

50376
1989
163

50376
1989
163

LA PRÉSENTE ÉTUDE A ÉTÉ RÉALISÉE DANS LE CADRE DU LABORATOIRE
D'HYDROGÉOLOGIE DE L'UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE-
FLANDRES-ARTOIS.

LE SYNDICAT INTERCOMMUNAL DU BASSIN DE LA SAMBRE A ASSURÉ LA
MAITRISE DE CET OUVRAGE, EN COORDONNANT SA PROPRE PARTICIPATION
FINANCIERE AVEC CELLES DES ORGANISMES SUIVANTS :

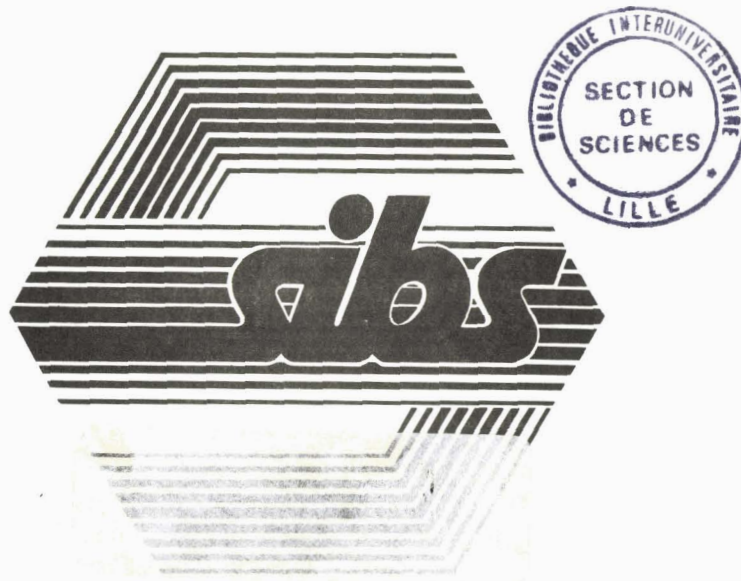
. SOCIÉTÉ EAU ET FORCE

. DIRECTION RÉGIONALE DE LA NAVIGATION

. SERVICE HYDROLOGIQUE CENTRALISATEUR NORD - PAS-DE-CALAIS

. AGENCE DE L'EAU ARTOIS-PICARDIE

. SERVICE RÉGIONAL D'AMÉNAGEMENT DES EAUX NORD - PAS-DE-CALAIS



AVANT-PROPOS

A l'issue de ce travail, il m'est agréable de remercier tous ceux qui ont participé, directement ou indirectement, à son élaboration.

Norbert CRAMPON, directeur du laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université des Sciences et Techniques de Lille-Flandres-Artois, m'a confié ce sujet et a accepté de présider ce jury, ce dont je le remercie bien vivement.

Jean Pierre LABORDE, professeur d'hydrologie au laboratoire d'Analyse Spatiale Raoul Blanchard de l'Université de Nice - Sophia Antipolis a accepté de rapporter ce mémoire et je lui en suis très reconnaissant.

Jacky MANIA, professeur d'hydrogéologie à l'Université des Sciences et Techniques du Doubs à Besançon, est également rapporteur de ce travail et je l'en remercie sincèrement.

Mes remerciements vont également à Monique DACHARRY, Professeur d'hydrologie à l'U.F.R de Géographie de l'Université des Sciences et Techniques de Lille, qui a accepté d'examiner ce rapport.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Jean-Luc PELLETIER, ingénieur hydrologue au S.R.A.E Nord - Pas-de-Calais puis au S.R.A.E des Pays de la Loire, dont les grandes qualités humaines ont soutenu mon action par une solide collaboration.

Je remercie Messieurs C. OBLED (I.N.P.Grenoble), P. GUILLOT, T. LEVIANDIER, J.C. MAILHOL (C.E.M.A.G.R.E.F) pour leurs conseils et suggestions.

Merci également à tous les professionnels de l'Hydrologie et de l'Hydrogéologie qui ne m'ont pas ménagé leur temps et particulièrement à J. RAHAL (S.I.B.S), REYNAUD (S.R.A.E), M.LANG (S.H.C). Mes remerciements aussi à Messieurs LOISEL, BRIQUET, PITARD (S.H.C), BLU (S.R.A.E), G.PETIT-RENAUD (U.S.T.L).

Merci à Jeanine PAILLARD pour sa gentillesse et sa disponibilité.

Merci à Gilles POREL, chercheur dans mon laboratoire, ami de tous les instants de détente et de réflexion.

Merci à Bernardo, Marie, Christian, Fred, Hervé, Annie, André, Berirand, Eliane, Erick, Marc, Haniche, Anouar, Yves....

Je dédie enfin ce travail à mes parents, à Claudette, à mon épouse Nathalie, et à mes enfants Olivia et Silvère.

"....Ici, dit Manon, c'est du crétacé jurassique de la deuxième époque du quaternaire."

L'instituteur ouvrit des yeux si grands qu'ils remontèrent les sourcils.

" Vous êtes bien savante pour une bergère!"

**"Manon des sources"
Marcel Pagnol**

SOMMAIRE



Cadre de l'étude	11
PREMIERE PARTIE : PRESENTATION DU BASSIN DE LA SAMBRE	
<u>CHAPITRE 1 : CONTEXTE GEOGRAPHIQUE</u>	19
1.1. LOCALISATION	19
1.2. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES	21
1.2.1. Forme et relief	21
1.2.2. Hydrographie	21
1.2.3. Climat	22
1.2.4. Couvert végétal	22
1.2.5. Population	23
1.2.6. Industrie	23
<u>CHAPITRE 2 : CONTEXTE GEOLOGIQUE</u>	25
2.1. CADRE PALEO GEOGRAPHIQUE ET TECTONIQUE GENERAL	25
2.2. LITHOSTRATIGRAPHIE LOCALE	27
2.2.1. Les terrains primaires	30
2.2.2. Les terrains secondaires	31
2.2.3. Les terrains tertiaires	32
2.2.4. Les terrains quaternaires	32
2.3. TECTONIQUE DU BASSIN	33
<u>CHAPITRE 3 : CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE ET PRINCIPAUX AQUIFERES</u>	35
DEUXIEME PARTIE : EQUIPEMENT HYDROPLUVIOMETRIQUE DU BASSIN SAISIE ET TRAITEMENT INFORMATIQUE DES DONNEES	
<u>CHAPITRE 1 : EQUIPEMENT DU BASSIN</u>	39
1.1. STATIONS PLUVIOMETRIQUES : CARACTERISTIQUES ET SITUATION	39
1.2. STATIONS PLUVIOGRAPHIQUES : CARACTERISTIQUES ET SITUATION	39
1.3. STATIONS THERMOMETRIQUES	39
1.4. STATIONS LIMNIGRAPHIQUES	41
<u>CHAPITRE 2 : CONTROLE DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES</u>	43
2.1. NOTION DE PLUVIOMETRIE JOURNALIERE	43
2.2. QUALITE DES DONNEES	43
2.3. DETECTION DES ERREURS ACCIDENTELLES	44

<u>CHAPITRE 3 : SAISIE ET TRAITEMENT INFORMATIQUE DES DONNEES</u>	45
3.1. FICHIERS BASE DE DONNEES	45
3.2. FICHIERS SELECTION	45
3.3. PROGRAMMES DE TRAITEMENT	45
3.3.1. Saisie de données	46
3.3.2. Traitement de données	46

TROISIEME PARTIE : ETUDE PLUVIOMETRIQUE DU BASSIN DE LA SAMBRE

<u>CHAPITRE 1 : ETUDE PLUVIOMETRIQUE A L'ECHELLE ANNUELLE</u>	49
1.1. CRITIQUE DES DONNEES ANNUELLES	49
1.1.1. Double cumuls	49
1.1.2. Corrélation annuelle	54
1.1.3. Données brutes et données corrigées	58
1.1.4. Choix des stations prise en compte pour l'étude statistique de la pluviométrie annuelle	59
1.2. EXTENSION DES DONNEES POUR LES STATIONS DE THIRIMONT ET DE MAROILLES	59
1.2.1. Station de Thirimont	59
1.2.2. Station de Maroilles	60
1.3. VALEURS ANNUELLES CARACTERISTIQUES	61
1.3.1. Relation pluviométrie-altitude	61
1.3.2. Pluies minimales et maximales	64
1.4. ETUDE STATISTIQUE DES PLUIES ANNUELLES	66
1.5. LAME MOYENNE ANNUELLE	69
1.6. CONCLUSIONS SUR L'ETUDE PLUVIOMETRIQUE ANNUELLE	74
<u>CHAPITRE 2 : ETUDE DES PLUIES A L'ECHELLE MENSUELLE</u>	75
2.1. CRITIQUE DES PLUIES MENSUELLES	75
2.2. EXTENSION DES DONNEES MENSUELLES DES STATIONS DE THIRIRMONT ET DE MAROILLES	79
2.2.1. Station de Thirimont	79
2.2.2. Station de Maroilles	80
2.3. REGIME MENSUEL DES PRECIPITATIONS	80
2.4. ETUDE STATISTIQUE DES PLUIES MENSUELLES DE 1963 A 1984	85
2.4.1. Choix de la loi d'ajustement	85
2.4.2. Calcul des quantiles et des intervalles de confiance	86
2.5. LAME MOYENNE MENSUELLE	93

CHAPITRE 3 : ETUDE DES PLUIES MAXIMALES JOURNALIERES	95
3.1. CHOIX DE LA LOI D'AJUSTEMENT	95
3.2. AJUSTEMENT DES MAXIMA ANNUELS DES PLUIES JOURNALIERES DE 1963 A 1984	96
3.3. AJUSTEMENT DES MAXIMA MENSUELS DES PLUIES JOURNALIERES DE 1963 A 1984	101
QUATRIEME PARTIE : LE BASSIN DE LA SOLRE	
CHAPITRE 1 : PRESENTATION DU BASSIN DE LA SOLRE	111
1.1. SITUATION	111
1.2. HYDROGRAPHIE	111
1.3. COUVERT VEGETAL ET AGRICULTURE	113
1.4. POPULATION ET ACTIVITES HUMAINES	114
1.5. STRATIGRAPHIE ET HYDROGEOLOGIE	115
CHAPITRE 2 : PLUVIOMETRIE	119
2.1. PLUIES ANNUELLES ET MENSUELLES	119
2.1.1. Pluies annuelles	119
2.1.2. Pluies mensuelles	120
2.2. MAXIMA ANNUELS DES PLUIES JOURNALIERES	122
2.3. RELATION INTENSITE-DUREE-FREQUENCE DES PLUIES A COLLERET (I.D.F.)	123
2.3.1. Intérêt de la relation	123
2.3.2. Saisie des données pluviographiques	124
2.3.3. Traitement des données pluviographiques de la station de Colleret	124
2.3.3.1. Ajustement de Gumbel à l'échelle annuelle	126
2.3.3.2. Ajustement de Gumbel saisonnier	131
2.3.3.3. Ajustement par la méthode du renouvellement sur les pluies de durée t supérieures à un seuil	136
2.3.4. Ajustement par la formule de Montana	136
2.3.5. Relation pluie-durée-période de retour : loi de Montana généralisée	139
CHAPITRE 3 : HYDROLOGIE DU BASSIN DE LA SOLRE	143
3.1. HYDROMETRIE	143
3.1.1. Situation de la station et courbe de tarage	143
3.1.2. Précision de l'enregistrement	144
3.2. DEBITS MOYENS ANNUELS ET MENSUELS DEBITS CARACTERISTIQUES	147
3.2.1. Ecoulement annuel	147
3.2.2. Ecoulement mensuel - Régime d'écoulement	147
3.2.2.1. Coefficient mensuel de débit	147
3.2.2.2. Régime d'écoulement et pluviométrie	150
3.2.3. Débits classés	150

3.3. ANALYSE STATISTIQUE DES DEBITS MOYENS ANNUELS ET MENSUELS	150
3.3.1. Débit moyen annuel	150
3.3.2. Débit moyen mensuel	152
<u>CHAPITRE 4 : BILAN ANNUEL</u>	155
4.1. LES TERMES DU BILAN	155
4.2. MODE DE CALCUL	157
4.3. RESULTATS	157
4.3.1. Résultats attendus	161
4.3.2. Résultats observés	161
<u>CHAPITRE 5 : BASSES-EAUX ET ETIAGE</u>	167
5.1. VARIABLES D'ETIAGE	167
5.2. AJUSTEMENT DES ECHANTILLONS	169
5.2.1. Loi de Gumbel	169
5.2.1.1. Modification de la loi classique	169
5.2.1.2. Utilisation de la loi	170
5.2.2. Résultats des ajustements de Gumbel	171
5.3. CALENDRIER DE BASSES-EAUX	171
5.3.1. Méthodologie	171
5.3.2. Résultats	174
<u>CHAPITRE 6 : CRUES DE LA SOLRE</u>	179
6.1. ETUDE STATISTIQUE DES DEBITS MAXIMA INSTANTANES ANNUELS	179
6.1.1. Répartition mensuelles des crues	179
6.1.2. Estimation des probabilités d'apparition des crues	181
6.1.2.1. Ajustement des débits maxima instantanés supérieurs à un seuil par la méthode du renouvellement	182
6.1.2.2. Ajustement des débits maxima instantanés par la loi de Galton	186
6.1.2.3. Ajustement des débits maxima instantanés par la loi de Fréchet	187
6.1.2.4. Résultats obtenus par les trois méthodes	188
6.1.2.5. Crue du 21 juillet 1980	191
6.1.3. Comparaison avec les maxima d'Etroeungt	193
6.1.4. Comparaison avec les débits maxima à Maroilles	194
6.1.5. Niveau d'alerte dans le secteur de Ferrières-la-Grande	195
6.2. SIMULATION DES DEBITS MOYENS JOURNALIERS PAR MODELE A DEUX RESERVOIRS	197
6.2.1. Description générale du modèle	197
6.2.2. Contrôle du modèle	200
6.2.2.1. Erreur de prévision et critère de validité du modèle	200
6.2.2.2. Initialisation, période de calage et de contrôle	201
6.2.3. Définition du modèle adapté au cas du bassin de la Solre	202
6.2.3.1. Données utilisées	202
6.2.3.2. Version retenue	203
6.2.3.3. Résultats	206
6.2.3.4. Complément	206
6.2.4. Résultats	208
6.2.5. Crue du 21 juillet 1980	215
6.2.6. Perspectives d'utilisation en annonce de crue	215
6.2.7. Conclusion sur la modélisation	217

6.3. CARACTERISTIQUES DES HYDROGRAMMES DE CRUES DE LA SOLRE A FERRIERE-LA-GRANDE	218
6.3.1. Qualité des données pluviographiques et limnigraphiques	218
6.3.1.1. Contrôle des données pluviographiques	218
6.3.1.2. Contrôle des données limnigraphiques	218
6.3.2. Saisie informatique et visualisation	218
6.3.2.1. Saisie des débits	218
6.3.2.2. Saisie des pluies	219
6.3.2.3. Averse génératrice de crue	219
6.3.2.4. Visualisation	219
6.4. VOLUME DE CRUE ET COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT	235
6.4.1. Détermination de la part du ruissellement	235
6.4.2. Comparaison avec les hydrogrammes de crues observés à Etroeungt sur la partie amont de l'Helpe Mineure	236
6.4.2.1. Lames moyennes à Etroeungt	236
6.4.2.2. Volumes de crue	244
6.4.2.3. Coefficients de ruissellement	244
6.4.3. Facteurs des différences constatées entre les coefficients de ruissellement du bassin de Ferrière-la-Grande et d'Etroeungt	245
6.4.3.1. Défaillance systématique des limnigraphes	245
6.4.3.2. Différences d'évapotranspiration entre bassins	245
6.4.3.3. Rôle du sous-sol	246
 <u>CHAPITRE 7 : LIAISONS EAUX DE SURFACE - EAUX SOUTERRAINES</u>	 249
7.1. POSITION DES NAPPES PAR RAPPORT A LA SOLRE	
7.1.1. Information sur les niveaux piézométriques	249
7.1.2. Evolution des niveaux piézométriques	249
7.1.2.1. Comparaison des niveaux piézométriques au coeur du synclinal de Ferrière-la-Petite de part et d'autre de la Solre	249
7.1.2.2. Niveaux aquifères en bordure du synclinal. Relations entre nappes	254
7.2. PERTES DE LA SOLRE PAR INFILTRATION DANS LA NAPPE DU CALCAIRE CARBONIFERE	255
7.2.1. Jaugeages dans le secteur de Ferrière-la-Petite	255
7.2.2. Pertes par infiltration rapide	257
7.2.2.1. Observations géologiques dans le secteur du bois de Morlut	257
7.2.2.2. Observations en période de crue	257
7.2.2.3. Interprétation	258
7.3. ALIMENTATION DE LA NAPPE DU CALCAIRE CARBONIFERE ET PROTECTION DES CAPTAGES	259
 CONCLUSIONS GENERALES	 261

BIBLIOGRAPHIE	271
CARTOGRAPHIE	281
ANNEXES	283
Annexe 1 - Méthodes statistiques	285
Double-cumuls	287
Corrélation	289
Loi de Gauss	295
Loi de Galton	301
Lois de Gumbel et de Fréchet	307
Méthode de Renouvellement	313
Annexe 2 - Programmes informatiques	323
Coran	325
Ajrac	329
Renouvellement	341
Saisidf	349
IDF	353
Bil	357
Fipluie	361
Ficrue	365
GR2	369
LEXIQUE	377

LISTE DES DOCUMENTS

N°		Page
1	Géographie et hydrographie du bassin de la Sambre	20
2 a	Situation géologique du bassin de la Sambre dans la géologie du Nord de la France	26
2 b	Situation géologique du bassin de la Sambre dans la géologie des Ardennes	26
2 c	Schéma géologique du bassin de la Sambre	28
3	Exemples de coupes lithostratigraphiques	29
4	Equipement du bassin de la Sambre	40
5 a	Caractéristiques des stations pluviométriques	41
5 b	Caractéristiques des stations hydrométriques	42
5 c	Surface de drainage des stations hydrométriques du bassin de la Sambre	42
6 a-i	Comparaison des modules pluviométriques cumulés	50-52
7	Comparaison des pluies annuelles observées à Liessies avec 3 stations de référence	53
8 a-c	Corrélation entre les modules pluviométriques	54
9	Paramètres de la régression entre les modules pluviométriques de 16 stations du bassin de la Sambre	56
10	Coefficients de corrélation calculés entre les modules pluviométriques de 16 stations du bassin de la Sambre	57
11	Modules pluviométriques annuels en mm	62
12 a	Modules pluviométriques moyens en mm	63
12 b	Comparaison des modules pluviométriques	63
13	Corrélation entre la pluviométrie moyenne 1963-1984 (en mm) et l'altitude	64
14	Pluies annuelles minimales et maximales observées sur la période 1963-1984	65
15	Evolution conjointe des modules pluviométriques annuels de 1951 à 1984 en cinq stations situées à l'Est du bassin de la Sambre	65
16	Ajustements de Gauss sur la pluviométrie annuelle de Thirimont et de Rance	67
17	Ajustements de Gauss sur la pluviométrie annuelle de Chimay et d'Eppe Sauvage	68
18	Ajustements de Gauss sur la pluviométrie annuelle de Maubeuge et de Fourmies	69
19	Ajustements de Gauss sur la pluviométrie annuelle d'Avesnes et de Berlaimont	70
20	Ajustements de Gauss sur la pluviométrie annuelle de Maroilles et de Landrecies	71
21	Paramètres des ajustements de Gauss et quantiles des modules pluviométriques annuels	72
22	Lame moyenne 1963-1984 sur le bassin de la Sambre	73
23	Paramètres des corrélations effectuées entre les stations indiquées ci-dessus et la station de référence de Maubeuge M.N.	77
24	Paramètres des corrélations effectuées entre les stations indiquées ci-dessus et la station de référence d'Avesnes M.N.	77
25	Paramètres des corrélations effectuées entre les stations indiquées ci-dessus et la station de référence de Fourmies	78
26	Paramètres des corrélations effectuées entre les stations indiquées ci-dessus et la station de référence de Rance.	78
27	Paramètres de l'extension des pluies mensuelles à la station de Thirimont	79
28	Paramètres de l'extension des pluies mensuelles à la station de Maroilles	80
29 a	Pluie moyenne mensuelle fictive sur la période 1963-1984 en dix stations du bassin de la Sambre	82
29 b	Histogramme des lames moyennes mensuelles 1963-1984	82
30 a	Visualisation graphique des pluies moyennes mensuelles pondérées	83
30 b	Visualisation graphique des pluies moyennes mensuelles pondérées	83
31	Pluies mensuelles les plus élevées observées sur le bassin de la Sambre	84
32	Pluies mensuelles les plus faibles observées sur le bassin de la Sambre	84
33	Ajustement de Galton sur les pluies de mars à Maubeuge de 1963 à 1984	87
34	Ajustement de Galton sur les pluies de janvier à Avesnes de 1963 à 1984	87
35	Ajustement de Galton sur les pluies de janvier à Berlaimont de 1963 à 1984	88
36	Paramètres des ajustements de Galton réalisés sur les échantillons des pluies mensuelles	89

37	Quantiles et intervalles de confiance à 80 % des pluies mensuelles de période de retour 2 ans	90
38	Quantiles et intervalles de confiance à 80 % des pluies mensuelles de période de retour 3 ans	90
39	Quantiles et intervalles de confiance à 80 % des pluies mensuelles de période de retour 5 ans	91
40	Quantiles et intervalles de confiance à 80 % des pluies mensuelles de période de retour 10 ans	91
41	Quantiles et intervalles de confiance à 80 % des pluies mensuelles de période de retour 20 ans	92
42	Quantiles et intervalles de confiance à 80 % des pluies mensuelles de période de retour 50 ans	92
43	Quantiles et intervalles de confiance à 80 % des pluies mensuelles de période de retour 100 ans	93
44	Moyenne, écart-type des pluies mensuelles critiquées (mm) en dix stations du bassin de la Sambre sur la période 1963-1984	94
45	Paramètres des ajustements de Gumbel sur les maxima annuels des pluies journalières	96
46	Ajustement de Gumbel sur les maxima annuels des pluies journalières à Chimay	97
47	Ajustement de Gumbel sur les maxima annuels des pluies journalières à Rance	97
48	Ajustement de Gumbel sur les maxima annuels des pluies journalières à Maubeuge M.N	98
49	Ajustement de Gumbel sur les maxima annuels des pluies journalières à Eppe sauvage	98
50	Ajustement de Gumbel sur les maxima annuels des pluies journalières à Avesnes M.N.	99
51	Ajustement de Gumbel sur les maxima annuels des pluies journalières à Fourmies	99
52	Ajustement de Gumbel sur les maxima annuels des pluies journalières à Landrecies	100
53	Ajustement de Gumbel sur les maxima annuels des pluies journalières à Berlaimont	100
54	Ajustement de Gumbel sur les maxima annuels des pluies journalières à Chimay	102
55	Ajustement de Gumbel sur les maxima annuels des pluies journalières à Rance	102
56	Quantiles des maxima annuels des pluies journalières de 1963 à 1984.	103
57	Paramètres des ajustements de Gumbel sur les maxima mensuels des pluies journalières	104
58	Quantiles des maxima mensuels des pluies journalières de période de retour 2 ans	104
59	Quantiles des maxima mensuels des pluies journalières de période de retour 3 ans	105
60	Quantiles des maxima mensuels des pluies journalières de période de retour 5 ans	105
61	Quantiles des maxima mensuels des pluies journalières de période de retour 10 ans	105
62	Quantiles des maxima mensuels des pluies journalières de période de retour 20 ans	106
63	Quantiles des maxima mensuels des pluies journalières de période de retour 50 ans	106
64	Quantiles des maxima mensuels des pluies journalières de période de retour 100 ans	106
65	Caractéristiques du bassin de la Solre	112
66	Carte géologique schématique et principaux équipements du bassin de la Solre	116
67	Indices et caractéristiques de quelques captages et puits implantés sur les synclinaux carbonifère du bassin de la Solre	117
68	Coupe géologique schématique Nord-Sud du bassin de la Solre	117
69	Paramètres et quantiles des ajustements de Gauss sur les pluies annuelles à Maubeuge, Colleret, Eccles, Sars-Poteries et Dimont de 1963 à 1984	120
70	Corrélations mensuelles entre les stations pluviométriques du bassin de la Solre.	121
71	Ajustement de Gumbel sur les maxima mensuels des pluies de 30 minutes enregistrées à Colleret de 1976 à 1985	128
72	Ajustement de Gumbel sur les maxima mensuels des pluies de 24 heures enregistrées à Colleret de 1976 à 1985.	129
73	Paramètres des ajustements de Gumbel sur les maxima annuels des pluies de 30 minutes à 24 heures	130
74	Quantiles des maxima annuels des pluies de 30 minutes à 24 heures à Colleret	130
75	Ajustement de Gumbel sur les maxima mensuels des pluies d'"été" de 30 minutes enregistrées à Colleret de 1976 à 1985	132
76	Ajustement de Gumbel sur les maxima mensuels des pluies d'"hiver" de 30 minutes enregistrées à Colleret de 1976 à 1985	133
77	Paramètres des ajustements sur les maxima d'"été" des pluies de 30 minutes à 24 heures à Colleret	134
78	Quantiles des maxima d'"été" des pluies de 30 minutes à 24 heures à Colleret	134
79	Paramètres des ajustements sur les maxima d'"hiver" des pluies de 30 minutes à 24 heures à Colleret	135
80	Quantiles des maxima d'"hiver" des pluies de 30 minutes à 24 heures à Colleret	135

81	Ajustement des quantiles des maxima des pluies d'été de 30 minutes à 24 heures à Colleret de 1976 à 1985 par une loi de Montana	138
82	Ajustement des quantiles des maxima des pluies d'hiver de 30 minutes à 24 heures à Colleret de 1976 à 1985 par une loi de Montana	138
83	Ajustement des coefficients des lois de Montana généralisée (été et hiver)	140
84	Jaugeages effectués à la station de Ferrière-la-Grande sur la Solre.	145
85	Courbe de tarage de la Solre à Ferrière-la-Grande	146
86	Écoulement annuel en cinq stations du bassin de la Sambre	148
87	Évolution comparée de la lame écoulée et de la pluviométrie annuelle	149
88	Évolution conjointe de l'écoulement mensuel et de la pluie mensuelle sur le bassin de la Solre de 1976 à 1984	151
89	Évolution mensuelle de la lame précipitée et écoulée sur le bassin de la Solre sur l'année moyenne.	151
90	Débits caractéristiques moyens de la Solre à Ferrière-la-Grande	152
91	Tracé de l'ajustement de Gauss sur les modules annuels de la Solre à Ferrière-la-Grande de 1973 à 1984	153
92	Paramètres et quantiles de l'ajustement de Gauss sur les modules annuels de la Solre à Ferrière-la-Grande de 1973 à 1984	153
93	Paramètres et quantiles des ajustements de Galton sur les débits moyens mensuels de la Solre de 1973 à 1984	154
94	Bilans annuels 1976 à 1978 sur le bassin de la Solre	158
95	Bilans annuels 1979 à 1981 sur le bassin de la Solre	159
96	Bilans annuels 1982 à 1984 sur le bassin de la Solre	160
97	Variation de l'ETR et de l'excédent en fonction de la RFU max choisie.	162
98	Valeurs des ETR annuelles calculées par les méthodes de Thornthwaite, de Turc et de Coutagne.	164
99	Variables d'étiage	168
100	Exemple d'ajustement de Gumbel sur les minima annuels des débits moyens sur 3 jours	172
101	Résultats des ajustements de Gumbel sur les variables d'étiage	173
102	Dates de début et de fin d'étiage pour les seuils de 4 l/s/km ² et de 5 l/s/km ²	174
103	Ajustement de Gauss sur les dates de début et de fin d'étiage pour un seuil de 4 l/s/km ²	175
104	Ajustement de Gauss sur les dates de début et de fin d'étiage pour un seuil de 5 l/s/km ²	176
105	Dates de début et de fin d'étiage ayant la probabilité p d'être dépassées	177
106	Répartition mensuelle des crues	180
107	Ajustement des débits maxima instantanés de la Solre par la méthode du renouvellement	184
108	Tracé de l'ajustement de Galton sur les débits maxima instantanés annuels de la Solre à Ferrière-la-Grande de 1973 à 1984	187
109	Tracé de l'ajustement de Fréchet sur les débits maxima instantanés annuels de la Solre à Ferrière-la-Grande de 1973 à 1984	189
110	Quantiles et intervalles de confiance à 70 % calculés sur les débits maxima journaliers et instantanés de la Solre de 1973 à 1984	190
111	Corrélation des débits maxima instantanés observés à Ferrière-la-Grande (Solre) et à Etroeungt (Helpe Mineure), de 1973 à 1984	193
112	Schéma de fonctionnement du modèle GR2	198
113	Simulation des débits moyens journaliers de l'année 1980	210
114	Simulation des débits moyens journaliers de l'année 1981	211
115	Simulation des débits moyens journaliers de l'année 1982	212
116	Simulation des débits moyens journaliers de l'année 1983	213
117	Simulation des débits moyens journaliers de l'année 1984	214
118	Caractéristiques des crues de la Solre à Ferrière-la-Grande	220
119	Crue du 13/2/76	221
120	Crue du 14/3/80	222
121	Crue du 21/7/80	223
122	Crue du 4/1/81	224
123	Crue du 15/1/81	225
124	Crue du 10/3/81	226
125	Crue du 4/6/81	227
126	Crue du 29/6/81	228
127	Crue du 21/10/81	229
128	Crue du 23/5/82	230
129	Crue du 1/2/83	231

130	Crue du 25/3/83	232
131	Crue du 14/5/83	233
132	Crue du 31/3/86	234
133	Comparaison des hydrogrammes de crue enregistrés à Ferrière-la-Grande sur la Solre et à Etroeungt sur l'Helpe mineure : crue du 13/2/76	237
134	Comparaison des hydrogrammes de crue enregistrés à Ferrière-la-Grande sur la Solre et à Etroeungt sur l'Helpe mineure : crue du 15/1/81	238
135	Comparaison des hydrogrammes de crue enregistrés à Ferrière-la-Grande sur la Solre et à Etroeungt sur l'Helpe mineure : crue du 10/3/81	239
136	Comparaison des hydrogrammes de crue enregistrés à Ferrière-la-Grande sur la Solre et à Etroeungt sur l'Helpe mineure : crue du 4/6/81	240
137	Comparaison des hydrogrammes de crue enregistrés à Ferrière-la-Grande sur la Solre et à Etroeungt sur l'Helpe mineure : crue du 23/5/82	241
138	Comparaison des hydrogrammes de crue enregistrés à Ferrière-la-Grande sur la Solre et à Etroeungt sur l'Helpe mineure : crue du 25/3/83	242
139	Comparaison des hydrogrammes de crue enregistrés à Ferrière-la-Grande sur la Solre et à Etroeungt sur l'Helpe mineure : crue du 31/3/86	243
140	Volumes de crue et comparaison des lames ruisselées et précipitées sur le bassin de la Solre à Ferrière et le bassin de l'Helpe mineure à Etroeungt.	245
141	Carte géologique schématique du bassin versant de l'Helpe mineure à Etroeungt	247
142	Réseau d'alimentation en eau potable de la société eau et force sur le bassin de la Sambre	250
143	Situation et caractéristiques des ouvrages implantés sur le synclinal carbonifère de Ferrière-la-Petite.	251
144	Exhaure sur le bassin de la Solre en millions de m ³	252
145	Comparaison entre les niveaux piézométriques dans les puits et le niveau moyen du plan d'eau de la Solre	253
146	Schéma d'interprétation des effondrements dans le secteur du bois de Morlut.	258

CADRE DE L'ETUDE



L'ensemble du travail présenté ici s'inscrit dans le cadre d'une convention entre l'Université des Sciences et Techniques de Lille et le Syndicat intercommunal du Bassin de la Sambre (S.I.B.S) à Maubeuge. Assurant la maîtrise de l'ouvrage, le S.I.B.S, outre sa participation financière propre, a coordonné les financements des organismes et Services d'Etat co-contractants (Société Eau et Force, Direction Régionale de la Navigation, Service Hydrologique Centralisateur, Service Régional d'Aménagement des Eaux du Nord - Pas-de-Calais et Agence de l'Eau Artois-Picardie).

1 TRAVAUX ANTERIEURS

Dans le cadre de l'Inventaire des Ressources Hydrauliques, le B.R.G.M a présenté plusieurs travaux se rapportant à des préoccupations d'ordre hydrogéologique : Dassonville et Plat (1968), Clément (1970), Caudron et Clément (1972) - Philippart (1974).

Ultérieurement, Delporte (1979) a présenté à l'Université des Sciences et Techniques de Lille une thèse sur le traitement de l'information hydrogéologique, socio-économique et économique appliqué au bassin de la Sambre.

On citera également les études ultérieures sur la circulation, la vulnérabilité et les modalités de l'écoulement souterrain dans l'Avesnois : Carlier et Crampon (1981 et 1983), Crampon et al. (1983), Verbeke (1981), Droz (1982), Lempereur (1983), Carlier (1983), Carlier et al. (1983), Carlier et Crampon (1986), Crampon et al. (1987).

On signalera enfin des études menées sur le régime et la modélisation des débits de la Sambre belge à Namur, au point de confluence avec la Meuse (Wémans, 1984 et 1985).

Les renseignements apportés par ces études ont constitué une solide base de réflexion. D'autres sont en cours de réalisation, notamment la modélisation des crues de la Sambre.

2 CONTENU

La diversité des objectifs poursuivis par les organismes ayant soutenu cette étude explique l'étendue du thème traité qui recouvre presque tous les aspects de l'hydrologie tout en utilisant les caractères géologiques et hydrogéologiques du bassin versant.

Le travail présenté ici complète les études antérieures mais s'attache davantage au contexte climatique et hydrologique en analysant quantitativement et statistiquement les grandeurs pluviométriques et débitométriques, moyennes et extrêmes. Il comprend :

- . une étude pluviométrique complète du bassin de la Sambre
- . une étude pluviométrique et hydrologique du sous-bassin de la Solre

L'étude climatologique du bassin de la Sambre comprend plusieurs volets :

- recueil des données pluviométriques manquantes ;
- collecte des données de température ;
- mise à jour des données pluviométriques existantes ;
- critique des données climatologiques sur l'ensemble du bassin :
détection des erreurs accidentelles et systématiques, vérification de
l'homogénéité des valeurs moyennes ;
- saisie informatique des données ;
- étude pluviométrique complète à l'échelle annuelle, mensuelle et journalière :

- . Sélection des valeurs moyennes annuelles et mensuelles
- . Sélection des pluies maximales journalières
- . Critique des données par double-masses et corrélations
- . Calcul de la lame moyenne annuelle précipitée
- . Etude statistique des pluies annuelles
- . Etude statistique des pluies mensuelles
- . Etude statistique des pluies maximales journalières

L'étude pluviographique et hydrologique du bassin de la Solre utilise les données recueillies

sur le bassin de la Solre par le Service Régional d'Aménagement des Eaux du Nord - Pas-de-Calais.
Elle comprend également plusieurs volets :

- Dépouillement des données pluviographiques de la station de Colleret
au pas de temps fixe de 30 minutes ;
- Saisie informatique de ces données ;
- Etablissement de la relation intensité-durée-fréquence à Colleret ;
- Régime annuel et mensuel des débits, rapports entre précipitations
moyennes et débits ;
- Débits classés et débits caractéristiques de la Solre ;
- Ajustement statistique des débits moyens annuels et mensuels ;
- Evapotranspiration, bilan annuel et pluriannuel
au pas de temps mensuel ;
- Etude d'étiage : débits probables d'étiage,
dates de début et de fin d'étiage, durée d'étiage ;
- Analyse statistique des débits maxima journaliers et instantanés ;
- Dépouillement et saisie informatique des hydrogrammes de crue
et des averses concomitantes au pas de temps de deux heures ;
- Examen de la liaison pluie-débit en vue de la préparation d'un modèle de prévision ;
- Liaisons eaux de surface - eaux souterraines au niveau des zones fracturées
du bassin : étude géologique, analyse piézométrique, pertes, protection des captages.

3 INTERET

Ce travail est une collaboration à la mise en place d'une gestion optimale des ressources en eau du bassin de la Sambre. Celle-ci doit en effet satisfaire à des exigences nombreuses et parfois contradictoires.

Parmi celles-ci, on peut citer :

- Les besoins de la navigation sur la Sambre : la Sambre est un couloir fluvial important pour le commerce entre la France et la Belgique.
- Le dimensionnement correct des ouvrages de génie civil

- L'exploitation des ressources en eau souterraine : Les terrains calcaires de l'ère primaire sont largement fracturés et constituent des aquifères importants. Les sociétés chargées de l'alimentation en eau potable y puisent la quasi-totalité de leurs besoins. Ces aquifères sont libres donc vulnérables à la pollution par les eaux superficielles.

- L'exploitation de la ressource en eau superficielle : une industrie ,largement implantée dans les principales vallées du bassin, puise dans les eaux de surface. Ces exigences d'une alimentation continue en eau industrielle, associées à celles de l'aménagement touristique et des sociétés de pêche, nécessitent une bonne connaissance de cette ressource, notamment en période d'étiage. La sauvegarde de la qualité de ces eaux superficielles nécessite également une meilleure connaissance des débits d'étiage.

- La protection de la population et des infrastructures industrielles contre les inondations des vallées de la Sambre et de ses affluents : le bassin de la Sambre est périodiquement soumis à des inondations qui causent d'importants dégâts. La protection contre ces crues passe nécessairement par une meilleure connaissance du fonctionnement hydraulique des bassins versants et par une délimitation précise des zones inondables. L'information dégagée doit permettre d'améliorer le plan d'annonce de crue.

PREMIERE PARTIE

**PRESENTATION
du BASSIN de la SAMBRE**

CHAPITRE 1 : CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

1.1. LOCALISATION

Le bassin de la Sambre française est situé au Sud-Est du département du Nord (document 1). Il recouvre une bonne partie de l'arrondissement d'Avesnes-sur-helpe, l'extrême Sud-Est de l'arrondissement de Cambrai et empiète légèrement au Sud sur le département de l'Aisne et à l'Est sur le territoire belge.

Il correspond principalement à deux zones géographiques :

. Le bassin industriel de la Sambre qui comprend les cantons de Berlaimont, Hautmont, Maubeuge Nord et Sud.

. L'Avesnois (région d'Avesnes-Fourmies) qui est formé des cantons d'Avesnes-Nord et Sud, Landrecies, Solre-le-Château et Trélon.

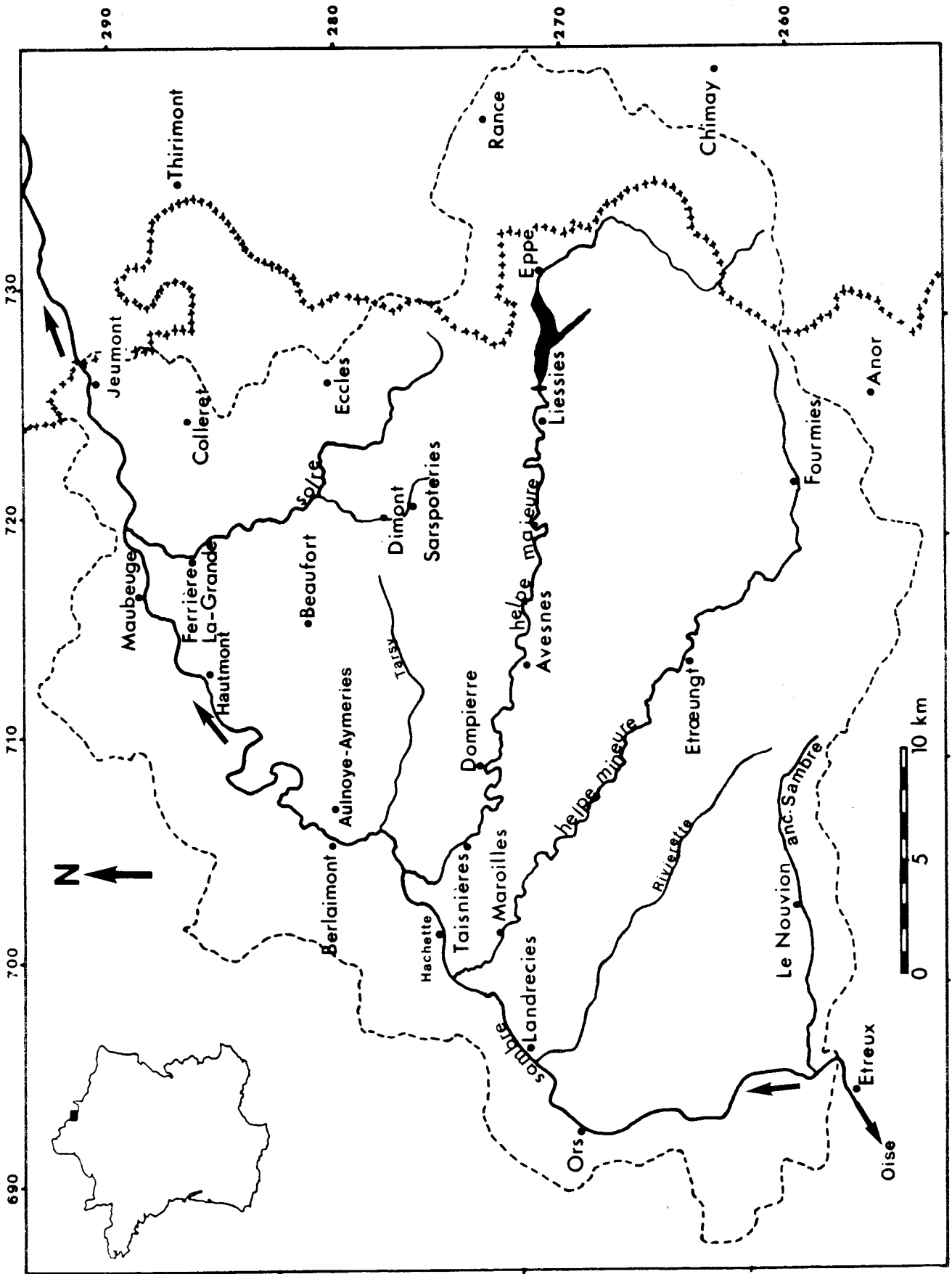
Les limites Nord et Ouest, séparant le bassin de la Sambre de celui de l'Escaut, cheminent entre 140 et 160 mètres d'altitude et sont très proches de la Sambre.

Vers le Sud, la limite de séparation entre les bassins de la Sambre et de l'Oise oscille entre 220 et 260 mètres d'altitude.

Le canal de la Sambre constitue ainsi une artère permettant les échanges entre la Belgique et la région parisienne.

Son bassin hydrographique a une superficie de 2740 km² environ, dont 1254 en France.

L'étude présentée ici concerne la partie française du bassin versant de la Sambre, d'Etreux vers Jeumont, à la frontière belge. Ainsi définie, la Sambre française recouvre en partie l'Avesnois et le nord de la Thiérache.



1 : Géographie et hydrographie du bassin de la Sambre

1.2. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES

1.2.1. Forme et relief

La Sambre et ses affluents ont modelé de larges vallées en pente douce séparées par des collines peu élevées.

La forme du bassin versant de la Sambre française est assez compacte mais la vallée présente une forte dissymétrie : un très vaste versant d'inclinaison générale Nord-Ouest en rive droite (pente moyenne inférieure à 1%), et un versant de rive gauche très réduit et plus incliné (pente moyenne : 4,5%).

La Sambre reçoit donc par sa rive droite des eaux qui transitent par de longs affluents, dont les temps de concentration élevés se superposent au temps de concentration propre de la Sambre.

La vallée de la Sambre est assez large mais son lit mineur est assez étroit, ce qui favorise les débordements. Le lit majeur recueille les eaux d'inondation, plus particulièrement dans la zone des prés d'Hachette immédiatement en aval du confluent des Helpes mais aussi dans la basse vallée industrielle, ce qui occasionne d'importants dégâts.

1.2.2. Hydrographie

L'ancienne Sambre prend sa source à la limite Sud-Est du département, à l'Est de la forêt du Nouvion-en-Thiérache (document 1). Elle s'écoule, par l'Ouest et le Nord, vers Landrecies. Elle s'oriente ensuite vers le Nord-Est, arrose Berlaimont, Aulnoye-Aymeries, Hautmont et Maubeuge puis franchit la frontière Belge en aval de Jeumont ; à Namur, où elle mêle ses eaux à celles de la Meuse, elle est à 180 kilomètres de sa source.

Les travaux de canalisation de la Sambre eurent lieu de 1824 à 1836. Un canal reliant la Sambre à l'Oise fut construit à partir de Landrecies et l'ancienne Sambre fût détournée ; l'inversion du sens du courant se produit donc au Nord d'Etreux (Aisne) et définit ainsi les limites Sud du bassin versant.

En rive droite française, la Sambre reçoit la Riviérette, l'Helpe Mineure, l'Helpe Majeure , la Tarsy et la Solre .

Les limites du bassin versant français se trouvant très proches de la rive gauche, on n'y trouve pas d'affluents à débit notable.

Les deux Helpes drainent à elles-seules une surface correspondant à la moitié de la surface du

bassin de la Sambre française. Les confluents des deux Helpes avec la Sambre ne sont séparés que de 5 kms, ce qui apporte des volumes d'eau importants dans ce secteur. Après son confluent avec l'Helpe Majeure, la Sambre aura drainé 65 % de la surface du bassin.

La Sambre française s'écoule de 137 à 120 mètres d'altitude sur une longueur de 73 kilomètres, soit une pente moyenne de 0,2 pour mille.

Pour les besoins de la navigation, le tirant d'eau est fixé à 1,80 mètres (2,20 à partir de Hautmont), ce qui correspond à des chargements maxima de 350 tonnes, et la vitesse du courant est diminuée en rachetant la pente par des barrages à poutrelles auxquels sont associées neuf écluses de Landrecies à la frontière.

Cette faible pente induit une rivière dont l'allure paisible cache un caractère torrentiel ; en cas de fortes précipitations, les affluents apportent des masses d'eau considérables qui font monter rapidement les débits au delà de 100 m³/seconde à la station de Maubeuge. Pour une cote moyenne à l'échelle de Maubeuge de 0,17 m, la cote d'alerte est de 1,77 m ; de nombreuses submersions ont été observées : 3,54 en 1926, 3,29 m en 1930, 4,28 m en 1956, 4,73 m en 1961, 3,26 m en 1963, 3,49 m en 1980. Outre les dégâts causés chez les riverains, ces crues dégradent les berges et bloquent la navigation. Ce comportement a justifié la mise en place d'un service d'annonce de crues.

1.2.3. Climat

Le climat est de type semi-continentale caractérisé par une pluviométrie plus forte (830 mm environ) et une température plus froide (moyenne annuelle : 9 degrés C.) que le reste du département. Le nombre moyen de jours de pluie est de 175. Les vents dominants sont de secteur Sud à Sud-Ouest.

1.2.4. Couvert végétal

Les forêts couvrent environ 14% de la surface totale du bassin et sont essentiellement situées en rive gauche de la Sambre (forêt de Mormal) et sur les hauteurs du bassin de la Solre et de l'Helpe majeure. Mis à part la basse vallée de la Sambre, la région est à vocation pastorale, la prairie permanente, bordée de haies, étant l'unité foncière la plus répandue.

On note que les études de télédétection par satellites (Landsat et NOAA) permettent de déceler les changements dans l'utilisation des sols ; on peut citer, à ce sujet, l'étude de Coudoux (1985) sur l'Avesnois-Thiérache vu des satellites.

1.2.5. Population et emploi

(C.C.I.Avesnes, 1987)

D'après le recensement de 1982, on peut estimer que la population du bassin est d'environ deux cent dix mille habitants, soit une densité de 167 habitants au km². Les communes les plus importantes sont celles de Maubeuge (36000 h), Hautmont (18500 h), Fourmies (15200 h), Jeumont (11700 h), Aulnoye-Aymeries (10000 h), Louvroil (8200 h), Avesnes (6500 h) et Ferrière-la-Grande (5600 h).

Les secteurs primaire, secondaire et tertiaire représentent respectivement 7, 49 et 44 % du total des emplois.

1.2.6. Industrie

Le bassin industriel de la Sambre se caractérise par la présence de grands établissements concentrés dans la basse vallée de la Sambre. Les branches d'activité sont celles de la fonderie (Usines et Aciéries de Sambre et Meuse), de la métallurgie (Vallourec Industries à Aulnoye), de la chaudronnerie (Spie-Batignolles à Ferrière-la-Grande), de la construction électrique et électronique (Jeumont-Schneider), de l'automobile (Maubeuge Construction Automobile), du verre (Boussois SA) et des matériaux de construction et céramique (Desvres à Maubeuge, Landrecies et Boussois).

L'Avesnois réalise un équilibre entre les zones herbagères et les zones à vocation industrielle ; il comprend des petites et moyennes entreprises du textile, de la métallurgie et du secteur agro-alimentaire (laiteries-fromageries).

De nombreuses carrières exploitant le calcaire carbonifère comme pierre à chaux ou granulats ont fermé au cours des dernières années mais certaines d'entre elles restent actives (carrière C.B.S à Limont-Fontaine et C.C.M à Wallers-Trélon).

L'ensemble de ces industries utilise la voie d'eau comme moyen de transport et les matériaux transportés sont essentiellement des matières premières : sables, dolomies, calcaires (verrerie), cuivre, plomb, argiles, sables (céramique) ainsi que des produits semi-finis pour la métallurgie et des produits agricoles.

Dans les années cinquante, l'ensemble de ces industries représentait un important complexe de la région Nord-Pas-de-Calais. A partir de 1964, le déclin s'est amorcé et le bassin vit actuellement une crise industrielle difficile. Malgré la baisse de l'activité industrielle et le faible gabarit du canal (péniches inférieures à 350 tonnes de charge), la Sambre reste une voie fluviale importante pour le transit des

marchandises entre la Belgique et la région parisienne.

La qualité du trafic fluvial et les contraintes de la navigation se superposent à celles de l'évacuation des eaux. De nombreuses entreprises sont implantées "au fil de l'eau" et sont particulièrement exposées aux inondations.

N.B : Pour une vue d'ensemble de la géographie économique du bassin de la Sambre, on se reportera utilement à l'étude de Loiseau (1977) et aux publications du service Etudes-Documentation de la chambre de commerce et d'industrie d'Avesnes.

CHAPITRE 2 : CONTEXTE GEOLOGIQUE

Les renseignements concernant la géologie du bassin de la Sambre proviennent essentiellement de la consultation des cartes géologiques au 1/50 000 du Quesnoy et de Maubeuge (Nord du bassin), d'Avesnes, Trélon, Guise et Hirson (Sud du bassin).

La Géologie du secteur a été notamment étudiée par Carpentier (1913), Delattre et al. (1967), Bouroz, (1969) et Conil (1973).

Les terrains primaires du bassin de la Sambre forment les derniers affleurements de la terminaison occidentale de la partie centrale du synclinorium de Dinant, en Ardenne (documents 2 a et 2 b).

2.1. CADRE PALEOGEOGRAPHIQUE ET TECTONIQUE GENERAL

La paléogéographie est marquée par la transgression dévonienne dont le bassin de sédimentation fût faillé et plissé par orogénèse hercynienne. Les reliefs ainsi formés ont ensuite été pénéplanés, ce qui a permis aux transgressions crétacées puis tertiaires de déposer leurs sédiments en discordance sur le Primaire.

La transgression dévonienne s'effectue par le Sud et les dépôts sont discordants sur le socle calédonien (Cambrien à Silurien).

Au Dévonien inférieur, la transgression ne dépasse pas la région du futur synclinal de Namur et la sédimentation a un caractère lagunaire marqué. Au Couvinien, la mer progresse vers le Nord et notamment sur le Condroz et le futur synclinal de Namur mais la sédimentation reste de type littoral, le milieu marin franc s'étendant vers le Sud. Au Famennien, la sédimentation prend un caractère détritique qui succède au régime récifal du Frasnien, avec des dépôts moins épais au Nord qu'au Sud, caractérisés par la présence de grés grossiers à ripple-marks et à stratification entrecroisée. C'est le signe d'une certaine surrection du fond marin où l'on peut voir l'influence de la phase tectonique bretonne de orogénèse hercynienne. La transgression marine reprend au Strunien. Vers la fin du Viséen, une déformation du fond marin occasionne la formation d'une brèche intraformationnelle qui apparaît due à l'influence de la phase sudète de orogénèse hercynienne.

Au Namurien et surtout au Westphalien, l'Ardenne est presque totalement soustraite à la sédimentation marine et il ne subsiste qu'un bassin de type paralique dans la région du futur synclinal de Namur dont la sédimentation fournit les niveaux productifs du Westphalien (Houiller).

A la fin du Westphalien, l'ensemble de la série primaire est déformé par la phase asturienne, ce qui crée les synclinaux de Namur et de Dinant séparés par l'anticlinal du Condroz. L'intensification de la compression provoque le charriage de l'ensemble synclinal de Dinant-anticlinal du Condroz sur le synclinal de Namur, le charriage s'opérant sur une centaine de kilomètres par la grande faille du Midi.

Les reliefs produits par les plissements hercyniens sont ensuite réduits à l'état de pénéplaine et une karstification s'opère à la faveur de cette période d'émersion. Des dépôts continentaux, wealdiens, sont conservés dans des poches de dissolution ou dans des dépressions du socle primaire.

