique de la Moselle

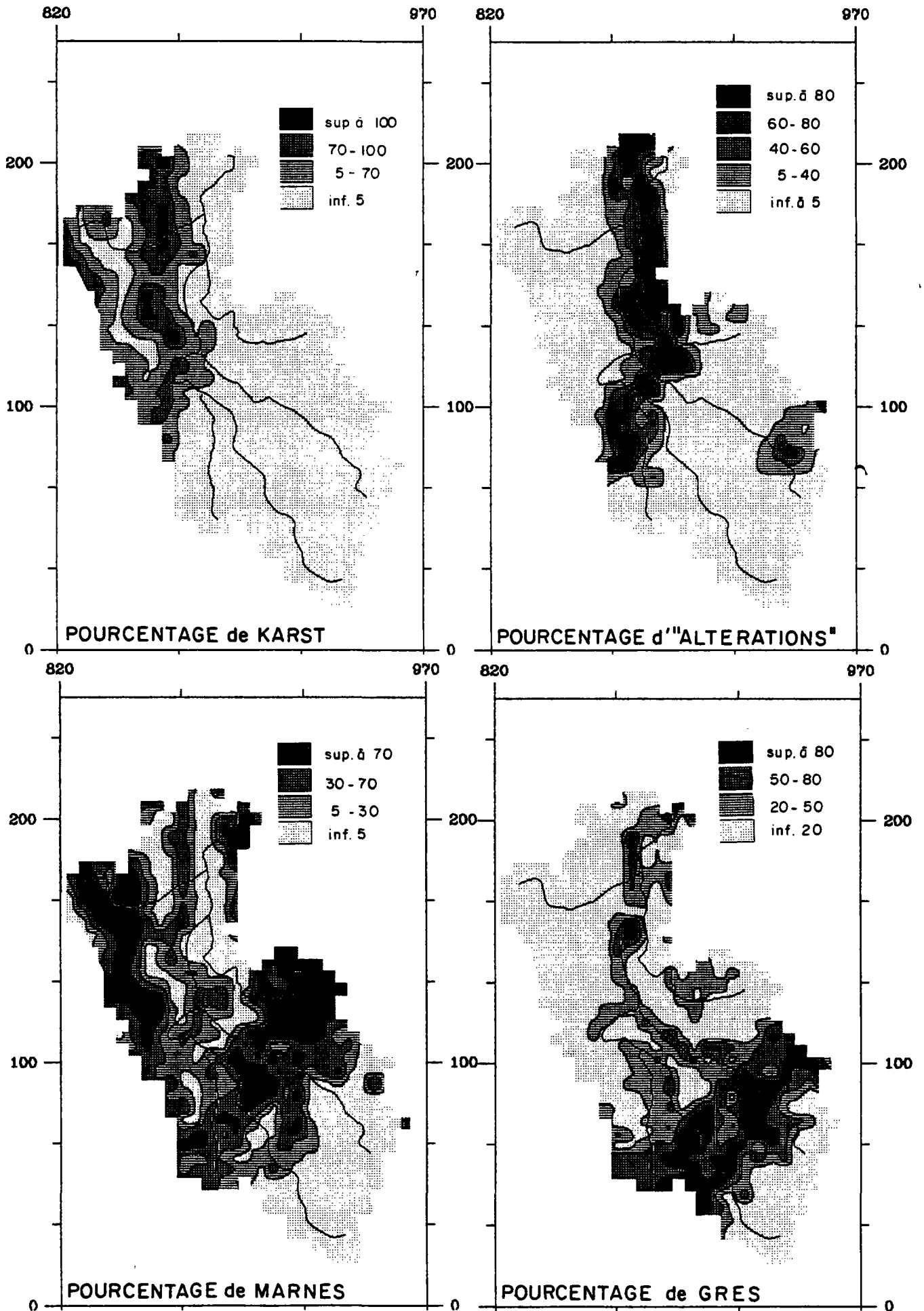


FIGURE A.2 - Fichier physiographique de la MOSELLE

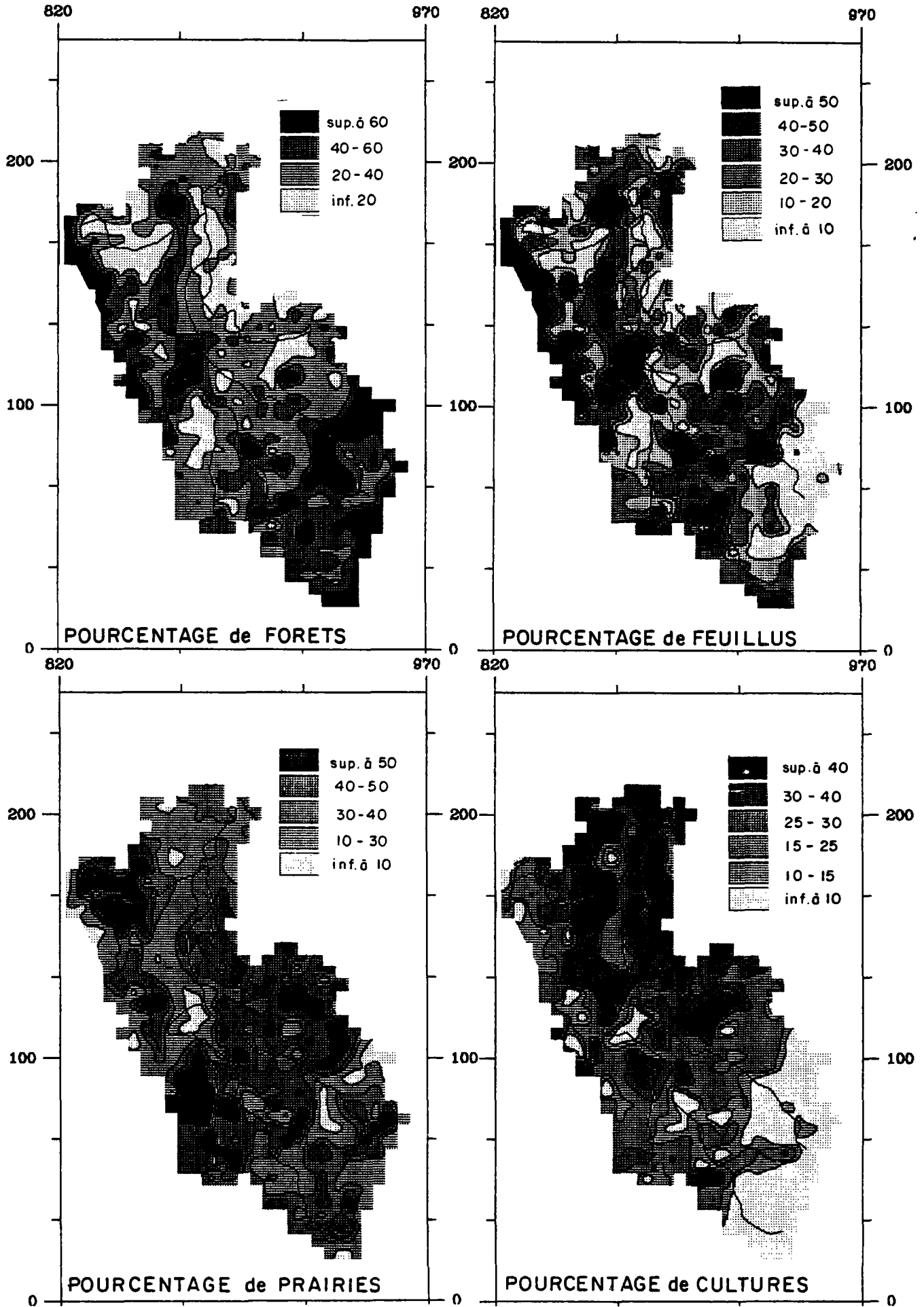


FIGURE A.3 - Fichier physiographique de la MOSELLE

BIBLIOGRAPHIE

- COUDRAIN A., THIERY D. (1978) .- Estimation des pluies efficaces avec l'algorithme de TURC - Influence du pas de temps de calcul et de l'utilisation de données moyennes .- *Rapport B.R.G.M. n° 78 SGN 640 HYD, Octobre 1978*
- ROCHE P.A. (1983) .- Sous-programme ROSACE - Algorithme de ROsembröck Adapté à un Contrôle Externe des paramètres .- *Note technique SGN/EAU n° 83/01, Janvier 1983*
- ROCHE P.A. (1983) .- Etude des bassins versants de la Moselle Française - Analyse des variations spatiales et temporelles des hauteurs de pluie mensuelles et calcul de lame d'eau mensuelle pour chaque bassin versant .- *2ème rapport d'avancement - Note technique SGN/EAU n° 84/32, Juin 1983*
- ROCHE P.A., THIERY D. (1984a) .- Evaluation des apports mensuels par les précipitations en région montagneuse - Application au bassin de la Moselle Française .- *Société Hydrotechnique de France, Section Pluviométrie, PARIS, Mai 1984*
- ROCHE P.A., THIERY D. (1984b) .- Simulation globale de bassins hydrologiques - Introduction à la modélisation et Description du modèle GARDENIA .- *Rapport B.R.G.M. n° 84 SGN 337 EAU, Novembre 1983*
- ROCHE P.A., THIERY D. (1985) .- Modélisation des grands bassins versants - Adaptation des modèles hydrologiques et analyse de sensibilité - Application aux bassins de la Moselle (conventions ENV. n° 83.224 et n° 83.109) .- *Rapport B.R.G.M. n° 85 SGN 290 EAU, Septembre 1985*
- THIERY D. (1982) .- Analyse et modélisation des bassins versants de la Moselle Française - Analyse des données climatiques - Etude statistique de l'influence de la physiographie sur les écoulements .- *1er rapport d'avancement - Note technique SGN/EAU n° 84/31, Octobre 1982*