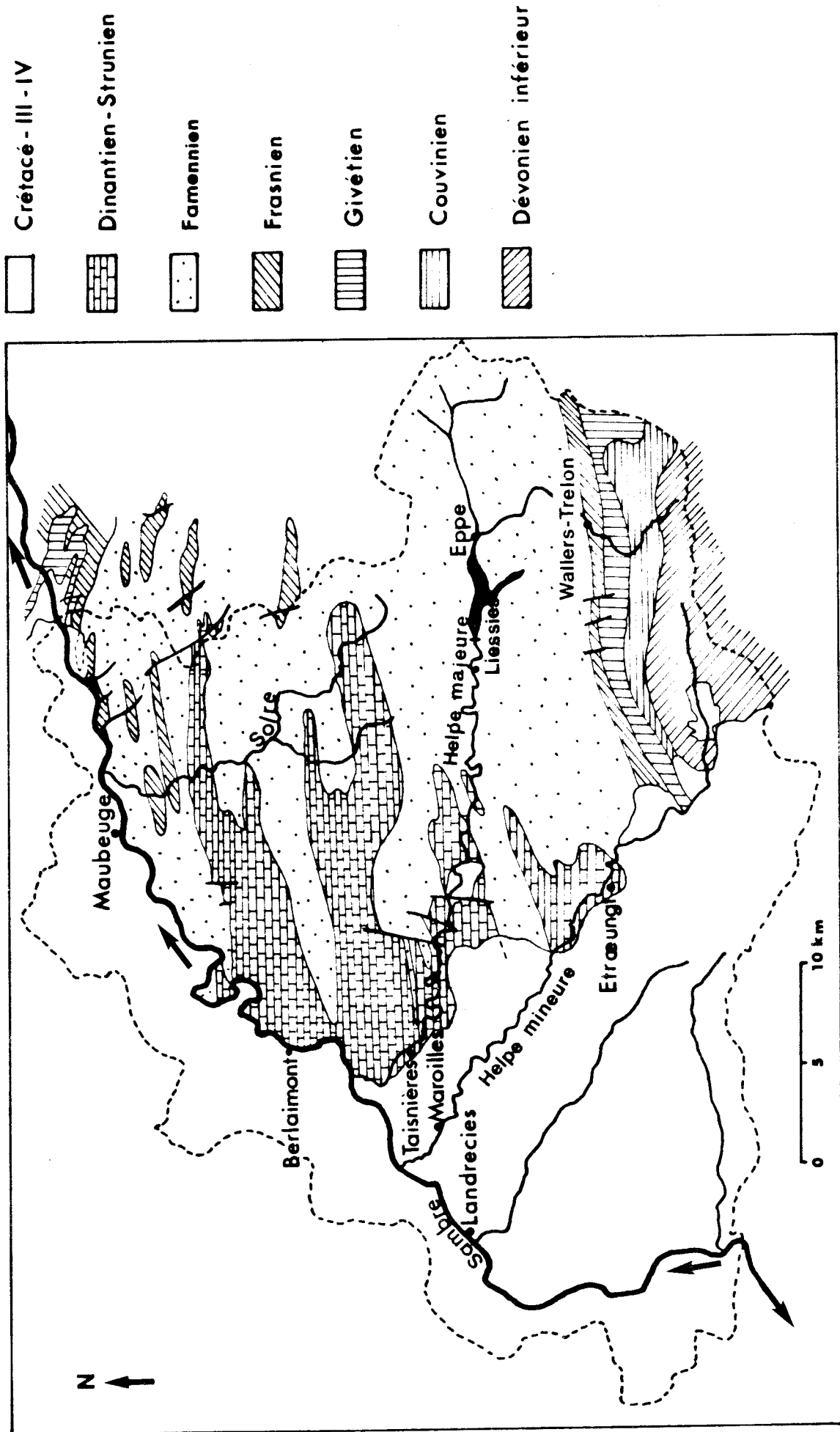
A l'Ouest, toute la pénéplaine est ensuite recouverte par la transgression crétacée qui débute au Cénomaniens. Ces nouvelles formations reposent alors en discordance sur les couches plissées et érodées du Primaire et resteront en position quasi-horizontale.

Après une régression vers la fin du Crétacé, le pays a connu un épisode continental marqué par les dépôts vraisemblablement lacustres ou fluviaux du Landénien. La transgression marine du Tertiaire s'est produite pendant l'Yprésien supérieur (Cuisien) et la sédimentation marine persiste pendant le Lutétien dont on observe des traces dans les limons quaternaires qui recouvriront plus tard ces formations.

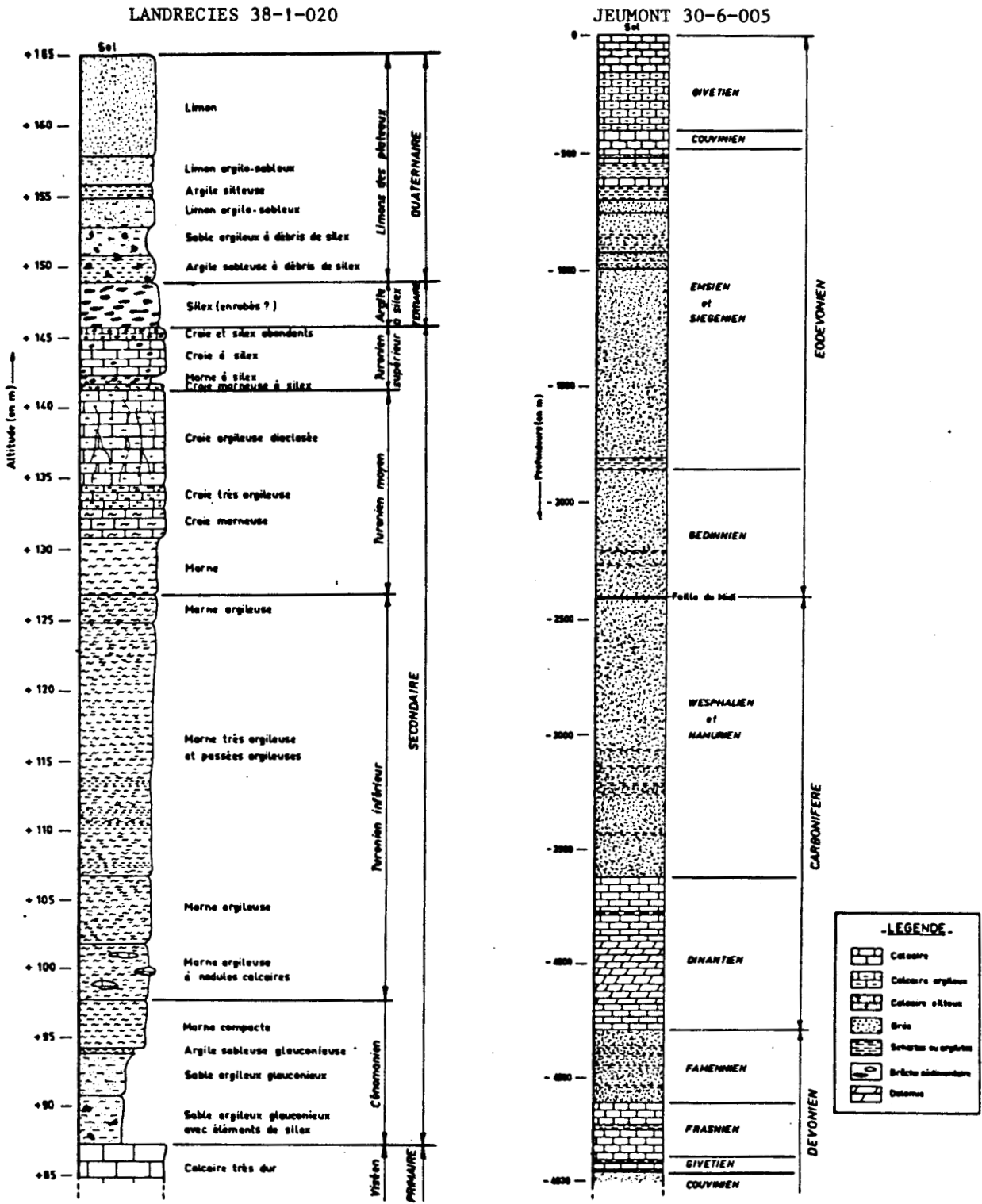
2.2. LITHOSTRATIGRAPHIE LOCALE

Les éléments ayant permis de reconstituer les anciens milieux de sédimentation sont tirés de l'étude des faciès des terrains. Comme on l'a vu précédemment, les terrains dévoniens du bassin de la Sambre appartiennent au synclinal de Dinant et l'on se trouve ici bien au Sud de la faille du Midi (document 2b). On trouvera ci-dessous le détail des terrains composant le sous-sol du bassin de la Sambre.

Les affleurements des différents terrains rencontrés sont présentés sur le schéma géologique du document 2 c. Les deux coupes lithologiques du document 3 résument les détails stratigraphiques présentés ci-dessous.



2 c : Schéma géologique du bassin de la Sambre (Crampon, 1987, modifié). Le bassin comprend des terrains primaires (Dévonien à Carbonifère inférieur) plissés et érodés, recouverts en discordance par des terrains crétacés, tertiaires et quaternaires (en pointillés : limite du bassin versant).



3 : Exemples de coupes lithostratigraphiques :
(d'après Delporte, 1979)

- A l'Ouest (Landrecies), la coupe traverse en premier des formations quaternaires, tertiaires et secondaires.

- A l'Est du bassin (Jeumont), la coupe débute par des formations primaires.

2.2.1. Les terrains primaires

DEVONIEN

Gédinnien : L'assise des "Psammites de Cauderlot" (Nord du bassin) comprend des quartzites gris et verts et des schistes plus ou moins gréseux. Elle est interrompue, à diverses profondeurs, par la faille du midi.

Siégénien : La partie inférieure comprend des quartzites zonaires, des grés et des schistes. La partie supérieure est composée de grés rouges, de grés micacés et de grés feldspathiques.

Emsien : Il s'agit d'un ensemble de schistes verts ou rouge lie-de-vin, de grés quartzitiques et de poudingues.

Couvinien : Sa partie inférieure contient des poudingues à galets de quartz et de quartzites puis des grés rougeâtres et des schistes rouges passant vers les horizons supérieurs à des grauwackes crinoïdiques et à des calcschistes et calcaires gréseux.

Givétien : Il s'agit de calcaire compact noir ou bleu foncé en gros bancs métriques montrant vers le sommet des amandes ou des veines de calcite .

Frasnien : Il débute par des calcaires noirs noduleux et des calcschistes (assise de Fromelennes), se poursuit par des schistes verts (assise de Bossières), des calcaires construits à algues (biostromes de l'assise de Frasnes) et se termine par les schistes verts et les schistes fins de l'assise de Matagne et Franc-Waret. L'assise de Fromelennes est difficile à distinguer du Givétien sous-jacent, la macrofaune montre des caractères frasniens et givétiens, la microfaune est givétienne et la lithologie est très semblable à celle du Givétien (notice de la carte géologique au 1/50 000 de Trélon). L'assise de Fromelennes devrait donc être rattachée au Givétien supérieur.

Famennien : il est d'abord constitué d'une assise inférieure de schistes fins, verts, puis d'un faciès schisteux plus ou moins gréseux passant à des grés micacés gréseux en petits bancs puis en gros bancs. Le Famennien supérieur débute par des calcaires gréseux, se poursuit par des schistes à nodules calcaires et se termine par des schistes calcaires et des grés très micacés, en petits bancs.

CARBONIFERE

Strunien : Il s'agit d'un ensemble de couches de passage entre le régime schisto-gréseux du Dévonien et le régime calcaire du Dinantien. C'est la "Zone d'Etroeungt" de J.Gosselet, formée d'une alternance de schistes et de psammites dans lesquels s'intercalent progressivement des bancs de schistes calcaireux puis des calcaires purs crinoïdiques devenant rapidement prédominants.

Tournaisien : Il comprend toute la série des assises bien connues de l'Avesnois : calcaire noir d'Avesnelles, schistes d'Avesnelles, calcaire bleu à phtanites et dolomie crinoïdique tournaïenne, dite du camp de César.

Viséen inférieur : il comprend deux sous-assises dont l'inférieure présente un faciès de calcaire vaseux dans le Nord, avec le calcaire noir de Bachant, et un faciès plus côtier dans le sud, avec un complexe de calcaire bréchoïde et oolithique, de calcaires dolomitiques ou de dolomies massives. La sous-assise supérieure est faite de calcaires gris noir alternant avec une dolomie grise.

Viséen moyen : il est constitué du calcaire de Fontaine .

Viséen supérieur : il débute par le calcaire bréchiforme gris-bleu de Limont qui comporte à sa base le fameux "banc d'or", ainsi nommé de par sa richesse en pyrite, et qui se poursuit par le calcaire bleu-noir de Saint Hilaire . Le sommet est caractérisé par les schistes de Queue-Noir-Jean, dont les lits riches en anthracite annoncent le passage au Namurien.

Namurien : On ne le rencontre que dans deux petits bassins : ceux de Berlaimont et de Taisnières composés de grés quartzeux grisâtres et de schistes fins, noirs, à niveaux charbonneux.

2.2.2. Les terrains secondaires

Wealdien : Il s'agit d'une formation continentale, sans fossiles, qui affleure sur le bord de la vallée de la Sambre, à Boussois. Elle contient des argiles plastiques blanches ou gris-brun contenant des amas de gypse et du minerai de fer, alternant avec des sables blancs et des graviers avec galets arrondis de quartz et de grés dévoniens.

CRETACE

Cénomaniens : Il débute par un conglomérat de transgression et se prolonge par des marnes argileuses et sableuses très glauconieuses. Sa partie supérieure est essentiellement composée d'une craie marneuse blanchâtre et compacte.

Turonien : Il affleure essentiellement dans la partie ouest du bassin . Sa partie inférieure, marneuse, apparaît au fond des vallons ; la partie moyenne est toujours marneuse mais contient des intercalations de bancs de craie marneuse blanche, aquifère auquel font appel les puits des herbagers. Le Turonien supérieur n'existe que dans la partie occidentale du bassin ; il est formé d'une craie franche à gros silex cornus.

2.2.3. Les terrains tertiaires

EOCENE

Landénien : il est formé d'un résidu de décalcification de terrains crétacés connu sous le nom d'argile à silex.

Landénien supérieur : il correspond à l'assise des "Sables du Quesnoy" dont l'appellation recouvre en réalité une formation continentale complexe de sables quartzeux blancs, parfois roux ou franchement rouges comme à Ferrière-la-Petite, de graviers contenant de nombreux silex de la craie. Les sables sont argileux et parfois accompagnés d'argile pure et plastique anciennement utilisée pour poteries (Ferrière-la-Petite).

Yprésien supérieur (Cuisien) : Ce sont des sables marins jaunes, comprenant au sommet des plaquettes de grès blancs fossilifères (petit massif de Clairfayts, au Sud de Solre-le-Château).

Lutétien : il comprend des sables blancs, quartzeux, légèrement glauconieux.

2.2.4. Les terrains quaternaires

Limons des Plateaux : Les plateaux sont recouverts d'un épais dépôt argileux et sableux dont l'épaisseur peut dépasser dix mètres et dont l'origine est en partie attribuable à l'altération sur place des roches sous-jacentes et au ruissellement ainsi qu'à l'action éolienne.

Alluvions : Des alluvions anciennes, formées à leur base de silex arrondis et de galets puis de sables argileux et d'argiles sableuses, occupent les boucles concaves de la vallée de la Sambre. Les alluvions récentes occupent les vallées des affluents de la Sambre. Elles forment le sous-sol horizontal de la vallée de la Sambre, occupé par des prairies inondables ; elles sont composées de limons bruns argileux, pratiquement imperméables et localement de limons argilo-sableux, dont l'épaisseur peut atteindre huit mètres à Catillon.

2.3. TECTONIQUE DU BASSIN

Du point de vue tectonique, on rappelle que le bassin appartient au synclinal de Dinant charrié vers le Nord sur le synclinal de Namur par la faille du Midi. On se trouve donc au sud de la faille du Midi et la tectonique locale est marquée par le modelé de quatre grands ensembles d'axe Est-Ouest qui, par le jeu d'ondulations ultérieures, apparaissent chacun composés d'une alternance d'anticlinaux et de synclinaux et s'individualisent en quatre groupes qui sont, du Nord au Sud :

- Le synclinorium d'Aibes-Pont-sur-Sambre à l'Ouest, à Aibes à l'Est, qui inclut le synclinal de Quartes à St-Rémy-du-Nord, l'anticlinal de Pantignies, le synclinal de Bachant à Ferrière-la-Petite et Aibes dont l'extrémité orientale recoupe le bassin de la Solre et qui se poursuit sur 21 kilomètres de longueur et qui s'ennoie graduellement vers l'ouest, l'anticlinal de Rohué-Fontaine, le synclinal de Berlaimont-Lhoripette-La Marlière, l'anticlinal du Pont-des-Moines à la Rue-des-Esclaves et le synclinal de Limont-Damousies.

- Le synclinorium de Taisnières-en-Thiérache à l'Ouest, à Dimechaux et Solre-le-Château à l'Est, est séparé du précédent par l'anticlinal de Petit-Landrecies et comprend le synclinal de Floursies-Dimechaux, l'anticlinal de Dimont et le synclinal de Taisnières-St-Aubin-Sars-Poteries qui s'allonge à l'affleurement sur plus de 22 kilomètres depuis Taisnières jusqu'au delà de Solre-le-Château.

- Le synclinorium de Dompierre et Cartignies à l'Ouest, à Flaumont-Waudrechies à l'Est. Cet ensemble est séparé du précédent par l'anticlinal de Hugemont et comprend le synclinal de St-Hilaire, l'anticlinal de Château-Gaillard et le synclinal d'Avesnelles.

- Le synclinorium d'Etroeungt-Boulogne-sur-Helpe à l'Ouest, à Fourmanoir à l'Est est séparé du précédent par le grand anticlinal de Haut-Lieu et inclut le synclinal de Fourmanoir, l'ondulation anticlinale du Bosquet, le synclinal de Cantraine, l'anticlinal de Quatre-Maisons et le synclinal d'Etroeungt.

Si la direction de ces plis s'opère bien d'Est en Ouest, des ondes transverses recoupent cette direction et produisent des mouvements d'ennoyage et de surélévation des axes de plis (Carlier, 1983) ainsi que des failles transverses dont certaines ont été décelées à Limont-Fontaine, Recquignies, Rocq, Marpent, Beaumont, Avesnes, St-Hilaire et Bérelles.

A l'extrême Sud-Est du bassin, le monoclinal de Trélon présente des bancs à pendage 30° à 40° Nord fracturés et déplacés par un réseau de failles verticales de direction N 160°-170 °.

Les dépôts transgressifs discordants, crétacés et tertiaires, sont surtout présents au Nord de la Sambre et au Sud-Est d'une ligne passant par Taisnières et Etroeungt ; vers le Nord-Est, on trouve de rares témoins de la transgression crétacée (au niveau de Clermont, sur la partie belge du bassin) ; les témoins de la transgression tertiaire sont plus nombreux et forment quelques buttes éocènes sur le plateau primaire en majeure partie recouvertes elles-mêmes par des limons quaternaires

CHAPITRE 3 : CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE ET PRINCIPAUX AQUIFERES

La nature et l'épaisseur des terrains primaires montrent que ceux-ci peuvent constituer localement de vastes pièges pour les eaux d'infiltration, les terrains déposés ultérieurement ne formant que des aquifères de moindre importance, on distingue ainsi :

- L'aquifère des calcaires du Dévonien moyen (Givétien surtout mais aussi Couvinien supérieur parfois suffisamment calcaire pour être aquifère comme en témoigne l'exurgence du Moulin de Bourges, à 2 km au Sud de Wallers-Trélon) et du Dévonien supérieur (Frasnien). Ces terrains offrent une porosité faible mais la fracturation et la karstification induisent une perméabilité en grand favorable au développement d'une nappe importante assez bien exploitée.
- L'aquifère du Famennien schisteux se limite à la partie supérieure de la formation, fissurée et altérée, et contient donc une nappe limitée en profondeur mais étendue.
- L'aquifère du Dinantien dont les calcaires tournaisiens et viséens sont épais, bien fracturés et karstifiés. La circulation des eaux y est aisée, ce qui permet une forte exploitation de cette nappe pour l'alimentation des communes en eau potable.
- L'aquifère du Turonien : Les bancs calcaires contenus dans les marnes turoniennes permettent le développement de nappes à leur niveau.
- L'aquifère des sables tertiaires et des limons des plateaux : une nappe de faible importance et de faible perméabilité existe à la base des sables tertiaires ou des limons lorsqu'ils reposent sur l'argile à silex, les marnes turoniennes ou le Dévonien schisteux.
- L'aquifère des alluvions n'existe en réalité que dans la vallée de la Sambre lorsque la puissance de ces formations le permet.

DEUXIEME PARTIE

**EQUIPEMENT
HYDROPLUVIOMETRIQUE DU BASSIN**

**SAISIE ET TRAITEMENT
INFORMATIQUE DES DONNEES**

CHAPITRE 1 : EQUIPEMENT DU BASSIN

1.1. STATIONS PLUVIOMETRIQUES : CARACTERISTIQUES ET SITUATION.

Les 18 stations pluviométriques et pluviographiques sont localisées sur le document 4. Elles sont bien réparties sur l'ensemble du bassin et sont gérées par la Météorologie Nationale, par le service des Voies Navigables et par le Service Régional de l'Aménagement des Eaux. Trois stations pluviométriques belges (Thirimont, Rance et Chimay) situées à l'extérieur de la bordure est du bassin ont également été choisies et sont gérées par l'Institut Royal de Météorologie de Belgique.

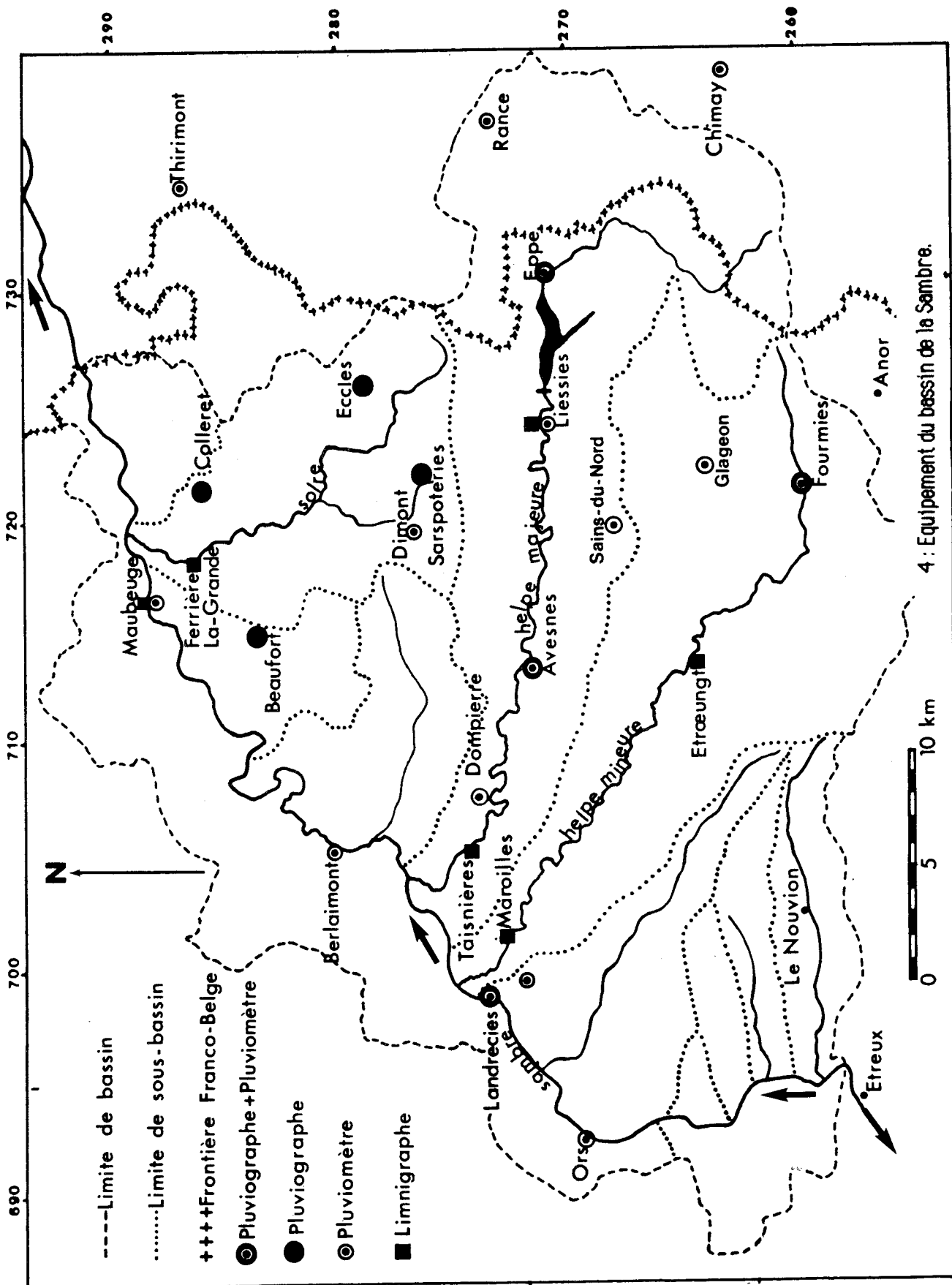
Les stations de Glageon, Ors et Sains du Nord sont situées en bordure du bassin. Outre la station de Dompierre, elles sont gérées par le service de la Protection des Végétaux et les observations pluviométriques y sont saisonnières. Elles ne seront donc pas prises en compte dans cette étude.

1.2. STATIONS PLUVIOGRAPHIQUES : CARACTERISTIQUES ET SITUATION

Huit pluviographes dont cinq sont gérés par le Service des Voies Navigables et trois par le Service Régional d'Aménagement des Eaux fournissent un enregistrement continu de la pluie (pluviogramme). Les stations sont équipées de pluviographes à augets basculeurs type Précis-Mécanique. Seules les données des pluviographes qui ont été régulièrement dépouillées par le S.R.A.E (Colleret, Eccles et Sars-Poteries) seront prises en compte ; elles permettront notamment d'extrapoler la relation Intensité-Durée-Fréquence des pluies calculée pour Colleret à la ville de Maubeuge (Partie IV, Chapitre 2), et d'analyser, à petit pas de temps, les averses génératrices de crues sur le bassin de la Solre (Partie IV, Chapitre 6). La précision de l'enregistrement est d'un dixième de mm de pluie et l'enregistrement se fait sur table déroulante au défilement de 10 mm/heure.

1.3. STATIONS THERMOMETRIQUES

Les températures sont enregistrées aux stations de Maroilles (Ouest du bassin) et à Thirimont (Est du bassin), en Belgique. Seules les données de Thirimont seront prises en considération car cette station est proche du bassin de la Solre, bassin sur lequel seront réalisés des calculs d'évapotranspiration et de bilan.



1.4. STATIONS LIMNIGRAPHIQUES

Le bassin de la Sambre est équipé de six stations de jaugeage :

- sur l'Helpe mineure à Etroeungt (amont) et Maroilles (aval).
- sur l'Helpe majeure à Liessies (amont) et Taisnières-en-Thiérache (aval)
- sur la Solre à Ferrière-la-Grande
- sur la Sambre à Maubeuge (les observations n'y débutent qu'en 1980)

Les caractéristiques des différentes stations sont exposées dans les documents 5a à 5c.

STATION PLUVIO	X	Y	Z	GEST.	DEBUT OBS.	EQUIPT	REMARQUES
AVESNES	714,35	269,95	152	M.N	1962	P	Arret du 6/63 au 7/66
AVESNES	714,05	270,27	152	V.N	1962	P, PG	
BEAUFORT	716,65	283,02	174	V.N	1973	PG	Non dépouillé
BERLAIMONT	705,63	279,00	129	V.N	1962	P	
CHIMAY	50°2'58''	4°18'48''	258	I.R.M	1951	P	
COLLERET	721,42	285,33	177	S.R.A.E	1976	PG	Chgt.emplact oct 80
DIMONT	719,15	275,95	205	M.N	1976	P	
ECCLES	725,71	279,25	220	S.R.A.E	1976	PG	
EPPE SAUVAGE	731,56	270,40	179	V.N	1962	P, PG	
FOURMIES	721,89	258,65	185	M.N	1962	P, PG	
LANDRECIES	698,85	272,17	131	V.N	1962	P, PG	
LIESSIES	724,93	270,03	175	M.N	1969	P, Th	
MAROILLES	699,97	270,55	155	M.N	1963	P, Th	obs. sais. de 63-68
MAUBEUGE	716,25	287,07	140	M.N	1962	P	
MAUBEUGE	715,85	287,60	125	V.N	1962	P	arret en 79 et 80
RANCE	50°8'15''	4°17'49''	210	I.R.M	1951	P	
SARS-POTERIES	722,16	275,78	190	S.R.A.E	1973	PG	
THIRIMONT	50°16'3''	4°14'27''	200	I.R.M	1971	P, Th	

5 a : Caractéristiques des stations pluviométriques

M.N : Météorologie Nationale

V.N : Service des Voies Navigables

S.R.A.E : Service Régional d'Aménagement des Eaux

I.R.M : Institut Royal Météorologique de Belgique

P : Pluviomètre

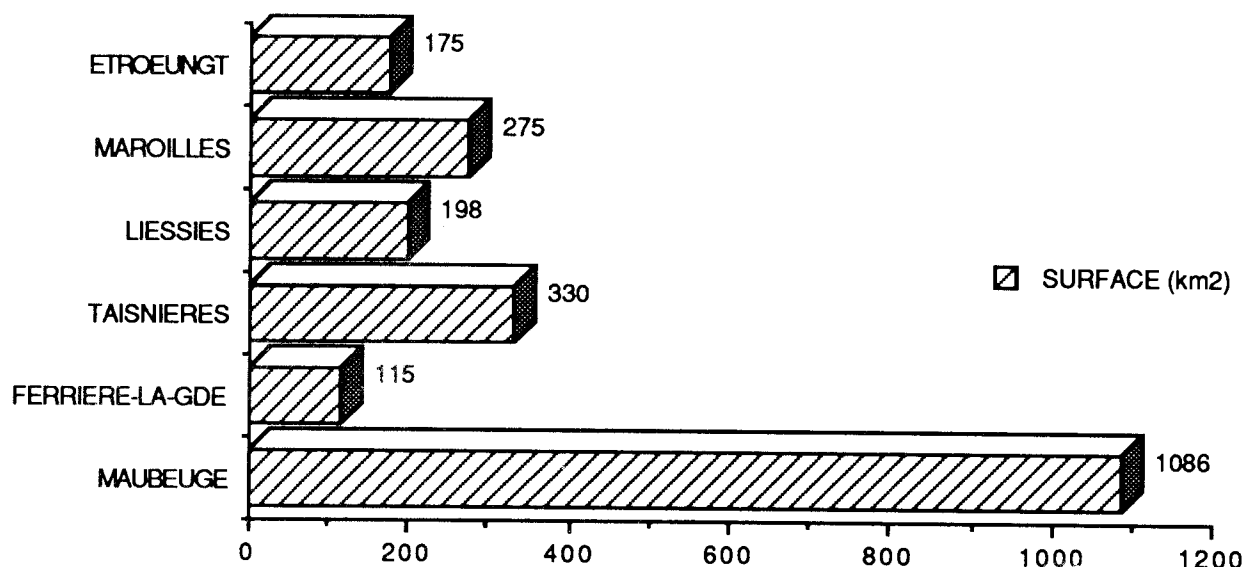
PG : Pluviographe

Th : Thermomètre

HYDROMETRIE	COURS D'EAU	SURFACE DRAINEE	GESTIONNAIRE	DEBUT OBS.
ETROEUNGT	HELPE MINEURE (amont)	175 km ²	V.N	1963
MAROILLES	HELPE MINEURE (aval)	275 km ²	V.N	1965
*LIESSIES	HELPE MAJEURE (amont)	198 km ²	V.N	1963
TAISNIERES	HELPE MAJEURE (aval)	330 km ²	V.N	1962
FERRIERE-LA-GDE	SOLRE	115 km ²	S.R.A.E	1973
MAUBEUGE	SAMBRE	1086 km ²	V.N	1980

5 b : Caractéristiques des stations hydrométriques

Les stations hydrométriques du bassin de la Sambre sont implantées sur les principaux affluents naturels de la Sambre canalisée : Helpes majeure et mineure et Solre. Elle permettent le contrôle du drainage de 60 % de la surface du bassin. La station de Maubeuge, implantée en aval de la Sambre française, ne fonctionne que depuis 1980 et les débits journaliers y sont influencés par la navigation. Toutes les stations hydrométriques sont équipées d'un limnigraphe OTT.
 (* Débits influencés par le barrage d'Eppe Sauvage)



5 c : Surface de drainage des stations hydrométriques du bassin de la Sambre

CHAPITRE 2 : CONTROLE DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES

2.1. NOTION DE PLUVIOMETRIE JOURNALIERE

Les données pluviométriques du bassin de la Sambre constituent donc un ensemble de 18 stations, gérées par des services différents. On obtient ainsi des données journalières indiquant la quantité d'eau recueillie dans un pluviomètre ou enregistrée par un pluviographe, du jour J à six heures T.U. (Temps Universel) au jour J+1 à la même heure ; cette quantité est rapportée à la pluie tombée le jour J et notée P_j.

Selon le service gestionnaire, on obtient ainsi des mesures dont le mode d'obtention est différent :

- données corrigées éditées par la météorologie nationale qui modifie certaines valeurs aberrantes ou complète des observations manquantes par comparaison avec des stations voisines.
- données brutes représentées par les bordereaux d'observateurs coopérant avec le service des voies navigables.
- données brutes extraites d'un cumul journalier d'enregistrements pluviographiques effectué par le Service Régional d'Aménagement des Eaux (Colleret, Eccles, Sars-Poteries)
- données non dépouillées constituées d'enregistrements pluviographiques .

2.2. QUALITE DES DONNEES

La caractéristique majeure des données hydrométéorologiques est d'être issues de mesures effectuées sur le terrain, dans des conditions naturelles. C'est à dire que, contrairement au laboratoire où le milieu ambiant et les mesures sont relativement bien contrôlées, les facteurs qui influencent la grandeur à mesurer et la mesure proprement dite sont très nombreux et il convient d'éliminer ceux qui sont "extra-naturels".

Les données fournies sont ainsi susceptibles d'être entachées d'erreurs . Il s'agit d'erreurs accidentelles ou systématiques. Leur existence éventuelle nécessite un contrôle de la qualité des données.

2.3. DETECTION DES ERREURS ACCIDENTELLES

Les erreurs accidentelles sont surtout des erreurs d'observation, de transcription, de copie, d'impression. Les erreurs accidentelles peuvent être décelées en plaçant en vis-à-vis les pluviométries obtenues aux diverses stations pour un même jour. Cette visualisation permet de s'assurer que la pluie enregistrée le jour J n'a pas été attribuée au jour suivant ou au jour précédent. Elle permet également de vérifier que des valeurs localement fortes de la pluviométrie ne sont pas dues à des erreurs de transcription mais bien à des particularités locales ou météorologiques (averses orageuses souvent localisées) . La consultation des fichiers manuscrits bruts ou des enregistrements pluviographiques permet bien souvent de distinguer entre les oeuvres de la nature et les erreurs humaines.

CHAPITRE 3 : SAISIE ET TRAITEMENT INFORMATIQUE DES DONNEES

3.1. FICHIERS BASE DE DONNEES

L'étude présentée dans cet ouvrage regroupe près de 200 000 données de base :

- pluie journalière sur 17 stations pluviométriques ;
- débits moyens journaliers en cinq stations limnigraphiques ;
- débits maxima instantanés ;
- cumul des pluies sur un intervalle fixe de 30 minutes
à la station pluviographique de Colleret ;
- données de température ;

3.2. FICHIERS SELECTIONS

Des fichiers-sélections ont été extraits des fichiers de base de données :

PLUIES :

- fichier des modules pluviométriques annuels ;
- fichier des pluies mensuelles ;
- fichier des pluies maximales de 24 heures mensuelles et annuelles ;
- fichier des pluies maximales mensuelles de 30 minutes, 1, 2, 3, 6, 12 et 24 heures à Colleret .

DEBITS :

- fichier des débits moyens annuels (modules) ;
- fichier des débits moyens mensuels ;
- fichier des débits caractéristiques ;
- fichier des débits maxima journaliers et instantanés mensuels et annuels ;
- débits et averses génératrices de crues au pas de temps de 2 heures (sur la Solre) .

3.3. PROGRAMMES DE TRAITEMENT

La saisie des données, leur organisation en fichiers de base de données en accès direct ou séquentiel et leur traitement a nécessité l'écriture ou l'adaptation de plusieurs programmes dont les listings sont édités en annexe du présent rapport.

3.3.1. Saisie de données

Outre les fichiers classiques de saisie en accès direct ou séquentiel :

- SAISIDF permet plus particulièrement de saisir des données pluviographiques à pas de temps fixe avec une méthode d'indexation permettant de retrouver la date d'occurrence d'une donnée.

- FIPLUIE permet la saisie et l'indexation de l'averse de crue au pas de temps de deux heures et sur une durée totale de 12 jours, soit 144 points.

- FICRUE permet la saisie et l'indexation des hauteurs d'eau relevées sur l'hydrogramme de crue et leur transformation en débit par l'intermédiaire de la courbe de tarage.

3.3.2. Traitement de données

- CORAN : corrélation simple et multiple linéaire

- IDF cumule les pluies sur diverses durées et extrait les valeurs maximales mensuelles des pluies de durée t .

- AJTRAC : ajustement des échantillons aux lois de Gauss, Galton, Gumbel et Fréchet. Il calcule les paramètres de l'ajustement par la méthode des moments ou du maximum de vraisemblance (cf. lexique), vérifie l'adéquation de ces lois aux distributions observées, calcule l'intervalle de confiance pour différents seuils et trace l'ajustement retenu sur table traçante Graphtec MP 1000. Une routine de calcul est plus particulièrement destiné au traitement des valeurs extrêmes minimales que sont les débits d'étiage.

- RENOUVELLEMENT ajuste des échantillons de valeurs extrêmes supérieures à un seuil selon un modèle basé sur la loi de Poisson et la loi exponentielle simple ou de Weibull (cf. annexe renouvellement). Il vérifie l'adéquation de la loi de Poisson et trace l'ajustement sur table traçante Graphtec.

- BIL calcule l'évapotranspiration mensuelle par la méthode de Thornthwaite, en déduit l'évapotranspiration réelle, le stock d'eau restant (à RFU variable), calcule les excédents et écrit un bilan annuel ou pluriannuel.

- TRACRUE trace les hydrogrammes de crue ainsi que les histogrammes des pluies observées aux stations pluviographiques et la lame moyenne précipitée sur le bassin versant, ceci au pas de temps de deux heures et sur une durée totale de 12 jours.

- GR2 utilise un modèle à deux réservoirs pour simuler les débits moyens journaliers à partir de la température moyenne et de la pluviométrie journalière.

TROISIEME PARTIE

**ETUDE PLUVIOMETRIQUE
du BASSIN de la SAMBRE**

CHAPITRE 1 : ETUDE PLUVIOMETRIQUE A L'ECHELLE ANNUELLE

1.1. CRITIQUE DES DONNEES ANNUELLES

1.1.1. Double cumuls (Ven Te Chow, 1964)

Il arrive que des erreurs systématiques viennent perturber l'homogénéité d'une série d'observations. Celles-ci peuvent survenir à l'occasion d'un changement d'observateur, d'une défectuosité progressive d'un appareil, d'un changement de type d'appareil, d'un changement de méthode de mesure ou de modifications de l'environnement.

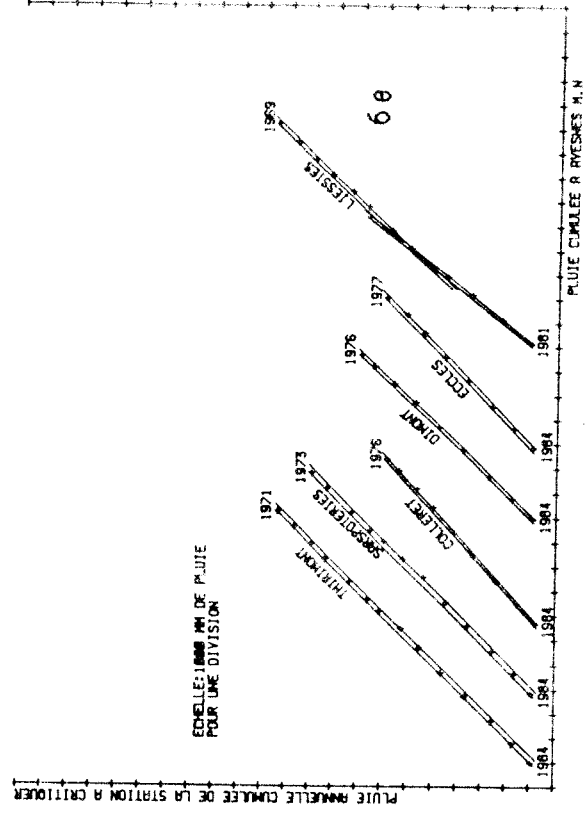
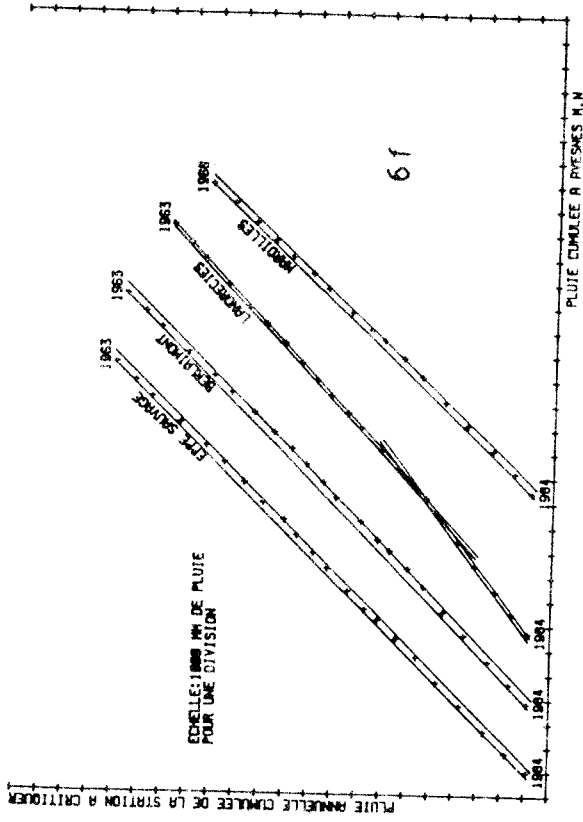
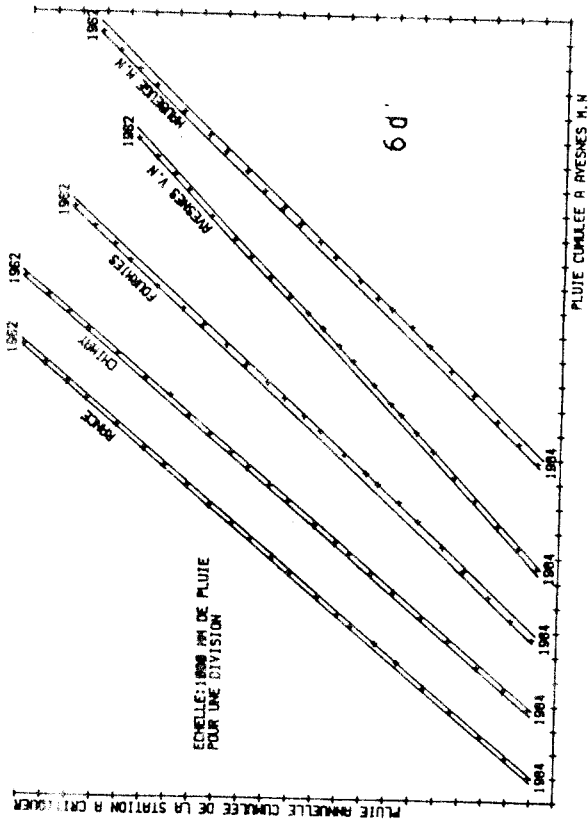
Ces erreurs entraînent une rupture de l'homogénéité de la série observée qui fausse le traitement ultérieur des données.

Pour mettre en évidence d'éventuelles ruptures d'homogénéité dans les séries pluviométriques, on a appliqué la méthode des double-cumuls (cf. annexe I) aux totaux pluviométriques annuels des stations du bassin de la Sambre. On a choisi d'effectuer les double-cumuls entre trois stations prises comme référence et toutes les autres stations. Les stations de référence choisies sont celles de Maubeuge M.N, Avesnes M.N et Fourmies. Ces trois stations sont toutes trois gérées par la Météorologie Nationale, ont une durée d'observation commune de 23 ans et sont bien corrélées (cf paragraphe 1.1.2.).

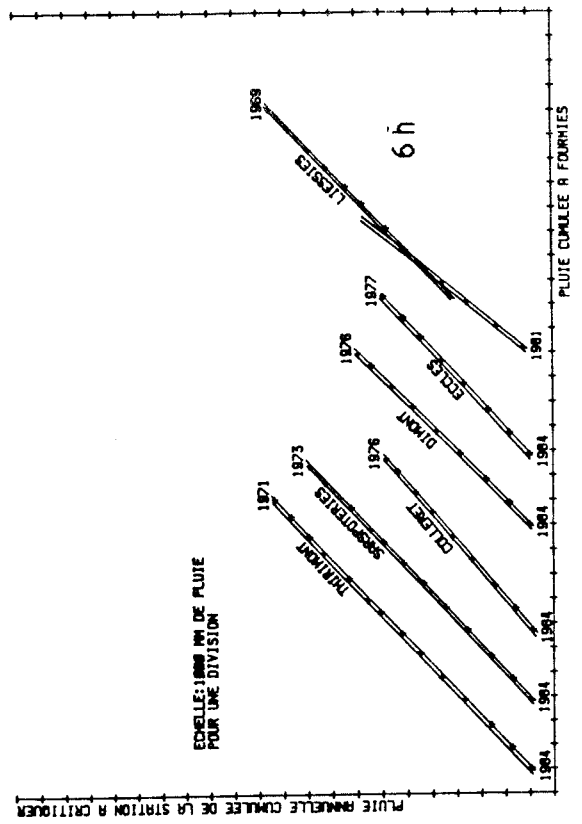
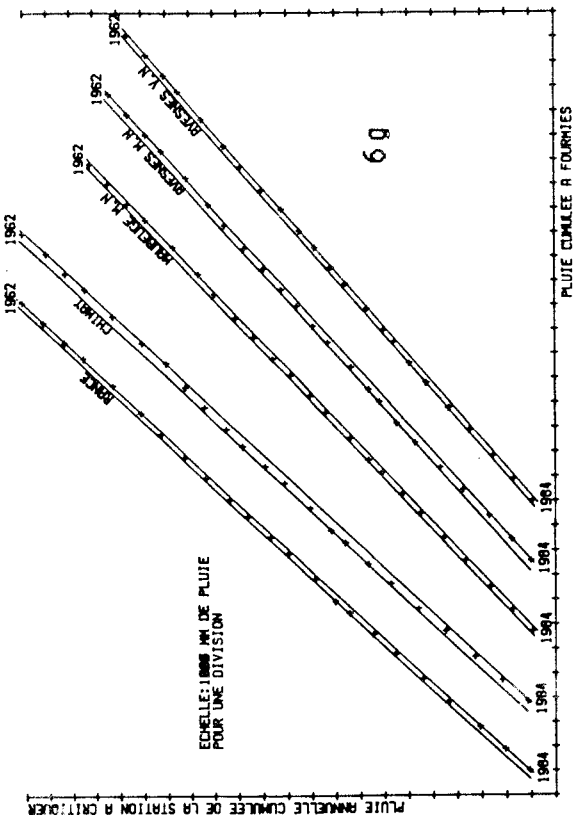
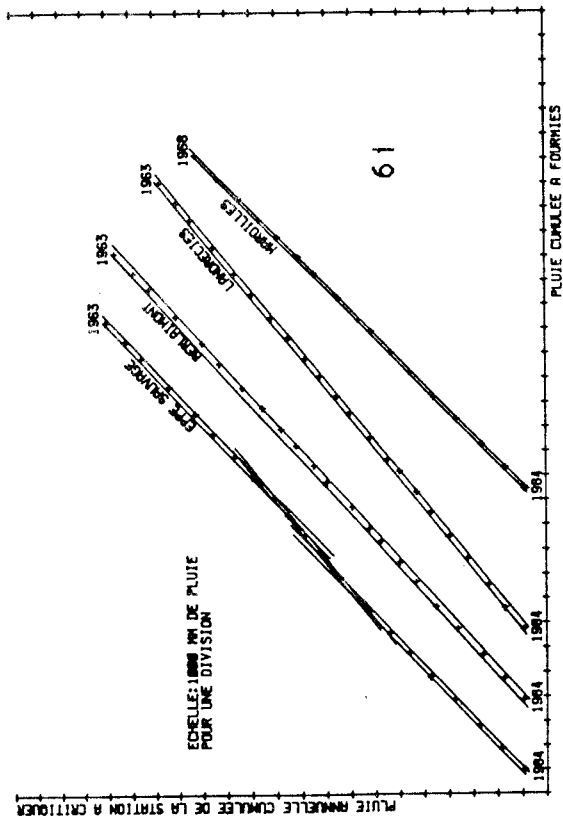
On ne constate pas de rupture de pente systématique entre les stations à critiquer et les stations de référence, ce qui confirme l'homogénéité des stations de référence choisies (documents 6a à 6i).

On constate que les séries ne présentent pas de ruptures de pente notables sauf en ce qui concerne les stations de Liessies, Eppe sauvage et Landrecies.

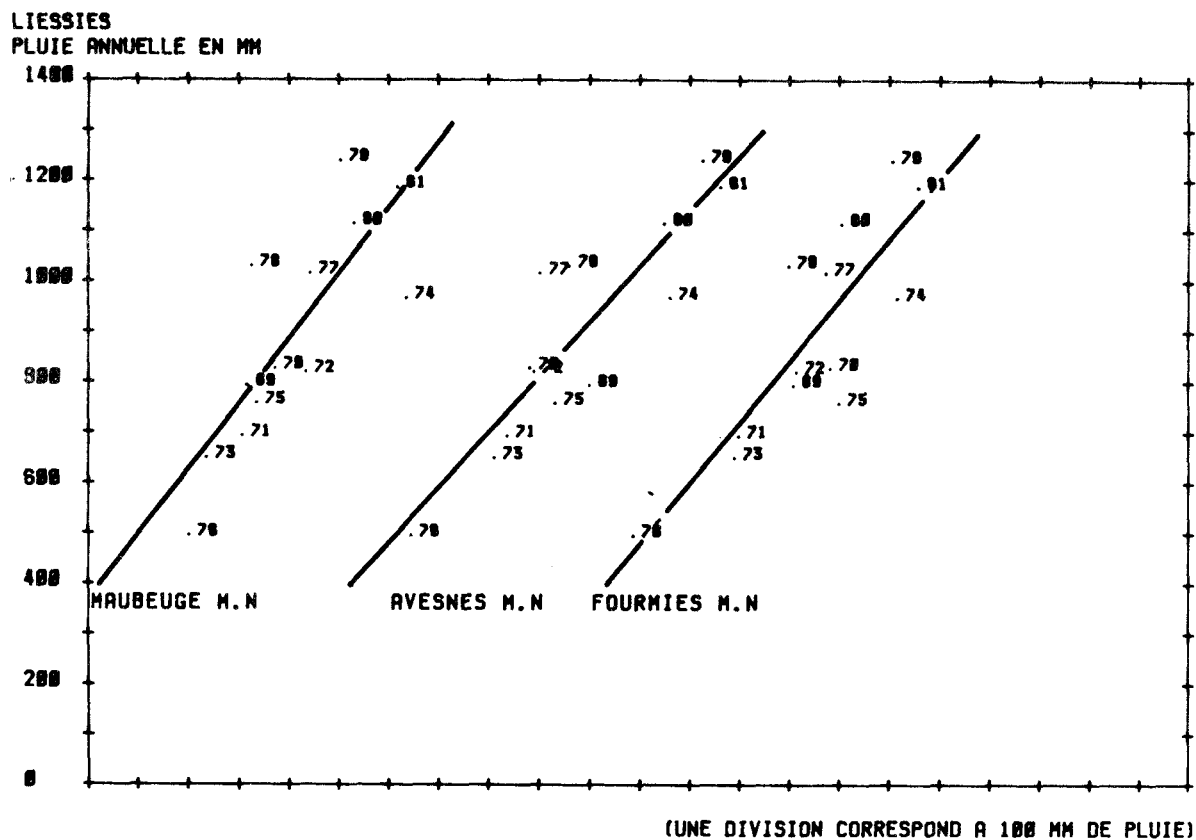
La station de Liessies montre une rupture systématique avec les trois stations de référence, entre 1977 et 1978 (document 6b, 6e et 6h). Ceci est confirmé si l'on trace le graphe des pluies annuelles non cumulées entre Liessies et les trois stations de référence, en portant, pour chaque année, le point représentatif et le millésime correspondant (document 7).



6 d, e, f : Comparaison des modules pluviométriques cumulés (station de référence : Avesnes M.N.)



6 g, h, i : Comparaison des modules pluviométriques cumulés
(station de référence : Fourmies)



7 : Comparaison des pluies annuelles observées à Liessies avec 3 stations de référence.

On note, sur la période commune 1969-1981, que les pluies annuelles de 69 à 77 sont pratiquement toutes systématiquement inférieures à celles des stations de référence et que celles de 76 à 81 y sont systématiquement supérieures, et ceci pour des valeurs élevées de la pluviométrie annuelle. Les écarts observés de part et d'autre de la droite de régression n'ont donc pas un caractère aléatoire et apparaissent comme systématiques. La série de la station de Liessies apparaît donc hétérogène avec une rupture se situant autour des années 77-78. La consultation de l'annuaire des stations pluviométriques ne fait état d'aucun changement particulier au cours de la période d'observation. Par ailleurs, la période d'observation est courte et comprend de nombreuses lacunes d'observation. L'ensemble de ces constatations nous amène à éliminer la station de Liessies plutôt que de tenter une homogénéisation hasardeuse.

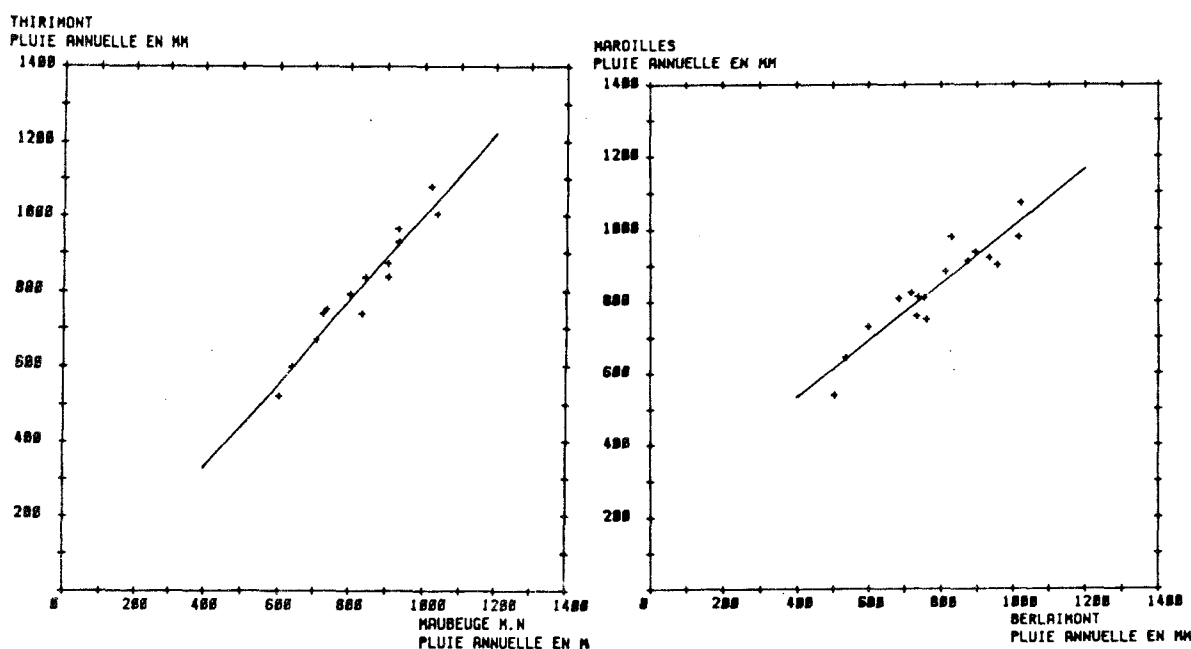
La station d'Eppe sauvage présente deux ruptures de pente avec la station de référence de Maubeuge, en 1971 et 1975, la pente originelle se rétablissant après 1975 (document 6c). Aucun changement dans les conditions d'exploitation de la station n'est de nature à justifier ce phénomène. On constate en outre que ces ruptures s'estompent en se référant à Fourmies et correspondent à une oscillation par rapport à Avesnes. L'ensemble de ces observations nous amène à conserver les valeurs observées à Eppe sauvage sans modification.

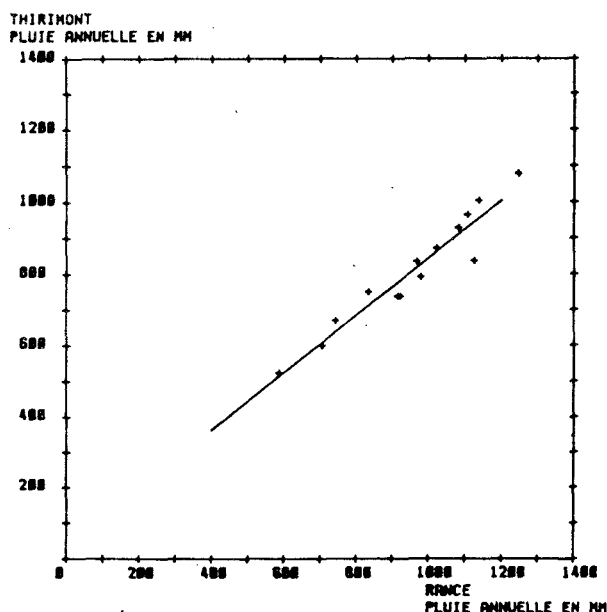
On signalera enfin une légère rupture de pente entre les totaux cumulés de Landrecies et d'Avesnes vers l'année 1978 (document 6f). Cette rupture correspond à une simple oscillation par référence à Maubeuge et Fourmies, elle n'est pas de nature à biaiser l'échantillon des pluies annuelles à Landrecies.

Notons enfin que la méthode des double-cumuls nous est apparue comme assez grossière et peu performante, son utilisation laissant un large champ de subjectivité. Les ruptures de pente doivent être particulièrement fortes pour que l'on puisse préjuger d'une mauvaise qualité des données. La difficulté s'accroît lorsqu'on désire rechercher la cause d'une rupture de pente ; en l'absence d'une cause bien déterminée, il paraît hasardeux de tenter une correction quelconque. La solution consiste à signaler la station douteuse et à émettre des réserves sur son utilisation. La méthode des "double-cumuls" sera utilement complétée par une étude de corrélation.

1.1.2. Corrélation annuelle

Afin de vérifier le degré d'association des valeurs de la pluviométrie annuelle entre les stations du bassin de la Sambre, on a pratiqué de façon systématique une analyse de corrélation (cf. annexe II) entre chaque station et toutes les autres et ces corrélations ont été visualisées (exemples sur documents 8a à 8c).





8 a : Corrélation entre les modules pluviométriques des stations de Maubeuge M.N et de Thirimont, de 1971 à 1984

8 b : Corrélation entre les modules pluviométriques des stations de Rance et de Thirimont, de 1971 à 1984

8 c : Corrélation entre les modules pluviométriques des stations de Berlaimont et de Maroilles, de 1971 à 1984

Le calcul des paramètres (document 9) et les tracés sont effectués par le programme CORAN (cf. annexe informatique).

a et b sont les paramètres de la droite de régression :

$$y = ax + b$$

avec :

a, le coefficient de régression

b, l'ordonnée à l'origine

L'étendue du nuage de points autour de la droite de régression est mesurée par SR, l'écart-type des résidus entre les valeurs calculées et observées.

Le document 10 fournit le coefficient de corrélation ainsi que le nombre de couples pris en compte pour la régression. On constate que les corrélations sont en général bonnes même pour des stations parfois éloignées les unes des autres.

La plupart des coefficients de corrélation sont significatifs au seuil de 1 % (cf. annexe II : "test de Student"), ce qui signifie qu'il y a moins d'une chance sur cent que les coefficients obtenus soient le fait du hasard.

Certains coefficients de corrélation sont inférieurs à 0,8. Ces modestes résultats, eu égard à leur signification, pourraient être mis sur le compte de l'éloignement (Epe-Berlaimont, Epe-Landrecies, Chimay-Maroilles, Chimay-Landrecies, Liessies-Landrecies) si l'on n'observait pas, par ailleurs, d'excellents coefficients de corrélation entre certaines stations éloignées les unes des autres :

Thirimont-Berlaimont : 0,98

X Y	THIR	RANCE	CHINAY	EPPE	MAU N.N	COLL	BCC	SARS	DIM	LIES	FOUR	AVES N.N	AVES V.N	BERL	MAR	LAND
THIRIMONT	a: b: SR:	0,8 45 42	0,745 92 62	0,824 160 75	1,116 -117 39	1,061 38 47	0,959 55 33	0,984 14 57	0,954 1 45	0,606 250 90	0,9 31 62	0,781 180 60	0,923 119 69	0,92 93 32	1,02 -40 51	1,074 56 71
RANCE	1,152 23 50		0,949 60 61	0,908 218 68	1,069 69 61	1,266 45 53	0,825 345 57	1,157 20 71	1,153 -11 43	0,797 232 71	1,02 67 61	0,968 188 55	1,112 110 59	0,908 234 65	1,189 -43 62	1,217 89 87
CHINAY	1,11 64 76	0,922 64 60		0,913 208 82	0,977 144 97,8	1,293 44 46	0,777 409 40	1,061 116 79	1,17 -7 38	0,792 217 59	0,982 99 86	0,946 204 78	1,046 158 90	0,831 290 102	1,075 41 105	1,168 119 108
EPPE	0,933 36 73	0,911 -66 75	0,867 -19 77		1,006 -31 88	0,95 139 59	0,624 363 38	0,779 178 91	0,871 92 52	0,626 212 76	0,954 -26 87	0,863 121 94	0,997 52 95	0,88 113 76	0,876 61 91	1,141 0 101
MAUBEUGE	0,834 153 34	0,803 62 53	0,681 180 82	0,749 223 70		0,877 187 29	0,789 203 32	0,878 114 43	0,769 174 36	0,515 349 76	0,846 93 65	0,781 210 68	0,904 142 68	0,81 187 44	0,857 103 54	1,067 71 72
COLLERET	0,841 50 41	0,711 43 40	0,714 26 53	0,825 50 53	1,066 -151 31		0,757 142 41	0,901 8,077 44	0,863 -2 31	0,552 178 58	0,772 72 41	0,664 193 45	0,774 157 51	0,893 29 29	0,844 39 39	0,814 175 74
ECCLES	0,926 44 33	0,815 0 56	1,008 -226 46	1,147 -173 50	1,079 -91 38	1,022 49 47		0,79 173 70	0,982 -45 50	0,566 223 96	0,96 -39 61	0,595 325 66	0,746 249 70	0,972 31 31	0,709 229 65	0,782 277 52
SARSPOT	0,877 104 59	0,747 100 56	0,76 74 76	0,744 220 100	1,031 -37 49	0,969 93 40	0,654 301 55		0,893 42 25	0,547 306 89	0,877 56 59	0,776 185 51	0,91 135 54	0,869 136 45	0,964 18 45	0,942 160 84
DIMONT	0,951 79 44	0,815 61 36	0,814 47 32	0,946 70 54	1,177 -122 45	1,087 57 34	0,76 268 44	1,08 -14 28		0,051 846 145	0,862 115 49	0,77 226 37	0,881 192 41	0,934 127 45	0,956 65 41	0,911 226 85
LIESSIES	1,155 -12 128	1,06 -110 82	1,123 -146 70	1,192 -28 105	1,3 -156 126	1,526 -116 97	0,488 688 89	1,241 -81 133	1,374 -183 77		1,209 -126 114	1,11 26 86	1,282 -50 103	1,043 101 131	1,299 -192 106	1,464 -110 142
FOURNIES	0,92 117 63	0,843 65 55	0,753 153 75	0,792 228 74	0,932 99 68	1,16 8 50	0,64 385 50	0,969 81 63	1,028 -19 54	0,604 304 77		0,844 201 64	1,026 91 48	0,825 215 60	1,003 25 59	1,164 41 68
AVESNES N.N	1,072 -62 71	0,916 -83 53	0,831 0 73	0,81 135 89	0,985 -24 76	1,319 -150 63	0,938 92 82	1,14 -113 66	1,214 -219 47	0,75 110 71	0,966 -49 68		1,117 -57 43	0,858 111 73	1,162 -118 65	1,184 -51 86
AVESNES V.N	0,897 25 62	0,782 13 49	0,683 109 73	0,718 176 72	0,847 58 66	1,144 -85 54	0,767 166 65	0,986 -49 59	1,044 -138 45	0,591 205 70	0,872 1 44	0,83 102 37		0,776 142 50	1,002 -83 50	1,065 1 65
BERLAIMONT	1,055 -82 35	0,932 -96 66	0,787 49 99	0,898 66 77	1,118 -134 51	1,103 -30 36	1,101 -105 24	1,077 -99 54	0,968 -46 46	0,583 235 98	1,019 -92 67	0,925 62 76	1,123 -57 60		1,107 -147 57	1,33 -153 67
MAROLLES	0,866 131 47	0,722 150 48	0,586 286 78	0,683 295 81	0,94 66 56	1,071 40 44	0,788 211 69	0,946 59 48	0,964 3 41	0,571 323 71	0,823 125 53	0,721 264 51	0,865 186 52	0,776 232 48		0,918 193 74
LANDRECIES	0,721 118 58	0,593 147 61	0,524 216 72	0,552 265 70	0,699 132 58	0,818 97 75	0,899 -28 57	0,742 99 70	0,726 78 76	0,369 352 71	0,682 119 52	0,606 233 61	0,732 158 54	0,631 211 46	0,725 94 65	

9 : Paramètres de la régression effectuée entre les modules pluviométriques de 16 stations du bassin de la Sambre.

Pour chaque couple de stations, on indique :

a : pente de la droite de régression

b : constante en mm

SR : écart-type des résidus ou erreur-type en mm

avec :

$$Y = aX + b$$

X : Module pluviométrique en X (mm)

Y : Module pluviométrique en Y (mm)

Pour interpoler ou extrapoler les valeurs d'une station Y à partir d'une station X, on choisit les paramètres situés à l'intersection X,Y. L'interpolation sera d'autant plus fiable que le coefficient de corrélation sera proche de 1 et que l'erreur-type sera faible.

Rance-Berlaimont : 0,93

Fourmies-Colleret : 0,95

Rance-Marailles : 0,93

Les coefficients de corrélation calculés entre Eccles d'une part et Sars-Poteries, Liessies, Fourmies, Avesnes MN, Avesnes V.N et Marailles d'autre part sont peu significatifs

	THIR	RANCE	CHINAY	EPPE	MAU MN	COLL	ECC	SARS	DIM	LIES	POUR MN	AVES MN	AVES VN	BERL	MAR	LAND
THIRIMONT	1	0,96 14	0,91 14	0,87 14	0,97 14	0,95 9	0,94 8	0,92 12	0,95 9	0,83 11	0,91 14	0,92 14	0,89 14	0,98 14	0,94 14	0,88 14
RANCE		1	0,94 34	0,9 22	0,93 23	0,95 9	0,82 8	0,93 12	0,97 9	0,91 13	0,93 23	0,94 23	0,92 23	0,93 2	0,93 17	0,82 22
CHINAY			1	0,89 22	0,82 23	0,96 9	0,89 8	0,89 12	0,98 9	0,93 13	0,86 23	0,89 23	0,83 23	0,82 22	0,79 17	0,74 22
EPPE				1	0,85 22	0,91 9	0,86 8	0,73 12	0,93 9	0,88 13	0,85 22	0,83 22	0,83 22	0,87 22	0,74 17	0,73 22
MAUBEUGE					1	0,97 9	0,92 8	0,94 12	0,95 9	0,81 13	0,89 23	0,88 23	0,87 23	0,95 22	0,9 17	0,82 22
COLLERET						1	0,88 8	0,94 9	0,97 9	0,91 6	0,95 9	0,94 9	0,92 9	0,97 9	0,95 9	0,82 9
ECCLES							1	0,7 8	0,86 8	0,5 5	0,78 8	0,75 8	0,71 8	0,95 8	0,75 8	0,85 8
SARSPOT								1	0,97 9	0,83 9	0,92 12	0,94 12	0,93 12	0,95 12	0,95 12	0,82 12
DIMONT									1	0,94 6	0,94 9	0,97 9	0,94 9	0,98 9	0,96 9	0,81 9
LIESSIES										1	0,84 13	0,89 13	0,84 13	0,8 13	0,84 13	0,72 13
FOURMIES											1	0,9 23	0,94 23	0,92 22	0,91 17	0,85 22
AVESNES MN												1	0,95 23	0,9 22	0,92 17	0,83 22
AVESNES VN													1	0,93 22	0,91 17	0,85 22
BERLAIN														1	0,93 17	0,86 22
MARAILL															1	0,82 17
LANDREC																1

10 : Coefficients de corrélation calculés entre les modules pluviométriques de 16 stations du bassin de la Sambre.

0,89-----> coefficient de corrélation
14-----> taille de l'échantillon

à cause du faible nombre d'observations communes (N=8). Le test de Fisher indique en effet que pour 6 degrés de liberté, le coefficient de corrélation ne sera considéré significatif que s'il est supérieur à :

0,71 au seuil de 5 %

0,79 au seuil de 2 %

0,83 au seuil de 1 %

Les coefficients de corrélation des couples Eccles-Sars-Poteries ($r=0,7$), Eccles-Liessies ($r=0,5$) ne sont donc pas significatifs alors que ces stations sont proches.

On note ainsi que les coefficients ne sont pas significatifs entre Eccles et les stations citées ci-dessus alors qu'ils sont meilleurs pour Colleret dont la période d'observation est également courte (N=9) . Il conviendra donc d'être prudent lors de l'utilisation de la pluviométrie de la station d'Eccles, notamment pour les calculs de bilan sur le bassin de la Solre.

Les écart-types des résidus (SR) de la régression sont indiqués dans le document 9. On note que des coefficients de corrélation peuvent être élevés, alors que le nuage de points autour de la régression est large. C'est notamment le cas pour les couples comprenant la station de Liessies où les corrélations sont globalement significatives mais où les erreurs-types élevées montrent que la relation obtenue est assez lâche.

En conclusion, les stations pluviométriques du bassin de la Sambre paraissent bien corrélées à l'échelle annuelle ; on émettra quelques réserves sur l'utilisation des stations d'Eccles et de Liessies.

1.1.3. Données brutes et données corrigées

On a signalé précédemment que les séries utilisées avaient des origines différentes. Certaines sont en effet des données brutes relevées directement sur les bordereaux observateurs (stations gérées par les voies navigables), d'autres sont des données corrigées (stations gérées par la Météorologie Nationale).

Il est bien entendu rassurant de constater que les données brutes annuelles sont bien corrélées avec les données corrigées. Dans certains cas, on dispose de deux stations très proches (Maubeuge M.N-Maubeuge VN, Avesnes M.N-Avesnes V.N), l'une corrigée, l'autre brute. On ne constate pas d'anomalie, les valeurs de pluviométrie obtenues en deux sites très proches restant voisines et les coefficients de corrélation élevés. Rappelons que l'effet de lissage sur les modules annuels est important et qu'on observe parfois des différences notables dans la pluviométrie observée sur de plus petits pas de temps.

1.1.4. Choix des stations prises en compte pour l'étude statistique de la pluviométrie annuelle sur le bassin de la Sambre.

Sur l'ensemble des 17 stations représentatives de la pluviométrie sur l'ensemble du bassin, 8 stations présentent un enregistrement continu sur la période commune 1963-1984, il s'agit des stations de Rance, Chimay, Eppe sauvage, Maubeuge M.N, Fourmies, Avesnes M.N, Berlaimont et Landrecies.

La station de Thirimont ne débute qu'en 1971, et celle de Maroilles débute bien en 1963 mais les observations sont saisonnières de 1963 à 1968. Ces deux stations seront étendues par corrélation avec des stations de référence situées dans leur zone d'influence.

Les stations de Maubeuge V.N et Avesnes V.N, fournissant des valeurs très proches de leurs homologues de la Météorologie nationale, ne seront pas utilisées pour l'étude de la pluviométrie générale du bassin. Ceci ne signifie pas pour autant qu'il faille les négliger. Les données de ces stations ont été consultées lors de la phase de recherche des erreurs accidentelles, elles le seront de nouveau lors de l'analyse des pluies maximales et des averses génératrices de crues.

1.2. EXTENSION DES DONNEES POUR LES STATIONS DE THIRIMONT ET DE MAROILLES

1.2.1. Station de Thirimont

La série de Thirimont ne comprend que 14 observations annuelles (1971 à 1984). Afin d'utiliser cette série sur la période d'observation commune 1963-1984, on recherche des stations bien corrélées avec Thirimont. Le meilleur coefficient de corrélation ($r=0,97$) est observé entre Thirimont et Maubeuge M.N (document 10), la visualisation du nuage de points, de la droite de régression (document 8a) et un écart-type des résidus égal à 39 mm indique que la corrélation est excellente entre Thirimont et Maubeuge M.N. Le coefficient de corrélation avec Rance est également excellent (0,96) avec un écart-type des résidus de 41,8 mm (document 8b).

Si on réalise une régression multiple entre Rance et Maubeuge M.N d'une part et Thirimont d'autre part, on obtient un coefficient de corrélation supérieur à 0,97 (0,974) et une erreur-type d'estimation légèrement inférieure à celles observées avec la corrélation simple (38,6 mm). La corrélation multiple n'améliore pas sensiblement l'estimation, déjà excellente avec la corrélation simple, mais fournit le meilleur résultat et l'extension des pluies annuelles de Thirimont se fera par l'équation de

la droite de régression linéaire multiple :

$$Y = 0,358 X1 + 0,642 X2 - 64,4 \quad \text{avec:}$$

Y : Pluie annuelle à Thirimont

X1 : Pluie annuelle à Rance

X2 : Pluie annuelle à Maubeuge M.N

Le bénéfice de l'extension de la série de Thirimont (14 valeurs) par l'utilisation des séries de Rance et de Maubeuge M.N (22 valeurs communes) peut être mesuré par le terme d'efficacité relative. On obtient ici une efficacité relative (cf. annexe II : "extension et efficacité de l'extension") de 0,657, ce qui correspond à une période d'observation fictive de 21 années pour la série étendue de Thirimont. On admet que la série étendue de Thirimont correspond réellement à une observation de 21 années. Ce bon résultat est dû à l'excellente corrélation obtenue.

1.2.2. Station de Maroilles

Deux stations montrent un bon coefficient de corrélation avec Maroilles : il s'agit de Berlaimont ($r : 0,93$ - erreur-type : 48,5 mm, document 8c) et d'Avesnes M.N ($r : 0,92$ - erreur-type : 51,2 mm). La corrélation linéaire multiple entre Berlaimont et Avesnes M.N d'une part et Maroilles d'autre part fournit un coefficient de corrélation multiple de 0,95 et une erreur-type de 45,8 mm, ce qui est meilleur que ci-dessus, on utilisera donc l'équation de régression multiple suivante :

$$Y = 0,452 X1 + 0,347 X2 + 206,5 \quad \text{avec :}$$

Y : Pluie annuelle à Maroilles

X1 : Pluie annuelle à Berlaimont

X2 : Pluie annuelle à Avesnes M.N

L'efficacité relative de l'extension de la série de Maroilles (17 valeurs) est de 0,796, ce qui correspond à une période d'observation fictive de 21 ans. Ce résultat permet de considérer que la série de Maroilles comprend réellement 21 années d'observation.

La méthode des double-cumuls et les calculs de corrélation annuelle permettent de vérifier la bonne cohérence des données, à l'échelle annuelle, sur le bassin de la Sambre.

Ils permettent également d'étendre les données des stations de Thirimont et de Maroilles avec une bonne efficacité.

On dispose ainsi de la pluie annuelle, sur une période commune de 22 ans (1963-1984), pour 11 stations bien réparties sur le bassin de la Sambre.

L'ensemble des valeurs annuelles est regroupé dans le document 11.

N.B : Les séries courtes du bassin de la Solre (Colleret, Eccles, Sars-Poteries et Dimont) comportent moins de douze années d'observation. Elles sont toutes situées sur le bassin de la Solre et seront examinées et étendues lors de l'étude spécifique de ce sous-bassin (cf partie IV, Chapitre 2). Les résultats sont cependant présentés dans le document 11, conjointement avec les autres séries du bassin de la Sambre.

1.3. VALEURS ANNUELLES CARACTERISTIQUES

1.3.1. Relation pluviométrie-altitude

Le document 12a indique la pluviométrie annuelle moyenne, la période d'observation correspondante ainsi que la pluviométrie moyenne relative à la période commune 1963-1984 (22 années) de dix stations bien réparties sur le bassin (comparaison graphique : document 12b).

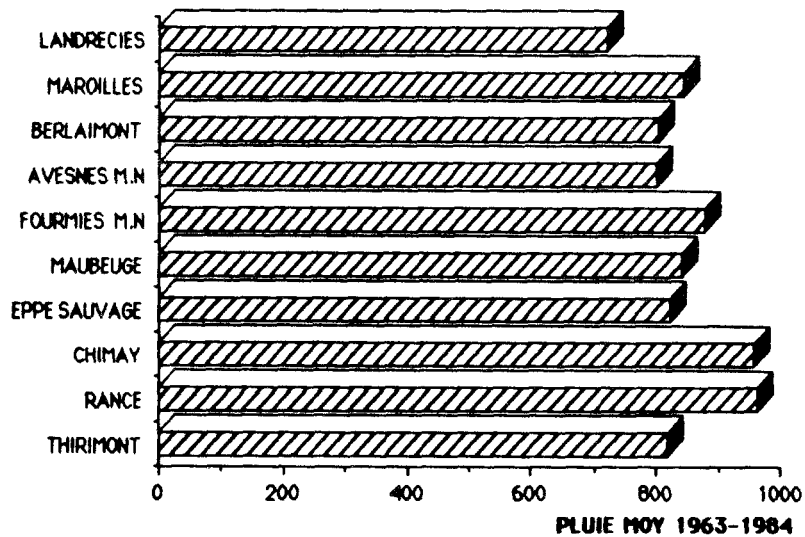
Ces dernières valeurs permettent d'établir des comparaisons entre les différentes stations. On constate que la partie orientale du bassin, dont le relief est plus accusé et l'altitude plus élevée, est la plus arrosée (document 13).

ANNEE	THIR	RANCE	CHIMAY	EPPE	HAUMN	MAUVN	COLL	ECCL	SARS	DIM	LIESS	POURM	AVEVN	AVEVN	BERL	MAR	LAND
1951		1176	1175														
1952		1019	1056														
1953		639	610														
1954		978	964														
1955		795	792														
1956		940	904														
1957		1218	1128														
1958		1300	1190														
1959		793	769														
1960		991	964														
1961		1131	1073														
1962		895	990		745							831	757	759			
1963	*773	889	820	805	810	732	*713	*774	*796	*832		831	722	729	786	*812	716
1964	*690	816	831	669	721	623	*618	*669	*705	*727		653	640	601	647	*721	632
1965	*1117	1225	1182	1192	1159	969	*1086	*1185	*1154	*1243		1125	1043	981	1126	*1078	938
1966	*1040	1167	1200	1098	1071	1084	*992	*1081	*1064	*1139		1099	950	930	1088	*1028	848
1967	*684	855	995	743	690	650	*585	*632	*673	*690		841	670	689	705	*758	712
1968	*837	954	802	826	873	744	*781	*848	*861	*906		974	797	862	934	921	769
1969	*722	913	829	763	716	693	*613	*663	*700	*721	793	808	800	784	813	883	705
1970	*785	989	917	865	772	703	*673	*729	*757	*787	827	882	682	726	738	814	644
1971	670	743	658	526	707	558	*603	*653	*691	*710	693	698	638	647	600	729	602
1972	738	923	909	686	834	663	*739	*802	*821	*860	820	802	691	680	719	825	688
1973	599	705	768	586	637	589	*528	*570	633	*628	650	690	613	582	536	645	545
1974	1005	1138	1078	847	1037	925	*956	*1041	1059	*1099	967	1015	961	897	1017	979	841
1975	751	834	865	703	736	708	*634	*687	776	*744	758	900	733	688	686	809	709
1976	523	587	582	519	602	524	463	*507	525	535	495	487	446	415	505	540	476
1977	836	968	957	817	843	774	714	794	772	807	962	874	703	652	755	811	692
1978	738	915	937	811	725	627	666	693	796	836	1008	799	760	700	654	760	597
1979	838	1125	1119	831	904	*819	802	804	907	938	1239	1006	1026	914	830	979	717
1980	965	1108	1125	995	931	*845	800	937	897	984	1113	905	949	855	896	937	743
1981	1079	1246	1199	1014	1019	939	942	1010	973	1064	1186	1056	1061	941	1022	1072	873
1982	872	1024	1112	922	903	876	867	877	905	956		938	904	841	875	912	672
1983	793	979	1036	917	803	748	719	810	721	818		893	799	787	761	750	730
1984	929	1084	1142	905	932	862	842	966	951	981		1021	1000	924	957	901	950

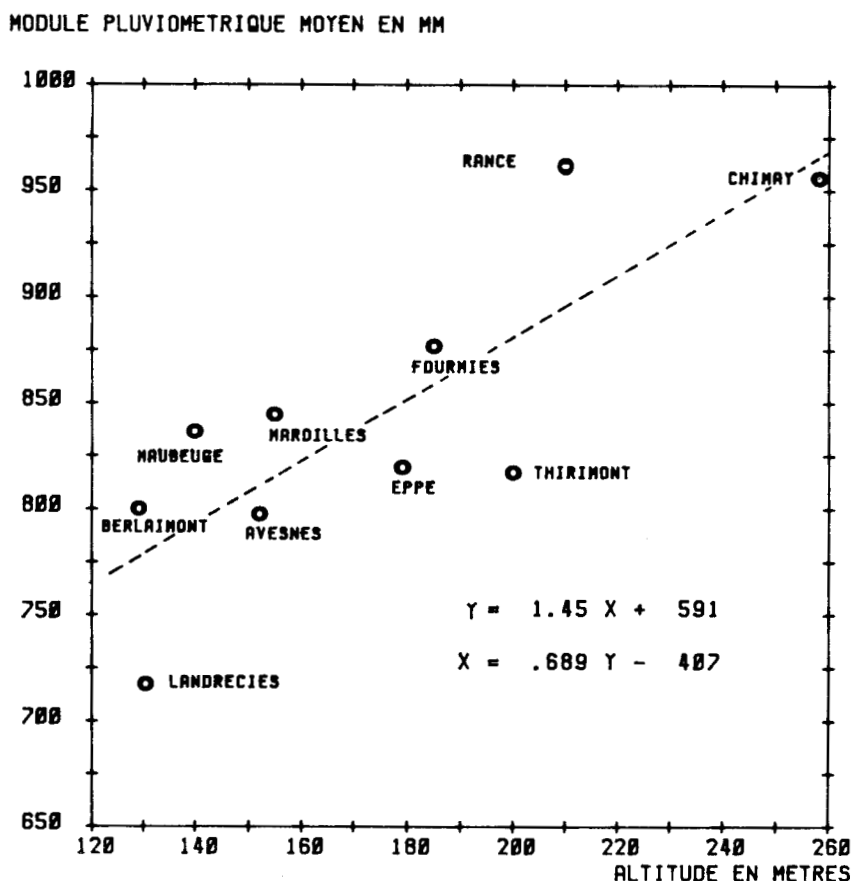
11 : Modules pluviométriques annuels en mm
 * Valeur estimée

STATION PLUVIOMETRIQUE	ALTITUDE EN METRES	PERIODE D'OBSERVATION	PLUIE MOYENNE en mm	PLUIE MOYENNE 1963-1984 en mm
THIRIMONT	200	1971-1984	810	817
RANCE	210	1951-1984	972	963
CHIMAY	258	1951-1984	961	957
EPPE	179	1963-1984	811	820
MAUBEUGE	140	1962-1984	833	838
COLLERET	177	1976-1984	757	-
ECCLES	220	1977-1984	861	-
SARSPOTERIES	190	1974-1984	829	-
DIMONT	205	1976-1984	880	-
LIESSIES	175	1969-1981	891	-
FOURMIES MN	185	1962-1984	876	878
AVESNES M.N	152	1962-1984	798	799
BERLAIMONT	129	1963-1984	802	802
MARAILLES	155	1968-1984	839	844
LANDRECIES	131	1963-1984	718	718

12 a : Modules pluviométriques moyens en mm



12 b : Comparaison des modules pluviométriques



13 : Corrélation entre la pluviométrie moyenne 1963-1984 (en mm) et l'altitude

Le degré d'association entre l'altitude (X) et la pluie annuelle (Y) est relativement élevé ($r=0,8$) et l'équation de la droite de régression est la suivante :

$$Y = 1,45 X + 591$$

Bien que le nombre de couples de points altitude-pluie moyenne soit faible (10), le coefficient de corrélation est significatif. Selon les tables de Fisher, il y a moins d'une chance sur cent pour que ce résultat soit dû au hasard.

1.3.2. Pluies minimales et maximales

Pour chaque station, les valeurs minimales et maximales de la pluviométrie annuelle ont été relevées. Elles apparaissent dans le document 14.

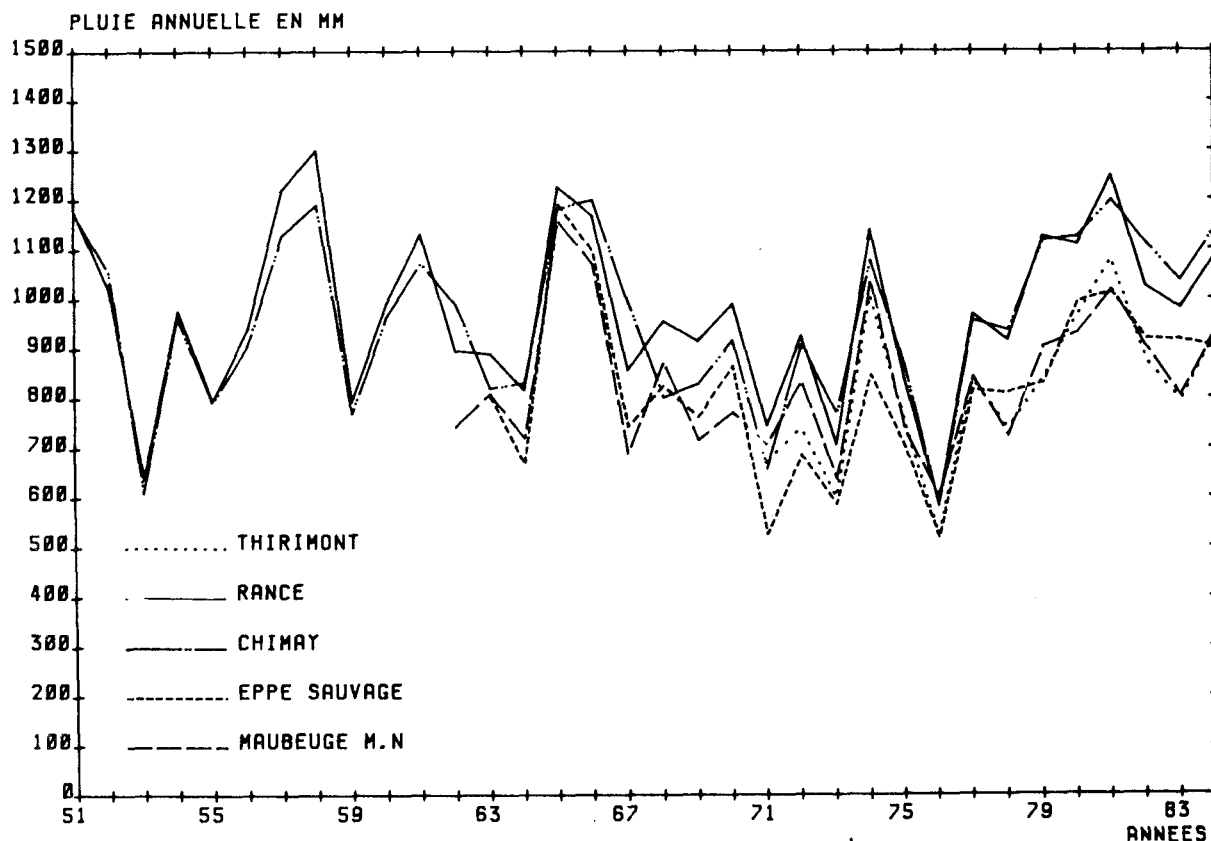
Les valeurs maximales observées concernent naturellement les stations les plus orientales du bassin (1246 mm à Rance en 1981, 1200 mm à Chimay en 1966).

Les valeurs minimales caractérisent la sécheresse de l'année 1976.

	MAX	ANNEE	MIN	ANNEE	MAX/MIN
RANCE	1246	1981	587	1976	2,1
CHIMAY	1200	1966	582	1976	2,1
EPPE	1192	1965	499	1976	2,4
MAUBEUGE MN	1159	1965	602	1976	1,9
FOURMIES	1125	1965	487	1976	2,3
AVESNES	1061	1981	446	1976	2,4
BERLAIMONT	1126	1965	505	1976	2,2
LANDRECIÉS	954	1965	474	1976	2,0

14 : Pluies annuelles minimales et maximales observées sur la période 1963-1984

On constate globalement la grande variabilité des pluies annuelles qui peuvent, au fil des années, varier du simple au double. Cette variabilité est bien illustrée par la représentation, à titre d'exemple, de l'évolution conjointe des pluies annuelles en cinq stations situées à l'est du bassin (document 15).



15 : Evolution conjointe des modules pluviométriques annuels de 1951 à 1984 en cinq stations situées à l'Est du bassin de la Sambre.

1.4. ETUDE STATISTIQUE DES PLUIES ANNUELLES

Les données successives de la pluviométrie annuelle s'ajustent particulièrement bien à la loi de Gauss (cf. annexe III).

Le programme AJTRAC (cf. annexe informatique) permet de visualiser les ajustements (documents 16 à 20) sur papier de Gauss (abscisse : fréquence au dépassement / ordonnée: module pluviométrique annuel en mm) et calcule l'équation de la droite d'ajustement (droite de Henry). Ceci permet d'en déduire les valeurs probables (quantiles) des pluies annuelles en chaque station pour des temps de retour de 2, 3, 5, 10, 50 et 100 ans. L'ensemble des paramètres et des quantiles calculés est synthétisé dans le document 21.

On retrouve l'influence de l'altitude déjà notée lors de l'étude des pluies annuelles moyennes.

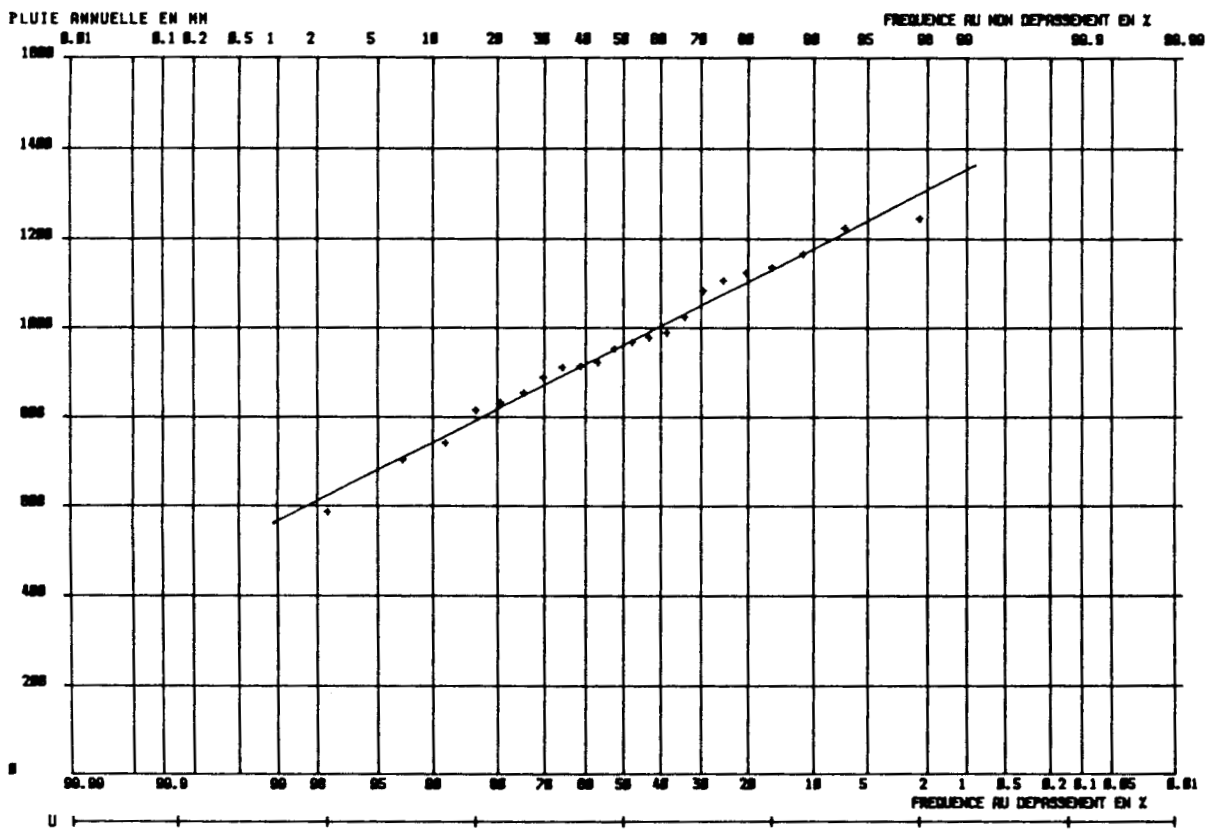
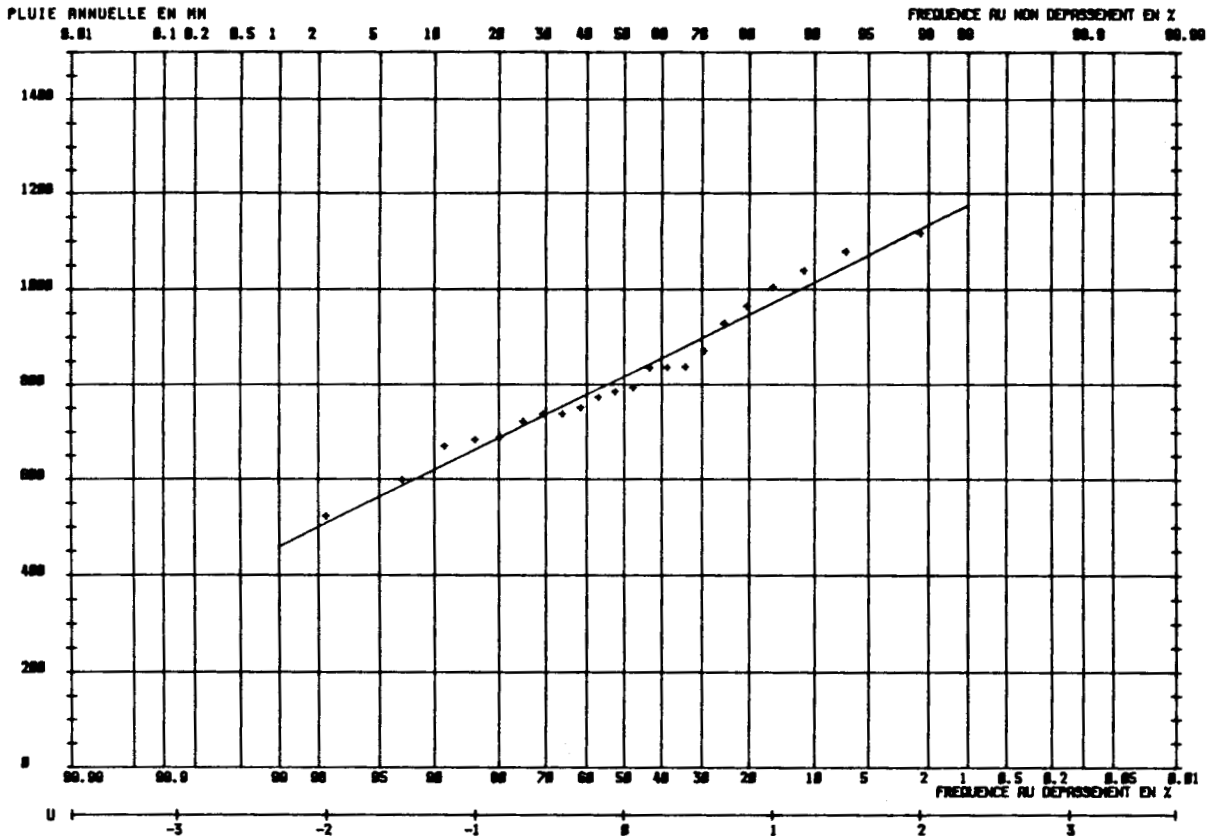
La variabilité de la pluie annuelle conduit à des écart-types élevés. Ceux-ci étant pris en compte dans le calcul des quantiles, on note un accroissement rapide des pluies annuelles.

1.5. LAME MOYENNE ANNUELLE

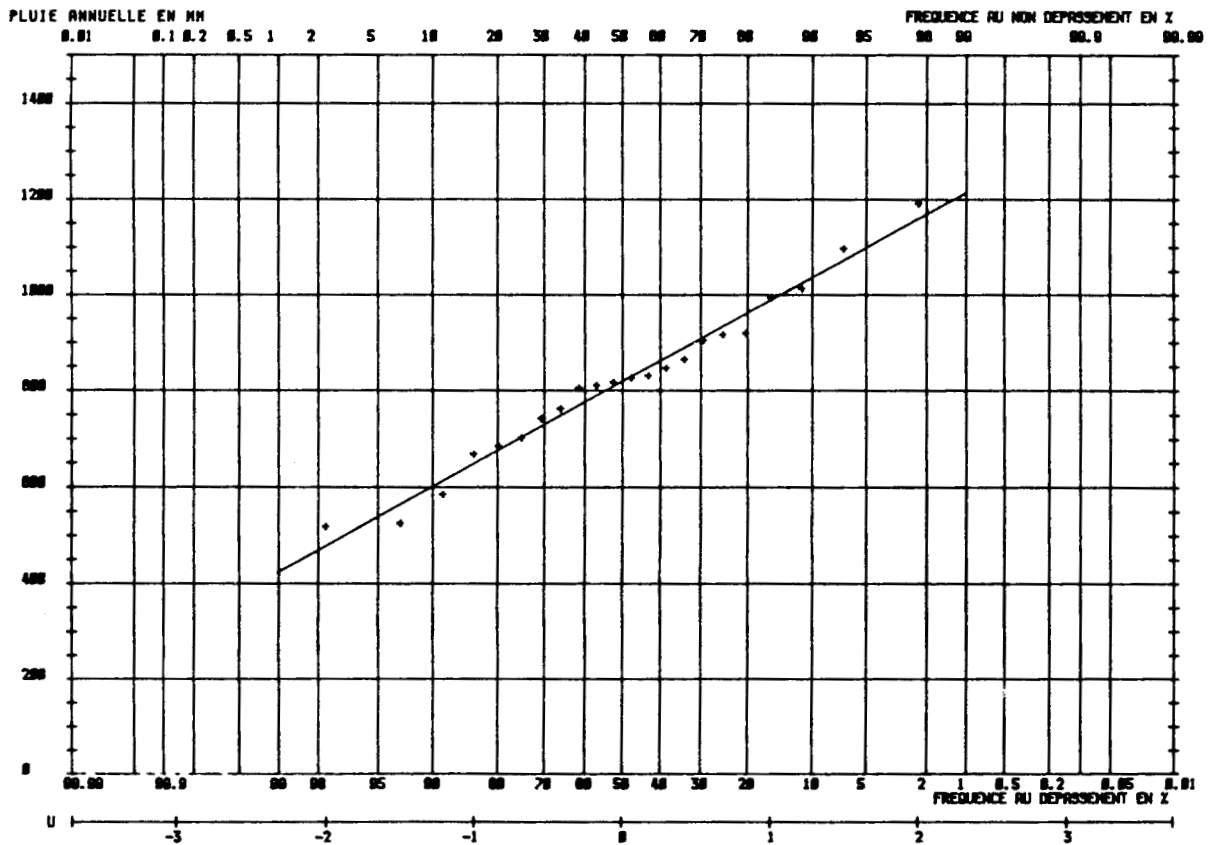
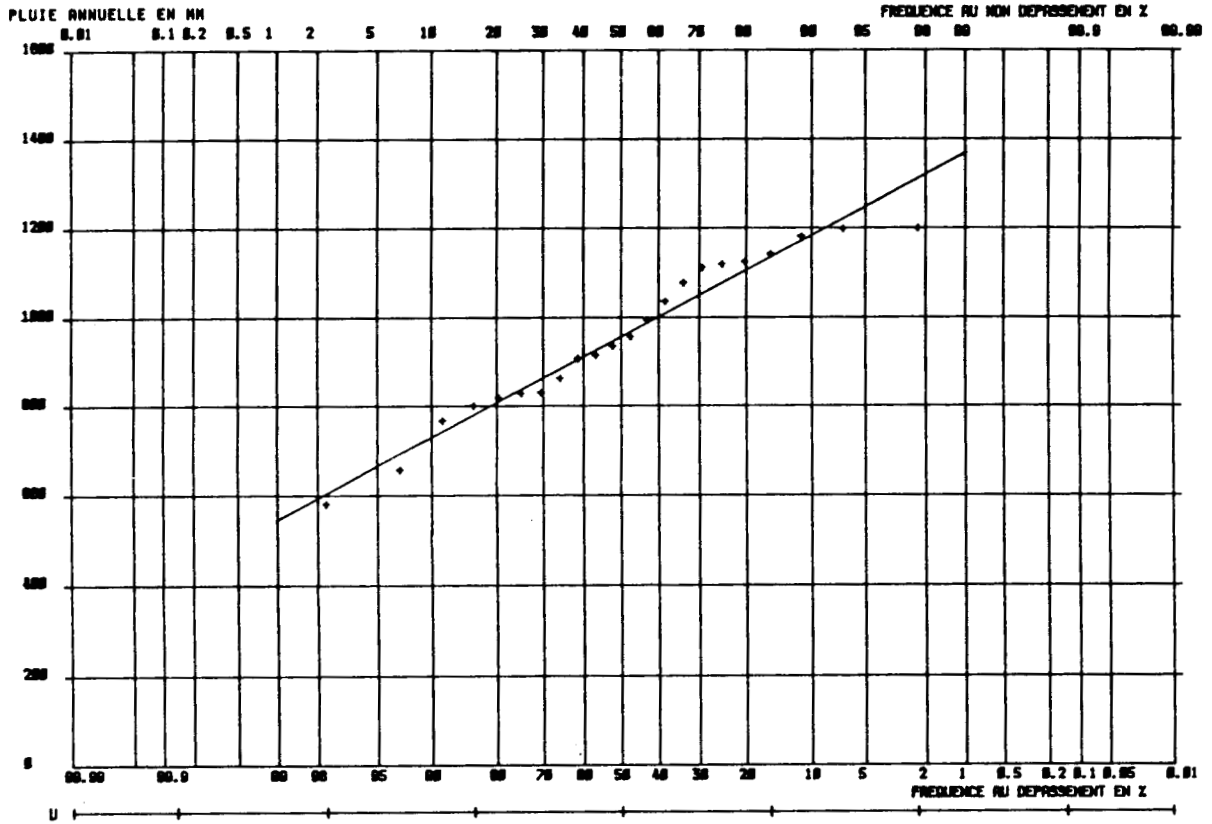
Cette notion permet de caractériser l'importance de la pluviométrie moyenne à l'échelle de la région sur la période commune 1963-1984.

La méthode de la simple moyenne arithmétique est assez grossière et risque, en l'absence d'un grand nombre de stations, de fournir une image fautive de la pluviométrie car elle donne autant d'importance à des stations situées en périphérie qu'à celles situées au centre du bassin ; si, en outre, les stations périphériques fournissent des valeurs extrêmes, la lame moyenne risque d'être surestimée. Pour le bassin de la Sambre, la lame moyenne estimée par cette méthode est de 843 mm.

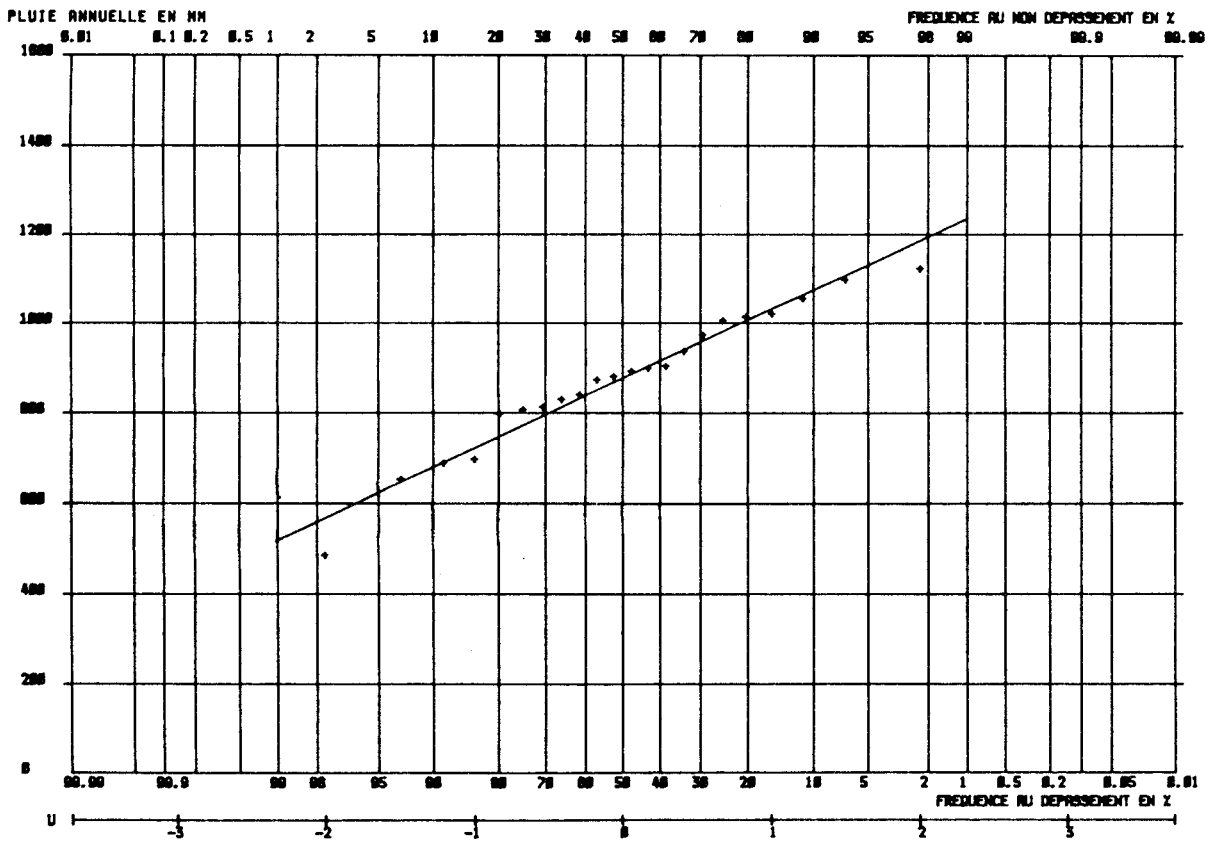
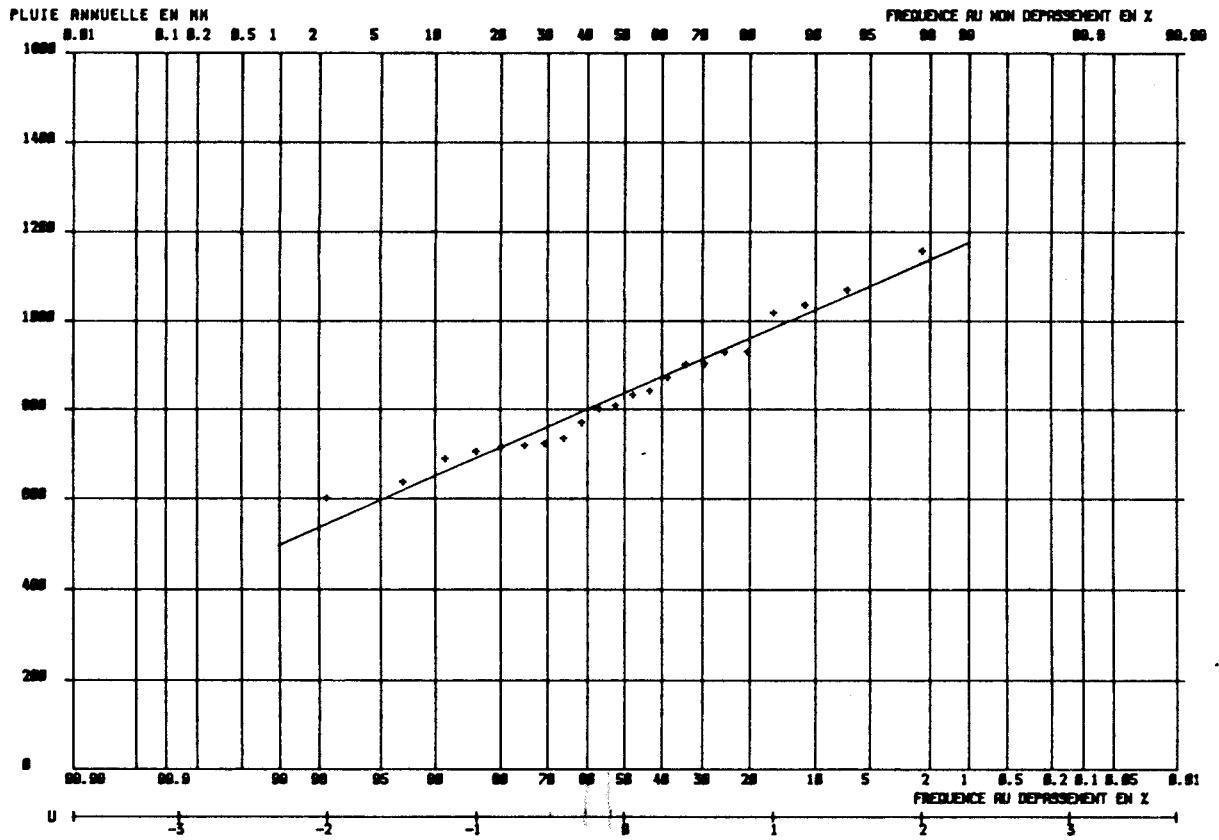
On a choisi d'utiliser la méthode de Thiessen. Dans cette méthode, on attribue à chaque pluviomètre un poids proportionnel à sa zone d'influence présumée (polygone de Thiessen), telle qu'un point situé dans cette zone soit plus près, en distance horizontale, de ce pluviomètre que de tout autre.



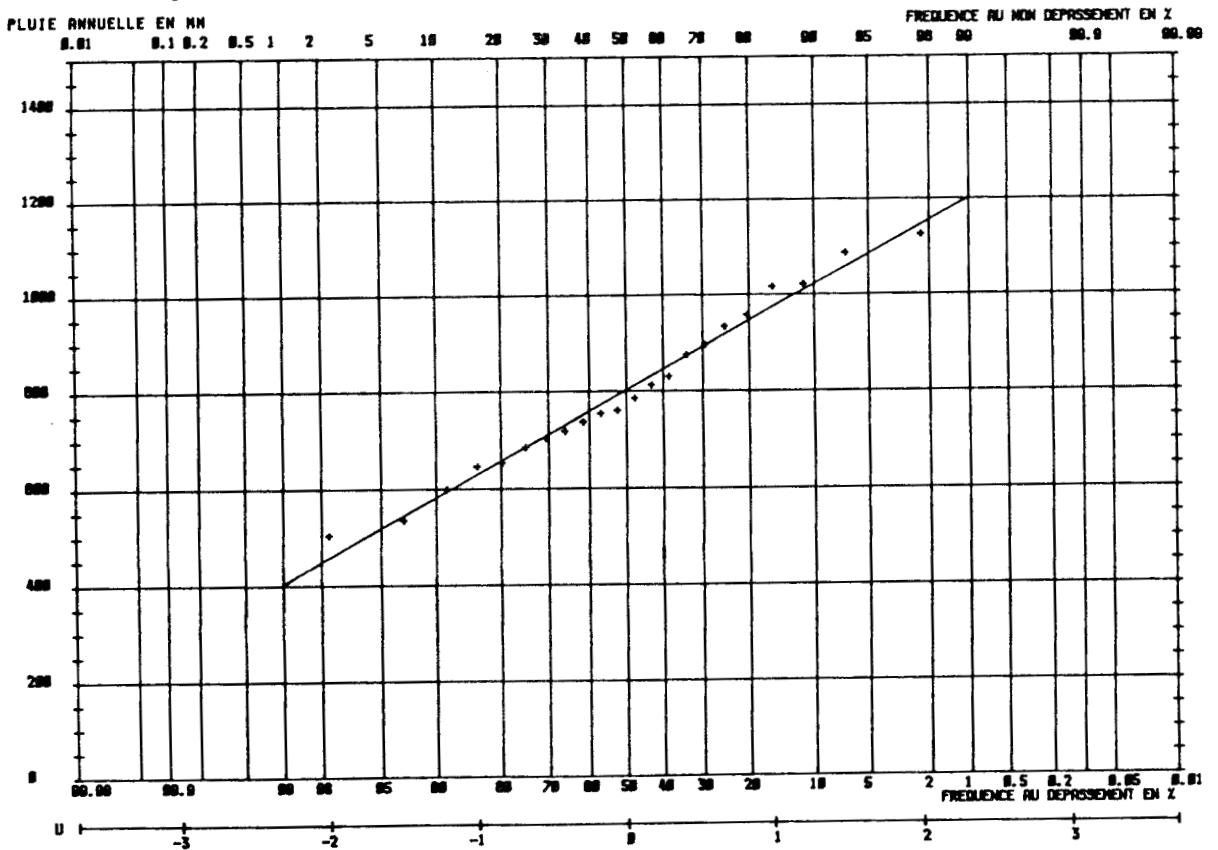
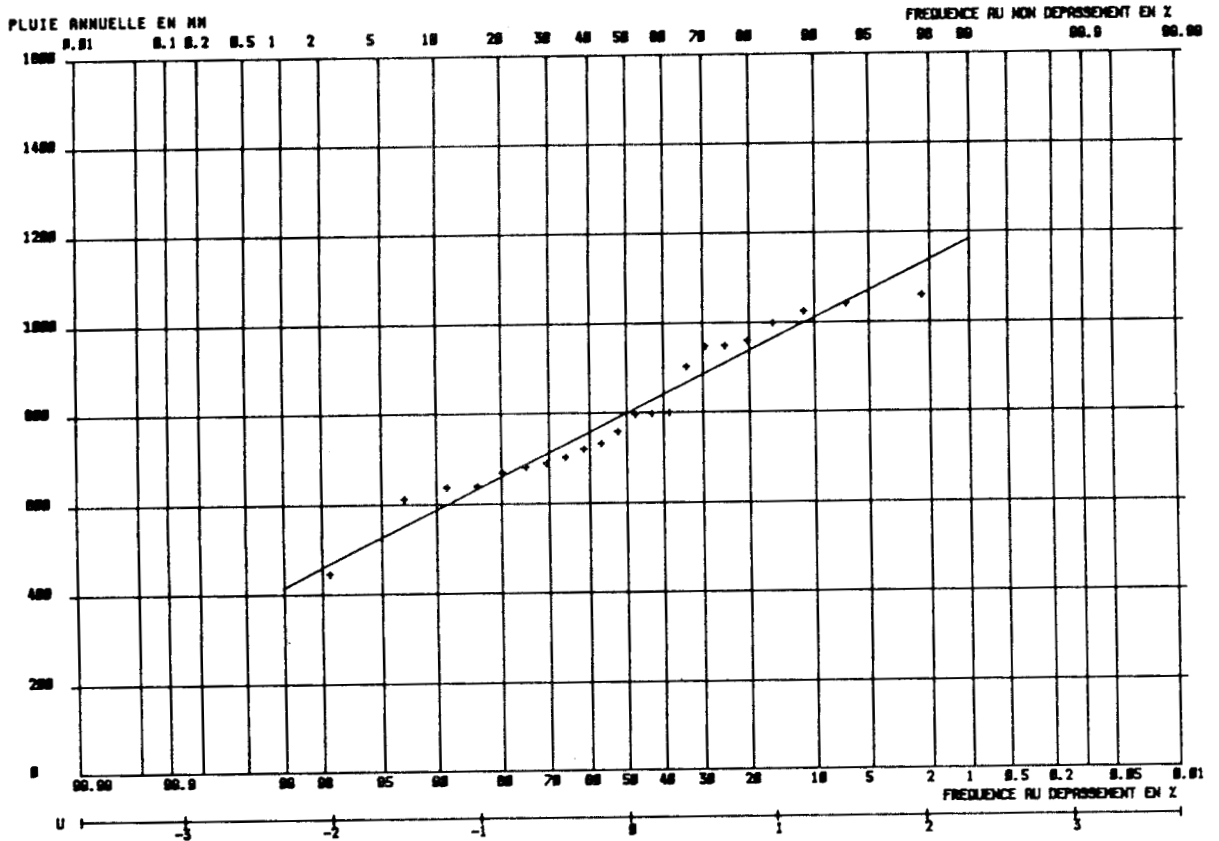
16 : Ajustements de Gauss sur la pluviométrie annuelle de Thirimont et de Rance (période 1963-1984)



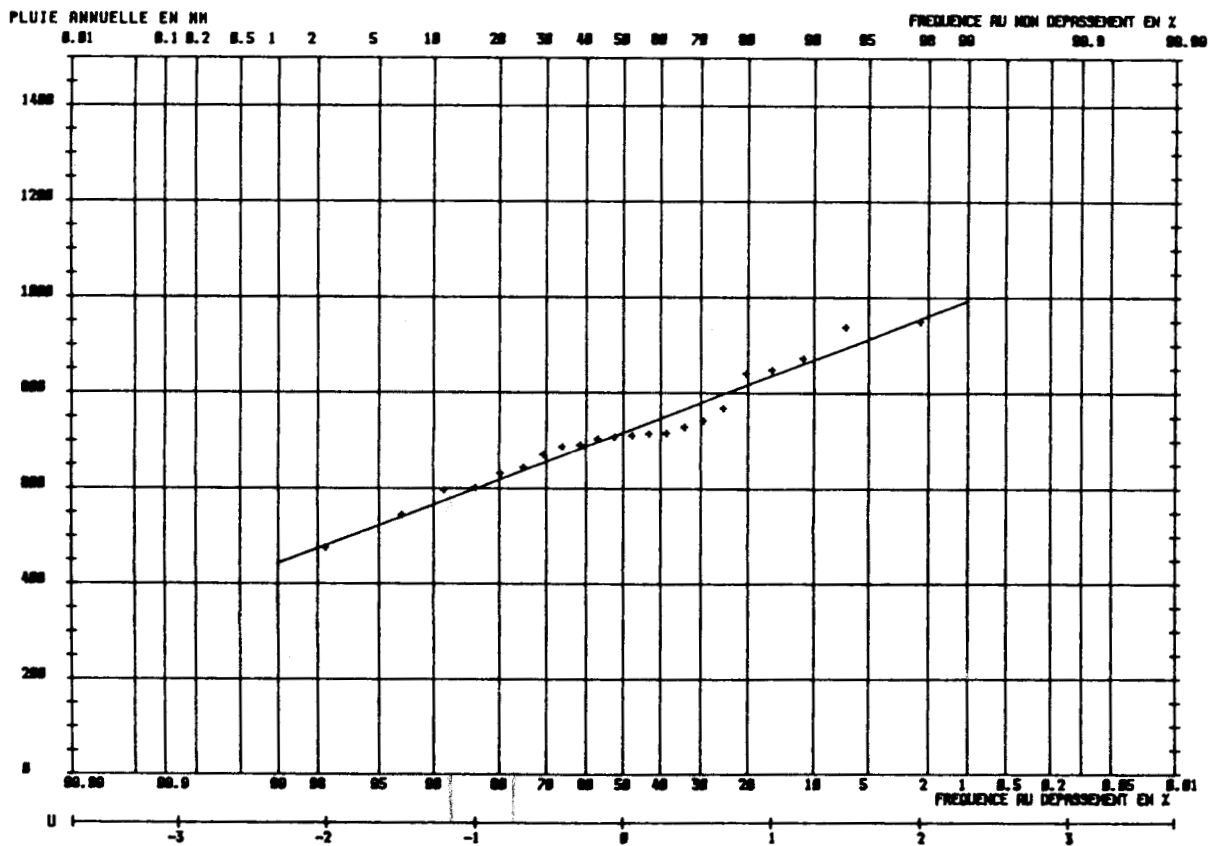
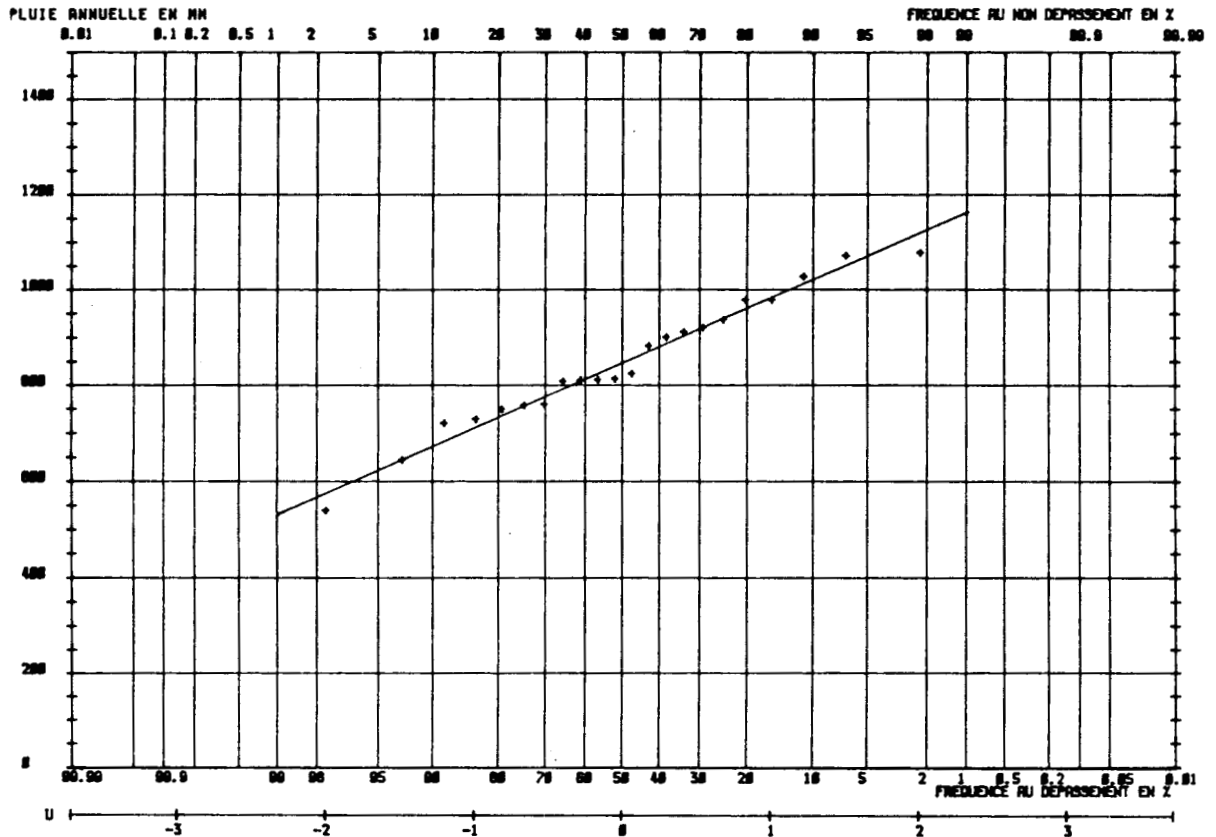
17 : Ajustements de Gauss sur la pluviométrie annuelle de Chimay et d'Eppe Sauvage (période 1963-1984)



18 : Ajustements de Gauss sur la pluviométrie annuelle de Maubeuge et de Fourmies (période 1963-1984)



19 : Ajustements de Gauss sur la pluviométrie annuelle d'Avesnes et de Berlaimont (période 1963-1984)



20 : Ajustements de Gauss sur la pluviométrie annuelle de Marolles et de Landrecies (période 1963-1984)

STATIONS	MOYENNE (MO)	ECART-TYPE (s)	TEMPS DE RETOUR						
			2 ANS	3 ANS	5 ANS	10 ANS	20 ANS	50 ANS	100 ANS
THIRIMONT I.C 95 %	817	154	817 749-886	885 813-956	947 868-1027	1015 923-1108	1072 966-1177	1134 1014-1255	1177 1045-1309
RANCE I.C 95 %	963	170	963 888-1038	1037 958-1116	1106 1018-1194	1181 1079-1282	1242 1127-1358	1312 1179-1445	1358 1213-1503
CHIMAY I.C 95 %	957	177	957 879-1036	1034 952-1116	1106 1015-1198	1184 1078-1290	1248 1128-1369	1320 1182-1459	1369 1218-1520
EPPE I.C 95 %	820	170	820 744-895	894 815-973	963 875-1051	1038 936-1140	1100 984-1216	1170 1036-1303	1216 1071-1361
HAUBEUGE I.C 95 %	838	146	838 773-902	901 833-969	961 885-1036	1025 938-1113	1078 979-1178	1038 1024-1253	1178 1053-1303
FOURNIES I.C 95 %	878	155	878 809-946	945 873-1017	1008 928-1087	1076 983-1168	1132 1027-1237	1195 1074-1316	1237 1105-1369
AVESNES I.C 95 %	799	166	799 726-873	871 795-948	939 853-1024	1012 913-1111	1072 959-1185	1139 1010-1269	1185 1043-1326
BERLAINMONT I.C 95 %	802	172	802 726-879	877 797-957	947 858-1036	1023 920-1126	1085 968-1202	1155 1021-1290	1202 1056-1349
MARAILLES I.C 95 %	848	136	848 788-909	907 844-971	963 893-1033	1023 941-1104	1072 980-1165	1128 1021-1234	1165 1049-1281
LANDRECIÉS I.C 95 %	718	119	718 666-771	770 715-825	818 757-879	870 799-941	913 832-994	962 869-1054	994 893-1095
$P(T) = s u + MO$ s : écart-type MO : moyenne u : variable réduite de Gauss			770-----> Estimation 715-825----> Intervalle de confiance à 95 %						

21 : Paramètres des ajustements de Gauss et modules pluviométriques annuels de période de retour 2, 3, 5, 10, 20, 50 et 100 ans.

Les quantiles $P(T)$ des pluies annuelles se déduisent de l'équation de la droite de Henry : $P(T) = s u + MO$. La table de Gauss fournit la valeur de la variable réduite u correspondant à la probabilité P au dépassement choisie, ce qui permet de calculer le quantile. La période de retour T est l'inverse de la probabilité au dépassement $F (T = 1/F)$.

Soit s_i , la surface de la zone d'influence du pluviomètre, et S_i , la surface totale du bassin versant, la pluie moyenne observée en ce pluviomètre sur la période 1963-1984 sera pondérée par le coefficient s_i/S_i . La lame moyenne pour l'ensemble du bassin s'obtient en sommant les termes obtenus pour tous les pluviomètres.

L'ensemble des surfaces est obtenu par utilisation du planimètre digital "OTT" dont la précision sur carte est de l'ordre du millimètre carré est très suffisante pour le problème traité. Cette méthode est plus représentative que la précédente et le tracé des zones d'influence a l'avantage d'être univoque.

Pour le bassin de la Sambre, la lame moyenne fournie par cette méthode est de 834 mm. Les coefficients de pondération appliqués aux modules pluviométriques sont précisés sur le document 22. On note que ce résultat est proche de celui que l'on obtient par une simple moyenne arithmétique (844 mm), ce qui montre que la couverture pluviométrique du bassin est bien répartie.

STATION	ALTITUDE (en m)	MODULE PLUVIOMETRIQUE 63-84 (en mm)	SURFACE (en km ²)	COEFFICIENT DE PONDERATION (Thiessen)	PLUIE PONDEREE (en mm)
THIRIMONT	200	817	15,6	0,012	10,2
RANCE	210	963	48,6	0,039	37,3
CHIMAY	258	957	29,4	0,023	22,4
EPPE SAUVAGE	179	820	168,2	0,134	110,0
NAUBEUGE	140	838	183,3	0,146	122,5
POURHIES	185	878	157,4	0,125	110,2
AVESNES	152	799	232,4	0,185	148,0
BERLAIMONT	129	802	126,4	0,101	80,8
MAROILLES	155	844	242,4	0,193	163,1
LANDRECIES	131	718	50,6	0,040	28,9
SURFACE TOTALE :			1254,3		
MOYENNE ARITHMETIQUE (mm) :		843,6	LAME MOYENNE (mm) :		833,4

22 : Lame moyenne 1963-1984 sur le bassin de la Sambre

1.6. CONCLUSIONS SUR L'ETUDE PLUVIOMETRIQUE ANNUELLE

L'étude pluviométrique à l'échelle annuelle a permis :

- . d'effectuer une première critique des données et d'émettre des réserves sur le bon fonctionnement de la station de Liessies
- . de montrer la bonne cohérence d'ensemble des pluies sur le bassin à ce pas de temps
- . de quantifier localement les précipitations annuelles moyennes et d'estimer leurs valeurs probables pour des périodes de retour de 2 à 100 ans.
- . de calculer la lame moyenne reçue sur le bassin de la Sambre.

Cette étude doit être complétée par l'étude des données pluviométriques à l'échelle mensuelle.

CHAPITRE 2 : ETUDE DES PLUIES A L'ECHELLE MENSUELLE

Les précipitations mensuelles permettent de définir le régime pluviométrique du bassin, c'est-à-dire la répartition de la hauteur des précipitations annuelles entre les divers mois de l'année.

2.1. CRITIQUE DES PLUIES MENSUELLES

Le calcul des corrélations annuelles entre toutes les stations du bassin de la Sambre (document 10) montre que les stations de Maubeuge, d'Avesnes et de Fourmies présentent de bonnes corrélations avec les stations environnantes. Ces trois stations ont été choisies comme stations de référence. Une quatrième station de référence, celle de Rance a été choisie parce qu'elle est également bien corrélée avec les stations environnantes mais aussi parce qu'elle est gérée par un service indépendant (Institut Royal de Météorologie de Belgique). On définit ainsi quatre zones d'influence qui se recoupent partiellement :

- Zone de Maubeuge M.N : Thirimont, Colleret, Eccles, Sars-Poteries, Dimont, Avesnes M.N, Berlaimont ;

- Zone d'Avesnes : Liessies, Fourmies, Landrecies, Maroilles, Berlaimont, Maubeuge M.N ;

- Zone de Fourmies : Chimay, Epe, Liessies, Avesnes M.N ;

- Zone de Rance : Fourmies, Epe sauvage, Liessies, Chimay.

Pour chaque zone, les corrélations ont été effectuées mois par mois entre chaque station de la zone et la station de référence.

L'utilisation de la méthode de corrélation linéaire n'a cependant de sens que si les échantillons sont distribués selon la loi normale. Sous nos climats, les pluies annuelles obéissent presque toujours à cette loi mais la normalité diminue et les lois de distribution des échantillons deviennent asymétriques lorsque le pas de temps d'observation diminue. Dans le cas de la pluviométrie mensuelle, il faut vérifier que les conditions de normalité des échantillons soient respectées. Ceci peut être constaté par report sur papier de Gauss, les couples valeur de la pluie mensuelle-fréquence empirique s'alignant selon une droite de Henry.

Globalement, les distributions sont souvent gaussiennes bien que l'on constate une légère dissymétrie. On note par ailleurs que les coefficients de variation (document 44) sont proches de 0,5 et qu'ils atteignent à peine 0,7 pour les pluies de septembre, octobre et décembre. Ceci confirme qu'on se trouve en limite de normalité avec des lois de distribution peu dissymétriques.

La méthode de corrélation linéaire reste donc justifiée d'autant plus que cette méthode est utilisée ici à des fins de correction.

Si l'on désire utiliser les paramètres de la régression pour étendre une série d'observations mensuelles, on vérifiera préalablement les conditions de normalité.

Pour chaque mois, on a indiqué le coefficient de corrélation, l'effectif pris en compte, les paramètres de la droite de régression ainsi que l'écart-type des résidus calculé selon la loi des moindres carrés (document 23 pour la zone de Maubeuge, document 24 pour la zone d'Avesnes, document 25 pour la zone de Fourmies, document 26 pour la zone de Rance).

Ces corrélations permettent de rechercher les causes d'un coefficient de corrélation particulièrement faible. On peut ainsi détecter des erreurs d'unités sur les bordereaux des observateurs, des erreurs de saisie et améliorer ainsi la qualité des données. Lorsque la cause d'une mauvaise corrélation n'est pas clairement déterminée, aucune correction n'est effectuée.

Globalement, les coefficients de corrélation sont élevés et significatifs.

Dans la zone de Maubeuge (document 23), deux coefficients sont voisins de 0,8 pour les corrélations de novembre, il s'agit des couples Maubeuge-Colleret et Maubeuge-Sars-Poteries. Dans ces deux cas, les fortes pluies enregistrées (60 mm) à la fin de novembre 83 sur la région n'ont pas été enregistrées à Colleret et à Eccles. On pourrait suspecter une panne simultanée des deux pluviographes et effectuer une correction mais on note que la crue enregistrée à l'exutoire du bassin reste très modeste (débit maximum instantané inférieur à 3 m³/s à la station de Ferrière-la-Grande). Les données de novembre 83 ont donc été conservées.

Lorsque les coefficients sont inférieurs à 0,85, il s'agit très souvent de corrélations faites pour des mois d'été où des orages localisés entraînent des différences appréciables de la pluviométrie mensuelle entre stations parfois voisines.

STATION Y		JANVIER	FEVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DECEMBRE
THIRIMONT	r	0,98	0,96	0,98	0,90	0,87	0,89	0,87	0,93	0,97	0,98	0,94	0,98
	n	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
	a	0,98	0,96	0,95	0,85	0,93	0,97	0,96	0,79	0,85	1,08	0,74	0,99
	b	-4,7	1,7	1,6	8,1	7,3	1,0	2,2	12,9	2,3	-6,0	17,9	-0,4
COLLERET	r	0,98	0,92	0,91	0,94	0,91	0,93	0,97	0,92	0,98	0,97	0,82	0,97
	n	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
	a	0,98	0,92	0,87	0,78	1,12	0,86	0,79	0,87	0,88	0,91	0,75	0,92
	b	-1,10	0,70	0,87	0,78	-1,12	0,86	0,79	0,87	0,88	0,91	0,75	0,92
ECCLES	r	0,97	0,93	0,89	0,86	0,90	0,84	0,97	0,76	0,97	0,98	0,97	0,92
	n	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
	a	1,11	0,79	0,89	0,73	0,98	1,09	1,07	0,76	0,95	1,08	0,55	0,85
	b	-23,8	9,7	6,5	13,0	0,0	-11,7	-4,9	15,1	-2,1	-0,6	26,2	2,4
SARSPOTERIES	r	0,95	0,95	0,93	0,95	0,90	0,82	0,92	0,79	0,96	0,97	0,82	0,97
	n	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
	a	1,12	0,89	0,83	0,89	0,86	0,85	1,18	0,88	0,93	1,04	0,76	0,95
	b	-16,1	8,3	11,0	4,5	9,7	12,8	-6,7	6,0	4,4	-2,0	7,6	-0,8
DINONT	r	0,98	0,92	0,94	0,94	0,95	0,88	0,92	0,96	0,94	0,99	0,96	0,95
	n	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
	a	1,08	0,79	0,92	0,83	0,99	0,83	1,20	1,26	0,90	1,03	1,02	0,97
	b	-8,9	14,3	6,6	9,1	2,4	14,3	2,2	-1,7	3,3	0,6	0,0	3,3
AVESNES M.N.	r	0,92	0,88	0,94	0,93	0,94	0,92	0,88	0,86	0,96	0,98	0,91	0,97
	n	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
	a	0,84	0,94	0,90	0,88	0,92	0,84	0,77	0,72	0,96	1,00	0,81	1,05
	b	6,5	5,4	3,9	4,9	5,4	6,0	11,5	13,0	-0,5	-3,1	11,7	-4,2
BERLAIMONT	r	0,89	0,92	0,93	0,93	0,94	0,81	0,87	0,94	0,91	0,99	0,94	0,97
	n	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
	a	0,89	0,95	0,79	0,94	0,90	0,74	1,00	1,01	0,96	1,07	0,90	1,06
	b	0,8	2,4	0,9	-0,6	4,6	7,2	1,6	0,8	1,4	-7,0	5,2	-5,5

23 : Paramètres des corrélations effectuées entre les stations indiquées ci-dessus et la station de référence de Maubeuge M.N.

r : coefficient de corrélation
n : nombre de couples de points
a : pente de la droite de régression
b : ordonnée à l'origine
Sr : écart-type des résidus
Equation de la droite de régression : $y = ax + b$
y : pluie mensuelle en Y (mm)
x : pluie mensuelle à Maubeuge M.N (mm)

STATION Y		JANVIER	FEVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DECEMBRE
LIESSIES	r	0,90	0,96	0,97	0,80	0,90	0,85	0,93	0,84	0,91	0,97	0,87	0,96
	n	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
	a	1,23	1,12	1,31	0,90	0,92	1,03	1,33	0,82	0,94	0,95	1,00	0,86
	b	-6,3	2,1	-9,4	10,5	13,9	5,9	-5,9	18,8	12,7	8,7	9,1	8,0
FOURNIES	r	0,92	0,91	0,95	0,92	0,91	0,81	0,60	0,84	0,94	0,98	0,95	0,98
	n	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
	a	0,96	1,05	1,00	1,06	0,82	0,75	0,69	0,96	1,05	1,07	1,00	1,01
	b	14,0	3,3	9,4	1,1	14,8	16,2	24,8	13,4	6,9	4,3	8,9	6,5
LANDRECIES	r	0,81	0,95	0,67	0,85	0,90	0,89	0,88	0,89	0,95	0,98	0,89	0,94
	n	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
	a	0,85	0,88	0,53	0,86	0,78	0,77	0,98	0,78	0,92	0,83	1,00	0,80
	b	-2,2	-1,5	19,6	1,4	8,4	4,2	-0,1	13,2	7,9	5,4	-5,5	2,2
MAROILLES	r	0,88	0,92	0,98	0,92	0,93	0,93	0,88	0,90	0,98	0,98	0,94	0,98
	n	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
	a	0,85	0,92	0,97	1,07	0,79	0,97	1,14	1,16	0,98	0,97	1,22	0,89
	b	14,6	5,2	6,8	-2,0	15,9	-1,8	0,2	2,1	5,4	4,4	-8,1	5,0
BERLAIMONT	r	0,88	0,97	0,92	0,94	0,94	0,84	0,93	0,87	0,91	0,98	0,94	0,96
	n	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
	a	0,94	0,99	0,81	1,00	0,92	0,85	1,22	1,11	0,96	1,04	1,01	0,97
	b	5,4	-0,4	10,8	-2,2	3,5	4,0	-9,0	0,7	4,1	-2,1	0,7	1,8
MAUBEUGE M.N.	r	0,92	0,88	0,94	0,93	0,94	0,92	0,88	0,86	0,96	0,98	0,91	0,97
	n	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
	a	0,99	0,82	0,97	0,98	0,96	0,99	1,00	1,03	0,97	0,95	1,03	0,90
	b	4,6	6,9	4,7	2,8	3,8	7,5	4,9	3,0	5,4	5,9	2,9	8,0

24 : Paramètres des corrélations effectuées entre les stations indiquées ci-dessus et la station de référence d'Avesnes M.N.

r : coefficient de corrélation
n : nombre de couples de points
a : pente de la droite de régression
b : ordonnée à l'origine
Sr : écart-type des résidus
Equation de la droite de régression : $y = ax + b$
y : pluie mensuelle en Y (mm)
x : pluie mensuelle à Avesnes (mm)

2.2. EXTENSION DES DONNEES MENSUELLES DES STATIONS DE THIRIMONT ET DE MAROILLES

Afin d'utiliser les séries mensuelles de Thirimont et de Maroilles sur la période commune 1963-1984, il a été procédé à leur extension selon la procédure déjà utilisée au paragraphe 1.2. du présent chapitre.

2.2.1. Station de Thirimont

La série de Thirimont a été étendue en utilisant les séries des stations de Rance et de Maubeuge M.N dont les corrélations respectives avec Thirimont sont bonnes. Les coefficients de corrélation, les paramètres des équations des droites de régression multiple, les écart-types des résidus (erreur-type de la régression), ainsi que l'efficacité relative des extensions (cf. annexe corrélation) sont présentés dans le document 27.

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ai	0,306	0,172	0,252	0,875	0,677	0,228	0,568	0,136	0,519	0,403	0,366	0,088
bi	0,538	0,77	0,672	0	0,291	0,734	0,398	0,69	0,42	0,579	0,455	0,875
Ki	1	0	0	2	-1	-1	-2	11	-5	-4	6	0
ri	0,99	0,97	0,99	0,96	0,95	0,89	0,95	0,94	0,98	0,99	0,96	0,98
SRi	4,9	6,5	7	7	12	20	14	9	8	9	8	9
E	0,644	0,66	0,644	0,667	0,675	0,719	0,675	0,683	0,652	0,644	0,667	0,652
k'	22	21	22	21	21	19	21	20	21	22	21	21

$$\text{Pluie mensuelle à Thirimont} = a_i \cdot x_i + b_i \cdot y_i + K_i$$

i : indice du mois

ri : coefficient de corrélation multiple

xi : pluie du mois i à Rance

SRi : erreur-standard ou erreur-type de la régression

yi : pluie du mois i à Maubeuge

E : efficacité relative (cf. annexe corrélation)

Ki : constante du mois i

k' : nombre de valeurs fictivement observées

27 : Paramètres de l'extension des pluies mensuelles à la station de Thirimont.

2.2.2. Station de Maroilles

La série de Maroilles a été étendue en utilisant les séries des stations de Berlaimont et d'Avesnes M.N dont les corrélations respectives avec Maroilles sont bonnes. Les coefficients de corrélation, les paramètres des équations des droites de régression multiple, les écart-types des résidus (erreur-type de la régression), ainsi que l'efficacité relative des extensions (cf. annexe corrélation) sont présentés dans le document 28.

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ai	0,611	0,854	0,502	1,124	0,072	0,312	0,596	0,637	0,471	0,758	0,936	0,312
bi	0,249	0,072	0,547	0,036	0,726	0,7	0,375	0,474	0,525	0,178	0,219	0,633
Ki	12	6	3	-2	16	-1	7	2	6	6	-4	2
ri	0,95	0,94	0,99	0,97	0,93	0,94	0,91	0,93	0,99	0,99	0,98	0,98
SRi	8	10	6	8	12	-1	20	15	9	8	9	7
E	0,796	0,801	0,778	0,787	0,806	0,801	0,815	0,806	0,778	0,778	0,782	0,782
k'	21	21	22	22	21	21	21	21	22	22	22	22

$$\text{Pluie mensuelle à Maroilles} = a_i \cdot x_i + b_i \cdot y_i + K_i$$

i : indice du mois

ri : coefficient de corrélation multiple

xi : pluie du mois i à Berlaimont

SRi : erreur-standard ou erreur-type de la régression

yi : pluie du mois à Avesnes

E : efficacité relative (cf. annexe corrélation)

Ki : constante du mois i

k' : nombre de valeurs fictivement observées

28 : Paramètres de l'extension des pluies mensuelles à la station de Maroilles

2.3. REGIME MENSUEL DES PRECIPITATIONS

L'ensemble des moyennes mensuelles interannuelles et des écart-types sur la période 1963-1984 est présenté dans le document 44.

Afin de procéder à une comparaison éliminant l'influence de la durée inégale des mois de l'année, on calcule une pluie mensuelle fictive par la formule :

$$PM * 365$$

$$PMF = \frac{\quad}{\quad}$$

$$12 N$$

avec :

PMF : Pluie mensuelle observée sur une période fictive de 30,4 jours (pluie mensuelle pondérée)

PM : Pluie mensuelle observée

N : Nombre de jours du mois considéré

Les résultats apparaissent dans les documents 29a et 29b et l'évolution de la moyenne mensuelle fictive interannuelle est représentée par les documents 30a et 30b.

Les résultats obtenus montrent que, sur l'ensemble du bassin, la pluviosité de décembre (moyenne de 77 mm sur la période 1963-1984) mais surtout celle de juin (81,9 mm) et de novembre (93 mm) est bien supérieure à la moyenne mensuelle de l'année (70,4 mm).

Si l'on considère la partie est du bassin et la moyenne des pluies mensuelles entre les stations de Thirimont, Rance, Chimay, Eppe, Maubeuge et Fourmies, les pluies moyennes de juin (86,5 mm) et de novembre (96,2) montrent encore davantage l'importance des pluies de ces mois.

Il faut noter que, si les moyennes mensuelles peuvent donner une idée du régime pluviométrique, elles ne peuvent préjuger des mois à risque pour les inondations ; ce dernier problème concernant davantage l'intensité de la pluie que la quantité moyenne sur une plus longue période.

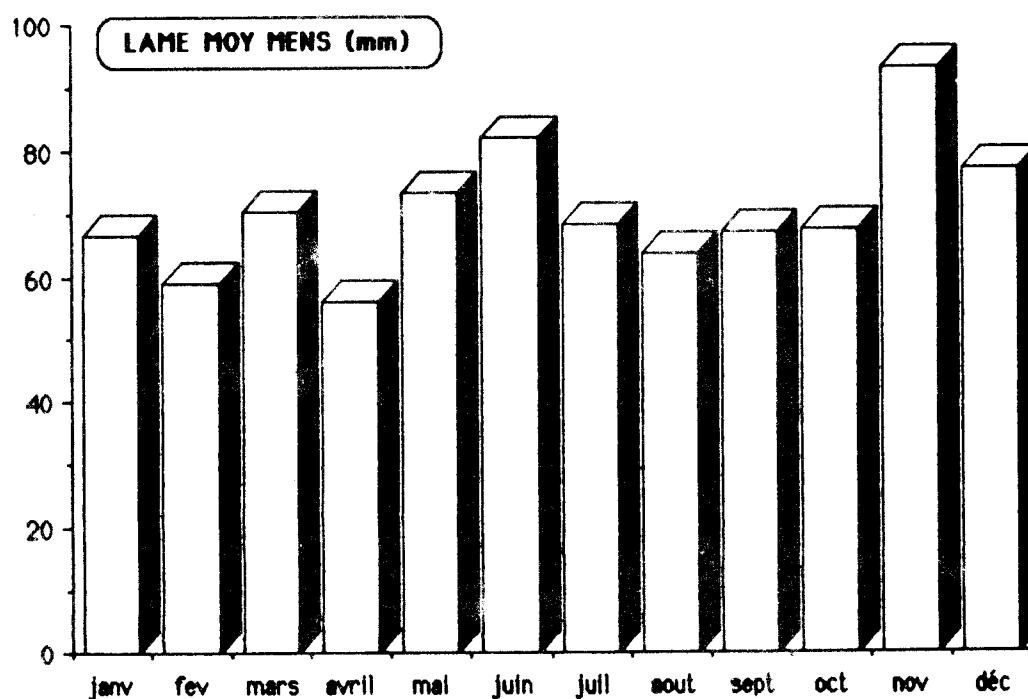
En fait ces moyennes estompent la réalité et les pluies mensuelles sont des valeurs éminemment variables comme en témoignent les documents 31 et 32 des pluies maximales et minimales observées en certaines années sur le bassin.

Sur la période commune 63-84, le mois de décembre 84 a connu des pluies mensuelles supérieures à 230 mm sur les stations les plus élevées de l'est du bassin (Eppe, Chimay, Rance).

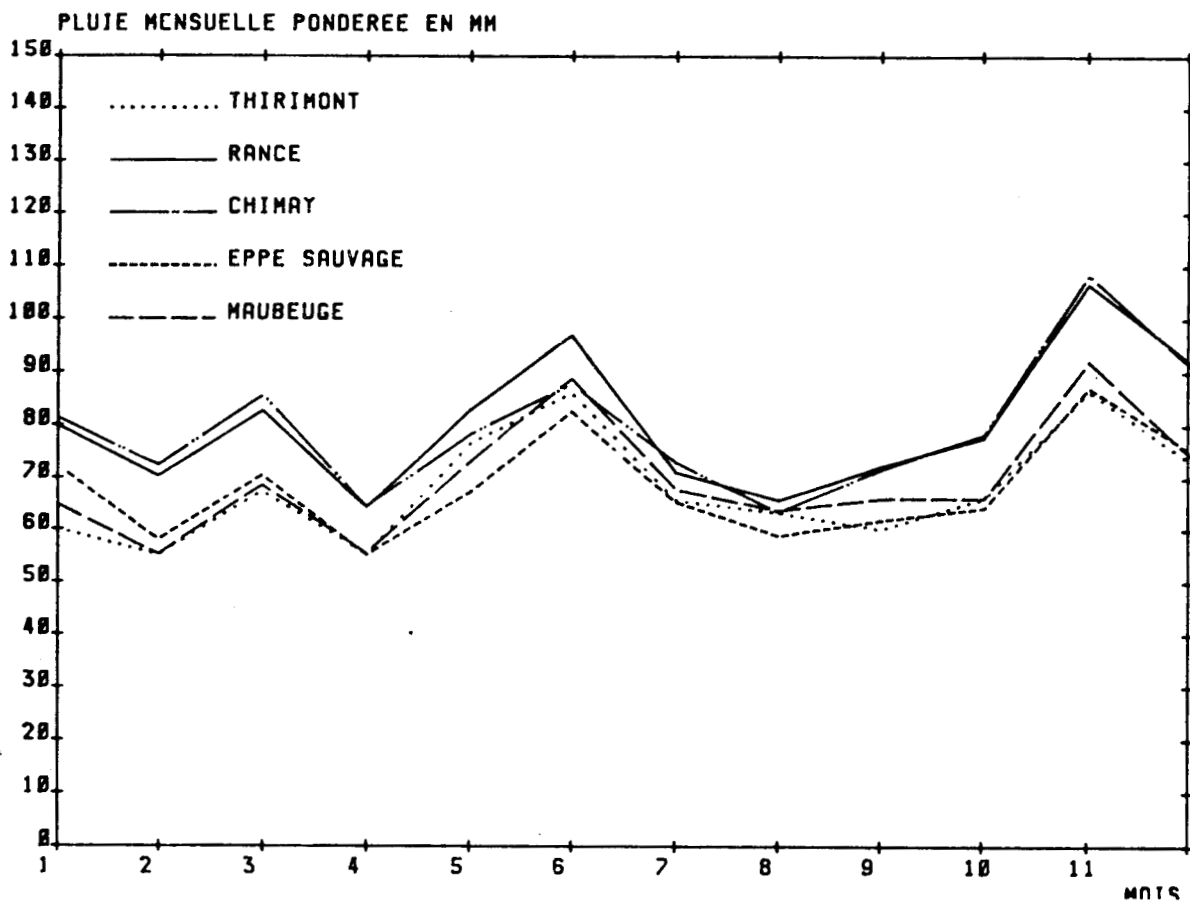
Inversement, des pluies mensuelles peuvent être dix fois inférieures aux moyennes interannuelles, ceci pratiquement à n'importe quelle période de l'année.

STATION	JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JU	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC
THIRIMONT	60,1	55,2	67,4	55,4	76,5	86,2	65,7	63,4	60,1	66,1	86,7	73,5
PANCE	80,0	70,4	82,7	64,4	82,8	96,9	71,1	65,7	72,4	77,7	106,8	92,1
CHINAY	81,4	72,5	85,7	64,6	78,2	87,8	73,1	63,5	71,8	78,4	108,6	91,4
EPPE SAUVAGE	72,3	58,0	70,5	55,2	67,2	82,6	65,4	58,9	61,8	64,3	87,3	75,5
MAUBEUGE	64,9	55,3	68,7	55,6	73,0	88,8	67,9	63,8	66,0	66,1	92,2	74,7
POURHIES	72,3	63,5	74,8	58,3	74,1	76,9	68,3	69,1	72,3	71,3	95,3	80,4
AVESNES	60,2	55,9	65,4	53,8	72,6	81,4	64,4	58,1	63,0	63,3	86,4	74,7
BERLAIMONT	61,8	55,2	63,5	51,7	70,1	73,1	69,9	65,2	64,8	63,9	88,4	73,9
MARAILLES	64,9	57,5	70,4	55,5	73,1	78,4	72,9	71,2	69,7	66,0	97,7	72,6
LANDRECIÉS	49,1	47,3	54,2	47,6	65,2	67,0	62,9	58,4	65,7	58,0	80,6	61,5
MOYENNE	66,7	59,1	70,3	56,2	73,3	81,9	68,2	63,7	66,8	67,5	93,0	77,0

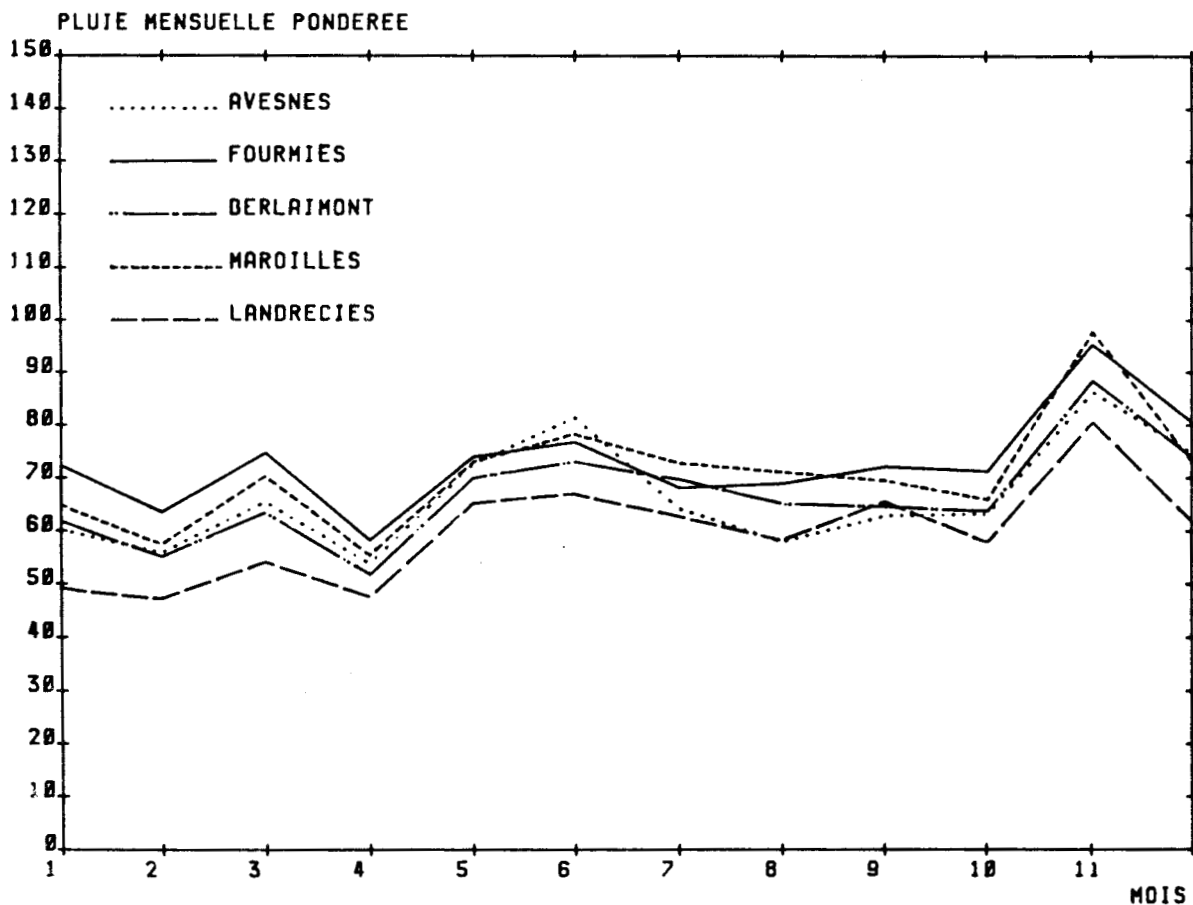
29 a : Pluie moyenne mensuelle fictive (pluie moyenne du mois considéré rapportée à 30,4 jours) sur la période 1963-1984 en dix stations du bassin de la Sambre, en mm



29 b : Histogramme des lames moyennes mensuelles 1963-1984



30 a : Visualisation graphique des pluies moyennes mensuelles pondérées sur la période 1963-1984



30 b : Visualisation graphique des pluies moyennes mensuelles pondérées sur la période 1963-1984

STATIONS	JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JT	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC
RANCE	204 84	178 70	190 79	112 65	166 82	171 63	205 80	145 63	177 68	224 81	149 79	236 66
CHINAY	225 84	168 70	198 79	110 65	167 82	199 82	196 80	113 63	157 74	211 81	166 63	232 65
EPPE	161 84	184 70	153 79	112 65	140 82	133 63	188 80	126 63	149 68	189 81	136 63	234 65
HAUBERGE H.N	143 84	121 70	152 79	108 70	151 65	175 63	161 80	138 69	166 68	170 81	145 63	190 66
AVESNES H.N	147 84	130 70	158 79	91 70	126 65	145 63	161 80	131 69	178 68	176 74	152 79	194 65
FOURNIES	169 84	156 70	164 79	118 66	146 82	144 63	160 68	152 63	215 68	187 74	148 63	213 66
BERLAIMONT	149 84	138 70	140 79	101 66	131 81	151 69	195 80	156 69	160 74	183 74	134 79	202 66
LANDRECIÉS	148 84	113 70	96 79	92 66	134 81	134 63	174 80	117 63	162 68	147 74	156 79	180 66
PLUIE MAX MENSUELLE	225	184	198	118	167	175	205	156	215	224	166	236

156----->pluie mensuelle
70----->année d'observation

31 : Pluies mensuelles les plus élevées observées sur le bassin de la Sambre entre 1963 et 1984.

STATIONS	JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JT	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC
RANCE	26 64	18 82	14 73	20 76	40 76	8 76	24 83	6 76	12 69	5 69	28 78	15 63
CHINAY	37 73	14 82	16 73	22 76	32 64	7 76	24 79	9 76	12 69	6 69	22 78	12 71
EPPE	23 73	14 82	7 73	14 74	29 68	4 76	25 84	4 76	9 69	6 69	20 78	13 63
HAUBERGE H.N	16 63	11 82	11 73	15 74	31 70	8 76	16 83	10 83	8 80	4 69	15 78	17 63
AVESNES H.N	17 64	11 82	11 73	15 76	24 64	3 76	20 63	10 83	11 69	7 69	22 78	11 63
FOURNIES	29 64	14 75	14 73	15 76	24 76	4 76	16 83	3 76	8 69	11 69	16 78	20 63
BERLAIMONT	19 64	6 82	8 73	10 74	22 64	4 76	17 83	9 73	3 77	6 69	13 78	14 63
LANDRECIÉS	6 82	3 82	10 73	14 82	21 74	2 76	25 64	13 73	6 80	12 71	15 78	12 63
PLUIE MIN MENSUELLE	6	3	7	10	21	2	16	3	3	4	13	11

14----->pluie mensuelle
73----->année d'observation

32 : Pluies mensuelles les plus faibles observées sur le bassin de la Sambre entre 1963 et 1984.

2.4. ETUDE STATISTIQUE DES PLUIES MENSUELLES DE 1963 à 1984

Cette variabilité interannuelle de la pluviométrie mensuelle peut être prise en compte par une analyse de type probabiliste et, à cet effet, on ajustera les échantillons mensuels observés en chaque station sur une période d'observation commune afin d'estimer la pluie mensuelle de probabilité au dépassement P et de période de retour T ($T=1/P$, en années).

2.4.1. Choix de la loi d'ajustement

On a vu (paragraphe 2.1.) que les échantillons de la pluviométrie mensuelle étaient distribués selon des lois situées à la limite de la normalité. Pour simplifier les calculs, on avait admis la normalité des lois pour le calcul des corrélations et pour permettre la critique des valeurs mensuelles. S'il s'agit d'ajuster des échantillons afin d'en tirer des probabilités d'occurrence, la dissymétrie doit être prise en compte même si elle est faible, ceci pour réaliser une meilleure adéquation de la loi à l'échantillon.

Pour adapter les échantillons à la loi de Gauss, on peut choisir comme variable Gaussienne le logarithme décimal de la variable étudiée. On obtient ainsi la loi de Galton ou loi de Gibrat-Gauss ou loi log-normale (cf. annexe loi de Galton). Les pluies mensuelles de dix stations ont été ajustées par cette loi.

On sait que la loi de Galton a pour fonction de répartition :

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{u^2}{2}} .du$$

avec :

$$u = a.\log_{10}(x - x_0) + b$$

La recherche des paramètres x_0 , a et b a été réalisée par la méthode des moments et insérée comme routine dans le programme AJTRAC (cf. annexe informatique). On peut également rechercher graphiquement la valeur de x_0 réalisant le meilleur ajustement.

Cette méthode réalise une bonne adéquation de la loi sur la partie moyenne et supérieure de l'échantillon, ce qui est souhaitable lorsqu'on s'intéresse aux quantiles rares de fréquence au dépassement inférieure à 0,5 , c'est à dire de période de retour supérieure à 2 ans.

Chaque échantillon a été reporté sur un papier de Galton à abscisse de probabilité gaussienne et

à ordonnée logarithmique. La droite d'ajustement a ensuite été tracée afin d'apprécier la qualité de l'ajustement. Des exemples d'ajustements sont présentés sur les documents 33 à 35. Dans l'ensemble, on constate une bonne adéquation de la loi de Galton aux échantillons.

Les paramètres des droites d'ajustement ont été calculés mois par mois sur l'ensemble des dix stations déjà prises en compte lors de l'ajustement annuel et sur la période commune 1963-1984.(document 36).

2.4.2. Calcul des quantiles et des intervalles de confiance

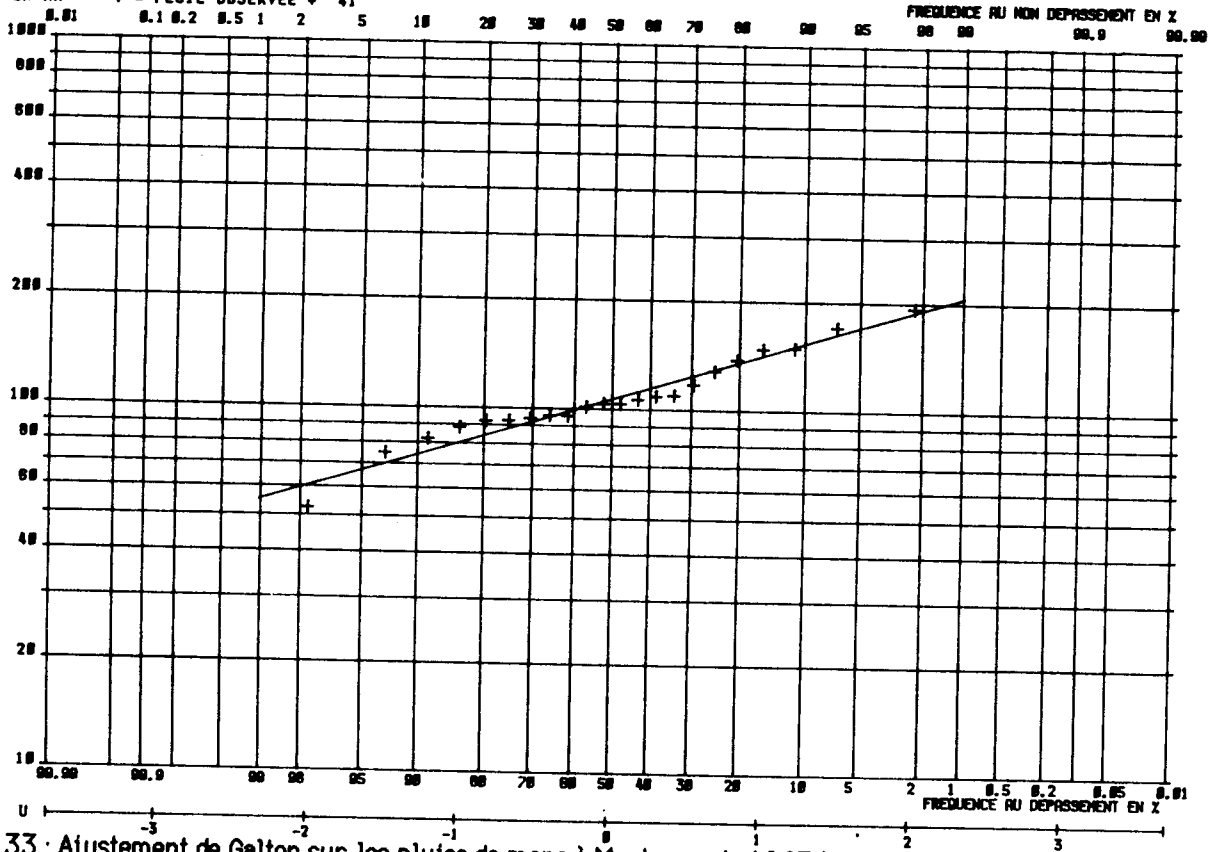
L'application de la loi permet d'en extraire les quantiles de faible probabilité de dépassement pour des temps de retour de 2, 3, 5, 10, 20, 50 et 100 ans avec indication de leurs intervalles de confiance à 80 % (documents 37 à 43) calculés selon les méthodes indiquées dans l'annexe IV : "loi de Galton".

L'analyse des résultats montre que :

- pour un mois donné, on retrouve nettement la corrélation pluie-altitude ; les stations plus élevées situées à l'est du bassin recevant des pluies mensuelles de 15 à 20 % supérieures à celles situées à l'ouest du bassin. Ce résultat se trouve amplifié par la prise en compte de quantiles de plus en plus rares.
- le mois dont les quantiles sont les plus faibles est le mois d'avril (quantile décennal moyen : 91 mm)
- les mois de janvier, février, mars, mai et août ont des quantiles de valeurs comparables (quantile décennal moyen : 109 mm)
- les quantiles des mois de juin, juillet, septembre, octobre et novembre sont supérieurs aux précédents (quantile décennal moyen : 128 mm)
- les quantiles de décembre sont les plus élevés (quantile décennal moyen : 147 mm)

$U = 8.884 \text{ LOG.DEC}(Y) - 16.395$
 $Y \text{ EN MM } Y = \text{PLUIE OBSERVEE} + 41$

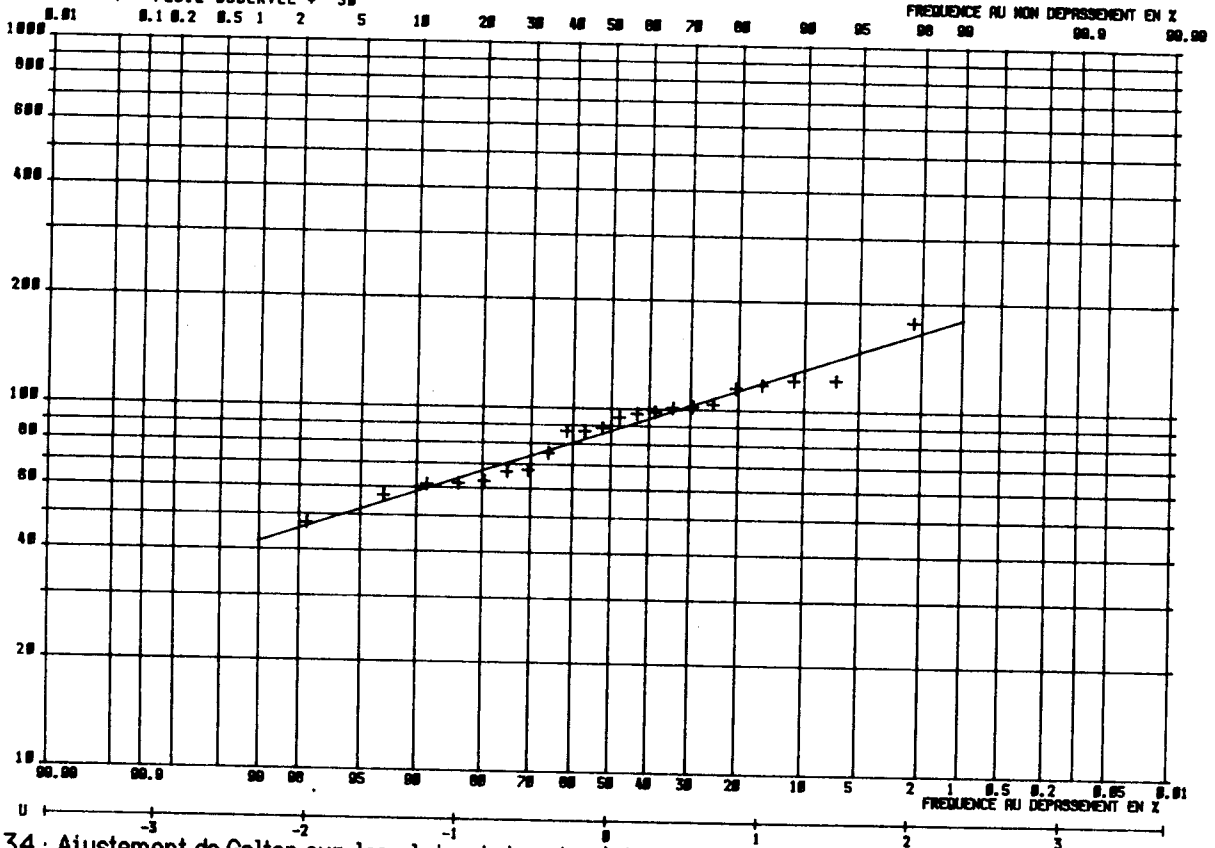
$Y = 10^{(.123 * U + 2.028)}$



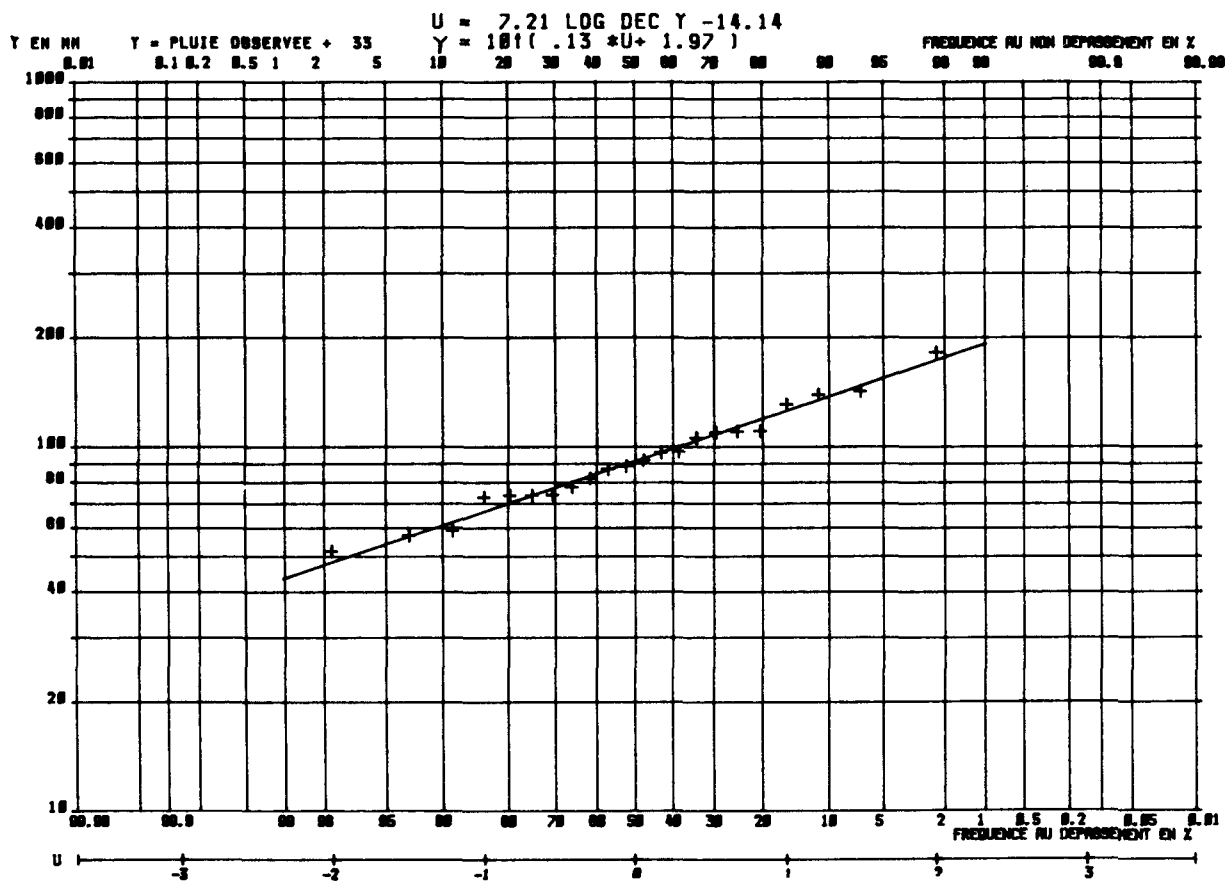
33 : Ajustement de Galton sur les pluies de mars à Maubeuge de 1963 à 1984
 Les paramètres sont estimés par la méthode des moments
 La variable ajustée Y est le logarithme décimal de (pluie mensuelle observée + 41).
 Quantile de la pluie mensuelle = Quantile Y calculé - 41.

$U = 7.343 \text{ LOG.DEC}(Y) - 14.242$
 $Y \text{ EN MM } Y = \text{PLUIE OBSERVEE} + 30$

$Y = 10^{(.136 * U + 1.94)}$



34 : Ajustement de Galton sur les pluies de janvier à Avesnes de 1963 à 1984
 Les paramètres sont estimés par la méthode des moments
 La variable ajustée Y est le logarithme décimal de (pluie mensuelle observée + 30).
 Quantile de la pluie mensuelle = Quantile Y calculé - 30.



35 : Ajustement de Galton sur les pluies de janvier à Berlaumont de 1963 à 1984
 Les paramètres sont estimés par la méthode des moments
 La variable ajustée Y est le logarithme décimal de (pluie mensuelle observée + 33).
 Quantile de la pluie mensuelle = Quantile Y calculé - 33.

		JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JT	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC
THIRIMONT	a	9,217	9,516	7,7	25,768	9,887	15,563	4,517	20,484	7,327	7,399	5,893	7,18
	b	-18,948	-19,374	-15,306	-62,632	-20,914	-37,963	-8,106	-49,9	-15,292	-15,976	-10,546	-15,378
	x0	-56	-61	-33	-216	-56	-193	-4	-210	-69	-84	-19	-71
RANCE	a	5,606	5,917	7,362	19,226	8,449	5,402	4,878	13,953	9,499	7,765	7,728	6,962
	b	-10,841	-11,447	-15,05	-45,651	-17,256	-10,487	-9,114	-32,518	-21,17	-17,478	-15,482	-15,533
	x0	-12	-28	-32	-175	-30	0	-10	-150	-103	-107	0	-86
CHINAY	a	4,519	7,345	7,129	25,268	7,368	5,682	4,625	5,291	14,902	10,122	7,398	8,863
	b	-8,32	-14,798	-14,6117	-64,136	-14,905	-10,805	-8,411	-9,362	-36,362	-24,104	-14,86	-20,838
	x0	-4	-42	-31	-283	-31	0	0	0	-208	-167	0	-139
EPEZ	a	10,503	3,819	16,718	28,679	6,965	5,061	6,049	5,102	14,326	8,133	7,411	4,533
	b	-23,144	-6,327	-39,475	-72,317	-13,563	-9,445	-12,077	-8,839	-33,562	-17,592	-14,187	-8,886
	x0	-90	-1	-160	-279	-25	0	-40	0	-162	-86	0	-27
HAUBEUGE M.N	a	10,865	10,296	8,084	18,572	11,832	5,204	8,933	18,19	6,892	8,569	6,298	7,001
	b	-23,666	-21,289	-16,394	-42,825	-26,454	-9,887	-19,29	-44,864	-14,473	-18,784	-12,151	-14,929
	x0	-88	-69	-41	-149	-101	0	-80	-230	-68	-94	0	-67
AVESNES M.N	a	7,343	8,265	6,702	29,092	22,212	5,207	6,669	11,234	6,928	6,739	6,639	7,573
	b	-14,241	-16,26	-12,882	-72,153	-55,714	-9,695	-13,065	-24,383	-14,55	-14,041	-12,644	-16,702
	x0	-30	-45	-22	-250	-250	0	-31	-92	-71	-64	0	-92
FOURNIES	a	6,831	7,896	8,544	12,311	12,625	20,331	8,024	14,352	6,212	8,645	6,956	6,546
	b	-13,302	-16,048	-17,574	-26,605	-27,985	-51,032	-16,834	-33,607	-12,994	-19,42	-13,56	-14,029
	x0	-20	-54	-42	-90	-92	-250	-61	-152	-61	-109	0	-66
BERLAINMONT	a	7,213	6,429	12,764	14,273	16,111	19,858	6,142	9,795	8,464	7,11	6,277	6,132
	b	-14,139	-11,905	-27,747	-31,301	-37,961	-49,746	-12,499	-21,692	-18,827	-15,186	-11,996	-12,881
	x0	-33	-25	-87	-107	-158	-251	-45	-102	-110	-79	0	-60
MAROLLES	a	10,372	7,284	6,097	13,388	6,273	20,801	7,999	9,925	9,182	9,91	6,067	6,985
	b	-21,42	-13,856	-11,368	-30,086	-11,559	-52,689	-17,127	-22,137	-20,596	-22,473	-11,852	-14,955
	x0	-53	-31	-7	-122	0	-266	-70	-102	-112	-123	0	-72
LANDRECIÉS	a	5,395	11,235	5,321	29,444	18,86	13,85	5,018	18,554	7,989	9,226	22,285	4,971
	b	-9,706	-23,359	-9,054	-73,312	-44,848	-31,575	-9,296	-43,419	-17,233	-20,006	-56,058	-9,5
	x0	-19	-79	0	-263	-174	-127	-15	-161	-84	-93	-250	-28

36 : Paramètres des ajustements de Galton réalisés sur les échantillons des pluies mensuelles en dix stations du bassin de la Sambre de 1963 à 1984

$Q(T) = 10(u - b)/a + x0$: Equation de la droite de Galton

$Q(T)$: Quantile des pluies mensuelles de période de retour T

u : variable réduite de Gauss pour la fréquence au dépassement F choisie, avec $T = 1/F$

a, b, x0 : paramètres calculés

		JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JT	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC
THIRIMONT	Q	58	48	64	54	74	82	58	63	53	60	81	68
	IC	50-66	40-55	56-73	47-60	66-83	71-94	50-67	54-72	43-64	48-73	66-100	56-80
RANCE	Q	74	58	79	62	80	87	64	64	66	71	101	84
	IC	65-84	49-68	69-89	54-70	72-89	72-106	55-74	54-74	55-78	57-86	89-114	70-100
CHINAY	Q	73	61	81	62	74	80	66	59	67	74	102	86
	IC	65-84	53-71	71-92	54-71	66-84	66-96	57-75	48-72	56-80	59-89	89-116	70-102
EPE	Q	70	44	70	53	64	73	59	54	58	60	82	64
	IC	60-80	37-53	61-79	46-61	56-72	59-92	50-70	44-67	48-68	49-71	72-93	53-77
HAUBEUGE H.N	Q	63	48	66	53	71	79	64	63	58	62	85	69
	IC	54-72	41-55	57-75	46-60	62-81	66-96	55-75	52-73	47-70	51-74	73-99	57-81
AVESNES H.N	Q	57	48	62	52	72	73	60	56	55	57	80	68
	IC	50-65	41-55	54-70	45-59	63-82	57-92	52-69	48-65	44-67	46-69	71-91	56-82
POURNIES	Q	69	54	72	55	73	74	64	68	62	66	89	73
	IC	61-77	45-63	64-81	48-63	64-81	63-84	55-75	58-78	51-76	54-80	77-103	60-87
BERLAIMONT	Q	58	46	62	49	69	70	63	62	58	58	81	66
	IC	51-67	39-54	55-70	42-56	60-78	60-81	53-75	52-73	46-71	46-70	70-95	54-79
MAROLLES	Q	63	49	66	55	70	75	68	68	63	62	90	66
	IC	56-71	42-56	58-76	46-64	61-79	65-86	58-80	57-79	51-76	51-74	78-103	55-79
LANDRECIÉS	Q	44	41	50	46	65	63	56	58	59	54	78	53
	IC	37-52	34-48	41-61	39-53	57-73	55-73	48-65	50-66	48-71	45-65	68-88	44-64

37 : Quantiles et intervalles de confiance à 80 % des pluies mensuelles de période de retour 2 ans (en mm).

		JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JT	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC
THIRIMONT	Q	71	60	78	64	88	100	74	77	71	81	92	88
	IC	62-80	51-69	68-88	57-72	79-98	88-113	63-86	67-86	59-84	67-96	74-116	74-104
RANCE	Q	91	74	95	74	94	105	81	80	85	96	115	111
	IC	79-104	63-86	83-108	66-83	85-104	86-128	69-94	69-91	72-99	79-114	101-130	93-130
CHINAY	Q	91	77	98	76	90	95	82	71	87	99	117	112
	IC	79-104	66-88	86-111	67-86	79-101	78-115	71-94	58-87	74-100	82-117	102-134	94-132
EPE	Q	86	58	84	65	77	90	77	66	74	79	94	87
	IC	75-97	48-69	74-94	57-73	68-87	71-113	65-90	53-82	63-85	66-93	82-107	72-104
HAUBEUGE H.N	Q	77	60	80	64	86	96	81	79	78	81	100	89
	IC	67-88	52-69	70-90	57-72	76-97	79-117	70-94	68-91	74-92	68-95	85-116	75-105
AVESNES H.N	Q	70	60	75	63	87	88	75	70	75	77	93	91
	IC	61-79	51-69	65-88	55-70	77-98	69-113	65-86	60-80	61-89	64-91	82-107	76-108
POURNIES	Q	83	68	86	67	86	90	81	83	84	88	103	96
	IC	73-93	58-79	76-97	59-76	77-96	79-102	70-93	73-95	69-100	73-104	89-119	81-113
BERLAIMONT	Q	72	58	74	60	84	86	83	80	79	78	96	88
	IC	63-82	49-68	66-83	53-68	74-94	75-98	70-97	68-92	64-94	64-94	81-112	73-105
MAROLLES	Q	75	61	79	68	82	92	87	86	83	82	106	88
	IC	67-84	52-70	69-91	59-78	71-93	80-104	75-100	74-99	70-98	69-96	91-123	73-103
LANDRECIÉS	Q	57	52	61	57	78	78	72	70	78	71	93	72
	IC	48-67	44-60	50-74	49-64	69-87	68-88	62-84	62-79	65-92	60-84	82-103	60-85

38 : Quantiles et intervalles de confiance à 80 % des pluies mensuelles de période de retour 3 ans (en mm).

		JANV	FEB	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JT	AOÛT	SEPT	OCT	NOV	DEC
THIRIMONT	Q	84	72	92	75	103	118	92	90	90	103	105	111
	IC	73-96	62-83	80-105	66-83	91-115	104-134	78-108	79-101	75-107	86-123	83-134	93-130
RANCE	Q	109	91	112	87	109	125	100	96	105	122	129	139
	IC	94-127	77-107	98-128	77-97	97-121	101-154	84-118	83-110	89-122	101-145	113-148	116-164
CHIMAY	Q	111	93	116	90	106	112	100	85	106	124	133	140
	IC	95-129	79-107	101-133	79-101	93-121	91-138	85-117	69-105	90-122	104-146	115-153	118-165
EPEE	Q	102	74	98	77	92	108	97	79	90	99	107	113
	IC	89-116	61-91	87-110	67-86	80-105	84-138	81-114	63-100	77-104	83-116	92-123	93-137
HAUBERGE H.N	Q	92	72	95	75	102	115	99	96	99	101	116	112
	IC	80-105	62-83	82-108	67-85	89-115	94-141	85-115	82-109	82-117	85-119	98-136	94-132
AVESNES H.N	Q	83	72	90	73	102	106	91	84	96	98	107	115
	IC	72-96	62-84	77-103	65-81	90-114	82-136	78-105	73-96	79-114	81-116	93-124	96-136
FOURNIES	Q	98	84	101	80	100	106	99	99	108	110	118	121
	IC	85-111	71-98	89-114	70-90	89-112	93-120	84-114	86-113	89-129	92-130	101-137	101-143
BERLAINMONT	Q	86	71	87	72	98	103	104	98	101	101	111	113
	IC	75-99	60-83	77-97	62-81	86-110	90-116	87-122	83-114	83-120	83-120	94-132	94-135
MAROILLES	Q	87	73	94	82	95	108	106	105	104	102	124	111
	IC	77-98	63-85	81-109	71-94	82-110	95-122	91-123	90-121	87-122	86-120	105-145	92-131
LANDRECIÉS	Q	71	64	72	67	91	92	90	82	98	89	108	92
	IC	59-85	54-73	59-89	59-76	80-101	80-104	76-106	72-92	82-116	75-104	96-120	76-111

39 : Quantiles et intervalles de confiance à 80 % des pluies mensuelles de période de retour 5 ans (en mm).

		JANV	FEB	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JT	AOÛT	SEPT	OCT	NOV	DEC
THIRIMONT	Q	101	87	110	86	120	139	116	105	113	131	121	138
	IC	87-116	74-101	94-127	76-97	105-136	121-159	95-140	92-119	94-136	107-157	94-157	115-165
RANCE	Q	133	114	133	101	126	151	125	114	128	154	148	174
	IC	112-158	94-136	114-155	89-114	111-143	120-189	103-151	98-132	108-150	126-184	128-171	144-208
CHIMAY	Q	137	113	139	105	126	134	125	103	128	155	152	174
	IC	115-165	95-132	119-161	92-119	109-146	107-167	104-150	81-130	109-148	129-184	130-178	145-206
EPEE	Q	122	97	114	89	110	132	122	96	109	123	122	148
	IC	105-140	77-122	100-129	78-101	95-128	101-171	100-146	75-124	93-126	102-147	105-143	119-183
HAUBERGE H.N	Q	110	87	113	88	120	140	121	114	125	126	136	140
	IC	95-126	74-100	97-130	77-99	104-137	112-175	102-141	98-131	103-151	105-149	113-163	116-167
AVESNES H.N	Q	100	88	108	84	118	128	111	101	122	124	125	145
	IC	85-116	74-102	92-126	74-95	104-133	98-169	94-130	86-116	99-147	101-149	107-147	120-173
FOURNIES	Q	116	103	119	94	116	124	120	118	138	138	136	152
	IC	100-135	86-121	103-137	82-108	102-131	108-141	101-141	102-135	112-167	114-163	115-161	126-183
BERLAINMONT	Q	104	87	101	85	115	121	130	120	127	128	130	144
	IC	89-122	73-104	89-115	73-97	100-130	105-138	107-156	101-140	105-153	105-155	108-157	118-174
MAROILLES	Q	101	89	112	98	111	127	130	127	129	126	146	139
	IC	89-115	75-104	95-132	84-113	95-131	111-144	110-153	108-148	108-153	106-149	123-174	115-166
LANDRECIÉS	Q	90	77	88	79	105	109	113	96	122	110	124	120
	IC	73-109	65-90	70-110	69-89	93-118	94-124	94-136	84-108	101-146	92-130	110-139	97-147

40 : Quantiles et intervalles de confiance à 80 % des pluies mensuelles de période de retour 10 ans (en mm).

		JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JT	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC
THIRIMONT	Q	115	101	126	96	135	158	140	118	136	157	136	164
	IC	98-135	85-118	107-148	84-108	117-155	136-181	112-174	103-135	110-165	127-191	104-180	134-198
RANCE	Q	157	135	153	113	143	176	151	131	149	183	164	207
	IC	129-190	110-165	130-181	99-129	124-164	138-225	121-186	111-152	124-177	149-222	140-193	169-252
CHIMAY	Q	164	131	160	118	145	155	149	120	147	183	170	205
	IC	134-203	109-157	135-189	103-134	123-170	122-197	121-184	94-155	124-172	150-218	143-202	169-246
EPEE	Q	139	121	128	100	128	155	146	113	125	146	137	184
	IC	119-162	93-158	111-146	87-114	108-150	117-206	118-178	87-149	106-145	119-176	115-162	143-233
HAUBERGE H.N	Q	126	100	129	99	136	164	141	130	150	148	155	166
	IC	107-146	84-117	110-152	86-113	117-157	129-210	118-166	111-151	121-183	122-178	128-189	136-201
AVESNES H.N	Q	116	102	125	94	132	151	130	115	147	149	142	173
	IC	97-138	85-121	105-149	83-106	115-150	113-201	108-155	98-135	118-179	120-182	119-169	141-209
FOURNIES	Q	134	120	136	107	130	140	140	134	166	163	153	182
	IC	113-158	99-144	116-158	92-124	113-149	121-160	117-166	115-154	133-205	134-195	128-184	148-222
BERLAIMONT	Q	121	103	114	96	129	137	156	139	152	154	149	174
	IC	102-144	84-125	99-130	83-111	112-148	118-157	126-190	116-165	123-184	124-188	122-182	140-214
MAROILLES	Q	114	103	129	112	127	143	152	147	152	148	168	166
	IC	99-131	86-123	107-155	95-131	106-152	124-163	127-181	123-173	126-182	123-177	138-203	135-201
LANDRECIÉS	Q	108	89	102	88	118	123	137	107	145	129	138	147
	IC	87-134	75-105	80-131	77-100	103-134	106-142	110-168	93-122	119-175	107-154	121-156	116-184

41 : Quantiles et intervalles de confiance à 80 % des pluies mensuelles de période de retour 20 ans (en mm).

		JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JT	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC
THIRIMONT	Q	134	117	147	108	154	180	173	134	164	189	156	197
	IC	112-159	97-140	122-175	94-122	132-180	153-208	134-223	115-153	131-203	151-234	117-211	158-242
RANCE	Q	188	163	178	128	163	210	185	150	176	221	186	250
	IC	151-233	130-204	148-214	110-146	139-191	160-274	144-235	127-176	144-211	176-272	156-222	200-309
CHIMAY	Q	202	155	187	133	169	183	183	144	170	217	193	244
	IC	158-257	126-188	154-225	115-153	141-203	141-237	143-233	109-189	142-200	176-262	160-233	198-296
EPEE	Q	161	155	145	113	150	187	177	136	144	174	155	232
	IC	135-189	115-210	125-166	98-129	124-180	138-254	140-221	102-183	121-170	140-213	129-187	176-304
HAUBERGE H.N	Q	145	116	150	112	156	197	165	150	182	176	180	199
	IC	122-171	97-138	125-179	96-128	132-181	151-257	136-198	126-174	144-226	143-215	145-223	160-246
AVESNES H.N	Q	136	119	147	105	149	180	154	134	178	180	164	208
	IC	112-163	98-144	120-179	92-120	129-170	132-247	125-188	112-158	141-222	143-225	135-199	166-256
FOURNIES	Q	157	142	156	123	147	158	165	153	203	194	176	220
	IC	130-189	116-173	131-185	104-143	127-170	136-182	135-199	130-179	159-256	157-236	144-215	175-274
BERLAIMONT	Q	143	123	129	110	147	156	189	164	183	187	173	213
	IC	117-173	99-153	111-150	94-128	126-169	133-180	150-236	135-196	146-225	148-233	139-216	167-267
MAROILLES	Q	130	122	152	129	148	162	180	172	181	175	196	200
	IC	111-152	99-148	123-187	109-152	121-181	139-186	147-218	142-205	147-219	143-212	158-242	160-248
LANDRECIÉS	Q	132	104	122	100	133	141	168	121	174	153	155	183
	IC	103-168	86-123	93-160	86-114	115-152	120-164	132-213	104-139	140-213	125-185	135-177	141-236

42 : Quantiles et intervalles de confiance à 80 % des pluies mensuelles de période de retour 50 ans (en mm).

		JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JT	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC
THIRIMONT	Q	147	130	162	116	168	195	200	144	185	213	172	221
	IC	122-177	106-156	133-196	100-132	142-198	165-227	151-263	124-167	154-231	168-267	127-235	175-276
RANCE	Q	211	185	197	138	178	235	211	164	195	248	201	282
	IC	167-267	144-234	161-240	118-159	149-211	177-313	162-275	137-194	158-236	196-310	167-243	222-354
CHIMAY	Q	231	172	207	144	187	205	210	162	187	241	210	272
	IC	177-302	135-212	168-253	123-165	153-227	156-269	161-274	121-217	155-221	194-295	172-257	218-334
EPPE	Q	176	183	157	122	166	212	200	154	158	195	169	271
	IC	146-210	132-254	134-181	104-139	135-203	153-292	156-255	113-211	131-187	155-242	139-206	201-362
MAUBEUGE M.N	Q	159	128	166	121	170	222	183	163	206	197	199	224
	IC	132-189	105-153	136-200	103-140	143-200	167-296	149-222	137-191	161-259	158-242	158-251	177-280
AVESNES M.N	Q	150	132	164	113	160	204	172	147	202	204	180	233
	IC	122-184	107-161	132-202	98-129	138-184	147-283	138-214	121-175	157-255	159-258	146-222	185-291
FOURNIES	Q	174	158	171	134	160	171	183	167	231	217	192	249
	IC	142-213	127-195	142-205	112-158	136-186	146-198	148-224	140-196	179-296	173-267	155-238	195-314
BERLAIMONT	Q	159	139	140	120	159	169	214	181	205	211	191	242
	IC	128-195	109-174	119-164	101-141	135-184	143-196	167-272	148-220	163-255	165-267	151-242	187-309
MAROILLES	Q	142	136	169	142	163	175	200	190	202	195	217	226
	IC	120-167	109-167	135-211	118-168	132-203	150-203	162-246	155-228	162-247	158-237	172-273	178-283
LANDRECIÉS	Q	151	114	138	108	143	153	192	131	195	170	167	211
	IC	116-195	94-137	103-184	92-124	123-165	129-180	148-249	112-151	155-242	137-208	144-191	159-278

43 : Quantiles et intervalles de confiance à 80 % des pluies mensuelles de période de retour 100 ans (en mm).

2.5. LAME MOYENNE MENSUELLE

La méthode de Thiessen fournit la lame moyenne mensuelle sur la période 1963-1984 (document 44). Quel que soit le mois, la lame moyenne reste élevée et l'on n'observe pas de "creux" important. La lame la plus élevée est celle de novembre, avec une lame moyenne de 90,7 mm.

STATION		JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JT	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC
THIRIMONT	MOY	61,3	50,8	68,7	54,6	78,0	85,0	67,0	64,6	59,3	67,4	85,5	74,9
	E.T	29,1	26,8	30,4	23,7	30,9	40,4	37,7	30,2	40,4	47,1	28,4	46,9
	C.V	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,5	0,6	0,5	0,7	0,7	0,3	0,6
	PL.POND ET.POND	0,76 0,36	0,63 0,33	0,85 0,38	0,68 0,29	0,97 0,38	1,06 0,50	0,83 0,47	0,80 0,38	0,74 0,50	0,84 0,59	1,06 0,33	0,93 0,58
RANCE	MOY	81,5	64,8	84,3	63,5	84,4	95,6	72,5	67,0	71,4	79,2	105,3	93,9
	E.T	39,1	36,6	36,4	28,0	31,0	41,7	40,3	35,2	41,9	55,1	31,3	59,7
	C.V	0,5	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,5	0,6	0,7	0,3	0,6
	PL.POND ET.POND	3,16 1,52	2,51 1,42	3,27 1,41	2,46 1,08	3,27 1,20	3,70 1,62	2,81 1,56	2,60 1,36	2,77 1,62	3,07 2,14	4,08 1,21	3,64 2,31
CHIMAY	MOY	83,0	66,7	87,3	63,7	79,7	86,6	74,5	64,7	70,8	79,9	107,1	93,2
	E.T	42,0	34,1	38,3	30,9	34,6	35,7	38,6	28,8	42,3	55,6	33,4	59,9
	C.V	0,5	0,5	0,4	0,5	0,4	0,4	0,5	0,4	0,6	0,7	0,3	0,6
	PL.POND ET.POND	1,95 0,98	1,56 0,80	2,05 0,90	1,49 0,72	1,87 0,81	2,03 0,84	1,75 0,90	1,52 0,68	1,66 0,99	1,87 1,30	2,51 0,78	2,18 1,40
EPE SAUVAGE	MOY	73,7	53,4	71,9	54,4	68,5	81,5	66,7	60,0	61,0	65,5	86,1	76,9
	E.T	35,5	35,2	31,4	26,2	31,0	38,2	41,0	27,8	35,2	42,8	26,8	55,0
	C.V	0,5	0,7	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5	0,6	0,7	0,3	0,7
	PL.POND ET.POND	9,88 4,76	7,16 4,72	9,64 4,21	7,30 3,51	9,19 4,16	10,93 5,12	8,95 5,50	8,05 5,73	8,18 3,73	8,78 4,72	11,55 5,74	10,31 3,59
HAUBEUGE	MOY	66,1	50,9	70,0	54,8	74,4	87,6	69,2	65,0	65,1	67,4	90,9	76,1
	E.T	32,3	26,5	31,5	24,8	33,7	39,8	38,2	36,6	44,7	43,1	33,6	47,2
	C.V	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,6	0,4	0,6
	PL.POND ET.POND	9,66 4,72	7,44 3,87	10,23 4,60	8,01 3,62	10,87 4,92	12,80 5,82	10,11 5,58	9,50 5,35	9,51 6,53	9,85 6,30	13,28 4,91	11,12 6,90
FOURMIES	MOY	73,7	58,5	76,2	57,5	75,5	75,8	69,6	70,4	71,3	72,7	94,0	81,9
	E.T	31,8	32,7	31,7	27,2	30,0	36,2	37,4	35,1	49,6	48,1	31,2	52,4
	C.V	0,4	0,6	0,4	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,7	0,7	0,3	0,6
	PL.POND ET.POND	9,25 3,99	7,34 4,10	9,56 3,98	7,22 3,41	9,47 3,76	9,51 4,54	8,73 4,69	8,83 4,40	8,95 6,22	9,12 6,04	11,80 3,92	10,28 6,58
AVESNES	MOY	61,4	51,5	66,7	53,1	74,0	80,3	65,6	59,2	62,1	64,5	85,2	76,1
	E.T	28,7	26,8	30,7	23,5	32,9	36,4	37,7	30,6	44,4	44,2	29,8	51,1
	C.V	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	0,6	0,5	0,7	0,7	0,3	0,7
	PL.POND ET.POND	11,38 5,32	9,54 4,97	12,36 5,69	9,84 4,35	13,71 6,10	14,88 6,74	12,15 6,99	10,97 5,67	11,51 8,23	11,95 8,19	15,79 5,52	14,10 9,47
BERLAIMONT	MOY	63,0	50,8	64,7	51,0	71,4	72,1	71,2	66,5	63,9	65,1	87,2	75,3
	E.T	30,7	27,4	26,9	25,1	32,2	36,6	44,1	39,2	47,1	46,8	32,3	51,4
	C.V	0,5	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,4	0,7
	PL.POND ET.POND	6,35 3,09	5,12 2,76	6,52 2,71	5,14 2,53	7,19 3,24	7,27 3,69	7,17 4,44	6,70 3,95	6,44 4,75	6,56 4,72	8,79 3,25	7,59 5,18
MAROLLES	MOY	66,1	52,9	71,7	54,7	74,5	77,3	74,3	72,6	68,7	67,3	96,4	74,0
	E.T	26,1	26,6	30,1	31,9	27,6	37,2	41,4	40,1	45,0	43,8	37,1	48,3
	C.V	0,4	0,5	0,4	0,6	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,4	0,7
	PL.POND ET.POND	12,77 5,04	10,22 5,14	13,86 5,82	10,57 6,16	14,40 5,33	14,94 7,19	14,36 8,00	14,03 7,75	13,28 8,70	13,01 8,46	18,63 7,17	14,30 9,33
LANDRECIES	MOY	50,0	43,5	55,2	46,9	66,5	66,1	64,1	59,5	64,8	59,1	79,5	62,7
	E.T	30,1	24,8	24,5	23,7	28,8	31,6	37,4	26,8	42,7	37,7	33,3	43,3
	C.V	0,6	0,6	0,4	0,5	0,4	0,5	0,6	0,5	0,7	0,6	0,4	0,7
	PL.POND ET.POND	2,02 1,21	1,75 1,00	2,23 0,99	1,89 0,96	2,68 1,16	2,66 1,27	2,58 1,51	2,40 1,08	2,61 1,72	2,38 1,52	3,20 1,34	2,53 1,75
MOY.ARITH	LAME	68,0	54,4	71,7	55,4	74,7	80,8	69,5	65,0	65,8	68,8	91,7	78,5
	E.T	32,5	29,8	31,2	26,5	31,3	37,4	39,4	33,0	43,3	46,4	31,5	51,5
	C.V	0,5	0,5	0,4	0,5	0,4	0,5	0,6	0,5	0,7	0,7	0,3	0,7
THIESSEN	LAME	67,2	53,3	70,6	54,6	73,6	79,8	69,5	65,4	65,6	67,4	90,7	77,0
	E.T	31,0	29,1	30,7	26,7	31,1	37,3	39,6	34,3	44,0	45,0	32,0	50,9
	C.V	0,5	0,5	0,4	0,5	0,4	0,5	0,6	0,5	0,7	0,7	0,4	0,7

44 : Moyenne, écart-type des pluies mensuelles critiquées (mm) en dix stations du bassin de la Sambre sur la période 1963-1984

Calcul des pluies pondérées en chaque station et des lames moyennes mensuelles par la méthode de Thiessen

MOY : Moyenne interannuelle des pluies du mois considéré

E.T : Ecart-type

C.V : Coefficient de variation

PL.POND : Part de la pluviométrie mensuelle attribuée à la station considérée

ET.POND : Ecart-type sur la pluie pondérée

CHAPITRE 3 : ETUDE DES PLUIES MAXIMALES JOURNALIERES

On dispose de l'observation des pluies journalières en 8 stations sur la période commune 1963-1984.

On a extrait de ces 8 séries les maxima mensuels et annuels des pluies journalières.

3.1. CHOIX DE LA LOI D'AJUSTEMENT

La loi de Gumbel est bien adaptée à l'ajustement des maxima journaliers (cf. annexe V : "loi de Gumbel").

La fonction de répartition de la loi de Gumbel peut s'écrire :

$$F(x) = \exp(-e^{-u})$$

avec $u = (x - x_0)/G$, variable réduite de Gumbel.

Pour simplifier l'écriture, on peut appeler P la fréquence au non dépassement $F(x)$, ce qui fournit l'expression des quantiles de x :

$$x = x_0 - G \log_e(-\log_e P)$$

x_0 est le paramètre de position

G est le paramètre d'échelle ou gradex (pente de la droite de Gumbel)

On obtient directement la valeur de x ayant une probabilité 1-P d'être dépassée si l'on connaît pour chaque mois de l'année et en chaque station les valeurs du paramètre de position et du gradex.

Une routine de calcul du programme AJTRAC permet de calculer ces paramètres (cf. annexe informatique).

Le report des points et de l'ajustement est réalisé sur un papier de Gumbel qui porte en graduation d'abscisse une échelle de fréquence au dépassement et une échelle de la variable réduite u.

Le tracé de la droite de Gumbel d'équation : $u = (x - x_0)/G$ permet de visualiser la qualité de l'ajustement.

3.2. AJUSTEMENT DES MAXIMA ANNUELS DES PLUIES JOURNALIERES DE 1963 A 1984

Pour chaque station, on a extrait les maxima annuels des pluies journalières. Chaque échantillon comprend ainsi 22 maxima pour la période 63-84.

Chaque échantillon a été ajusté à une loi de Gumbel ; le document 45 indique les moyennes et écart-types obtenus, ainsi que les paramètres de la loi choisie, soient le gradex et le paramètre de position.

STATIONS	MOYENNE	ECART-TYPE	GRADEX	X0
RANCE	35,4	9,9	7,8	31,0
CHIMAY	33,3	7,5	5,9	29,9
EPPE	36,2	13,3	10,4	30,3
MAUBEUGE M.N	32,6	8,5	6,7	28,8
FOURMIES	36,3	10,4	8,2	31,6
AVESNES M.N	31,3	8,9	7,0	27,3
BERLAIMONT	35,2	8,9	7,0	31,2
LANDRECIES	34,5	12,1	9,5	29,0

45 : Paramètres des ajustements de Gumbel sur les maxima annuels des pluies journalières de 1963 à 1984

Le paramètre d'échelle G ou "gradex" représente la pente de la droite d'ajustement de l'échantillon.

Le paramètre de position est noté X0.

Les quantiles Qp sont obtenus par l'équation de la droite de Gumbel :

$Q_p = G * u + X_0$ avec :

. variable réduite de Gumbel $u = -\log(-\log(P))$

. P : Fréquence au non dépassement.

. $G = 0,78 s$ (méthode des moments)

. $X_0 = \bar{X} - 0,577 G$

. \bar{X} : Moyenne de l'échantillon

. s : Ecart-type de l'échantillon

Ainsi, pour la station de Maubeuge, la pluie maximale de période de retour 10 ans ou maximum annuel décennal de la pluie journalière (valeur maximale annuelle Q0,9 de la pluie journalière ayant une probabilité de non-dépassement de $P=0,9$) sera :

$Q_{0,9} = 6,7 u + 28,8$ avec : $u = -\log(-\log(0,9)) = 2,25$

soit 43,8 mm.

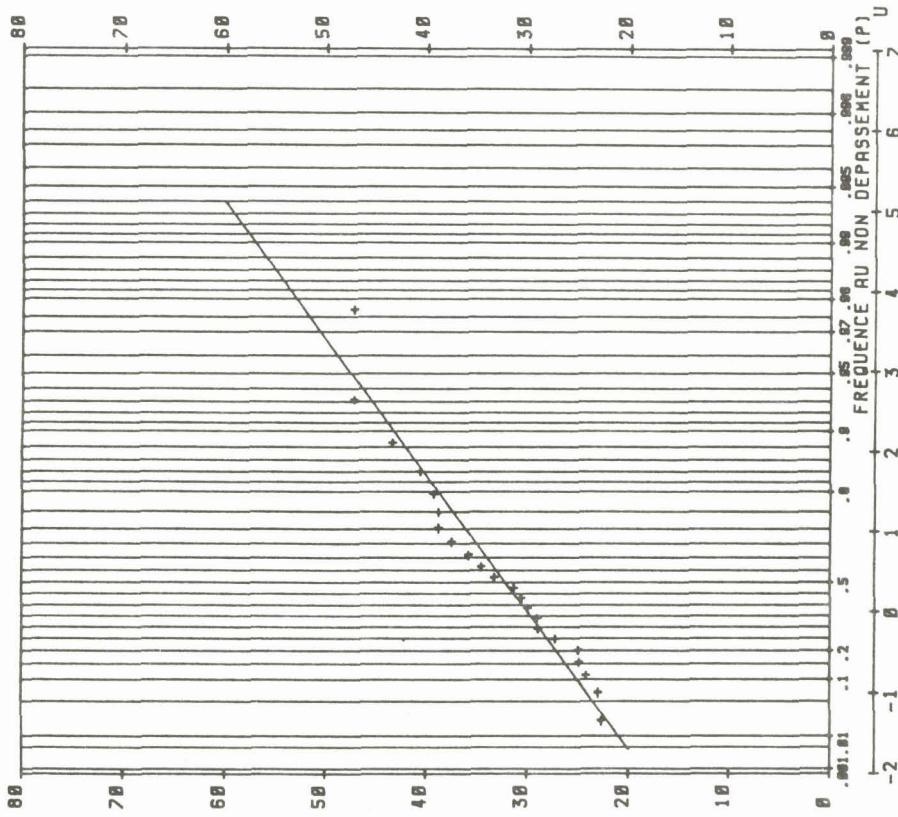
Les documents 46 à 53 montrent la qualité de l'ajustement tracé sur papier de Gumbel dont la propriété est de linéariser la fonction de répartition de la loi.

U = -LOG(-LOG P)

PLUIE MAX = 5.892 U + 29.936

PLUIE MAX EN MM

PERIODE 1963-1984



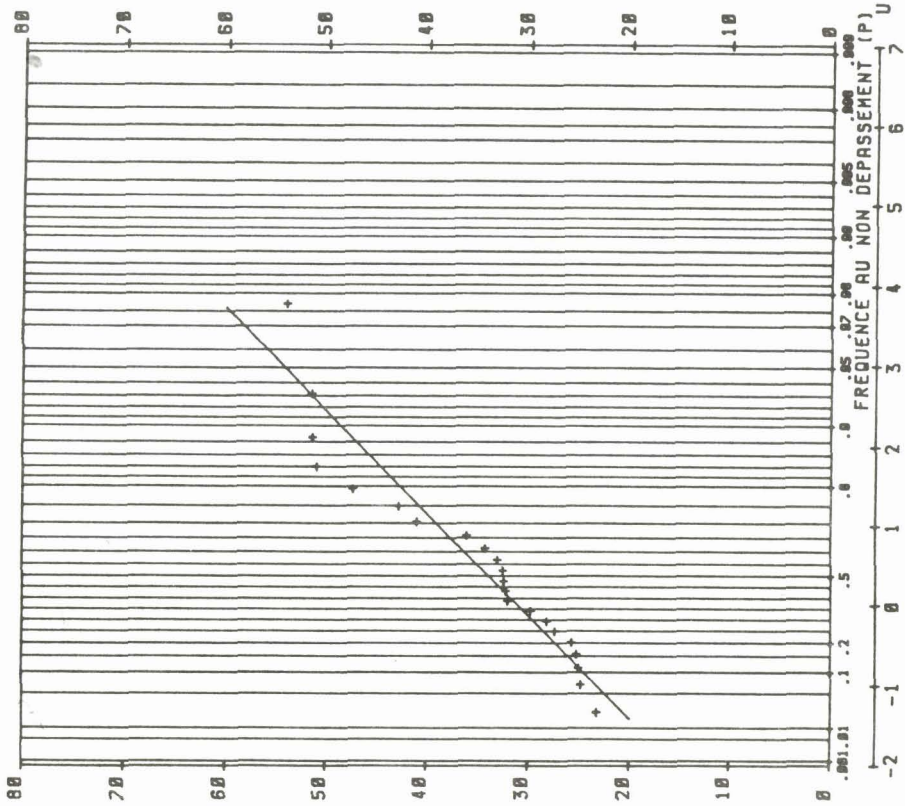
46 : Ajustement de Gumbel sur les maxima annuels des pluies journalières à Chimay de 1963 à 1984.
 en ordonnée : maxima annuels des pluies journalières
 en abscisse : fréquence au non-dépassement
 u est la variable réduite de la loi de Gumbel, soit :
 $u = -\log(-\log(P))$ avec:
 P : Fréquence au non-dépassement

U = -LOG(-LOG P)

PLUIE MAX = 7.792 U + 30.99

PLUIE MAX EN MM

PERIODE 1963-1984



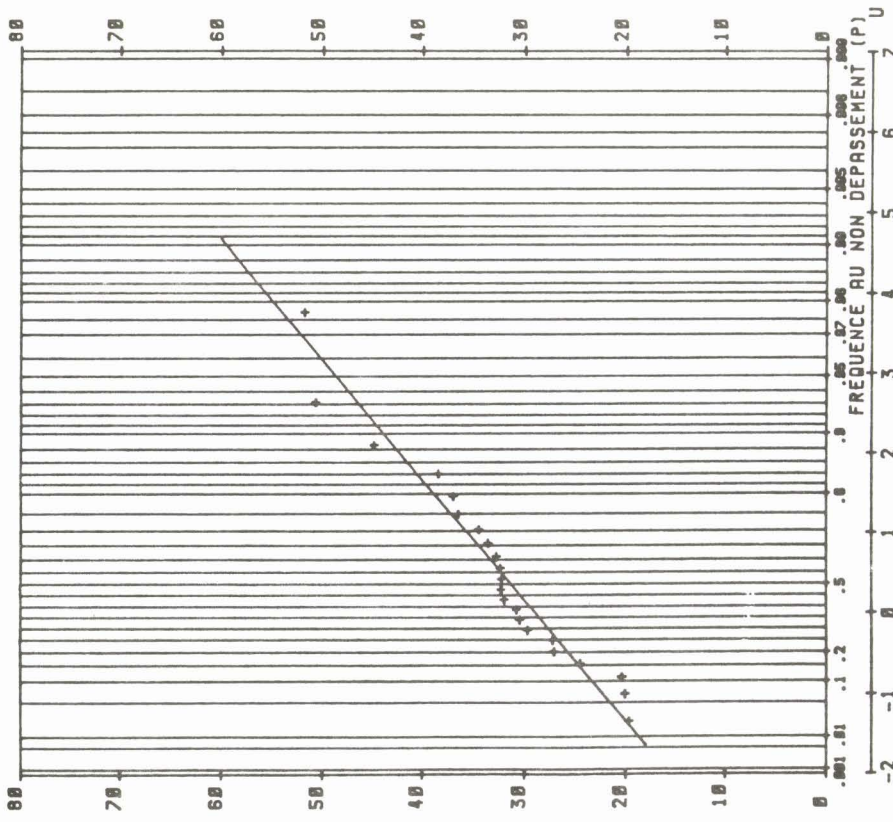
47 : Ajustement de Gumbel sur les maxima annuels des pluies journalières à Rance de 1963 à 1984.

U = -LOG(-LOG P)

PLUIE MAX = 6.659 U + 28.843

PLUIE MAX EN MM

PERIODE 1963-1984



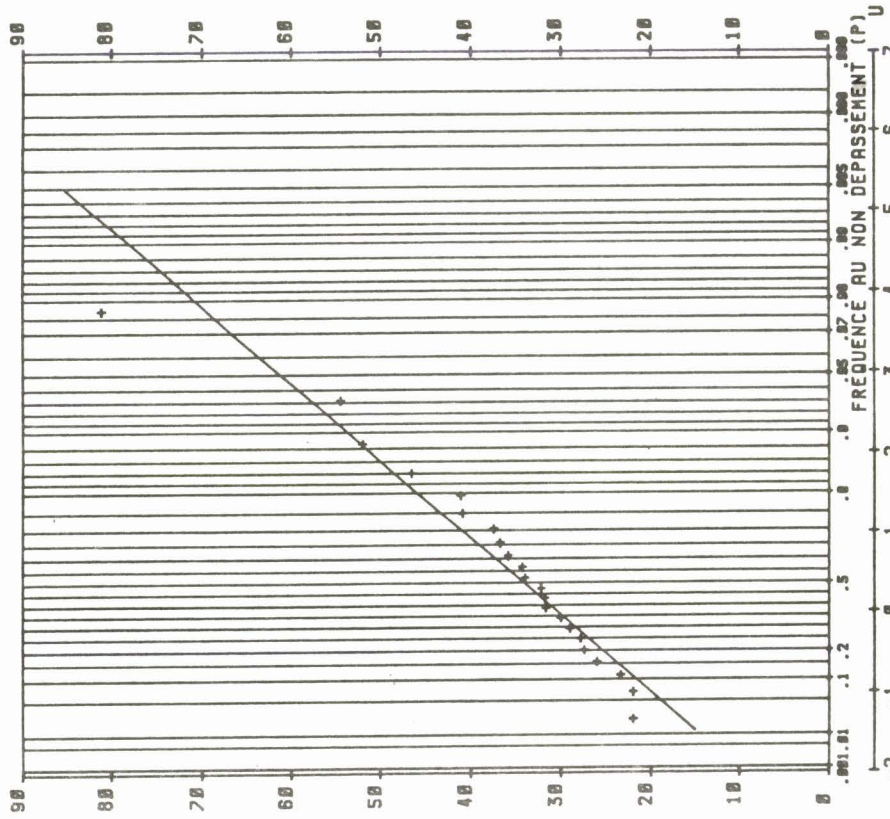
48 : Ajustement de Gumbel sur les maxima annuels des pluies journalières à Maubeuge M.N de 1963 à 1984.

U = -LOG(-LOG P)

PLUIE MAX = 10.38 U + 30.274

PLUIE MAX EN MM

PERIODE 1963-1984



49 : Ajustement de Gumbel sur les maxima annuels des pluies journalières à Eppe sauvage de 1963 à 1984.

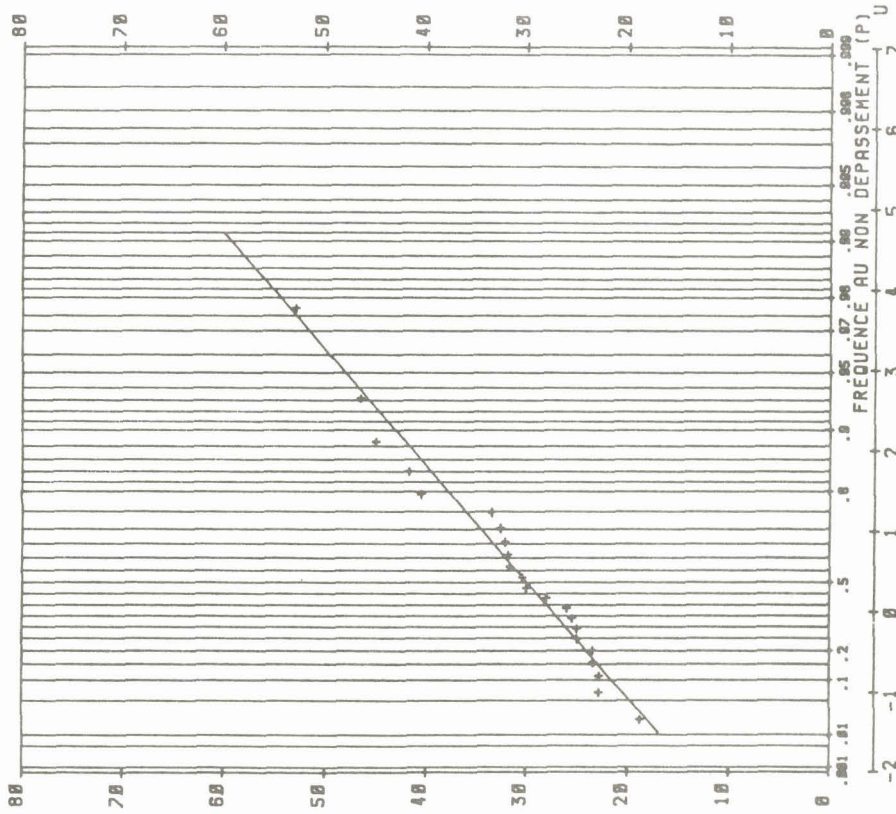


U = -LOG(-LOG P)

PLUIE MAX = 6.952 U + 27.329

PLUIE MAX EN MM

PERIODE 1963-1984



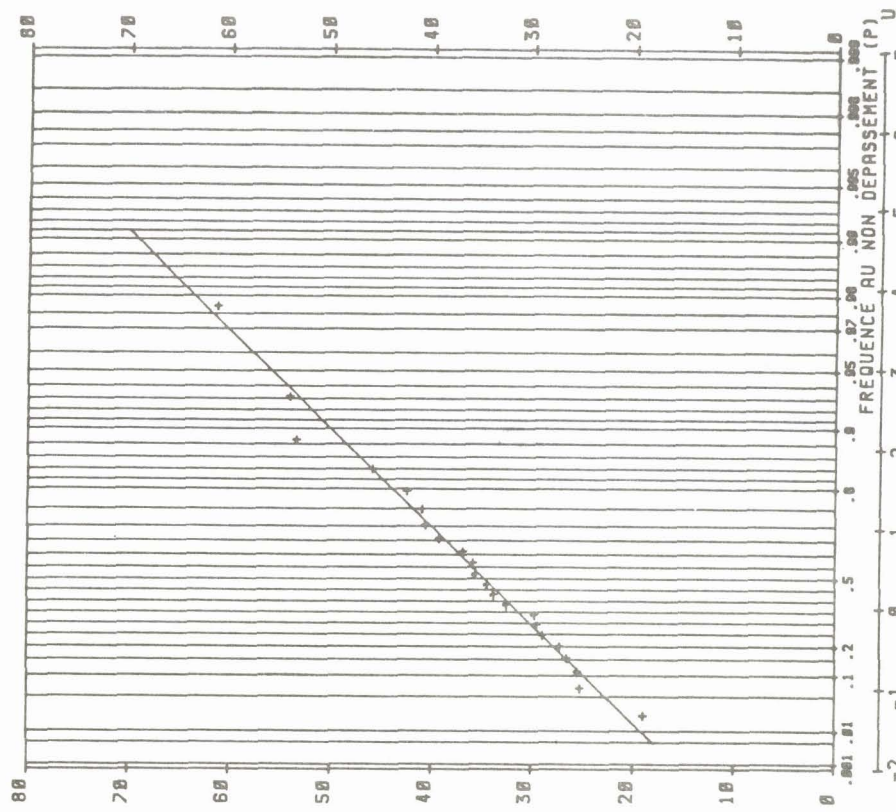
50 : Ajustement de Gumbel sur les maxima annuels des pluies journalières à Avesnes M.N. de 1963 à 1984.

U = -LOG(-LOG P)

PLUIE MAX = 8.172 U + 31.598

PLUIE MAX EN MM

PERIODE 1963-1984



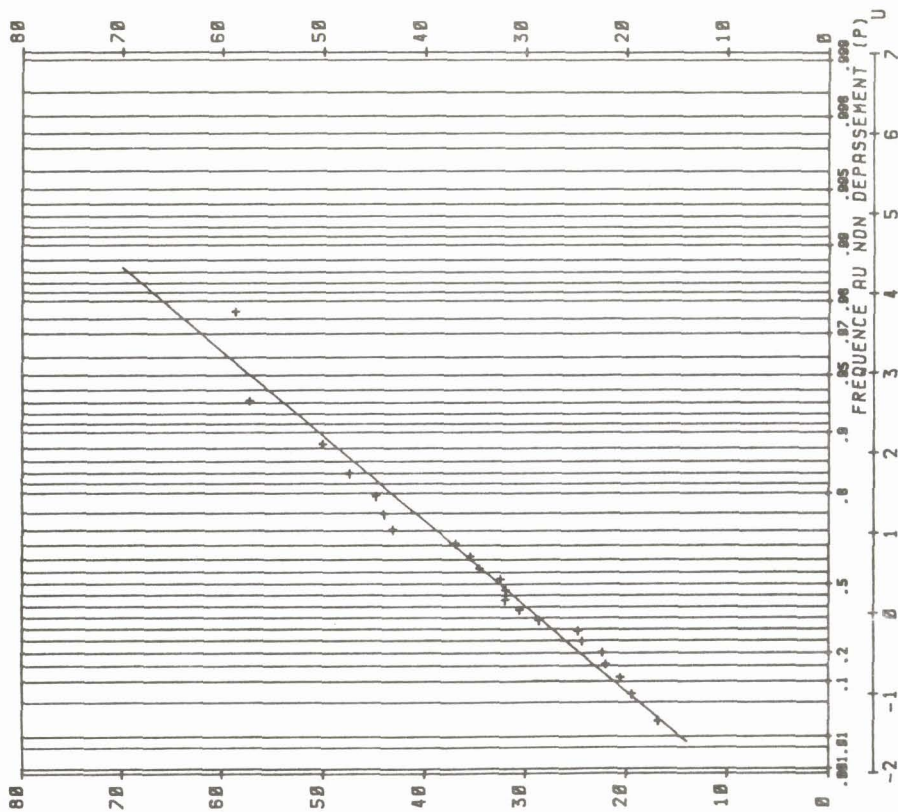
51 : Ajustement de Gumbel sur les maxima annuels des pluies journalières à Fourmies de 1963 à 1984.

U = -LOG(-LOG P)

PLUIE MAX = 9.465 U + 29.838

PLUIE MAX EN MM

PERIODE 1963-1984



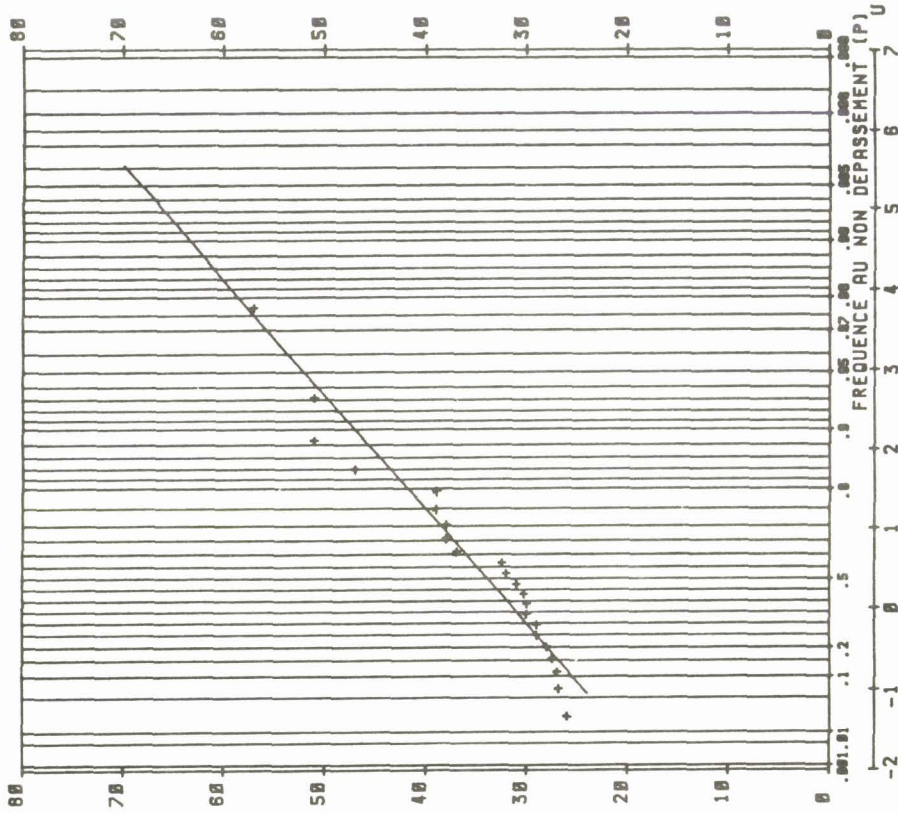
52 : Ajustement de Gumbel sur les maxima annuels des pluies journalières à Landrecies de 1963 à 1984.

U = -LOG(-LOG P)

PLUIE MAX = 6.988 U + 31.24

PLUIE MAX EN MM

PERIODE 1963-1984



53 : Ajustement de Gumbel sur les maxima annuels des pluies journalières à Berlaimont de 1963 à 1984.

La période d'observation étant plus longue à Chimay et à Rance, on a également réalisé deux ajustements sur cette période (documents 54 et 55).

Les quantiles, de période de retour 2, 3, 5, 10, 20, 50 et 100 ans, et leurs intervalles de confiance (cf. annexe V : "loi de Gumbel") à 95 et 80 % ont été calculés pour chaque ajustement réalisé. Les résultats apparaissent dans le document 56.

On note que les valeurs décennales varient entre 43 et 53 mm. Il faut donc considérer que la région peut recevoir des pluies journalières de cette ampleur une fois tous les dix ans, ceci dans l'hypothèse d'une bonne stationnarité du phénomène. Ceci n'est qu'une estimation, l'examen des intervalles de confiance montre, qu'au seuil de 80 %, la borne supérieure du quantile décennal peut approcher 65 mm à Eppe Sauvage.

On remarquera également que les stations situées à l'Ouest, dont la pluviométrie moyenne était plus modérée qu'à l'Est du bassin, ne présentent pas cette propriété lorsqu'on considère les maxima journalières. Cette information montre que les fortes pluies ne sont pas l'apanage des zones d'altitude élevée.

En ce qui concerne les ajustements réalisés à Rance et à Chimay sur une plus longue période, on constate que les quantiles sont peu modifiés par onze années d'observations supplémentaires.

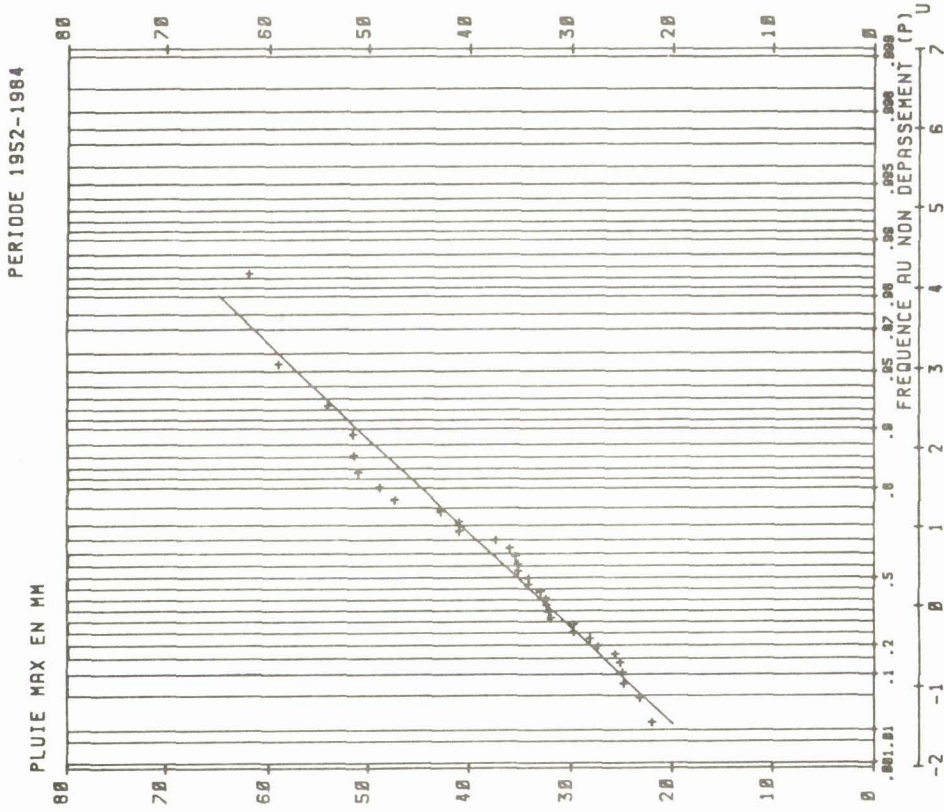
Les mois d'occurrence des maxima annuels ont été relevés pour les stations de Maubeuge, Fourmies et Avesnes. Globalement, sur les 69 maxima annuels recensés à ces trois stations, 42 surviennent de mai à août, 10 en novembre.

3.3. AJUSTEMENT DES MAXIMA MENSUELS DES PLUIES JOURNALIERES DE 1963 A 1984

Les valeurs du paramètre de position et du gradex ont été calculées pour chaque mois et en chaque station sur la période 1963-1984 (document 57). Ils fournissent les quantiles de période de retour 2, 3, 5, 10, 20, 50 et 100 ans (documents 58 à 64).

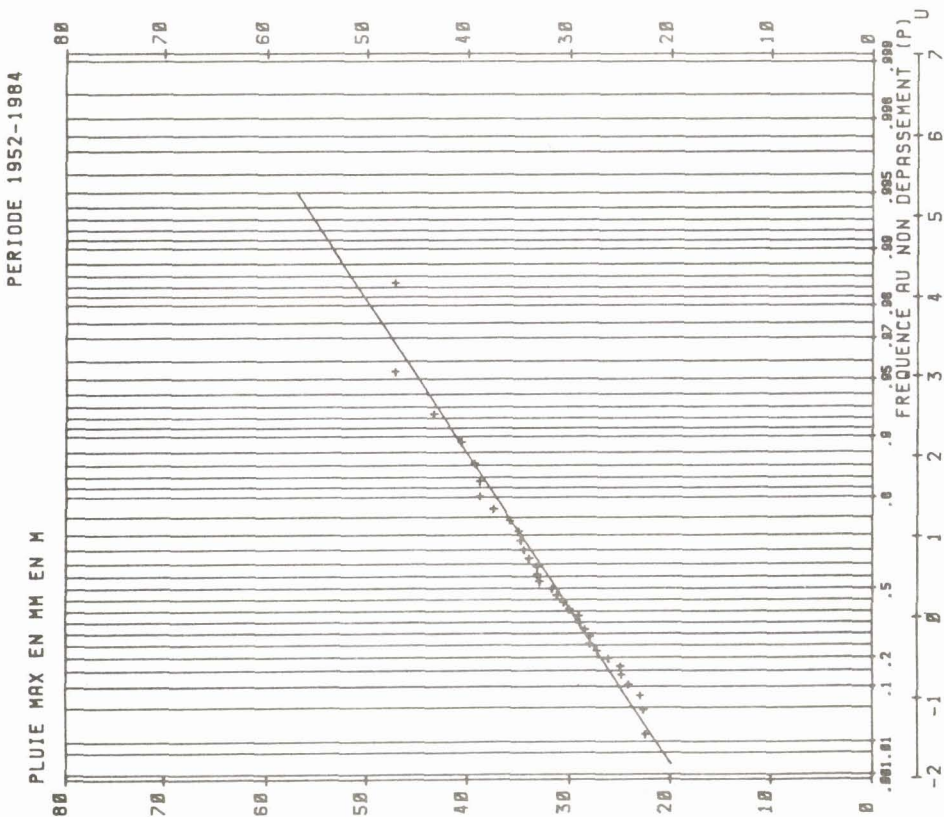
Les gradex sont les pentes des droites de Gumbel, plus le gradex d'un ajustement est élevé, plus les quantiles des maxima croissent rapidement. Le document 57 montre que les gradex des mois de juin sont les plus élevés (9 à 10 de moyenne). Hormis le mois d'octobre, les mois d'été présentent des gradex importants, ce qui caractérise les périodes orageuses.

U = -LOG(-LOG P)
PLUIE MAX EN MM = 8.39 U + 32.15



55 : Ajustement de Gumbel sur les maxima annuels des pluies journalières à Rance de 1952 à 1984.

U = -LOG(-LOG P)
PLUIE MAX EN MM = 5.2 U + 29.37



54 : Ajustement de Gumbel sur les maxima annuels des pluies journalières à Chimay de 1952 à 1984.

STATIONS ----- (PERIODE 63-84)	TEMPS DE RETOUR -----						
	2 ANS	3 ANS	5 ANS	10 ANS	20 ANS	50 ANS	100 ANS
RANCE	33,8	38	42,7	48,5	54,1	61,4	66,8
I.C 95 %	29,6-40	33,5-46,7	37,3-54,8	41,7-65,3	45,8-75,6	50,9-89,0	54,7-99,1
I.C 80 %	31,3-37	35,1-42,3	39-48,6	43,8-56,7	48,2-64,5	53,9-74,7	58,2-82,4
CHIMAY	32,1	35,3	38,8	43,2	47,4	52,9	57
I.C 95 %	28,9-36,7	31,8-41,8	34,7-47,9	38-55,9	41,1-63,6	45-73,8	47,8-81,4
I.C 80 %	30,2-34,4	33-38,5	36-43,2	39,6-49,3	43-55,3	47,3-63	50,5-68,8
EPPE	34,1	39,6	45,8	53,6	61,1	70,8	78
I.C 95 %	28,4-42,2	33,7-51,2	38,7-62	44,6-76	50-89,7	56,8-107,6	61,9-121
I.C 80 %	30,7-38,3	35,8-45,4	41-53,7	47,3-64,5	53,3-75	60,8-88,6	66,5-98,8
MAUBEUGE M.N	31,3	34,9	38,8	43,8	48,6	54,8	59,5
I.C 95 %	27,6-36,5	31-42,3	34,2-49,2	38-58,2	41,5-66,9	45,8-78,4	49,1-87
I.C 80 %	29,1-33,9	32,4-38,5	35,7-43,9	39,8-50,8	43,6-57,5	48,4-66,2	52,1-72,8
FOURNIES	34,6	39	43,9	50	55,9	63,5	69,2
I.C 95 %	30,1-41	34,2-48,1	38,2-56,5	42,8-67,6	47,1-78,4	52,5-92,4	56,5-103
I.C 80 %	31,9-37,9	35,9-43,5	40-50,1	45-58,5	49,7-66,8	55,7-77,5	60,1-85,5
AVESNES M.N	29,9	33,6	37,8	43	48	54,5	59,3
I.C 95 %	26,1-35,3	29,6-41,3	33-48,5	36,9-57,9	40,5-67,1	45,1-79,1	48,5-88,1
I.C 80 %	27,6-32,7	31-37,4	34,5-43	38,7-50,2	42,7-57,2	47,8-66,4	51,6-73,2
BERLAINMONT	33,8	37,5	41,7	47	52	58,5	63,4
I.C 95 %	30-39,3	33,5-45,3	36,9-52,6	40,8-62	44,5-71,2	49,1-83,3	52,5-92,3
I.C 80 %	31,5-36,6	34,9-41,4	38,5-47	42,7-54,3	46,7-61,3	51,8-70,5	55,6-77,4
LANDRECIÉS	32,5	37,6	43,2	50,3	57,2	63,8	72,6
I.C 95 %	27,3-40	32,1-48,1	36,7-57,9	42,1-70,7	47-83,2	53,2-99,5	57,8-111,8
I.C 80 %	29,4-36,3	34,1-42,8	38,8-50,4	44,6-60,2	50-69,8	56,9-82,2	62,1-91,5
(PERIODE 52-84)	2 ANS	3 ANS	5 ANS	10 ANS	20 ANS	50 ANS	100 ANS
RANCE	35,2	39,7	44,7	51	57	64,9	70,7
I.C 95 %	32,4-38,7	36,6-44,5	40,8-51,3	45,9-60	50,6-68,5	56,8-79,6	61,3-87,9
I.C 80 %	33,8-36,8	38-41,8	42,5-47,5	48,1-54,8	53,4-61,9	60,2-71,1	65,3-78
CHIMAY	31,2	34	37,1	41	44,8	49,6	53,3
I.C 95 %	29,5-33,4	32,1-37	34,7-41,2	37,9-46,6	40,8-51,9	44,6-58,8	47,4-63,9
I.C 80 %	30,4-32,2	33-35,3	35,8-38,9	39,2-43,4	42,5-47,8	46,8-53,5	49,9-57,8

56 : Quantiles des maxima annuels des pluies journalières de 1963 à 1984 en huit stations du bassin de la Sambre. Quantiles des maxima annuels des pluies journalières de 1952 à 1984 à Rance et Chimay.
I.C : Intervalle de confiance

STATIONS		JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JT	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC
RANCE	GRADEX	5,365	5,144	4,863	3,288	5,272	9,393	8,117	5,752	8,959	6,503	7,832	8,022
	X0	12,584	12,208	12,037	10,975	14,449	20,598	12,953	13,963	12,353	11,866	18,587	13,53
CHINAY	GRADEX	4,157	6,108	6,058	3,272	7,08	6,794	7,774	4,765	6,835	7,634	7,217	6,262
	X0	13,319	12,889	12,445	10,435	13,25	17,462	14,092	11,573	12,856	12,104	19,354	13,769
EPPE	GRADEX	4,497	4,46	3,341	3,55	5,024	10,669	12,115	7,8	8,157	6,851	7,368	4,836
	X0	12,01	10,326	11,272	10,215	11,537	17,471	12,862	12,897	13,153	9,51	17,985	12,323
NAUBEUGE	GRADEX	5,645	5,218	3,867	3,22	7,807	9,356	6,938	6,488	6,629	6,092	7,362	4,862
	X0	11,165	10,53	12,028	9,91	14,154	19,082	13,874	13,256	12,152	12,007	17,734	12,008
FOURNIES	GRADEX	4,559	5,444	4,556	3,648	5,734	10,841	7,516	10,108	8,974	6,307	6,801	5,558
	X0	12,783	12,177	13,453	11,363	13,992	17,413	15,373	15,022	12,927	12,838	19,53	12,679
AVESNES	GRADEX	3,948	4,712	4,099	3,122	5,249	8,787	8,197	7,842	7,087	4,739	7,031	5,713
	X0	10,79	11,554	11,126	9,64	13,112	14,971	14,693	11,789	11,415	10,797	15,975	11,958
BERLAIMONT	GRADEX	4,88	5,178	4,056	3,584	6,955	10,245	8,069	10,107	8,2	5,71	6,765	4,886
	X0	11,025	12,01	10,969	10,137	15,037	18,33	16,33	15,236	12,586	11,346	17,728	11,622
LANDRECIÉS	GRADEX	3,723	5,966	4,856	2,466	5,352	10,212	10,402	7,302	8,367	5,046	9,376	3,775
	X0	8,743	9,18	10,126	9,05	11,667	15,885	13,78	13,75	13,913	10,484	14,581	9,299

57 : Paramètres des ajustements de Gumbel sur les maxima mensuels des pluies journalières de 1963 à 1984

Le paramètre d'échelle G ou "gradex" représente la pente de la droite d'ajustement de l'échantillon.

Le paramètre de position est noté X0.

Les quantiles QP sont obtenus par l'équation de la droite de Gumbel :

$Qp = G * u + X0$ avec :

. variable réduite de Gumbel $u = -\log(-\log(P))$

. P : Fréquence au non dépassement.

. G = 0,78 s (méthode des moments)

. $X0 = \bar{X} - 0,577 G$

. \bar{X} : Moyenne de l'échantillon

. s : Ecart-type de l'échantillon

	JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JT	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC
RANCE	14,6	13,9	13,8	12,2	16,4	24	15,9	16,1	15,6	14,2	21,5	16,5
CHINAY	14,8	15,1	14,7	11,6	15,8	20	16,9	13,3	15,4	14,9	22	16,1
EPPE	13,7	12	12,5	11,5	13,4	21,4	17,3	15,8	16,1	12	20,7	14,1
NAUBEUGE	13,2	12,4	13,4	11,1	17	22,5	16,4	15,6	14,6	14,2	20,4	13,8
FOURNIES	14,5	14,2	15,1	12,7	16,1	21,4	18,1	18,7	16,2	15,1	22	14,7
AVESNES	12,2	13,3	12,6	10,8	15	18,2	17,7	14,7	14	12,5	18,6	14,1
BERLAIMONT	12,8	13,9	12,5	11,5	17,6	22,1	19,3	18,9	15,6	13,4	20,2	13,4
LANDRECIÉS	10,1	11,4	11,9	10	13,6	19,6	17,6	16,4	17	12,3	18	10,7

58 : Quantiles des maxima mensuels des pluies journalières de période de retour 2 ans

	JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JT	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC
RANCE	17,4	16,7	16,4	13,9	19,2	29,1	20,3	19,2	20,4	17,7	25,7	20,8
CHIMAY	17,1	18,4	17,9	13,4	19,6	23,6	21,1	15,9	19	19	25,9	19,4
EPPE	16,1	14,4	14,3	13,4	16,1	27,1	23,8	19,9	20,5	15,7	24,6	16,7
MAUBEUGE	16,3	15,2	15,5	12,8	21,2	27,5	20,1	19,1	18,1	17,5	24,4	16,4
POURMIES	16,9	17,1	17,6	14,7	19,2	27,2	22,2	24,1	21	18,5	25,7	17,7
AVESNES	14,4	15,8	14,8	12,5	17,9	22,9	22,1	18,9	17,8	15,1	22,3	17,1
BERLAIMONT	15,4	16,7	14,6	13,4	21,3	27,6	23,6	24,4	19,9	16,5	23,8	16
LANDRECIÉS	12,1	14,6	14,5	11,3	16,5	25,1	23,2	20,3	21,5	15	23	12,7

59 : Quantiles des maxima mensuels des pluies journalières de période de retour 3 ans

	JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JT	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC
RANCE	20,7	19,7	19,4	15,9	22,4	34,7	25,1	22,6	25,8	21,6	30,3	25,6
CHIMAY	19,6	22,1	21,5	15,3	23,9	27,7	25,8	18,7	23,1	23,6	30,2	23,2
EPPE	18,8	17	16,3	15,5	19,1	33,5	31,1	24,6	25,4	19,8	29	19,6
MAUBEUGE	19,6	18,4	17,8	14,7	25,9	33,1	24,3	23	22,1	21,1	28,8	19,3
POURMIES	19,6	20,3	20,3	16,8	22,6	33,7	26,6	30,2	26,4	22,3	29,7	21
AVESNES	16,7	18,6	17,3	14,3	21	28,2	27	23,6	22	17,9	26,5	20,5
BERLAIMONT	18,3	19,8	17,1	15,5	25,5	33,7	28,4	30,4	24,9	19,9	27,9	19
LANDRECIÉS	14,3	18,1	17,4	12,7	19,7	31,2	29,4	24,7	26,5	18	28,6	15

60 : Quantiles des maxima mensuels des pluies journalières de période de retour 5 ans

	JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JT	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC
RANCE	24,7	23,6	23	18,4	26,3	41,7	31,2	26,9	32,5	26,5	36,2	31,6
CHIMAY	22,7	26,6	26,1	17,8	29,2	32,8	31,6	22,3	28,2	29,3	35,6	27,9
EPPE	22,1	20,4	18,8	18,2	22,8	41,5	40,1	30,5	31,5	24,9	34,6	23,2
MAUBEUGE	23,9	22,3	20,7	17,2	31,7	40,1	29,5	27,9	27,1	25,7	34,3	22,9
POURMIES	23	24,4	23,7	19,6	26,9	41,8	32,3	37,8	33,1	27	34,8	25,2
AVESNES	19,7	22,2	20,3	16,7	24,9	34,7	33,1	29,4	27,4	21,5	31,8	24,8
BERLAIMONT	22	23,7	20,1	18,2	30,7	41,4	34,5	38	31	24,2	33	22,6
LANDRECIÉS	17,1	22,6	21,1	14,6	23,7	38,9	37,2	30,2	32,7	21,8	35,7	17,8

61 : Quantiles des maxima mensuels des pluies journalières de période de retour 10 ans

	JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JT	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC
RANCE	28,6	27,3	26,5	20,7	30,1	48,5	37,1	31	39	31,2	41,8	37,4
CHIMAY	25,7	31	30,4	20,2	34,3	37,6	37,2	25,7	33,2	34,8	40,8	32,4
EPPE	25,4	23,6	21,2	20,8	26,5	49,2	48,9	36,1	37,4	29,9	39,9	26,7
MAUBEUGE	27,9	26	23,5	19,5	37,3	46,9	34,5	32,5	31,8	30,1	39,6	26,4
FOURNIES	26,3	28,3	27	22,2	31	19,6	37,7	45	39,6	31,6	39,7	29,2
AVESNES	22,5	25,5	23,3	18,9	28,7	41	39	35,1	32,5	24,8	36,9	28,9
BERLAINMONT	25,5	27,4	23	20,8	35,7	48,8	40,3	45,3	36,9	28,3	37,8	26,1
LANDRECIÉS	19,8	26,9	24,5	16,4	27,6	46,2	44,7	35,4	38,8	25,5	42,4	20,5

62 : Quantiles des maxima mensuels des pluies journalières de période de retour 20 ans

	JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JT	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC
RANCE	33,6	32,1	31,1	23,8	35	57,2	44,6	36,4	47,3	37,2	49	44,8
CHIMAY	29,5	36,7	36,1	23,2	40,9	44	44,4	30,2	39,5	41,9	47,5	38,2
EPPE	29,6	27,7	24,3	24,1	31,1	59,1	60,2	43,4	45	36,2	46,7	31,2
MAUBEUGE	33,2	30,9	27,1	22,5	44,6	55,6	41	38,6	38	35,8	46,5	31
FOURNIES	30,6	33,4	31,2	25,6	36,4	59,7	44,7	54,5	47,9	37,5	46,1	34,4
AVESNES	26,2	29,9	27,1	21,8	33,6	49,3	46,7	42,4	39,1	29,3	43,4	34,2
BERLAINMONT	30,1	32,2	26,8	24,1	42,2	58,3	47,8	54,7	44,6	33,6	44,1	30,7
LANDRECIÉS	23,3	32,5	29,1	18,7	32,5	55,7	54,4	42,2	46,6	30,2	51,2	24

63 : Quantiles des maxima mensuels des pluies journalières de période de retour 50 ans

	JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JT	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC
RANCE	37,4	35,7	34,5	26,1	38,7	63,8	50,3	40,4	53,6	41,8	54,6	50,4
CHIMAY	32,4	41	40,3	25,5	45,8	48,7	49,9	33,5	44,3	47,2	52,6	42,6
EPPE	32,7	30,8	26,6	26,5	34,6	66,5	68,6	48,8	50,7	41	51,9	34,6
MAUBEUGE	37,1	34,5	29,8	24,7	50,1	62,1	45,8	43,1	42,6	40	51,6	34,4
FOURNIES	33,8	37,2	34,4	28,1	40,4	67,3	49,9	61,5	54,2	41,9	50,8	38,2
AVESNES	29	33,2	30	24	37,3	55,4	52,4	47,9	44	32,6	48,3	38,2
BERLAINMONT	33,5	35,8	29,6	26,6	47	65,5	53,5	61,7	50,3	37,6	48,8	34,1
LANDRECIÉS	25,9	36,6	32,5	20,4	36,3	62,9	61,6	47,3	52,4	33,7	57,7	26,7

64 : Quantiles des maxima mensuels des pluies journalières de période de retour 100 ans

Il est important de noter que les gradex obtenus pour un même mois sont parfois très différents sans qu'il soit possible d'invoquer la relation pluviométrie-altitude démontrée lors de l'étude des pluies moyennes annuelles. En août les gradex varient ainsi de 4,8 à 10,1, ce qui conduit à des quantiles rares très différents selon les stations. On constate notamment que les quantiles d'août, de période de retour cent ans, sont deux fois plus élevés à Fourmies qu'à Chimay, ces deux stations se trouvant à l'Est du bassin.

Dans l'ensemble, on constate donc une assez forte hétérogénéité des pluies maximales journalières. La cause de cette hétérogénéité est difficile à établir. On peut invoquer des différences climatiques à l'intérieur du bassin de la Sambre, ce qui paraît être le cas.

Outre ce phénomène, il semble qu'il faille prendre en considération les erreurs d'observation ; lors de l'échantillonnage des maxima journaliers mensuels ou annuels, on a vérifié que les valeurs élevées ne correspondaient pas à des cumuls, l'observateur n'ayant pas respecté l'heure de relevé du pluviomètre ; il est cependant toujours difficile de contrôler a posteriori des données relevées depuis plusieurs années, les techniques de corrélation n'ayant aucune valeur pour contrôler des données journalières, notamment en période d'été. Les résultats actuels sont une base de travail qui devra impérativement être contrôlée par l'observation ultérieure des données maximales en temps réel, par télétransmission notamment. Ce problème sera évoqué dans la conclusion générale.

QUATRIEME PARTIE

LE BASSIN DE LA SOLRE

CHAPITRE 1 : PRESENTATION DU BASSIN DE LA SOLRE

(Le document 65 résume les caractéristiques principales du bassin)

1.1. SITUATION

La Solre (prononcer "Sore") est le dernier important affluent rive droite de la Sambre française et son bassin, à l'extrême Nord-Est du département du Nord, draine une surface de 120 km² qui correspond environ à 10 % de la surface totale du bassin de la Sambre.

Le bassin de la Solre s'étend sur les régions naturelles du Hainaut, au Nord, et de la Thiérache, au Sud.

L'allongement général du bassin s'effectue du Sud-Est vers le Nord-Ouest, sa plus grande longueur est de 16,5 km.

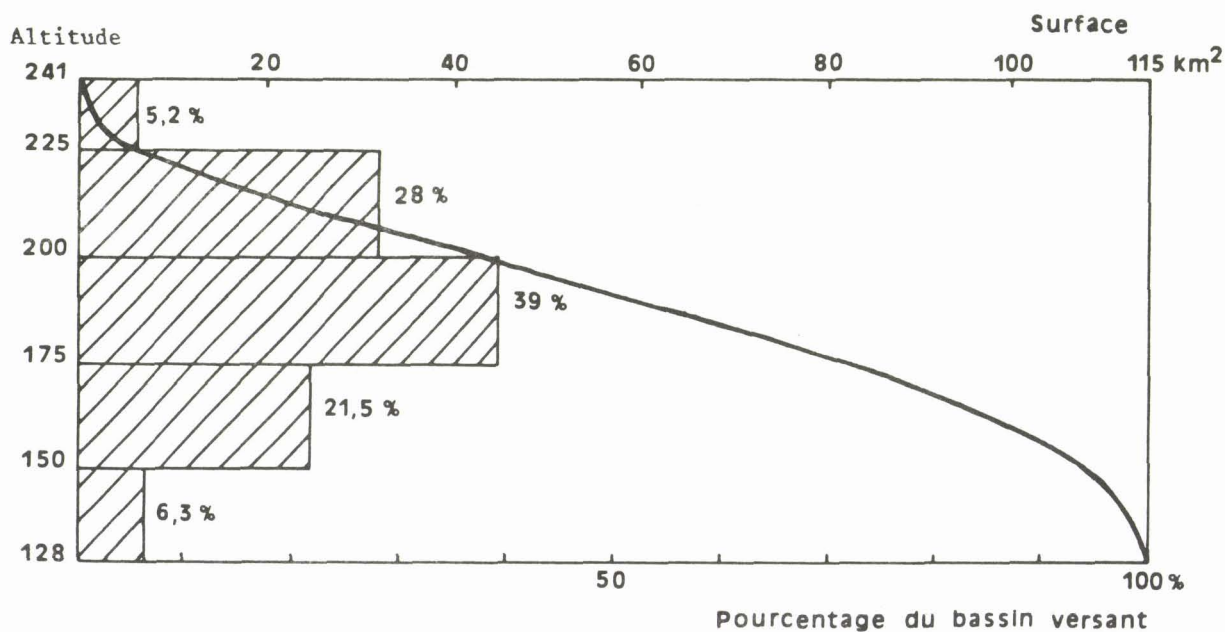
Le bassin étant situé sur la bordure Ouest des Ardennes, son relief, relativement au reste du département, y est assez accusé, les altitudes extrêmes étant de 241 mètres et de 128 mètres, soit un dénivellement de 113 mètres sur 16,5 kms, ce qui correspond à une pente moyenne de 0,68 %.

N.B : Une étude descriptive du bassin de la Solre a été réalisée dans le passé par les services du S.R.A.E Nord-Pas-de-Calais. Elle comprend notamment une cartographie au 1/25000 présentant la topographie, les sous-bassins versants, l'hypsométrie, l'oro-hydrographie, les caractéristiques de forme, la couverture végétale, les profils en long rives droite et gauche et la géologie (cf annexe cartographie).

1.2. HYDROGRAPHIE

La Solre prend sa source au sud-est de Solre le Château à une altitude de 228 m. Son parcours est long de 23 km et sa pente moyenne de 0,45 %. Elle coule selon un axe orienté Sud-Est - Nord-Ouest et partage son bassin versant en deux parties de superficie sensiblement égale.

Superficie totale du bassin : 120 Km ²											
. Station de jaugeage à Ferrière-la-Grande											
. Surface du bassin versant à Ferrière-la-Grande : 115 km ²											
. Pluviographes à Colleret, Eccles, Sars-Poteries											
. Pluviomètres à Dimont, Maubeuge											
Longueur du thalweg principal : 22 km											
Altitude maximum : 245 m											
Altitude minimum : 124 m											
Dénivellation : 121 m											
Pente moyenne : 0,73 %											
Module annuel 1973-1984 : 1,4 m ³ /s											
Coefficient mensuel de débit (débit moyen mensuel / module) :											
J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1,49	1,73	1,53	1,17	1,02	0,69	0,67	0,36	0,36	0,71	0,92	1,42



65 : Caractéristiques du bassin de la Solre, polygones des fréquences altimétriques en pourcentage de la surface totale et courbe hypsométrique du bassin.

Elle reçoit de part et d'autre un certain nombre d'affluents dont les principaux sont :

. en rive droite :

- le ruisseau de l'Ecrevisse
- le ruisseau du Grand Pré
- le ruisseau du Quiévelon

. en rive gauche

- le ruisseau du Stordoir

Les affluents dont les débits sont les plus élevés sont le Stordoir et le Ruisseau du Grand Pré.

A noter aussi l'existence de quelques étangs de superficie assez réduite (de l'ordre du demi-hectare) situés sur le parcours même de certains affluents ou sous-affluents de la Solre.

Citons pour exemple :

- les étangs du Ruisseau de l'Ecrevisse au Nord de Solre-le-Château ;
- l'étang du Rieu sur le ruisseau du Lepet (affluent du Stordoir) ;
- l'étang Fourtin sur le ruisseau des Viviers (affluent du Stordoir).

1.3. COUVERT VEGETAL ET AGRICULTURE

Le bassin versant de la Solre se situe en zone rurale à prédominance bocagère. La plus grande partie de la surface agricole utilisable est occupée par des prairies naturelles :

- Thiérache : 80 %
- Hainaut Français : 60 à 80 %

L'importance des herbages varie selon les communes. Au Sud du bassin, le caractère herbager est plus marqué : plus de 90 % pour les communes de Solre le Château, Hestrud, Clairfayt, Beugnies. Sur ces prairies, la production laitière est largement dominante.

Le reste de la surface agricole utilisable est occupé :

- par des cultures fourragères (plus de 10 % pour les communes de Ferrière-la-Grande, Rousies, Quiévelon, Aibes, Berelles, Wattignies-la-Victoire, Dimechaux, Dimont, Sars Poteries)

- par des cultures céréalières (plus de 30 % pour les communes de Sars-Poteries, Wattignies-la-Victoire, Damousies, Cerfontaine, Ferrière-la-Petite)

En dehors des surfaces agricoles, le bassin versant de la Solre possède des surfaces boisées très disséminées. Leur superficie totale est approximativement égale à 1/7 de la superficie totale du bassin.

1.4. POPULATION ET ACTIVITES HUMAINES.

Le bassin versant de la Solre s'étend sur 21 communes, comprenant environ 19.000 habitants (recensement de 1982), soit une densité de population de 160 h/km².

Quatre de ces communes ont une population supérieure à 1000 habitants :

- Solre-le-Château (2153 habitants) située sur le cours supérieur ;
- Ferrière-la-Grande (5611 habitants) et Rousies (4517 habitants) sur le cours inférieur ;
- Sars-Poteries (1699 habitants) sur le cours supérieur du Stordoir, l'affluent principal de la Solre.

A l'exception de Sars-Poteries, ces communes sont des centres industriels dont les activités sont liées à la métallurgie et la construction mécanique :

. Ferrière-la-Grande :

- Société parisienne d'industries électriques (S.P.I.E) ;
- Miroux et Cie-robinetterie ;
- S.E.C.I.M.- société de construction métallique.

. Rousies :

- Phénix-Rousies-galvanisation ;
- Société Fives-Lille.

. Solre-le-Château

- Société industrielle de Ferblanterie.

1.5. STRATIGRAPHIE ET HYDROGEOLOGIE

Le bassin versant de la Solre repose sur l'extrémité occidentale des terrains primaires du synclinal de Dinant, en Ardenne.

On ne reviendra pas ici sur les caractéristiques lithologiques des différents terrains rencontrés (partie I, chapitre 2) mais on notera quelques points importants influençant le comportement hydrologique et hydrogéologique du bassin.

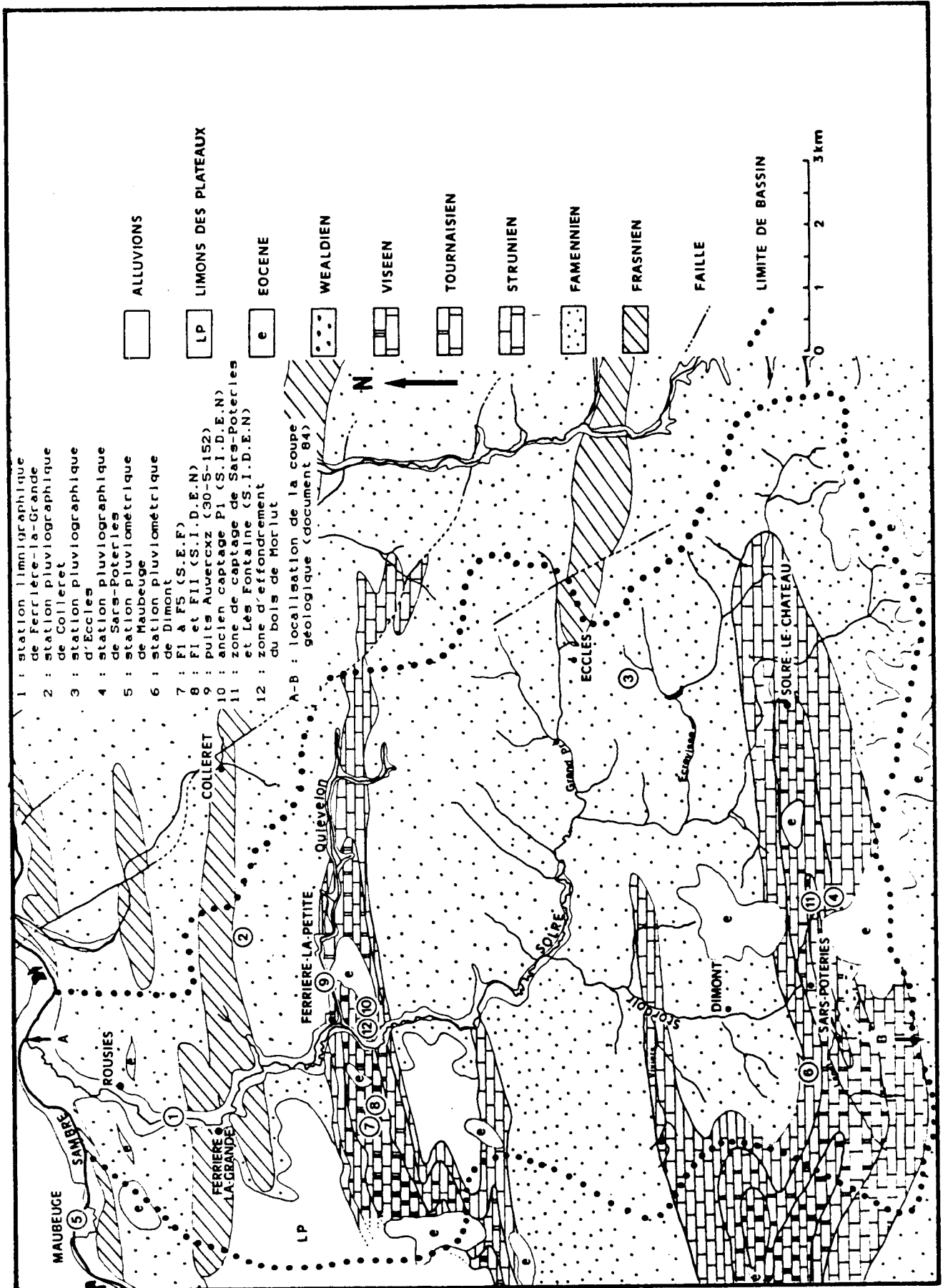
La carte géologique du bassin de la Solre (document 66) présente certains traits marquants :

- Deux importantes structures forment l'ossature primaire du bassin : il s'agit du synclinorium carbonifère de Ferrière-la-Petite, au Nord, et de celui de Sars-Poteries, au Sud. Ces deux unités sont reliées par l'anticlinorium famennien de Dimont - Wattignies-la-Victoire, et l'ensemble se raccorde à la vallée de la Sambre par l'anticlinorium frasnien de Ferrière-la-Grande.

- Le Givétien, le Frasnien et le Dinantien sont fracturés en profondeur et contiennent des nappes libres (influence de la fracturation sur le comportement hydrodynamique de ces nappes, Carlier, 1983). L'aquifère dinantien est largement exploité pour l'alimentation en eau potable et les captages sont gérés par deux sociétés : "Eau et Force" et le "Syndicat intercommunal de distribution des eaux du Nord (S.I.D.E.N)". Les caractéristiques et la situation des captages de ces deux sociétés sont présentées sur les documents 66 et 67.

- Certains terrains sont schisteux et imperméables : c'est le cas du Famennien. Leur frange d'altération supérieure contient cependant une nappe limitée en profondeur mais étendue en superficie.

- Les parties hautes sont largement occupées par les limons des plateaux



66 : Carte géologique schématique et principaux équipements du bassin de la Solre

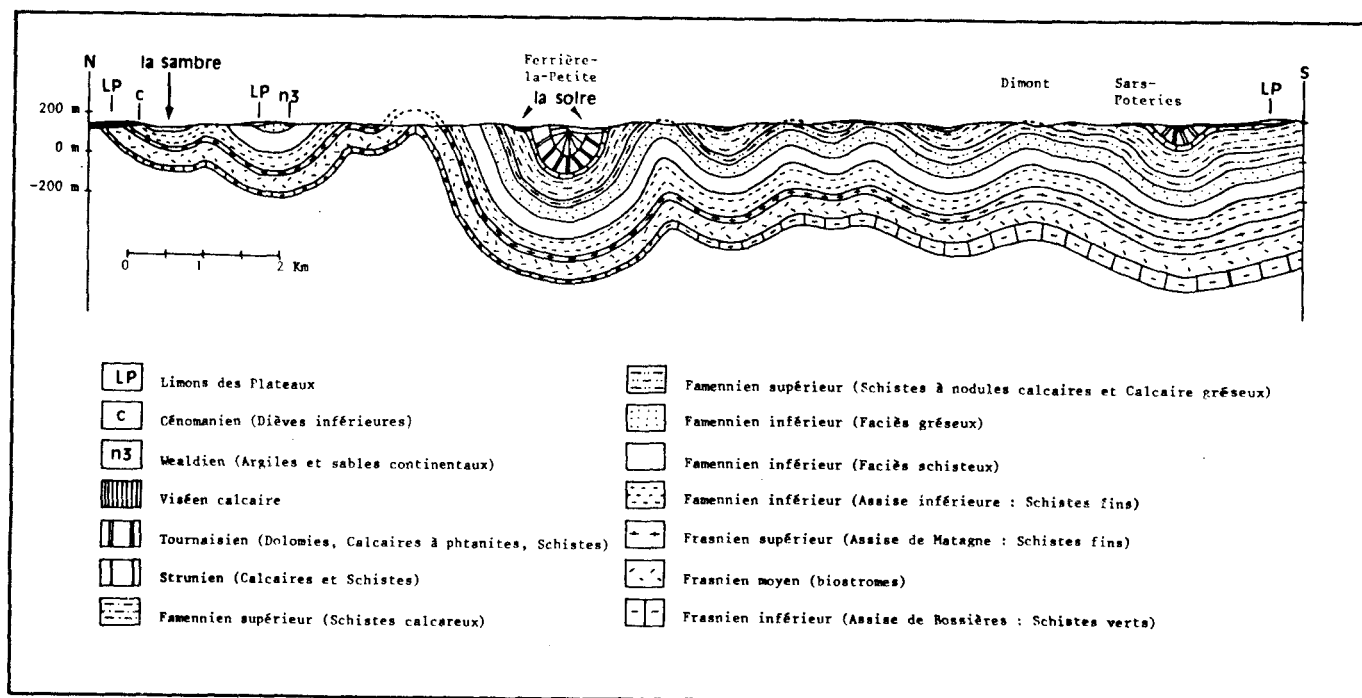
- La Solre s'écoule vers le Nord-Ouest, perpendiculairement au plissement des couches.

Ces caractéristiques montrent que le bassin de la Solre est un bassin hétérogène globalement peu perméable mais entaillé par des plissements largement érodés et fracturés qui constituent autant de pièges pour les eaux superficielles.

	F1	F2	F3	F4	F5	F1	PII	PI	AUWERCKZ
Indice	30-5-17	30-5-47	30-5-140	30-5-342	30-5-296	30-5-106	30-5-290	30-5-10	30-5-152
X	717,55	717,51	718,14	718,43	718,3	718,87	718,65	720,02	720,52
Y	282,8	282,75	282,88	282,95	283,02	283	282,85	283,2	283,79
Z sol	164,11	163,74	133,44	142,82	142,4	158	135	150	151
Profondeur	81	78,8	29,4	50,5	50,5	80		25	
Nature	A.E.P	A.E.P	A.E.P	St.piézo	A.E.P	A.E.P	A.E.P	A.E.P	Ancien puits
Mise en service	1959	1962	1964	-	1976	1968	1973	1954	
Société	S.E.F	S.E.F	S.E.F	S.E.F	S.E.F	S.I.D.E.N	S.I.D.E.N	S.I.D.E.N	

67 : Indices et caractéristiques de quelques captages et puits implantés sur les synclinaux carbonifère du bassin de la Solre
 F1 remplace P1 depuis septembre 1967
 F5 remplace F3 depuis 1976

Une coupe géologique schématique présente la position des différents terrains (document 68), de la Sambre, au Nord, vers l'extrémité amont du bassin versant, au Sud.



68 : Coupe géologique schématique Nord-Sud du bassin de la Solre. Le trait de coupe est indiquée sur le document 66 (points A et B).

CHAPITRE 2 : PLUVIOMETRIE DU BASSIN DE LA SOLRE

Le bassin de la Solre est équipé de deux pluviomètres, à Maubeuge et Dimont, et de trois pluviographes à Colletet, Eccles et Sars- Poteries.

Les trois pluviographes sont gérés par le S.R.A.E Nord - Pas-de-Calais. Il s'agit de pluviographes à augets basculeurs Précis-mécanique. Leur mise en service débute en 1973 (Sars-Poteries), 1976 (Colletet) et 1977 (Eccles).

Les deux pluviomètres gérés par la Météorologie Nationale fournissent les valeurs des pluies journalières. La station de Dimont est située au Sud et en amont du bassin de la Solre à proximité du pluviographe de Sars-Poteries et celle de Maubeuge (doublée d'une station gérée par le service des voies navigables) est placée immédiatement au nord du point de confluence de la Solre avec la Sambre.

La situation et les caractéristiques de ces stations sont respectivement fournies par les documents 4 (ou 66) et 5.

2.1. PLUIES ANNUELLES ET MENSUELLES

Les valeurs annuelles et mensuelles issues de ces cinq stations ont été critiquées lors de l'étude pluviométrique générale du bassin de la Sambre (cf. partie III, chap. 1 et 2 : documents 6b, 6e, 6h, 9, 10).

2.1.1. Pluies annuelles

Les périodes d'observation à Colletet, Eccles, Sars-Poteries et Dimont étant courtes, on a procédé à l'extension des données sur la période commune 1963-1984 (22 années) en utilisant les paramètres des régressions (document 9) entre ces stations et la station de Maubeuge. Les valeurs annuelles estimées sont contenues dans le document 11. Le nombre fictif d'années d'observation (cf. annexe corrélation) est de 20 pour Colletet, Eccles et Sars-Poteries et de 19 pour Dimont.

Les échantillons obtenus ont été ajustés à une loi de Gauss. On calcule l'intervalle de confiance sur les quantiles en prenant en compte, non pas le nombre des observations de l'échantillon étendu, mais le nombre fictif d'observations. Les paramètres de l'ajustement et les quantiles sont indiqués sur le document 69.

STATIONS	TEMPS DE RETOUR								
	MOYENNE (MO)	ECART-TYPE (s)	2 ANS	3 ANS	5 ANS	10 ANS	20 ANS	50 ANS	100 ANS
MAUBEUGE I.C 95 %	838	146	838 773-902	901 833-969	961 885-1036	1025 938-1113	1078 979-1178	1038 1024-1253	1178 1053-1303
COLLERET I.C 95 %	743	160	743 668-818	813 734-891	878 791-965	948 847-1049	1006 891-1121	1071 939-1203	1115 971-1259
ECCLES I.C 95 %	807	177	807 724-889	884 797-970	956 859-1052	1033 922-1145	1098 971-1225	1170 1024-1316	1218 1059-1378
SARS-POTERIES I.C 95 %	825	157	825 752-898	893 816-970	957 872-1042	1026 927-1125	1083 970-1196	1147 1018-1276	1190 1049-1331
DIMONT I.C 95 %	865	179	865 779-951	942 852-1032	1015 915-1115	1094 977-1210	1158 1026-1290	1231 1080-1383	1280 1114-1446

$$P(T) = s u + MO$$

770----->Estimation

715-825----->Intervalle de confiance à 95 % (I.C)

s : écart-type

u : Variable réduite de Gauss

MO : moyenne des pluies annuelles (mm)

69 : Paramètres et quantiles des ajustements de Gauss sur les pluies annuelles à Maubeuge, Colleret, Eccles, Sars-Poteries et Dimont de 1963 à 1984. Les valeurs ajustées à Colleret, Eccles, Sars-Poteries et Dimont ont été étendues.

La lame moyenne interannuelle est obtenue par la méthode de Thiessen en utilisant les coefficients de pondération suivants :

Maubeuge : 0,147, Colleret : 0,129, Eccles : 0,296, Sars-Poteries : 0,138 et Dimont : 0,29. On obtient une lame moyenne interannuelle estimée de 823 mm sur la période 1963-1984.

2.1.2. Pluies mensuelles

Afin de vérifier l'homogénéité des mesures pluviométriques effectuées sur le bassin, on a choisi d'effectuer des corrélations mensuelles entre les pluies mensuelles de Maubeuge, Colleret, Eccles, Sars-Poteries et Dimont. Le document 70 présente les coefficients de corrélation obtenus ainsi que l'effectif des échantillons utilisés.

On note que les coefficients de corrélation sont élevés et significatifs malgré la faiblesse de l'effectif (pour des effectifs de 8, 9 et 12 valeurs, les coefficients de corrélation sont en effet significatifs au seuil de 1 % si ceux-ci sont supérieurs respectivement à 0,83, 0,8 et 0,71).

JANVIER				FEBVIER				JUILLET				AOUT			
HAUBERGE H.N	COLLERET	ECCLES	SANS-SPOT	HAUBERGE H.N	COLLERET	ECCLES	SANS-SPOT	HAUBERGE H.N	COLLERET	ECCLES	SANS-SPOT	HAUBERGE H.N	COLLERET	ECCLES	SANS-SPOT
1	0,98	0,97	0,95	1	0,92	0,93	0,95	1	0,97	0,97	0,92	1	0,92	0,76	0,79
			0,98				0,92				0,12				0,12
COLLERET	1	0,92	0,99	COLLERET	1	0,97	0,98	COLLERET	1	0,96	0,95	COLLERET	1	0,61	0,72
			0,96				0,95				0,99				0,96
ECCLES	1	0,95	0,97	ECCLES	1	0,99	0,95	ECCLES	1	0,92	0,98	ECCLES	1	0,86	0,82
			0,98				0,98				0,99				0,99
SANS-SPOT	1	0,97	0,99	SANS-SPOT	1	0,98	0,99	SANS-SPOT	1	0,96	0,99	SANS-SPOT	1	0,92	0,92
			1				1				1				1
			DIMONT				DIMONT				DIMONT				DIMONT
			1				1				1				1

MARS				AVRIL				SEPTEMBRE				OCTOBRE			
HAUBERGE H.N	COLLERET	ECCLES	SANS-SPOT	HAUBERGE H.N	COLLERET	ECCLES	SANS-SPOT	HAUBERGE H.N	COLLERET	ECCLES	SANS-SPOT	HAUBERGE H.N	COLLERET	ECCLES	SANS-SPOT
1	0,91	0,89	0,93	1	0,94	0,86	0,95	1	0,98	0,97	0,95	1	0,97	0,98	0,97
			0,94				0,94				0,12				0,12
COLLERET	1	0,96	0,98	COLLERET	1	0,97	0,94	COLLERET	1	0,99	0,98	COLLERET	1	0,98	0,97
			0,97				0,96				0,98				0,98
ECCLES	1	0,95	0,93	ECCLES	1	0,99	0,92	ECCLES	1	0,98	0,98	ECCLES	1	0,98	0,97
			0,99				0,98				0,99				0,99
SANS-SPOT	1	0,99	0,99	SANS-SPOT	1	0,98	0,99	SANS-SPOT	1	0,98	0,99	SANS-SPOT	1	0,98	0,99
			1				1				1				1
			DIMONT				DIMONT				DIMONT				DIMONT
			1				1				1				1

MAY				JUN				NOVEMBRE				DECEMBRE			
HAUBERGE H.N	COLLERET	ECCLES	SANS-SPOT	HAUBERGE H.N	COLLERET	ECCLES	SANS-SPOT	HAUBERGE H.N	COLLERET	ECCLES	SANS-SPOT	HAUBERGE H.N	COLLERET	ECCLES	SANS-SPOT
1	0,91	0,8	0,95	1	0,93	0,84	0,82	1	0,82	0,87	0,82	1	0,97	0,92	0,97
			0,99				0,99				0,12				0,12
COLLERET	1	0,98	0,97	COLLERET	1	0,77	0,88	COLLERET	1	0,78	0,93	COLLERET	1	0,98	0,96
			0,99				0,99				0,99				0,99
ECCLES	1	0,96	0,97	ECCLES	1	0,88	0,86	ECCLES	1	0,79	0,95	ECCLES	1	0,9	0,96
			0,99				0,98				0,99				0,99
SANS-SPOT	1	0,99	0,99	SANS-SPOT	1	0,96	0,99	SANS-SPOT	1	0,98	0,99	SANS-SPOT	1	0,98	0,99
			1				1				1				1
			DIMONT				DIMONT				DIMONT				DIMONT
			1				1				1				1

70 : Corrélations mensuelles entre les stations pluviométriques du bassin de la Soire.
 0,82 -----> coefficient de corrélation
 9 -----> taille de l'échantillon

Quelques anomalies sont cependant constatées pour les mois de juin (Colleret - Eccles : 0,77, Colleret - Dimont : 0,79), d'août (Maubeuge - Eccles : 0,76, Colleret - Eccles : 0,61, Colleret - Sars-Poteries : 0,72) et de novembre (Colleret - Eccles : 0,78, Eccles - Sars-Poteries : 0,79). Ces coefficients peu significatifs sont dûs aux averses orageuses locales.

Ces anomalies restent cependant peu nombreuses par rapport à l'ensemble des régressions effectuées et le régime des précipitations Maubeuge (documents 29a et b) nous paraît suffisant pour définir le régime du bassin de la Solre. Si l'on désire des estimations plus précises de la pluviométrie mensuelle moyenne en d'autres stations du bassin, on utilisera les paramètres des régressions précédemment présentées (document 23) en s'assurant de la significativité du coefficient de corrélation et d'une bonne concentration du nuage de points autour de la droite de régression (écart-type SR des résidus faible).

Contrairement au cas des pluies annuelles, l'ajustement des échantillons des pluies mensuelles de Colleret, Eccles, Sars-Poteries et Dimont nous semble inutile pour les raisons suivantes :

. l'ajustement des échantillons réellement observés fournira des estimations entachées d'un intervalle de confiance très large du fait de la petite taille des échantillons

. la pratique de l'extension avant ajustement est ici discutable car certains échantillons des valeurs mensuelles présentent un coefficient de variation plus élevé et une distribution asymétrique qui les place en limite des conditions d'application de la loi de Gauss, ce qui diminue la signification du coefficient de corrélation obtenu. L'utilisation d'un tel coefficient pour comparer des échantillons réellement observés se justifie pour un contrôle de données mais rend trop imprécises les extrapolations.

2.2. MAXIMA ANNUELS DES PLUIES JOURNALIERES

On dispose de cinq fichiers de la pluviométrie journalière aux stations de Colleret, Eccles, Sars-Poteries, Maubeuge M.N et Dimont. Seule la station de Maubeuge présente une durée d'observation suffisante (22 ans) pour que l'ajustement de Gumbel soit correct. Cet ajustement a été présenté précédemment avec les autres stations du bassin de la Sambre (cf. partie III, chapitre 3 et document 56).

2.3. RELATION INTENSITE-DUREE-FREQUENCE DES PLUIES A COLLERET (I.D.F)

L'étude fine de la relation intensité-durée-fréquence nécessite le recours aux enregistrements pluviographiques. Ces enregistrements, ou pluviogrammes, permettent d'étudier en continu les variations d'intensité de la pluie.

Tout gestionnaire de réseau pluviographique sait combien il est difficile d'obtenir des enregistrements continus et ...parfaits. Quel que soit le soin apporté par l'observateur aux relevés des appareils, il se produit fatalement des pannes dues notamment à des arrêts ou à un mauvais fonctionnement de l'horlogerie, à des bouchages, à des blocages d'augets, à des encrages du stylet...

Les premières démarches à effectuer, lorsqu'on veut utiliser tout ou partie des enregistrements, sont de détecter les défauts, d'en reconnaître la nature et de rechercher dans quelle mesure elles affectent la donnée à extraire. Pour cela, on dispose d'informations indirectes et des pluviomètres les plus proches. La donnée incriminée pourra alors être rectifiée ou rejetée.

2.3.1. Intérêt de la relation

Parmi les missions des hydrologues et des techniciens de l'assainissement en milieu urbain, il en est une qui concerne la gestion du réseau d'évacuation des eaux pluviales. On sait, du fait de l'imperméabilisation des surfaces, que le ruissellement en milieu urbain est particulièrement important et rapide ; l'hydrologie urbaine a pour objet principal la détermination des débits à prendre en compte pour calibrer les ouvrages d'évacuation de ces eaux de ruissellement.

Le dimensionnement des ouvrages est habituellement calculé de façon à absorber le débit maximal de fréquence décennale. Ce débit est habituellement calculé par des modèles statistiques ou de simulation de la relation pluie-ruissellement. Ces modèles sont très nombreux et détaillés dans des articles ou ouvrages spécialisés (Normand, 1971 ; Fouquet et al., 1978 ; Valiron, 1985).

Outre l'indice de ruissellement lié au coefficient d'imperméabilisation du bassin urbain, la variable d'entrée principale à prendre en compte est l'intensité probable de la pluie pour différentes durées. L'objet du présent paragraphe est donc de sélectionner, parmi les données pluviographiques, celles qui sont maximales sur un intervalle de temps t ainsi que leur probabilité d'apparition. L'ajustement de ces données à une loi statistique convenablement choisie permet ensuite d'utiliser l'équation de cette loi pour calculer la pluie maximale sur l'intervalle de temps t , pour une probabilité choisie par le concepteur des ouvrages et dont la valeur est déterminée par le risque choisi. Ce risque

est un risque calculé qui doit bien entendu correspondre au degré optimum de sécurité de l'ouvrage, lequel dépend de considérations économiques, basées sur la comparaison du coût d'une sécurité accrue et de celui des dégâts occasionnés par un débordement du système.

La forme de la relation intensité-durée-fréquence des pluies maximales n'est cependant pas unique ("Colin et Bredel", "Lavabre", "Calvet", "Grosse et al.", "Dubant et al.", 1980) et il convient de choisir le modèle qui s'adapte le mieux aux données dont on dispose.

2.3.2. Saisie des données pluviographiques

Le problème de dimensionnement concernant plus particulièrement la ville de Maubeuge, on a choisi d'utiliser la totalité des enregistrements pluviographiques de la station de Colleret de 1976 à 1985, station dont les cumuls journaliers sont bien corrélés avec la pluviométrie journalière de Maubeuge et qui est située à 6,5 kilomètres au sud-est de la ville.

Grâce au concours du S.R.A.E Nord - Pas-de-Calais, les pluviogrammes ont été dépouillés manuellement au pas de temps fixe de la demi-heure. Pour la période 1976-1985, on a regroupé les données dans 120 fichiers mensuels. A l'intérieur de chaque fichier, chaque événement est repéré par sa date, en jour et 1/1000 ème de jour, et par le cumul de la pluie sur la demi-heure entière qui précède cette date. Sur la période 1976-1985, ceci représente environ 23000 données qui sont stockées en fichiers séquentiels sur un COMPAQ 286.

Le programme SAISIDF (cf. annexe informatique) a été écrit pour saisir facilement et exploiter ces mesures.

2.3.3. Traitement des données pluviographiques de la station de Colleret

Le but du traitement est ici de rechercher les quantiles des pluies maximales de durée t (t variant de 30 minutes à 24 heures). La durée d'observation des pluies à la station de Colleret n'étant que de dix années (1976-1985), on a choisi d'accroître la taille des échantillons en retenant les valeurs extrêmes mensuelles ou supérieures à un seuil. On obtient ainsi des échantillons "renforcés" qui sont plus stables que les échantillons des seules valeurs maximales annuelles. On a revérifié ensuite ces valeurs sur pluviogrammes en s'assurant qu'elles soient bien indépendantes les unes des autres.

Pour chaque durée, on a choisi d'utiliser successivement trois méthodes :

- Application de la loi de Gumbel à un échantillon constitué des 12 valeurs les plus fortes observées chaque mois. Pour la période d'observation de dix années, ceci revient à ajuster un échantillon de 120 valeurs pour chaque durée t.

- Application de la loi de Gumbel à un échantillon constitué des valeurs les plus fortes observées pendant les mois dont les gradex sont voisins, ceci afin de tenir compte de la non stationnarité du processus. Si l'on choisit un découpage en deux saisons de six mois, ceci revient à ajuster deux échantillons de 60 valeurs pour chaque durée t.

Le programme IDF (cf. annexe informatique) regroupe les fichiers mensuels d'une année donnée, cumule les pluies sur différentes durées t (30 minutes à 24 heures), et retient les valeurs maximales de chaque mois.

- Application de la méthode du renouvellement (cf. annexe renouvellement) en ne retenant que les valeurs supérieures à un seuil sur l'ensemble de la durée d'observation.

Le dépouillement ayant été effectué avec une origine des temps fixe, la pluie tombée en n heures est estimée à partir des pluies tombées sur n fois 30 minutes. On a donc choisi de passer des pluies P non centrées aux pluies P centrées (CEMAGREF, 1985) par la correction de Weiss :

$$P(\text{centrée}) = \frac{1}{1 - (1/8L)} \cdot P(\text{non centrée})$$

L : nombre de pas de temps fixe de base (ici la demi-heure) ayant permis le calcul de la pluie de L pas de temps.

Cette correction devient négligeable pour des durées supérieures à trois heures.

On dispose ainsi des pluies maximales mensuelles centrées sur l'intervalle de temps t.

2.3.3.1. Ajustement de Gumbel à l'échelle annuelle

a) Méthode

La loi de distribution de Gumbel pour les maxima annuels des pluies de trente minutes à vingt-quatre heures est déduite de celle des maxima mensuels. Chaque valeur mensuelle a une chance sur douze d'être la valeur maximale annuelle. La probabilité au non dépassement P_a de la valeur maximale de la pluie annuelle (x_a) correspond donc au produit des probabilités au non dépassement P_m des valeurs maximales mensuelles (x_m), soit :

$$P_a = (P_m)^{12}$$

Si on applique la loi de Gumbel aux valeurs maximales mensuelles retenues, on obtient :

$$P_m = \exp(-\exp(-u_m)) \text{ avec : } u_m = (x_m - x_{0m}) / G$$

P_m : Probabilité de non dépassement de la variable x_m

u_m : Variable réduite de Gumbel

x_{0m} : Paramètre de position

G : Gradex

$$\text{Si } P_a = (P_m)^{12}, \text{ il vient : } P_a = \exp(-\exp(-u_a))^{12}$$

avec :

$$u_a = u_m - \log_e 12$$

Si l'on travaille sur papier de Gumbel avec la variable réduite u_m en abscisse et les valeurs maximales mensuelles x_m en ordonnée, on constate que les abscisses d'une pluie maximale annuelle et d'une pluie mensuelle de même valeur sont décalées de $\log_e 12$, la pente des droites d'ajustement restant constante.

La droite d'ajustement des pluies maximales annuelles peut donc se construire en translatant la droite d'ajustement des valeurs mensuelles de $-\log_e 12$.

Calcul des quantiles

La valeur du quantile des pluies maximales annuelles (x_a) s'obtient donc par :

$$x_a = G (u_a + \log_e 12) + x_{0a} = G u_a + x_{0a}$$

$$\text{avec } x_{0a} = G \log_e 12 + x_{0m}$$

$$\text{or : } u_a = - \log_e (-\log_e P_a)$$

$$\text{Il vient donc : } x_a = G (- \log_e (-\log_e P_a)) + x_{0a}$$

puisque $T = 1/1 - P_a$:

$$x_a = G (- \log_e (\log_e (T/T - 1))) + x_{0a}$$

T étant exprimé en années avec $T > 2$

b) Application

Chaque échantillon des 120 pluies maximales de durée t observées mensuellement sur la période 1976-1985 a donc été ajusté à une loi de Gumbel.

A titre d'exemple, on présente les tracés obtenus pour les maxima de 30 minutes et de 24 heures (documents 71 et 72). Le document 73 présente les principaux paramètres des lois ajustées sur l'année entière : gradex et paramètre de position (X_0). Ces paramètres permettent de calculer les quantiles des pluies de durée 30 minutes à 24 heures pour des périodes de retour variant de 2 à 50 ans (document 74). Compte tenu de la durée d'observation (10 ans), les quantiles de période de retour 50 ans sont à utiliser avec précaution.

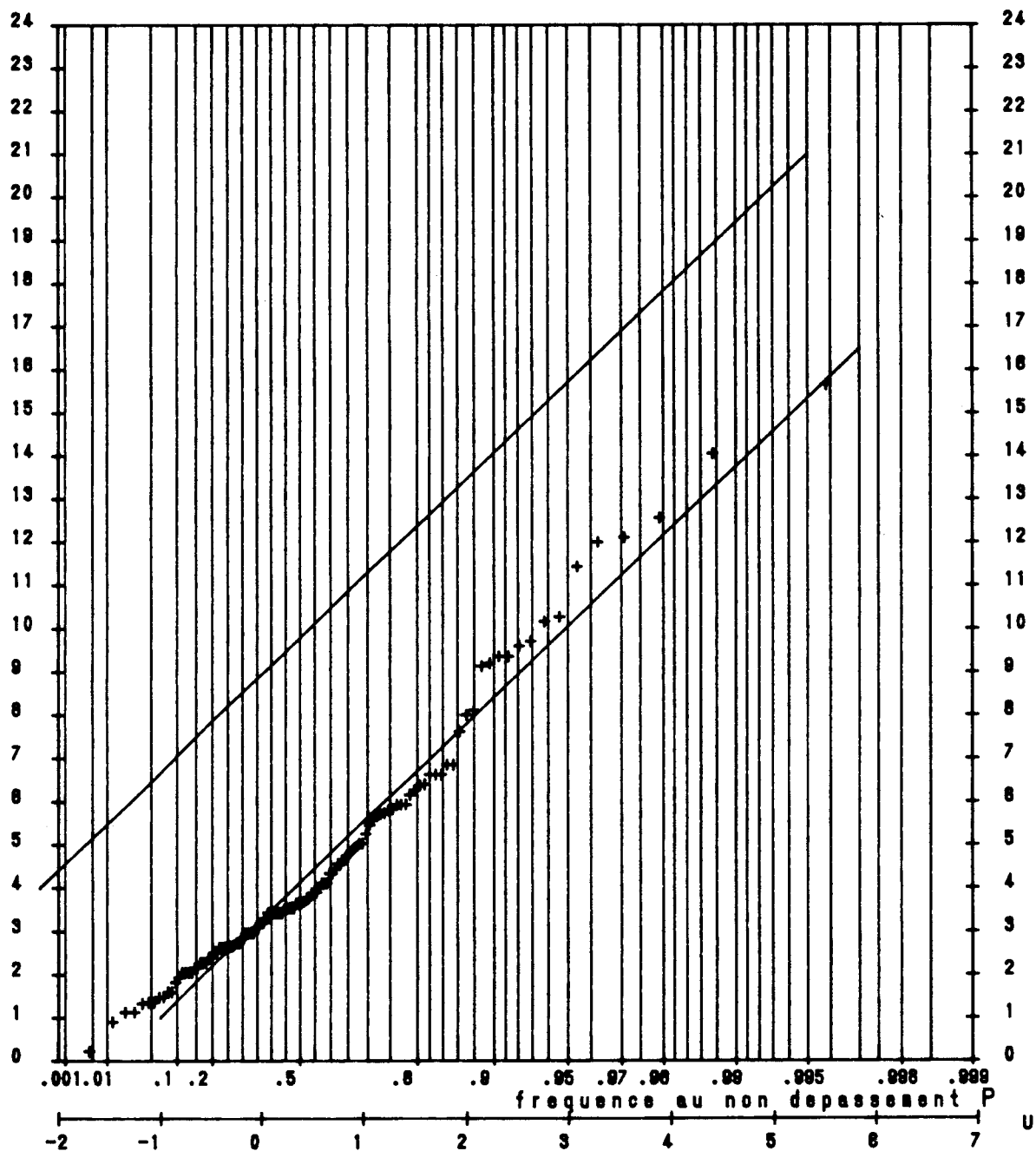
Les quantiles obtenus pour les pluies de 24 heures sont comparables à ceux que l'on obtient pour la station pluviométrique de Maubeuge (document 56), ce qui semble confirmer notre choix d'extrapoler les données pluviographiques de Colleret au secteur de la ville de Maubeuge. A la station météorologique de Lille-Lesquin, les quantiles obtenus pour les pluies journalières non centrées sont proches de ceux que l'on a calculé pour la station de Colleret. Pour les quantiles 2 ans et 10 ans, on obtient respectivement 32,2 et 42 mm à Lille-Lesquin contre 29,8 et 41,2 mm à Colleret.

$$U = -\text{LOG}(-\text{LOG } P)$$

$$\text{pluie de 30 min} = 2.27 U + 8.94$$

pluie de 30 min en mm

PERIODE 1976-1985



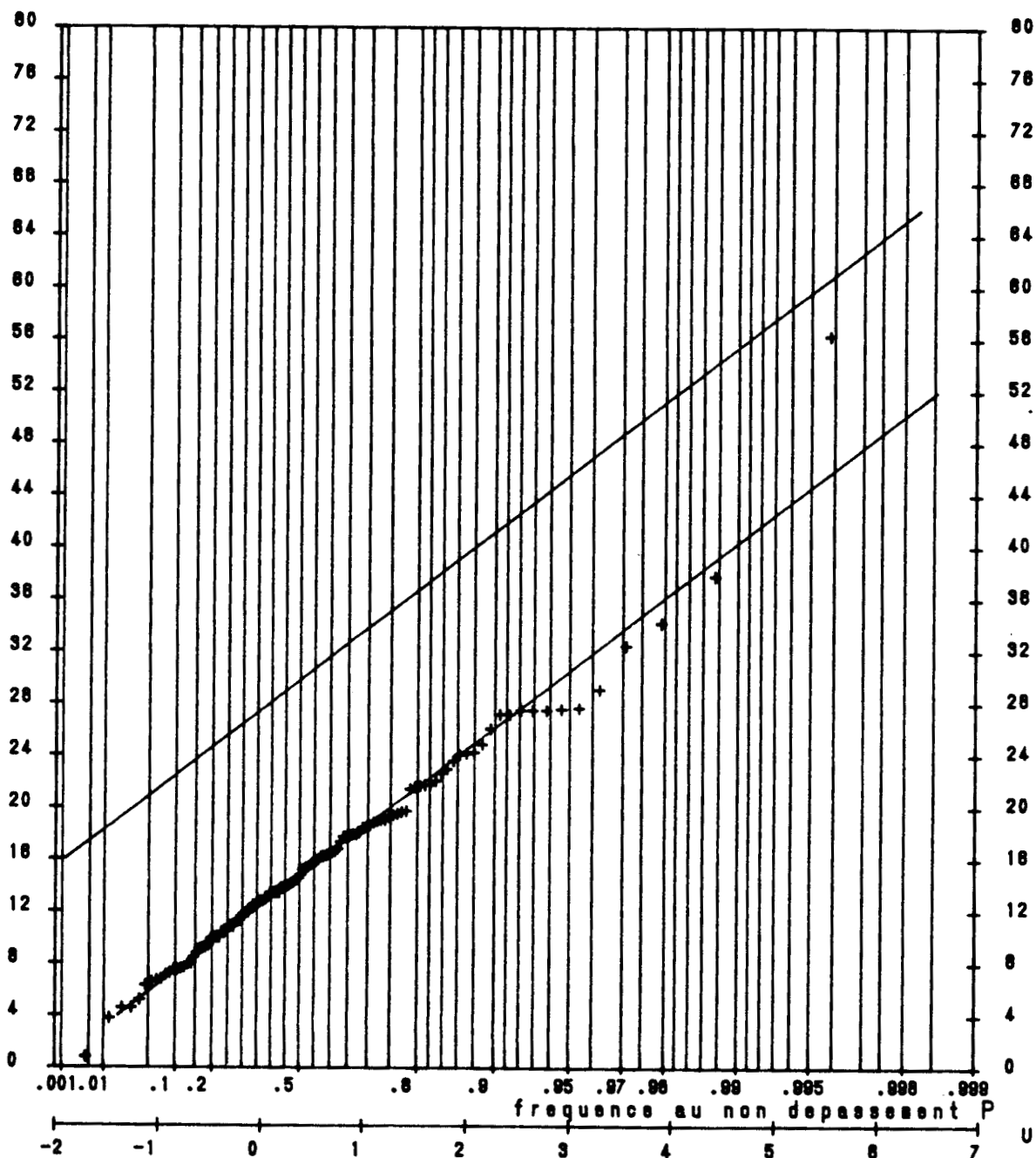
71 : Ajustement de Gumbel sur les maxima mensuels des pluies de 30 minutes enregistrées à Colletet de 1976 à 1985. L'équation de la droite d'ajustement des maxima annuels est déduite de la droite ajustée sur les maxima mensuels par une translation de $-\log_e 12$ sur l'axe des variables réduites.

$$U = -\text{LOG}(-\text{LOG } P)$$

$$\text{pluie de 24 h} = 8.06 U + 27.53$$

pluie de 24 h en mm

PERIODE 1976-1985



72 : Ajustement de Gumbel sur les maxima mensuels des pluies de 24 heures enregistrées à Colletet de 1976 à 1985. L'équation de la droite d'ajustement des maxima annuels est déduite de la droite ajustée sur les maxima mensuels par une translation de $-\log_e 12$ sur l'axe des variables réduites.

DUREE	GRADEX	X0
30 minutes	2,28	8,95
1 HEURE	2,45	10,27
2 HEURES	3,02	12,99
3 HEURES	3,15	14,16
6 HEURES	3,82	17,84
12 HEURES	4,52	21,40
24 HEURES	6,07	27,53

Document 73 : Paramètres des ajustements de Gumbel sur les maxima annuels des pluies de 30 minutes à 24 heures à Colleret

DUREE	TEMPS DE RETOUR (années)					
	2	3	5	10	20	50
30 mn	9,8	11,0	12,4	14,1	15,7	17,8
1 HEURE	11,2	12,5	13,9	15,8	17,5	19,8
2 HEURES	14,1	15,7	17,5	19,8	22,0	24,8
3 HEURES	15,3	17,0	18,9	21,3	23,5	26,5
6 HEURES	19,2	21,3	23,6	26,4	29,2	32,8
12 HEURES	23,1	25,5	28,2	31,6	34,8	39,0
24 HEURES	29,8	33,0	36,6	41,2	45,5	51,2

Document 74 : Quantiles des ajustements de Gumbel sur les maxima annuels des pluies de 30 minutes à 24 heures

On constate cependant que l'ajustement des pluies de faible durée n'est pas très satisfaisant, notamment celui des pluies de 30 minutes, les valeurs les plus élevées se situant au dessus de la droite d'ajustement. Cette remarque nous a incité à réaliser les ajustements saisonniers présentés ci-dessous.

2.3.3.2. Ajustement de Gumbel saisonnier

La loi de distribution de Gumbel pour les maxima saisonniers des pluies de trente minutes à vingt-quatre heures sera ici déduite de celles des maxima mensuels de chaque saison. Sur le bassin de la Sambre, on constate des gradex plutôt élevés pour les maxima des pluies observées de juin à novembre et des gradex plus faibles pour ceux de décembre à mai. On a donc choisi de regrouper les maxima mensuels selon ces deux saisons ("été" et "hiver"), la loi du maximum de chaque saison est alors obtenue alors par une translation de $-\log_e 6$ sur l'axe de la variable u . Les ajustements des maxima d'été des pluies de 30 minutes et de 24 heures sont présentés, à titre d'exemple, sur les documents 75 et 76.

Les documents 77 à 80 présentent les principaux paramètres des lois ajustées : gradex et paramètre de position (X_0) ainsi que les quantiles des pluies de durée 30 minutes à 24 heures pour des périodes de retour variant de 2 à 50 ans.

Pour les pluies de 30 minutes qui sont les plus utiles pour dimensionner les réseaux urbains d'écoulement des eaux pluviales, il est intéressant de noter la différence entre le gradex d'été (2,39) et d'hiver (2,08). Le quantile décennal d'hiver est ainsi de 11,3 mm alors que celui d'été est de 13,5mm. Alors que la pluviométrie moyenne de chaque saison est comparable (426 mm en été, 411 mm en hiver sur la période 1963-1984 à Maubeuge), on note que de plus fortes intensités de pluie peuvent survenir pendant les périodes d'été et qu'il convient de s'en prémunir.

Si l'on considère les pluies maximales de 24 heures, on constate également que le quantile décennal d'hiver est de 32,5 mm et qu'il peut atteindre 41 mm en période d'été.

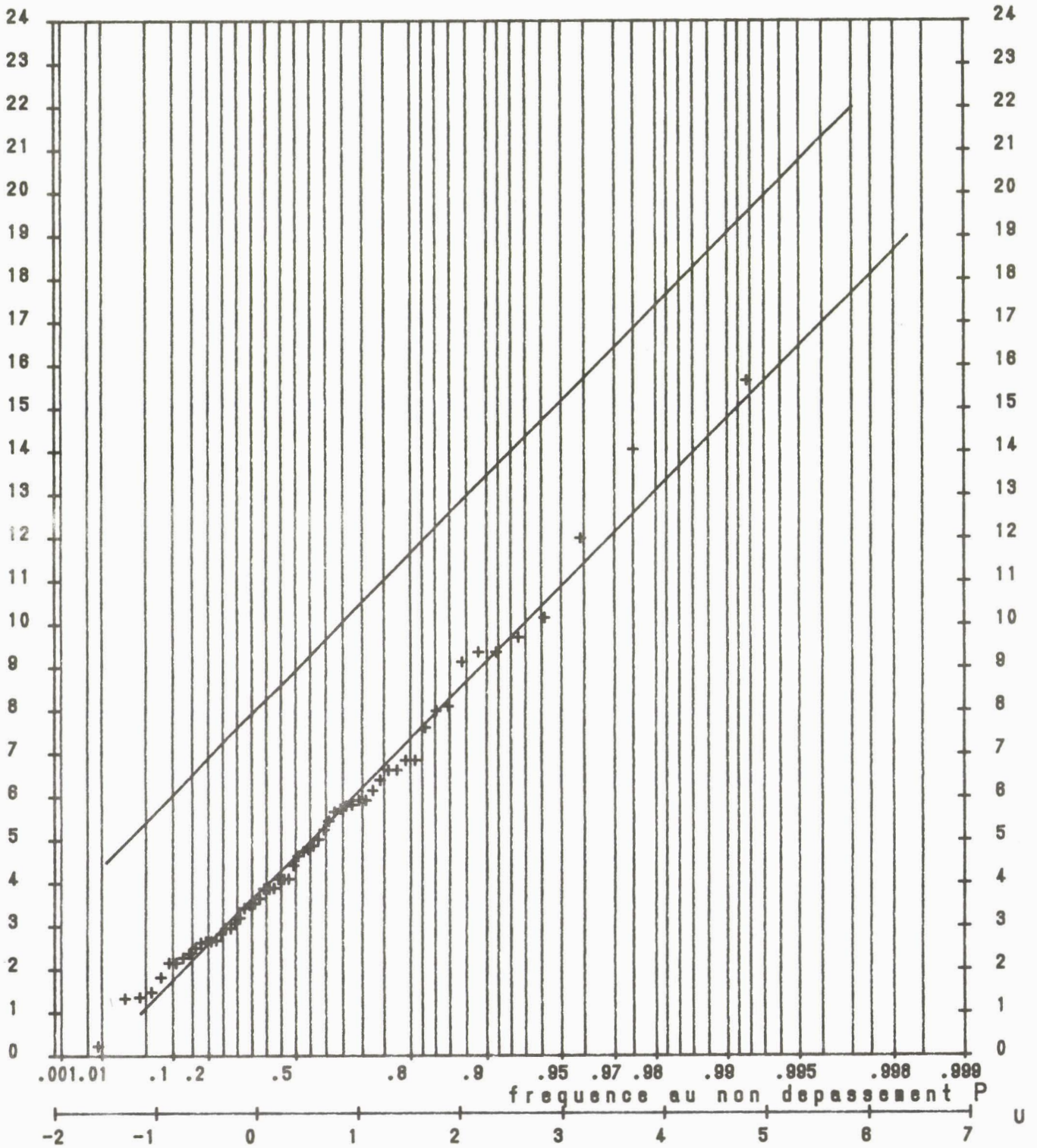
Pour les quantiles 2 ans et 10 ans "d'hiver", on obtient respectivement 23,2 et 29,9 mm à Lille-Lesquin (sur un découpage quelque peu différent : octobre à mai) contre 23,3 et 32,5 mm à Colleret (décembre à mai).

$$U = -\text{LOG}(-\text{LOG } P)$$

$$\text{Pluie de 30 min.} = 2.39 U + 8.05$$

Pluie de 30 min. en mm

ETE (juin<-->nov.) 1976-1985



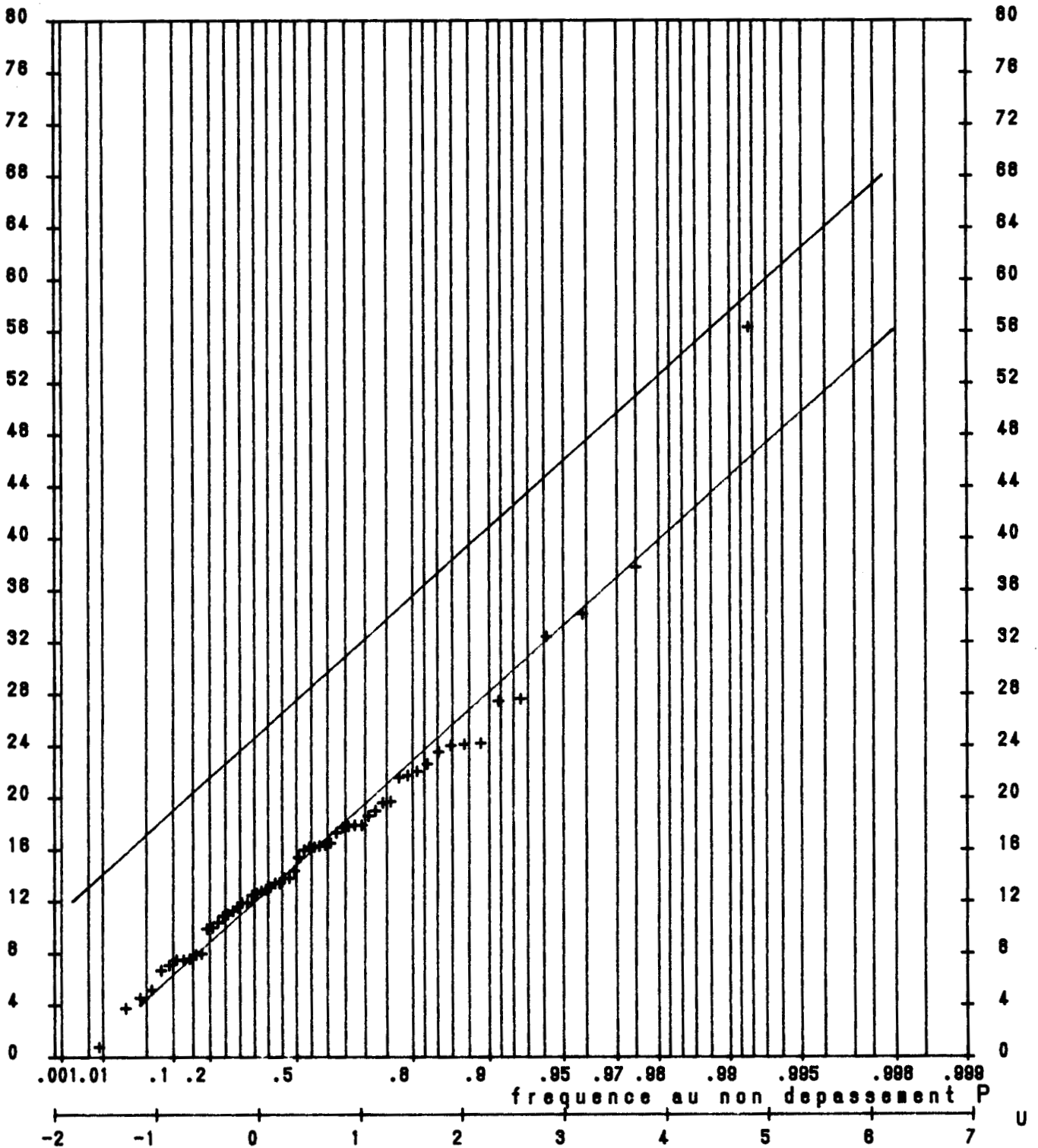
75 : Ajustement de Gumbel sur les maxima mensuels des pluies d'"été" de 30 minutes enregistrées à Colleret de 1976 à 1985. L'équation de la droite d'ajustement des maxima annuels est déduite de la droite ajustée sur les maxima mensuels par une translation de -log 6 sur l'axe des variables réduites.

$$U = -\text{LOG}(-\text{LOG } P)$$

$$\text{Pluie de 24 h.} = 7.08 U + 24.91$$

Pluie de 24 h. en mm

ETE (juin<-->nov) 1976-1985



76 : Ajustement de Gumbel sur les maxima mensuels des pluies d'"été" de 24 heures enregistrées à Colleret de 1976 à 1985. L'équation de la droite d'ajustement des maxima annuels est déduite de la droite ajustée sur les maxima mensuels par une translation de $-\log_e 6$ sur l'axe des variables réduites.

DUREE	GRADEX	X0
30 minutes	2,4	8,1
1 HEURE	2,69	9,4
2 HEURES	3,46	12,1
3 HEURES	3,6	13,1
6 HEURES	4,28	16,1
12 HEURES	4,99	19,0
24 HEURES	7,09	24,9

Document 77 : Paramètres des ajustements de Gumbel sur les maxima d'ETE des pluies de 30 minutes à 24 heures à Colleret

DUREE	TEMPS DE RETOUR (années)					
	2	3	5	10	20	50
30 mn	8,90	10,20	11,70	13,50	15,20	17,40
	9,17	9,95	11,02	12,67	14,57	17,52
1 HEURE	10,40	11,80	13,40	15,50	17,40	19,90
	11,17	12,10	13,40	15,39	17,66	21,21
2 HEURES	13,40	15,30	17,30	19,90	22,40	25,70
	13,60	14,73	16,29	18,68	21,42	25,67
3 HEURES	14,50	16,40	18,50	21,20	23,80	27,20
	15,26	16,53	18,27	20,93	23,98	28,70
6 HEURES	17,60	19,90	22,50	25,70	28,70	32,70
	18,59	20,11	22,21	25,41	29,08	34,75
12 HEURES	20,80	23,50	26,50	30,20	33,80	38,40
	22,65	24,48	27,00	30,86	35,26	42,06
24 HEURES	27,50	31,30	35,50	40,90	46,00	52,60
	27,58	29,79	32,83	37,47	42,75	50,92

13,4 -----> Quantile déduit de la loi de Gumbel

13,6-----> Quantile calculé par la formule de Montana généralisée

Document 78 : Quantiles des ajustements de Gumbel sur les maxima d'"ETE" (juin à novembre) des pluies de 30 minutes à 24 heures

DUREE	GRADEX	X0
30 minutes	2,08	6,6
1 HEURE	2,12	7,6
2 HEURES	2,4	9,4
3 HEURES	2,58	10,6
6 HEURES	3,33	14,3
12 HEURES	4,02	17,6
24 HEURES	4,89	21,5

Document 79 : Paramètres des ajustements de Gumbel sur les maxima d'HIVER des pluies de 30 minutes à 24 heures à Colleret

DUREE	TEMPS DE RETOUR (années)					
	2	3	5	10	20	50
30 mn	7,40	8,50	9,70	11,30	12,80	14,70
	7,30	7,91	8,77	10,09	11,62	14,01
1 HEURE	8,40	9,50	10,80	12,40	13,90	15,90
	9,03	9,76	10,78	12,34	14,14	16,95
2 HEURES	10,30	11,60	13,00	14,80	16,60	18,80
	11,17	12,04	13,25	15,10	17,21	20,50
3 HEURES	11,60	13,00	14,50	16,40	18,30	20,70
	12,65	13,62	14,95	16,98	19,31	22,91
6 HEURES	15,50	17,30	19,30	21,80	24,20	27,30
	15,65	16,79	18,37	20,77	23,50	27,71
12 HEURES	19,00	21,20	23,60	26,60	29,50	33,20
	19,36	20,72	22,58	25,39	28,60	33,51
24 HEURES	23,30	26,00	28,90	32,50	36,10	40,60
	23,95	25,55	27,74	31,06	34,80	40,54

11,6----> Quantile déduit de la loi de Gumbel

12,65----> Quantile calculé par la formule de Montana généralisée

Document 80 : Quantiles des ajustements de Gumbel sur les maxima d'"HIVER" (décembre à mai) des pluies de 30 minutes à 24 heures

2.3.3.3. Ajustement par la méthode du renouvellement sur les pluies de durée supérieures à un seuil.

On peut également n'ajuster que les valeurs supérieures à un seuil S_0 donné. Ce traitement relève d'un modèle de renouvellement utilisant une combinaison de la loi de Poisson et de la loi exponentielle (cf. annexe Renouvellement et annexe informatique, programme Renouvellement).

On cumule les pluies sur chaque durée et on constitue alors un échantillon des valeurs supérieures au seuil choisi de telle sorte que les valeurs soient indépendantes les unes des autres (averses différentes) et que le nombre de réalisations par année suive une loi de Poisson.

Les investigations menées avec cette méthode ne donnent cependant pas de résultats meilleurs que ceux de la loi de Gumbel. Le choix de seuils adéquats permet d'obtenir des distributions du nombre de pluies suivant correctement la loi de Poisson mais l'ajustement par la loi exponentielle simple ou de Weibull n'apporte pas d'amélioration notable.

Pour ces raisons, les estimations obtenues par la loi de Gumbel nous paraissent suffisantes.

2.3.4. Ajustement par la formule de Montana.

Les quantiles précédents sont calculés par des équations dont les paramètres varient selon la durée d'observation. La formule de Montana permet d'exprimer de façon synthétique et pratique les quantiles de pluie en fonction de la durée et de la période de retour choisie.

La formule de Montana s'écrit :

$$I = a / t^b$$

avec :

I : Intensité de pluie en mm/minute

a, b : paramètres

t : durée d'observation en minutes, c'est à dire temps pendant lequel on cumule la quantité de pluie.

En terme de quantiles de pluies (QP en mm), on obtient :

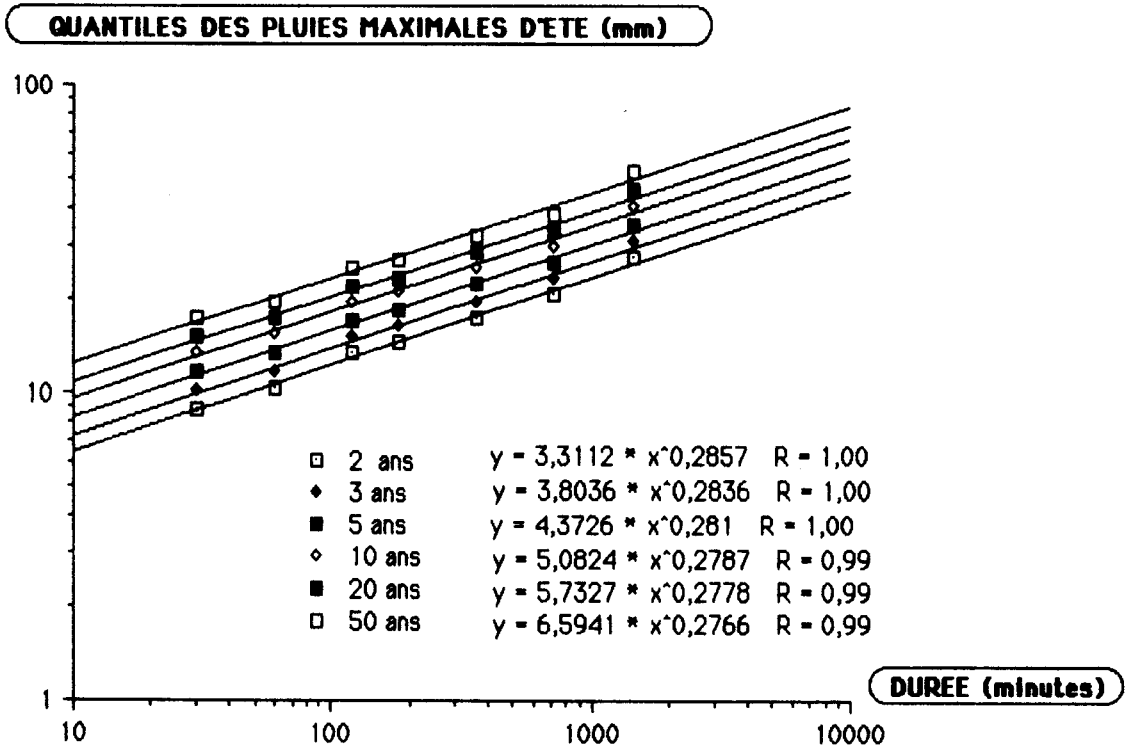
$$QP = I t = a t^{1-b}$$

ou :

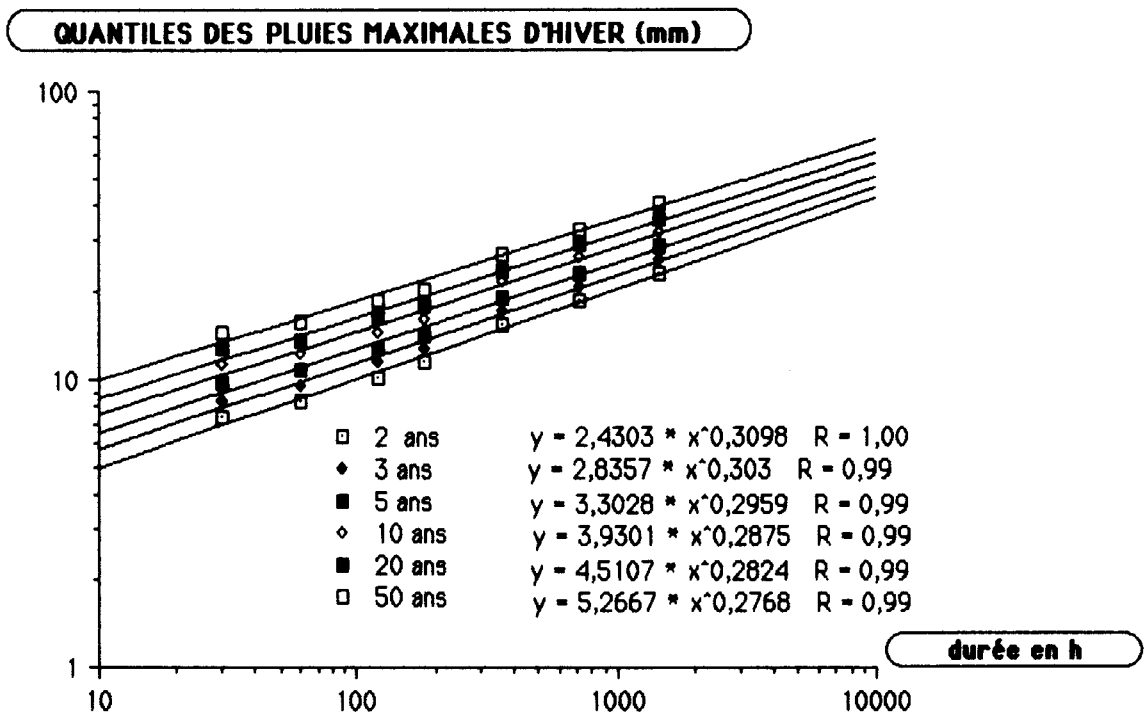
$$\log_e QP = (1 - b) \log_e t + \log_e a$$

Si l'on travaille en coordonnées logarithmiques, avec les quantiles en ordonnée et la durée de pluie en abscisse, cette dernière relation correspond à l'équation de la droite d'ajustement.

Les documents 81 et 82 présentent, pour chaque saison, les équations des droites d'ajustement obtenues pour chaque période de retour. Pour chaque saison et pour la période de retour désirée, on utilisera donc ces relations en remplaçant le paramètre x par la durée de la pluie en minutes, la valeur de y fournissant le quantile recherché en mm.



81 : Ajustement des quantiles des maxima des pluies d'été de 30 minutes à 24 heures à Colletet de 1976 à 1985 par une loi de Montana (une droite de Montana par période de retour) . Paramètres a et 1-b pour des périodes de retour de 2 à 50 ans.



82 : Ajustement des quantiles des maxima des pluies d'hiver de 30 minutes à 24 heures à Colletet de 1976 à 1985 par une loi de Montana (une droite de Montana par période de retour) . Paramètres a et 1-b pour des périodes de retour de 2 à 50 ans.

2.3.5. Relation pluie-durée-période de retour : loi de Montana généralisée

On dispose précédemment d'une loi de Montana par période de retour. La formule de Montana généralisée permet de construire une seule relation en calculant les paramètres a et 1-b en fonction de la période de retour.

La méthode des moindres carrés (document 83) permet d'obtenir les relations suivantes :

Saison d'ETE (juin à novembre) :

$$a = 3,0099 T^{0,2106}$$

$$1 - b = 0,2865 T^{-0,0099}$$

soit la formule générale :

$$QP \text{ été} = 3,0099 T^{0,2106} \cdot 0,2865 T^{-0,0099}$$

Saison d'HIVER (décembre à mai) :

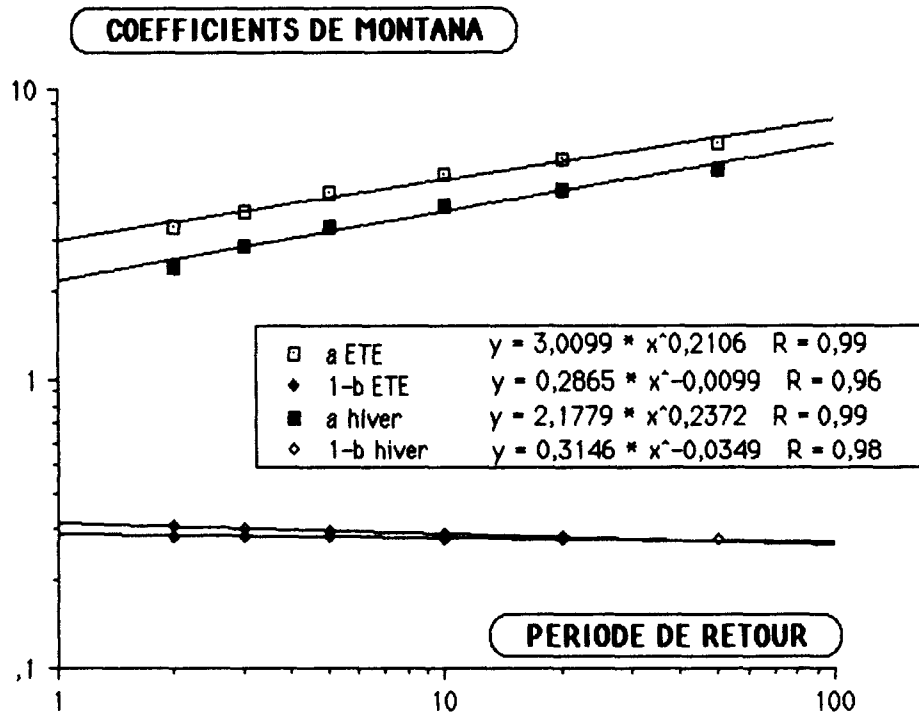
$$a = 2,1779 T^{0,2372}$$

$$1 - b = 0,3146 T^{-0,0349}$$

soit la formule générale :

$$QP \text{ hiver} = 2,1779 T^{0,2372} \cdot 0,3146 T^{-0,0349}$$

Les valeurs calculées par cette formule ont été écrites sous les quantiles primitivement utilisés pour caler la formule (documents 78 et 80). On constate que les différences sont minimes. Les coefficients de corrélation entre les valeurs calculées par la formule de Montana généralisée et les quantiles déduits des ajustements de Gumbel sont respectivement de 0,982 pour la saison d'été et de 0,996 pour la saison d'hiver.



83 : Ajustement des coefficients des lois de Montana généralisée (été et hiver).

La ville de Maubeuge ne dispose pas d'enregistrement pluviographique. La bonne cohérence des valeurs moyennes, annuelles et mensuelles (document 10 et 70), les résultats comparables des ajustements sur les maxima journaliers des stations de Maubeuge et de Colleret semblent nous autoriser à extrapoler les mesures pluviographiques enregistrées à Colleret à celles de Maubeuge.

On conseille donc l'application des formule de Montana généralisée saisonnières présentées au paragraphe précédent pour les calculs de dimensionnement des réseaux d'évacuation de la ville de Maubeuge. Pour cette utilisation, il nous paraît cohérent de se baser sur la formule de Montana généralisée présentée pour la période d'été, cette période nous paraissant la plus dangereuse pour les risques d'engorgement du réseau. L'étude hydraulique permettant de déterminer les volumes critiques à ne pas dépasser s'appuiera sur la surface du bassin urbain considéré et, en fonction du risque choisi, sur les quantiles calculés par cette dernière formule. On extrapolera prudemment la formule pour des durées inférieures à 15 minutes.

CHAPITRE 3 : HYDROLOGIE DU BASSIN DE LA SOLRE

3.1. HYDROMETRIE

3.1.1. Situation de la station et courbe de tarage

La station de jaugeage de la Solre est implantée immédiatement en aval de Ferrière-la-Grande, à 4 kilomètres en amont de son confluent avec la Sambre (document 4 et 66). Elle est équipée d'un limnigraphe à déroulement de marque OTT.

Cette station est gérée depuis janvier 1973, date de sa création, par le Service Régional d'Aménagement des Eaux du Nord-Pas-de-Calais. Les caractéristiques de cette station sont fournies dans le document 5b et 5c.

Un limnigraphe enregistre les variations du plan d'eau de la rivière par l'intermédiaire d'un flotteur. Un stylet retranscrit ces hauteurs d'eau sur une bande papier dont le déroulement s'effectue à une vitesse de 5 mm par heure. L'échelle d'enregistrement des hauteurs est de 1/5 ème, une remontée du plan d'eau de 1 cm se traduisant par un mouvement correspondant du stylet de 2 mm . Un système de retournement automatique du stylet permet d'enregistrer des mouvements du plan d'eau dont l'écriture dépasserait la largeur de la table.

Le calage de l'enregistrement est effectué par rapport à une échelle limnimétrique . Le zéro de l'échelle se situe à une altitude de 128,4 mètres N.G.F.

Les techniques de jaugeage et d'utilisation de la courbe de tarage sont traitées par de nombreux auteurs (notamment Oberlin, 1969 - Corda, 1970) et ne seront pas développées ici.

Le limnigraphe est placé à cinq mètres en amont du seuil. De janvier 1973 au 5 novembre 1975, l'échelle de lecture des hauteurs du plan d'eau est placée sur le seuil ; le type d'écoulement sur le seuil étant différent de celui qui était enregistré au niveau du limnigraphe, les hauteurs lues à l'échelle de seuil ne correspondaient pas à celles qu'enregistrait le limnigraphe. On installa donc une seconde échelle proche du limnigraphe le 5 novembre 1975 ; une série de lectures faites simultanément à l'échelle du seuil et à l'échelle du limnigraphe a permis d'obtenir une relation échelle seuil/échelle limnigraphe ; les hauteurs d'eau enregistrées à l'échelle du seuil de janvier 1973 au 5 novembre 1975 ont donc été transformées en hauteurs d'eau à l'échelle du limnigraphe.

Plus de 70 jaugeages au moulinet réalisés en basses et hautes-eaux, à 500 mètres en amont du seuil, ont permis de construire puis d'actualiser la courbe de tarage. On utilise deux courbes de tarage : de janvier 1973 à juin 1980 (courbe A) et de juillet 1980 à actuellement (courbe B). L'établissement de la courbe B est consécutif à la crue exceptionnelle du 21 juillet 1980, pendant laquelle ont été effectués sept jaugeages. La courbe B est donc une courbe de tarage dont l'extrapolation ne débute qu'au delà de 46 m³/s (hauteur maximale jaugée de 2,35 mètres correspondant à un débit de 46 m³/s).

Au delà de 13 m³/s, le seuil est noyé mais la station reste en dehors de l'influence du niveau de la Sambre. L'altitude du seuil est en effet de 128,5 mètres N.G.F alors que le point de confluence de la Solre avec la Sambre se situe à trois kilomètres vers l'aval, à une altitude de 124 mètres.

Le document 84 présente les jaugeages effectués postérieurement au 5 janvier 1975 et donc à l'installation d'une échelle sous le limnigraphe. Le document 85 présente les courbes de tarage A et B avec indication des jaugeages ayant permis leur construction.

3.1.2. Précision de l'enregistrement

La précision sur la mesure des débits admet plusieurs composantes :

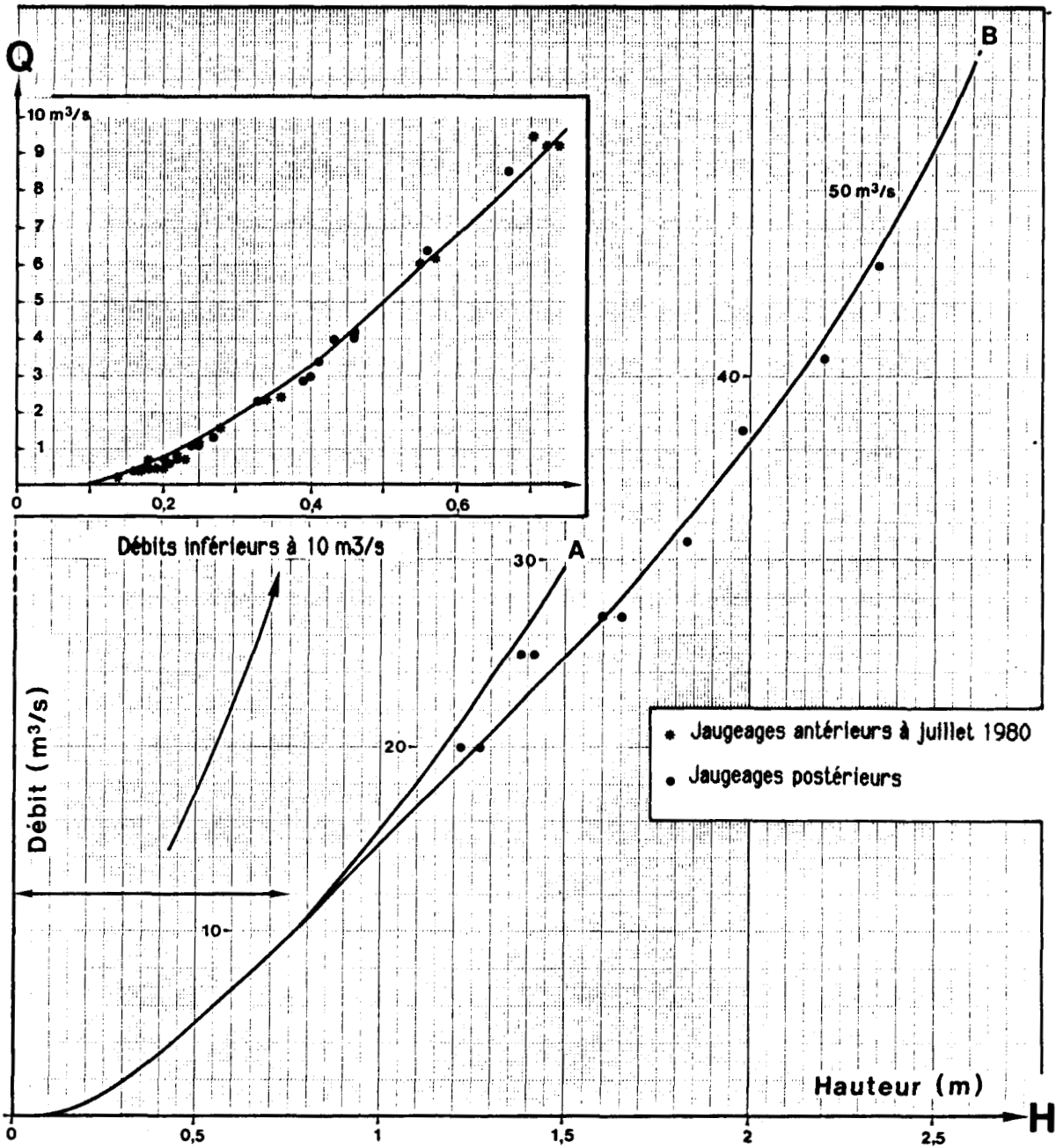
- . Précision des mesures de débits lors des jaugeages
- . Précision de l'enregistrement des hauteurs d'eau : les hauteurs d'eau retranscrites sur le limnigramme sont comparées à la hauteur lue sur l'échelle à chaque visite de l'observateur. L'écart moyen constaté entre les hauteurs d'eau réelles et enregistrées est de 1,4 cm environ.
- . Périodes d'étiage : La pente de la partie inférieure de la courbe de tarage est faible et la précision sur les débits inférieurs à 150 l/s s'en trouve amoindrie.
- . Période de hautes eaux : La partie supérieure de la courbe de tarage a été construite sur des jaugeages réalisés en période de crue ; elle correspond donc à des mesures de terrain et non à des calculs réalisés à l'aide de formules d'Hydraulique.
- . Périodes de gel prolongé : ces périodes peuvent entraîner un blocage du système d'enregistrement.

Globalement, la précision sur les débits d'étiage est estimée à 30 % pour les débits inférieurs à 500 l/s, à 20 % pour les débits voisins de 1 m³/s ; elle s'améliore ensuite régulièrement avec la croissance des débits jusqu'à une limite optimale de 10 %.

Sur l'année 85, des mesures ont été effectuées à la sonde électrique dans le puits de décharge du limnigraphe, afin de vérifier que le niveau de celui-ci correspondait bien au niveau du plan d'eau. Aucune anomalie notable n'a été constatée.

DATE	ECHELLE LIMNI	DEBIT m ³ /s	DATE	ECHELLE LIMNI	DEBIT m ³ /s
5/11/75	0,165	0,39	21/7/80	1,24	20
19/11/75	0,25	1,2	19/8/80	0,22	0,74
21/11/75	0,28	1,61	2/9/80	0,2	0,73
28/11/75	0,35	2,35	18/9/80	0,2	0,665
18/12/75	0,18	0,63	16/10/80	0,185	0,495
9/1/76	0,22	0,85	27/2/80	0,25	1,11
13/2/76	0,73	9,16	23/6/81	0,21	0,62
2/7/76	0,14	0,25	11/8/81	0,19	0,565
2/8/78	0,18	0,71	8/9/81	0,19	0,465
14/3/79	0,55	6,08	7/10/81	0,22	0,775
3/4/79	0,34	2,35	25/5/82	0,46	4,2
19/6/79	0,23	0,745	19/8/82	0,22	0,787
2/7/79	0,205	0,59	14/8/82	0,18	0,423
17/7/79	0,195	0,475	2/12/82	0,27	1,345
3/8/79	0,19	0,485	23/12/82	0,39	2,864
11/9/79	0,18	0,44	13/1/83	0,33	2,32
3/10/79	0,18	0,465	2/2/83	0,56	6,382
2/11/79	0,19	0,43	1/3/83	0,43	3,948
7/11/79	0,36	2,43	1/8/83	0,245	1,114
9/11/79	0,57	6,19	4/10/83	0,17	0,508
6/2/80	0,705	9,46	8/11/83	0,16	0,815
21/7/80	2,35	46	8/2/84	0,67	8,52
21/7/80	2,2	41	23/11/85	0,41	3,37
21/7/80	1,98	37	28/3/85	0,46	4,005
21/7/80	1,83	31	11/9/85	0,17	0,37
21/7/80	1,625	27	7/1/86	0,27	1,252
21/7/80	1,4	25	14/1/86	0,4	3,085

84 : Jaugeages effectués à la station de Ferrière-la-Grande sur la Soire.



85 : Courbe de tarage de la Solre à Ferrière-la-Grande

3.2. DEBITS MOYENS ANNUELS ET MENSUELS **DEBITS CARACTERISTIQUES**

3.2.1. Ecoulement annuel

Sur la période 1973-1984, le module interannuel de la Solre s'établit à 1,4 m³/s.

Les débits spécifiques et les lames écoulées de la Solre peuvent être comparés à ceux obtenus en d'autres stations du bassin à l'aide du document 86.

Parmi les variables qui permettent de décrire l'écoulement annuel, le débit spécifique permet de comparer des bassins versants différents puisqu'il représente un débit, en l/s, par unité de surface (km²).

Les débits spécifiques moyens annuels ne présentent pas de différences systématiques selon les stations (documents 86 et 87). Aucun bassin versant ne paraît se distinguer par son niveau moyen d'écoulement.

Si l'on considère la période 1974-1984, le "rendement moyen" d'un km² de bassin versant est voisin de 12,5 litres par seconde sur la Solre. Ce débit spécifique moyen est comparable à ceux que l'on observe sur les deux Helves.

Les lames écoulées annuelles exprimées en mm permettent des comparaisons avec la pluviométrie. Le document 87 montre la relation entre ces deux variables à l'échelle annuelle. On note une bonne corrélation entre l'écoulement annuel et la pluviométrie ; pour le bassin de la Solre, la corrélation entre ces deux variables est de 0,93.

Sur la période 1976-1984, le coefficient moyen d'écoulement est de 49 %.

3.2.2. Ecoulement mensuel - Régime d'écoulement

3.2.2.1. Coefficient mensuel de débit

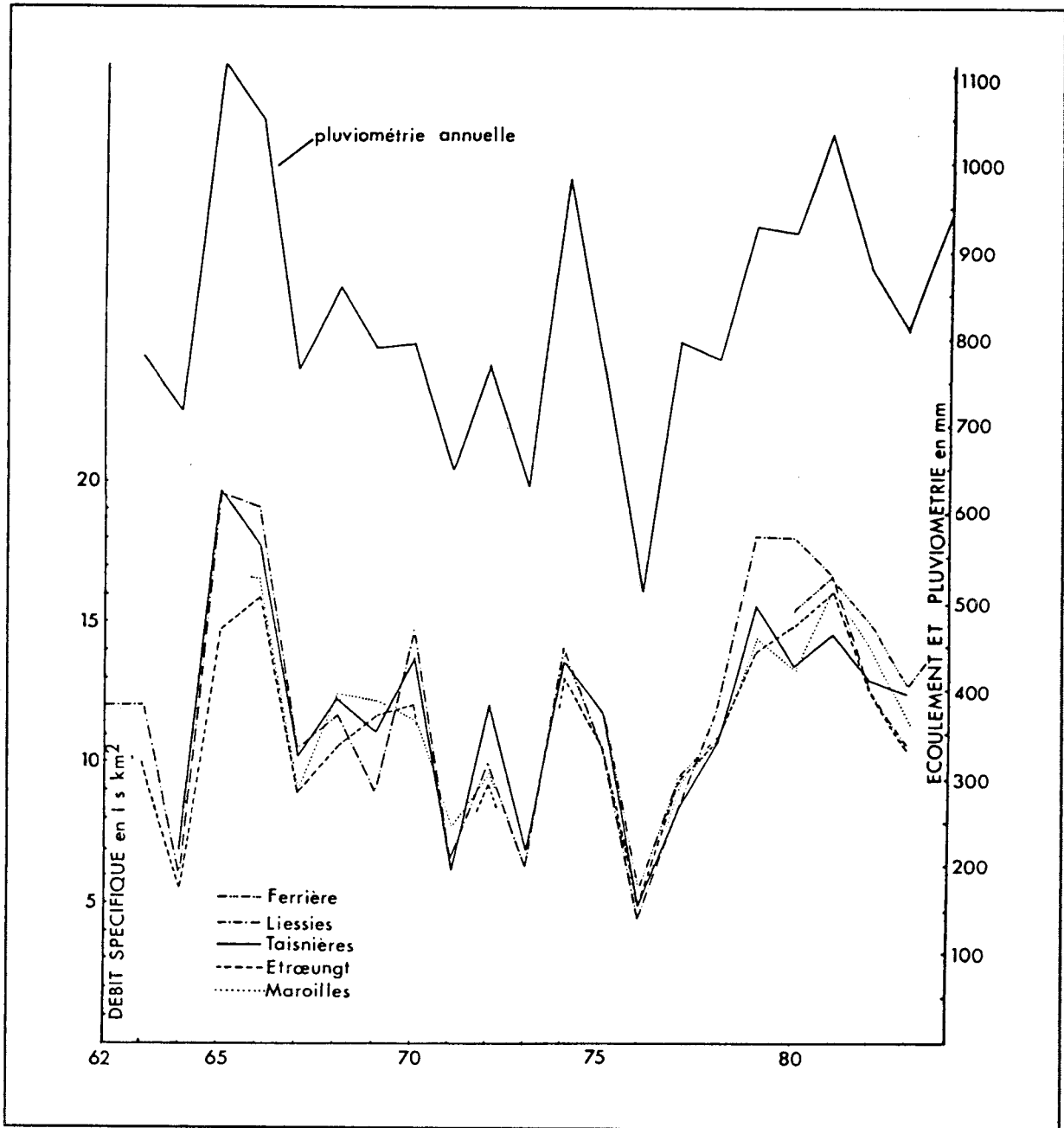
Les coefficients mensuels de débit présentés antérieurement caractérisent le régime hydrologique (Partie IV, chap.1, document 65). Chaque coefficient correspond au rapport du débit moyen interannuel du mois considéré et du module interannuel. Bien entendu, ce rapport exprime le régime hydrologique de l'année moyenne et régule artificiellement le régime par compensation des années sèches et humides.

ANNEE	DEBITS	FERRIERE	ETROEUNGT	MAROILLES	LIESSIES	TAISNIERES
1973	m3/s	0,714	-	-	1,247	2,245
	l/s/km2	6,21	-	-	6,30	6,60
	mm	196	-	-	199	215
1974	m3/s	1,510	2,295	3,816	2,798	4,484
	l/s/km2	13,13	13,11	13,88	14,13	13,59
	mm	415	414	438	447	429
1975	m3/s	1,334	1,863	2,926	2,145	3,896
	l/s/km2	11,60	10,65	10,64	10,83	11,81
	mm	367	336	336	342	373
1976	m3/s	0,640	0,852	1,305	0,888	1,591
	l/s/km2	5,57	4,87	4,75	4,48	4,82
	mm	176	154	150	142	152
1977	m3/s	1,080	1,654	2,568	1,672	2,754
	l/s/km2	9,39	9,45	9,34	8,44	8,35
	mm	297	299	295	267	264
1978	m3/s	1,260	1,905	3,009	2,371	3,535
	l/s/km2	10,96	10,89	10,94	11,97	10,71
	mm	346	344	346	378	339
1979	m3/s	1,810	2,463	3,973	3,589	5,122
	l/s/km2	15,74	14,07	14,45	18,13	15,52
	mm	497	445	457	573	490
1980	m3/s	1,780	2,625	3,682	3,576	4,423
	l/s/km2	15,48	15,00	13,39	18,06	13,40
	mm	489	474	423	571	424
1981	m3/s	1,920	2,833	4,470	3,308	4,798
	l/s/km2	16,70	16,19	16,25	16,71	14,54
	mm	528	512	514	528	459
1982	m3/s	1,720	2,199	3,861	2,521	4,264
	l/s/km2	14,96	12,57	14,04	12,73	12,92
	mm	473	397	444	402	408
1983	m3/s	1,490	1,847	3,151	2,110	4,106
	l/s/km2	12,96	10,55	11,46	10,66	12,44
	mm	409	334	362	337	393
1984	m3/s	1,645	2,400	4,799	2,685	5,040
	l/s/km2	14,30	13,71	17,45	13,56	15,27
	mm	452	433	551	429	483
MOYENNE 73-84	m3/s	1,409	-	-	2,409	3,855
	l/s/km2	12,25	-	-	12,17	11,68
	mm	387	-	-	384	369
MOYENNE 74-84	m3/s	1,472	2,085	3,415	2,515	4,001
	l/s/km2	12,80	11,91	12,42	12,70	12,12
	mm	404,405	376,508	392,362	401,355	383,143

FERRIERE-LA-GRANDE : SOLRE (BASSIN VERSANT 115 Km²)
 ETROEUNGT : HELPE MINEURE AMONT (BASSIN VERSANT : 175 Km²)
 MAROILLES : HELPE MINEURE AVAL (BASSIN VERSANT 275 Km²)
 LIESSIES : HELPE MAJEURE AMONT (BASSIN VERSANT 198 Km²)
 TAISNIERES : HELPE MAJEURE AVAL (BASSIN VERSANT : 330 Km²)

2,568-----> MODULE ANNUEL EN m3/s
 9,34-----> DEBIT SPECIFIQUE EN l/s/Km2
 295-----> LAME ECOULEE EN mm

86 Ecoulement annuel en cinq stations du bassin de la Sambre



87 : Evolution comparée de la lame écoulée et de la pluviométrie annuelle

3.2.2.2. Régime d'écoulement et pluviométrie

Sur le document 88 ont été tracées les lames moyennes mensuelles précipitées et écoulées de 1976 à 1984. Le document 89 présente les mêmes données pour l'année moyenne. Ces représentations font bien ressortir le régime hydrologique du bassin : on observe en effet une remontée des débits en octobre avec un palier supérieur de décembre à mars, les fortes pluies de ce dernier mois n'étant pas compensées par l'évapotranspiration. Le tarissement débute en avril et les fortes pluies mensuelles de mai et de juin sont compensées à l'écoulement par l'augmentation de l'évapotranspiration. L'étiage se produit habituellement d'août à septembre.

3.2.3. Débits classés

En reportant chronologiquement les débits moyens journaliers observés, on obtient une courbe en dents de scie montrant, pour chaque année, les mois de hautes ou de basses-eaux. En classant par ordre décroissant ces mêmes débits, on obtient une courbe dite des "débits classés" (Réminiéras, 1960). Les points essentiels de cette courbe définissent les débits caractéristiques suivants :

- . Débit caractéristique maximum (DC Max) ou débit dépassé dix jours par an
- . Débit caractéristique de 1, 3, 6 ou 9 mois (DC 1, DC 3, DC 6, DC 9) ou débits dépassés respectivement 1, 3, 6 ou 9 mois par an
- . Débit caractéristique d'étiage (DC E) : débit dépassé 355 jours par an.

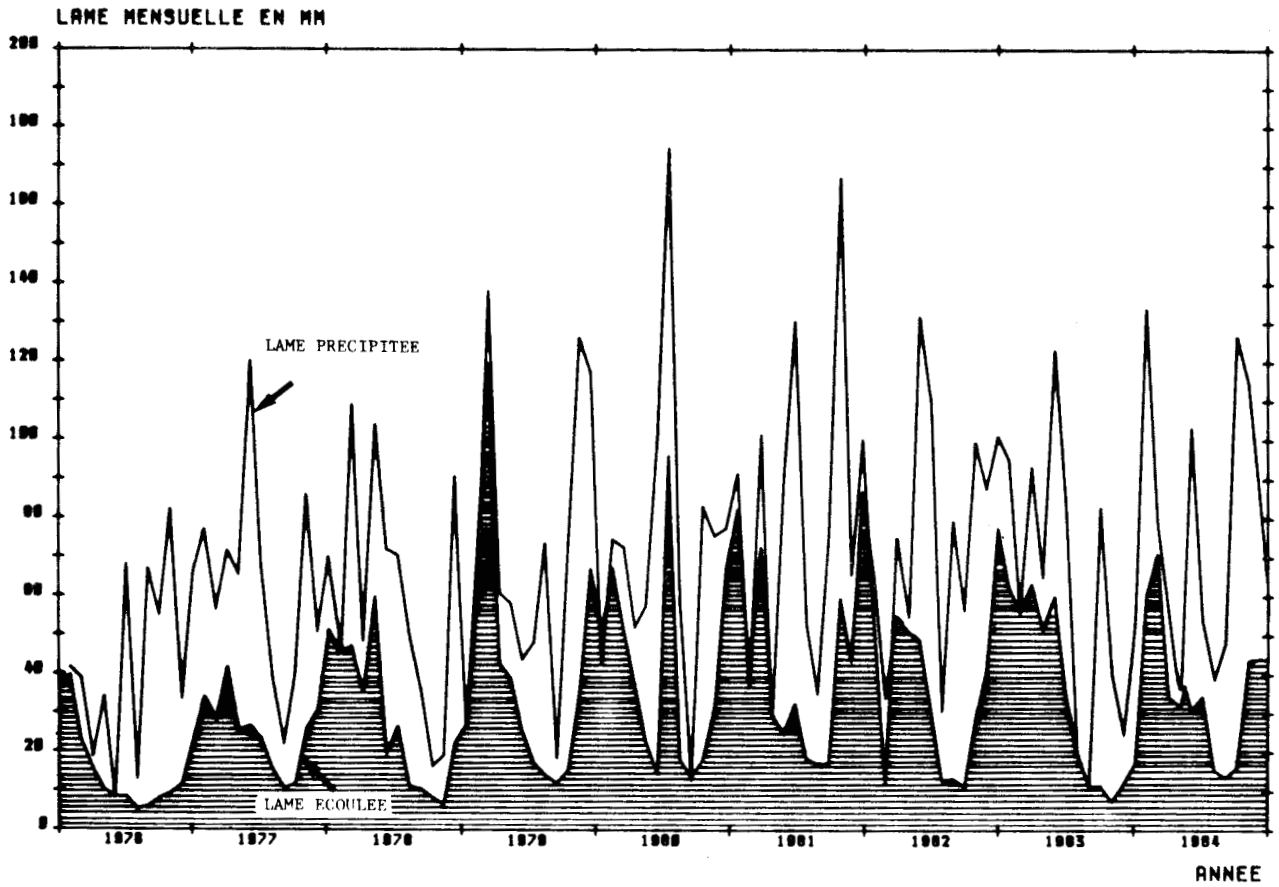
Le document 90 fournit les valeurs des débits caractéristiques moyens observés sur la Solre de 1974 à 1984.

3.3. ANALYSE STATISTIQUE DES DEBITS MOYENS ANNUELS ET MENSUELS

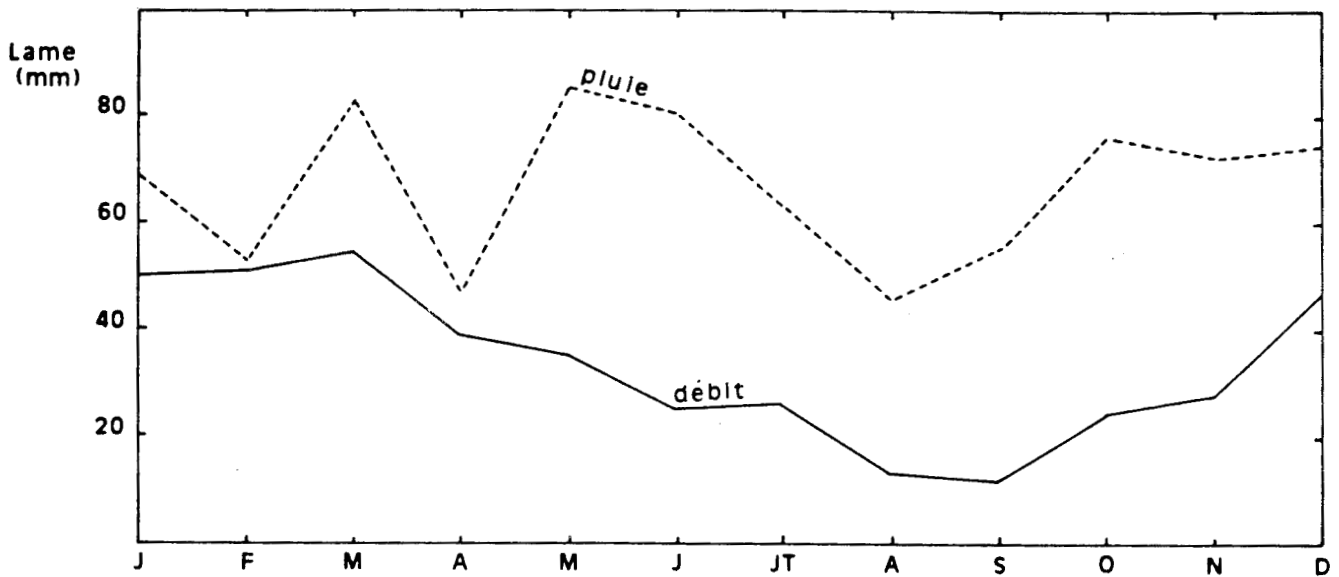
3.3.1. Débit moyen annuel

Un ajustement de Gauss sur les 12 valeurs des modules annuels sur la période 1973-1984 (document 91) fournit les quantiles présentés sur le document 92. Le quantile décennal est estimé à 1,94 m³/s.

Cet ajustement est fourni à titre indicatif, le nombre de valeurs disponibles pour l'ajustement étant faible (12 valeurs).



88 : Evolution conjointe de l'écoulement mensuel et de la pluie mensuelle sur le bassin de la Solre de 1976 à 1984



89 : Evolution mensuelle de la lame précipitée et écoulée sur le bassin de la Solre sur l'année moyenne.

DEBITS CARACTERISTIQUES en m ³ /s	
DC Max (dépassé 10 jours par an)	4,6
DC 1 (dépassé 30 jours par an)	3,2
DC 3 (dépassé 90 jours par an)	1,8
DC 6 (dépassé 180 jours par an)	1
DC 9 (dépassé 270 jours par an)	0,6
DC E (dépassé 355 jours par an)	0,35

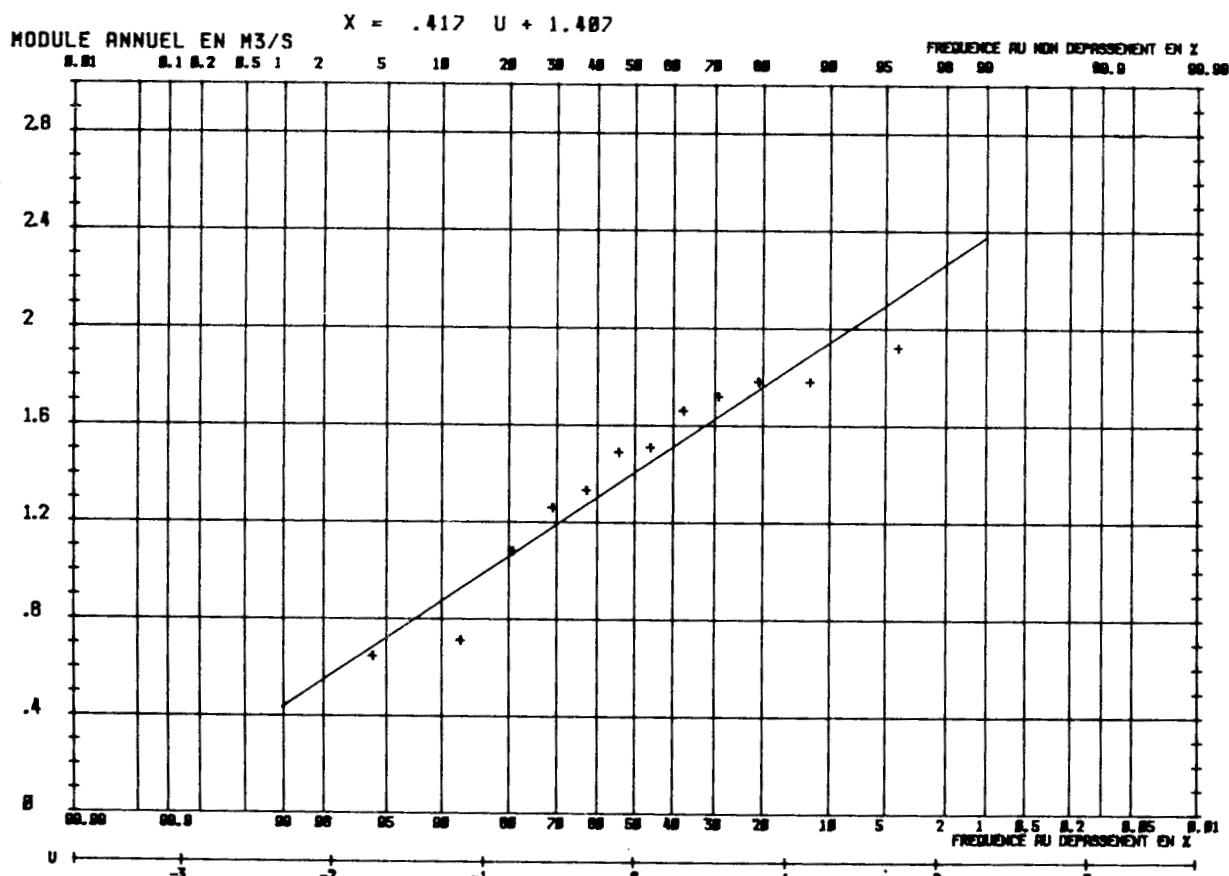
90 : Débits caractéristiques moyens de la Solre à Ferrière-la-Grande sur la période 1974-1984

3.3.2. Débit moyen mensuel

Les débits mensuels ont été ajustés par une loi de Galton . Le document 93 fournit les paramètres et les quantiles calculés pour chaque mois.

On note les faibles quantiles des mois d'août et de septembre, ce qui ne surprend pas puisqu'il s'agit de moyennes mensuelles d'été dans lesquelles se "diluent" les orages ponctuels de cette saison ; on attirera l'attention sur les valeurs élevées de juillet qui sont dues aux fortes pluies de 1980. C'est ici l'écart-type, davantage que la moyenne, qui entraîne une hausse rapide des quantiles vers les périodes de retour élevées.

L'évolution des moyennes montre que l'année hydrologique débute en octobre et que les débits moyens mensuels les plus élevés se placent au mois de février. Il faut cependant noter les fortes dispersions de mars et de décembre qui accroissent les probabilités de forts débits moyens sur ces périodes.



91 : Tracé de l'ajustement de Gauss sur les modules annuels de la Solre à Ferrière-la-Grande de 1973 à 1984

	VALEUR EN m ³ /s	INTERVALLE DE CONFIANCE A 80%
MOYENNE	1,408	1,24-1,57
ECART-TYPE	0,417	0,35-0,61
QUANTILE 2 ANS	1,407	1,24-1,57
QUANTILE 3 ANS	1,589	1,42-1,76
QUANTILE 5 ANS	1,758	1,57-1,95
QUANTILE 10 ANS	1,942	1,72-2,16
QUANTILE 20 ANS	2,094	1,84-2,35
QUANTILE 50 ANS	2,264	1,98-2,55
QUANTILE 100 ANS	2,378	2,06-2,69

EQUATIONS DE LA DROITE D'AJUSTEMENT :

$$Q = 0,417 u + 1,41$$

$$u = 2,395 Q - 3,37$$

92 : Paramètres et quantiles de l'ajustement de Gauss sur les modules annuels de la Solre à Ferrière-la-Grande de 1973 à 1984. L'ajustement est tracé par une routine du programme AJTRAC. Le débit annuel de période de retour $T = 1/F1$ ou "quantile" s'obtient en recherchant dans la table ou en calculant la valeur de la variable réduite de Gauss u qui correspond à la fréquence au dépassement $F1$ choisie. Son remplacement dans l'équation d'ajustement fournit la valeur du quantile.

	JANV	FEB	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JT	AOÛT	SEPT	OCT	NOV	DEC
MOYENNE	2,08	2,423	2,148	1,644	1,434	0,972	0,936	0,506	0,504	0,987	1,283	1,982
ECART-TYPE	0,87	0,693	1,198	0,74	0,722	0,449	1,039	0,185	0,148	0,803	0,812	1,2119
a	5,706	18,088	6,258	8,379	23,747	10,242	2,57	5,648	7,094	5,916	12,246	24,569
b	-1,609	-13,218	-2,932	-3,4	-20,64	-2,908	0,522	1,843	2,247	-1,569	-7,642	-27,307
x0	0	-3	-1	-1	-6	-1	0	0	0	-1	-3	-11
QUANTILE 2 ANS	1,913	2,379	1,941	1,546	1,398	0,922	0,626	0,471	0,481	0,841	1,207	1,924
QUANTILE 3 ANS	2,28	2,685	2,451	1,869	1,717	1,119	0,924	0,562	0,556	1,18	1,566	2,462
QUANTILE 5 ANS	2,687	2,987	3,009	2,208	2,027	1,323	1,332	0,664	0,633	1,555	1,929	2,985
QUANTILE 10 ANS	3,21	3,332	3,713	2,621	2,377	1,564	1,975	0,795	0,73	2,032	2,354	3,574
QUANTILE 20 ANS	3,717	3,632	4,387	3	2,678	1,782	2,736	0,922	0,823	2,493	2,733	4,079
QUANTILE 50 ANS	4,382	3,986	5,26	3,476	3,028	2,05	3,943	1,089	0,939	3,094	3,19	4,667
QUANTILE 100 ANS	4,892	4,233	5,922	3,825	3,27	2,243	5,036	1,217	1,026	3,553	3,516	5,073

$$Q(T) = 10^T [(1/a) u - b/a] + x_0$$

$$u = a \log(0-X_0) + b \quad u : \text{var. réduite de Gauss}$$

93 : Paramètres et quantiles des ajustements de Galton sur les débits moyens mensuels de la Solre de 1973 à 1984. L'ajustement est tracé par une routine du programme AJTRAC. La loi de Galton est équivalente à la loi de Gauss, on effectue simplement un changement de variable en ajustant le logarithme décimal des débits mensuels observés. Le débit mensuel de période de retour $T = 1/F1$ ou "quantile" s'obtient en recherchant dans la table ou en calculant la valeur de la variable réduite de Gauss u qui correspond à la fréquence au dépassement $F1$ choisie. Son remplacement dans l'équation d'ajustement fournit directement la valeur du quantile.

CHAPITRE 4 : BILAN ANNUEL

4.1. LES TERMES DU BILAN

Le bilan en eau d'un bassin versant est la balance des apports et des sorties sur une période de temps déterminée, correspondant généralement à une année. Il sert à vérifier la cohérence d'ensemble des données recueillies ou calculées : mesure des précipitations, calcul d'évapotranspiration, mesure de l'écoulement moyen.

Le bilan hydrologique d'un bassin peut se traduire par l'équation :

$$P = ETR + I + R + \Delta RFU$$

P : lame moyenne précipitée sur le bassin versant en mm calculée par une pondération (Méthode de Thiessen) des valeurs mensuelles de Maubeuge M.N (M), Colleret (C), Eccles (E), Sars-Poteries (S) et Dimont (D) avec :

$$P = 0,147 M + 0,129 C + 0,296 E + 0,138 S + 0,29 D \text{ (cf. partie IV, § 2.1.1.)}$$

ETR : Evapotranspiration réelle en mm

R : Ruissellement

I : Infiltration

ΔRFU : Variation de la réserve facilement utilisable, c'est à dire de la lame d'eau stockée dans le sol

REMARQUE : la période d'observation étant longue, on estime ici que la variation de réserve en eaux souterraines est identique en début et en fin de période.

L'excédent EXC correspond à la part des précipitations ayant ruisselée ou s'étant infiltrée :

$$EXC = I + R$$

On assimile parfois cet notion d'excédent à la pluie efficace ou à la pluie utile. Ces notions sont différemment appréhendées selon l'orientation des auteurs, chacun rapportant les notions d'efficacité et d'utilité à la quantité qu'il cherche à déterminer ; l'hydrogéologue considère qu'une pluie est efficace lorsqu'elle alimente les nappes (infiltration efficace), l'hydrologue lorsqu'elle alimente les cours d'eau.

L'hydrologue spécialisé dans la prévision des crues considère que la pluie efficace correspond à la part de la pluie qui a provoqué un supplément d'écoulement lié au ruissellement direct. Dans l'étude des bilans, on a choisi de conserver le terme d'excédent.

L'ETP (évapotranspiration potentielle), dont l'on déduira l'ETR, est calculée par la formule de Thornthwaite (in De Marsily, 1981):

$$ETP = 16 L (10 T / I)^a$$

T : Température moyenne du mois considéré, en degrés C

$$a : 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,49239$$

I : Indice thermique annuel, somme des douze indices thermiques mensuels i , précédant le mois considéré avec $i = (T/5)^{1,514}$

L : Coefficient de correction, fonction de la latitude et du mois. Ce coefficient est lu sur la table de Thornthwaite. Pour le bassin de la Sambre, la latitude est voisine de 50 degrés Nord et les coefficients mensuels sont les suivants, de janvier à décembre :

0,74	0,78	1,02	1,15	1,33	1,36	1,37	1,25	1,06	0,92	0,76	0,70
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Le calcul de l'ETR et de l'excédent d'eau (EXC) disponible pour le ruissellement et l'infiltration est effectué de la façon suivante :

cas a) Pluie mensuelle P supérieure à l'évapotranspiration potentielle ($P > ETP$)

$$ETR = ETP$$

$$\text{Si RFU initiale} < \text{RFU max, EXC} = P - ETP - (\text{RFU max} - \text{RFU})$$

$$\text{Si RFU initiale} = \text{RFU max, EXC} = P - ETP$$

(RFU max : lame d'eau maximale pouvant être stockée par le sol)

cas b) Pluie mensuelle P égale à l'ETP ($P = ETP$)

$$ETR = ETP$$

$$EXC = 0$$

cas c) Pluie mensuelle P inférieure à l'ETP ($P < ETP$)

$$ETR = ETP \text{ si } P + \text{RFU} \geq ETP$$

$$ETR = P + \text{RFU} \text{ si } P + \text{RFU} < ETP$$

$$EXC = 0$$

REMARQUE : L'excédent de longue période (plusieurs mois ou années) peut être calculé directement de la façon suivante :

Si l'on calcule un bilan sur n mois, il n'est pas nécessaire de calculer l'excédent de chaque mois, l'excédent total EXC.TOT, s'exprime par :

$$\text{EXC.TOT} = \sum_{i=1}^n \text{EXC}_i = \sum_{i=1}^n P_i - \sum_{i=1}^n \text{ETR}_i + (\text{RFU}_0 - \text{RFU}_n)$$

Si le stock d'eau ou RFU est identique en début et en fin de période :

$$\text{EXC.TOT} = \sum_{i=1}^n \text{EXC}_i = \sum_{i=1}^n P_i - \sum_{i=1}^n \text{ETR}_i$$

4.2. MODE DE CALCUL

Le bilan annuel est calculé à partir des valeurs mensuelles : température moyenne mensuelle (moyenne des températures maximales et minimales de chaque jour du mois à la station de Thirimont), lame mensuelle précipitée (méthode de Thiessen), évapotranspiration potentielle mensuelle (Thornthwaite).

On en déduit, selon la méthode exposée ci-dessus, les valeurs de l'évapotranspiration réelle mensuelle, du stock d'eau disponible dans le sol en fin de mois (RFU initiale du mois suivant) et de l'excédent mensuel.

On note cependant que le paramètre RFU maximum reste inconnu. Ce terme représente la lame d'eau maximale que le sol est capable d'emmagasiner. Sa valeur est habituellement fixée à 100 mm mais cette valeur peut être discutée.

L'ensemble de ces opérations est effectué par le programme BIL. Les données nécessaires sont lues sur fichiers séquentiels et le résultat est présenté sous forme d'un bilan annuel ou pluriannuel si l'on désire effectuer un bilan sur longue période. La RFU maximale prise en compte pour le calcul de l'ETR peut être choisie en début de programme.

4.3. RESULTATS

Ce programme a été appliqué au calcul du bilan sur le bassin de la Solre. Les bilans annuels, calculés pour une RFU max. de 100 mm, sont présentés sur les documents 94 à 96.

BILAN DE L'ANNEE 1976
RFU 100 MM

MOIS	TEMP	ETP(MM)	PL (MM)	STOCK	ETR	EXC	L.EC	D.E
JANVIER	+ 3.4	11.1	47.1	100.0	11.1	36.0	28.8	+ 18.3
FEVRIER	+ 3.1	10.8	42.3	100.0	10.8	31.5	39.5	+ 2.8
MARS	+ 3.7	17.1	38.1	100.0	17.1	21.0	22.9	+ 15.2
AVRIL	+ 7.5	40.9	18.6	77.7	40.9	.0	15.6	+ 3.0
MAI	+ 13.5	88.1	36.1	25.8	88.1	.0	10.3	+ 25.8
JUIN	+ 18.1	121.9	7.8	.0	33.6	.0	8.4	- .5
JUILLET	+ 19.7	133.4	74.5	.0	74.5	.0	8.4	+ 66.1
AOUT	+ 17.7	107.4	12.2	.0	12.2	.0	5.4	+ 6.8
SEPTEMBRE	+ 14.2	71.8	69.4	.0	69.4	.0	6.0	+ 63.4
OCTOBRE	+ 11.4	49.2	59.5	10.3	49.2	.0	8.2	+ 51.3
NOVEMBRE	+ 6.0	19.6	80.5	71.3	19.6	.0	9.4	+ 71.1
DECEMBRE	+ 1.0	2.3	38.6	100.0	2.3	7.7	11.7	+ 26.9
TOTAL :		673.6	525.3		428.9	96.4	174.6	350.7

BILAN DE L'ANNEE 1977
RFU 100 MM

MOIS	TEMP	ETP(MM)	PL (MM)	STOCK	ETR	EXC	L.EC	D.E
JANVIER	+ 2.5	7.0	68.5	100.0	7.0	61.5	22.9	+ 45.6
FEVRIER	+ 5.0	16.3	80.7	100.0	16.3	64.4	34.0	+ 46.7
MARS	+ 7.1	31.2	59.9	100.0	31.2	28.7	28.1	+ 31.8
AVRIL	+ 6.0	28.4	72.5	100.0	28.4	44.1	41.6	+ 30.9
MAI	+ 11.4	69.0	64.3	95.3	69.0	.0	25.3	+ 39.0
JUIN	+ 13.7	87.8	120.0	100.0	87.8	27.6	26.5	+ 93.5
JUILLET	+ 16.4	110.0	69.4	59.4	110.0	.0	23.1	+ 46.3
AOUT	+ 15.6	96.5	42.2	5.2	96.5	.0	15.7	+ 26.5
SEPTEMBRE	+ 12.6	66.2	19.3	.0	24.6	.0	10.8	+ 8.5
OCTOBRE	+ 12.1	55.6	44.1	.0	44.1	.0	11.7	+ 32.4
NOVEMBRE	+ 6.1	22.6	99.5	76.9	22.6	.0	25.9	+ 73.6
DECEMBRE	+ 5.0	16.9	50.5	100.0	16.9	10.6	30.9	+ 19.6
TOTAL :		607.5	791.5		554.4	237.0	296.5	495.0

BILAN DE L'ANNEE 1978
RFU 100 MM

MOIS	TEMP	ETP(MM)	PL (MM)	STOCK	ETR	EXC	L.EC	D.E
JANVIER	+ 2.0	6.7	71.1	100.0	6.7	64.4	51.4	+ 19.7
FEVRIER	+ 1.5	5.2	38.5	100.0	5.2	33.3	45.4	- 6.8
MARS	+ 6.1	30.3	112.0	100.0	30.3	81.7	47.2	+ 64.8
AVRIL	+ 7.0	39.7	49.4	100.0	39.7	9.7	35.6	+ 13.8
MAI	+ 11.8	78.0	104.4	100.0	78.0	26.4	59.8	+ 44.6
JUIN	+ 14.3	97.1	85.4	88.3	97.1	.0	19.6	+ 65.8
JUILLET	+ 15.2	103.9	73.9	58.3	103.9	.0	26.5	+ 47.4
AOUT	+ 15.1	94.6	47.5	11.3	94.6	.0	11.3	+ 36.2
SEPTEMBRE	+ 13.0	69.0	37.5	.0	48.8	.0	10.5	+ 27.0
OCTOBRE	+ 11.0	50.3	16.9	.0	16.9	.0	8.4	+ 8.5
NOVEMBRE	+ 5.3	19.9	19.2	.0	19.2	.0	6.6	+ 12.6
DECEMBRE	+ 2.9	10.0	93.6	83.6	10.0	.0	22.2	+ 71.4
TOTAL :		604.7	749.8		550.5	215.6	344.5	405.3

94 : Bilans annuels 1976 à 1978 sur le bassin de la Solre

TEMP : température moyenne du mois considéré

ETP : évapotranspiration mensuelle calculée par la méthode de Thornthwaite, en mm

PL : pluie mensuelle en mm STOCK : stock d'eau contenu dans le sol en fin de mois

ETR : évapotranspiration réelle EXC : excédent disponible pour le ruissellement et l'infiltration

L.EC : lame écoulée mensuelle à la station de Ferrière-la-Grande

D.E : déficit d'écoulement (pluie mensuelle - lame écoulée)

BILAN DE L'ANNEE 1979
RFU 100 MM

MOIS	TEMP	ETP(MM)	PL (MM)	STOCK	ETR	EXC	L.EC	D.E
JANVIER	- 3.0	.0	32.8	100.0	.0	16.4	27.0	+ 5.8
FEVRIER	+ .4	1.5	57.9	100.0	1.5	56.4	70.4	- 12.4
MARS	+ 4.9	25.4	142.1	100.0	25.4	116.7	118.7	+ 23.4
AVRIL	+ 7.6	44.8	65.3	100.0	44.8	20.5	42.8	+ 22.5
MAI	+ 11.6	78.6	60.4	81.8	78.6	.0	38.8	+ 21.6
JUIN	+ 15.0	104.0	47.8	25.6	104.0	.0	25.4	+ 22.4
JUILLET	+ 15.9	110.7	52.0	.0	77.6	.0	17.2	+ 34.8
AOUT	+ 15.4	97.5	72.0	.0	72.0	.0	14.2	+ 57.8
SEPTEMBRE	+ 13.7	73.4	18.7	.0	18.7	.0	12.0	+ 6.7
OCTOBRE	+ 11.6	53.6	70.0	16.4	53.6	.0	15.4	+ 54.6
NOVEMBRE	+ 5.4	20.2	131.1	100.0	20.2	27.4	35.3	+ 95.8
DECEMBRE	+ 5.3	18.3	120.9	100.0	18.3	102.6	67.0	+ 53.9
TOTAL:		628.0	871.4		514.8	340.2	484.2	387.2

BILAN DE L'ANNEE 1980
RFU 100 MM

MOIS	TEMP	ETP(MM)	PL (MM)	STOCK	ETR	EXC	L.EC	D.E
JANVIER	+ .2	.6	48.2	100.0	.6	47.6	50.0	- 1.7
FEVRIER	+ 5.6	21.2	75.9	100.0	21.2	54.7	67.3	+ 8.6
MARS	+ 5.0	24.0	81.8	100.0	24.0	57.8	51.0	+ 30.8
AVRIL	+ 7.1	39.0	51.5	100.0	39.0	12.5	37.1	+ 14.4
MAI	+ 10.8	70.2	67.2	97.0	70.2	.0	22.8	+ 44.4
JUIN	+ 13.8	93.1	106.4	100.0	93.1	10.3	14.4	+ 92.0
JUILLET	+ 14.7	100.7	182.1	100.0	100.7	81.4	95.9	+ 86.2
AOUT	+ 16.8	105.9	55.3	49.4	105.9	.0	18.1	+ 37.2
SEPTEMBRE	+ 15.3	81.1	11.1	.0	60.6	.0	13.5	- 2.3
OCTOBRE	+ 8.7	38.8	90.4	51.6	38.8	.0	17.9	+ 72.5
NOVEMBRE	+ 4.0	14.7	74.8	100.0	14.7	11.7	31.5	+ 43.3
DECEMBRE	+ 2.1	7.1	81.3	100.0	7.1	74.2	67.3	+ 14.0
TOTAL:		596.4	926.5		575.9	350.6	486.8	439.7

BILAN DE L'ANNEE 1981
RFU 100 MM

MOIS	TEMP	ETP(MM)	PL (MM)	STOCK	ETR	EXC	L.EC	D.E
JANVIER	+ 2.2	8.1	93.5	100.0	8.1	85.4	82.2	+ 11.3
FEVRIER	+ 1.2	4.6	40.0	100.0	4.6	35.4	41.2	- 1.1
MARS	+ 8.6	44.9	101.4	100.0	44.9	56.5	72.4	+ 29.0
AVRIL	+ 8.3	47.8	27.3	79.5	47.8	.0	29.7	- 2.3
MAI	+ 12.4	82.6	99.3	96.3	82.6	.0	24.6	+ 74.7
JUIN	+ 14.3	97.0	128.9	100.0	97.0	28.3	32.4	+ 96.5
JUILLET	+ 16.3	111.7	66.6	54.9	111.7	.0	18.2	+ 48.4
AOUT	+ 16.6	103.3	35.6	.0	90.6	.0	17.1	+ 18.5
SEPTEMBRE	+ 14.5	76.0	77.1	1.1	76.0	.0	17.1	+ 60.0
OCTOBRE	+ 8.7	38.9	170.7	100.0	38.9	32.9	59.3	+111.4
NOVEMBRE	+ 5.9	21.4	66.0	100.0	21.4	44.6	43.5	+ 22.5
DECEMBRE	+ .6	1.7	105.6	100.0	1.7	103.9	86.8	+ 18.8
TOTAL:		638.0	1012.7		625.3	387.4	524.5	488.2

BILAN DE L'ANNEE 1982								
RFU 100 MM								
MOIS	TEMP	ETP(MM)	PL (MM)	STOCK	ETR	EXC	L.EC	D.E
JANVIER	+ 1.3	4.2	55.0	100.0	4.2	50.8	65.2	- 10.1
FEVRIER	+ 3.6	13.1	11.3	98.2	13.1	.0	34.0	- 22.6
MARS	+ 5.3	25.3	73.4	100.0	25.3	46.3	54.9	+ 18.5
AVRIL	+ 7.4	41.5	49.5	100.0	41.5	8.0	53.1	- 3.5
MAI	+ 12.7	84.2	127.1	100.0	84.2	42.9	49.3	+ 77.8
JUIN	+ 16.5	112.6	113.8	100.0	112.6	1.2	31.1	+ 82.7
JUILLET	+ 17.8	121.8	33.6	11.8	121.8	.0	12.9	+ 20.7
AOUT	+ 17.0	105.3	89.1	.0	100.9	.0	13.2	+ 75.9
SEPTEMBRE	+ 15.4	80.3	58.9	.0	58.9	.0	11.2	+ 47.7
OCTOBRE	+ 9.9	43.2	100.3	57.1	43.2	.0	28.6	+ 71.7
NOVEMBRE	+ 6.4	22.1	87.9	100.0	22.1	23.0	41.0	+ 46.9
DECEMBRE	+ 3.0	8.9	105.8	100.0	8.9	96.9	77.5	+ 28.3
TOTAL :		662.5	906.3		636.8	269.5	472.0	434.3

BILAN DE L'ANNEE 1983								
RFU 100 MM								
MOIS	TEMP	ETP(MM)	PL (MM)	STOCK	ETR	EXC	L.EC	D.E
JANVIER	+ 5.0	16.2	96.1	100.0	16.2	79.9	62.4	+ 33.7
FEVRIER	+ .5	1.3	57.0	100.0	1.3	55.7	55.9	+ 1.1
MARS	+ 5.3	23.7	92.4	100.0	23.7	68.7	63.3	+ 29.1
AVRIL	+ 7.9	41.4	66.0	100.0	41.4	24.6	51.6	+ 14.4
MAI	+ 10.0	61.8	128.8	100.0	61.8	67.0	60.0	+ 68.8
JUIN	+ 16.2	108.1	91.9	83.8	108.1	.0	34.7	+ 57.2
JUILLET	+ 20.7	141.8	19.3	.0	103.2	.0	19.6	- .2
AOUT	+ 18.3	112.3	12.4	.0	12.4	.0	11.4	+ 1.0
SEPTEMBRE	+ 14.4	72.7	85.3	12.6	72.7	.0	11.6	+ 73.7
OCTOBRE	+ 10.1	42.8	39.2	9.0	42.8	.0	7.5	+ 31.7
NOVEMBRE	+ 6.0	19.9	46.1	35.2	19.9	.0	12.1	+ 34.0
DECEMBRE	+ 3.7	10.7	52.3	76.9	10.7	.0	17.3	+ 35.0
TOTAL :		652.7	787.4		514.2	296.1	407.4	380.0

BILAN DE L'ANNEE 1984								
RFU 100 MM								
MOIS	TEMP	ETP(MM)	PL (MM)	STOCK	ETR	EXC	L.EC	D.E
JANVIER	+ 3.0	9.0	139.6	100.0	9.0	107.6	60.3	+ 79.3
FEVRIER	+ 2.2	6.8	75.3	100.0	6.8	68.5	70.8	+ 4.5
MARS	+ 3.6	15.3	57.2	100.0	15.3	41.9	34.7	+ 22.5
AVRIL	+ 7.5	39.0	34.0	95.0	39.0	.0	41.6	- 7.5
MAI	+ 9.5	58.6	108.3	100.0	58.6	44.8	30.9	+ 77.4
JUIN	+ 13.9	91.0	55.3	64.3	91.0	.0	34.2	+ 21.1
JUILLET	+ 16.3	109.9	41.4	.0	105.7	.0	15.6	+ 25.8
AOUT	+ 17.7	111.2	45.7	.0	45.7	.0	13.6	+ 32.1
SEPTEMBRE	+ 13.1	69.4	132.0	62.6	69.4	.0	16.2	+115.8
OCTOBRE	+ 11.0	50.8	114.0	100.0	50.8	25.9	43.5	+ 70.5
NOVEMBRE	+ 9.1	34.4	88.2	100.0	34.4	53.8	44.1	+ 44.1
DECEMBRE	+ 3.6	11.8	55.7	100.0	11.8	43.9	43.7	+ 12.0
TOTAL :		607.2	947.2		537.5	386.6	449.2	498.0

Sur la période 1976-1984, la lame totale précipitée est de 7520 mm et l'ETR totale est de 4938 mm, ce qui correspond à 66 % d'évapotranspiration ; l'excédent total calculé de 2580 mm, soit 34 % des précipitations, reste disponible pour le ruissellement et l'infiltration. La lame annuelle moyenne précipitée s'établit donc à 836 mm pour une ETR moyenne de 549 mm et un excédent moyen de 287 mm.

Afin de vérifier la cohérence du bilan annuel, on a placé en vis-à-vis la lame écoulee mensuelle (L.EC) à la station de Ferrière-la-grande. Pour des bassins jaugés, cette précaution oblige à assurer la cohérence des bilans car, sur une longue période, les excédents calculés doivent au moins couvrir l'écoulement total à l'exutoire.

4.3.1. Résultats attendus

La RFU étant identique en début et en fin de période, on a :

$$\text{EXC} = \text{P} - \text{ETR}.$$

L'excédent assure le ruissellement (direct et retardé) et l'infiltration. L'infiltration servant à alimenter le débit de base, elle correspond donc à un écoulement différé et on peut admettre que l'excédent de longue période correspond au ruissellement direct, retardé et différé, c'est à dire à l'écoulement E :

$$\text{EXC} = \text{E}$$

4.3.2. Résultats observés

Contrairement au résultat attendu, on note (document 97) que le terme d'écoulement sur 9 ans (3640 mm) est nettement supérieur à l'excédent, soit 2580 mm pour une RFU max. de 100 mm., Plusieurs voies s'ouvrent pour expliquer ce résultat :

a) Terme d'écoulement trop élevé

L'écoulement mesuré à la station de Ferrière-la-grande peut être surestimé à cause d'erreurs sur la mesure des hauteurs ou sur la courbe de tarage. Au vu des valeurs comparables obtenues pour les débits spécifiques sur les bassins voisins (document 86), il ne semble pas que l'écoulement moyen soit surestimé.

PERIODE 1976 - 1984 (valeurs en mm)					
	RFU max	ETR	P - ETR (ou EXC)	L.EC - EXC	ETR/P en (en %)
Lame précipitée : 7520 mm	100	4940	2580	1060	65,7
	90	4850	2670	970	67,0
Lame écoulée : 3640 mm	80	4760	2760	880	65,7
	70	4670	2850	790	64,5
Déficit	60	4580	2940	700	63,3
d'écoulement : 3879 mm	50	4490	3030	610	62,0
	40	4400	3120	520	60,8
	30	4310	3210	430	59,5
	20	4220	3300	340	58,3
	10	4120	3400	240	56,9
	0	4000	3520	120	55,2

97 : Variation de l'ETR et de l'excédent en fonction de la RFU max choisie.

Cet écoulement peut également être accru par des apports d'eaux souterraines extérieures au bassin et alimentant la Solre au niveau des vallées. Cette hypothèse n'est pas conforme aux observations (cf. chap..7) car on montre au contraire que la Solre perd une partie de ses eaux dans ces mêmes aquifères.

Dans la réalité, on observe plutôt un prélèvement sur l'écoulement superficiel, prélèvement dont une petite partie est pompée par les captages d'AEP implantés sur l'aquifère carbonifère et dont l'autre pourrait s'écouler hors du bassin par les drains constitués, à l'ouest, par la continuité des synclinaux carbonifères. Un apport extérieur par l'aquifère famennien n'étant pas concevable puisque celui-ci est limité à la frange d'altération superficielle et épouse donc la topographie, ce qui place les limites de cet aquifère au niveau de celles du bassin hydrologique.

Le prélèvement par captage reste cependant faible (27 millions de m³ de 1976 à 1984) comparé à l'écoulement total de 420 millions de m³ sur la même période. En outre, une partie de ce prélèvement artificiel retourne à la Solre, ce qui limite encore l'importance de ce terme dans le bilan de longue période. Le prélèvement naturel sur le débit reste faible et s'effectue surtout en période de crue, ce qui n'est pas perceptible sur la valeur de l'écoulement moyen.

b) Sous-estimation des pluies

Les pluies sont obtenues par une moyenne pondérée de mesures effectuées en cinq stations (cf. paragraphe 41). Elles sont du même ordre de grandeur que la moyenne du bassin de la Sambre et il n'y a pas lieu de craindre une erreur importante.

c) Surestimation de l'ETR

L'excédent obtenu peut être insuffisant du fait d'une surestimation de l'ETR. On peut contrôler la valeur globale obtenue annuellement par la méthode de Thornthwaite en calculant à nouveau l'ETR annuelle par la méthode de Turc :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + (P/L)^2}} \quad \text{avec : } L = 300 + 25 T + 0,05 T^3$$

ou par la méthode de Coutagne :

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

(formule valable pour nos latitudes)

P : Précipitation annuelle en mm

T : Température moyenne annuelle

Le document 98 précise les ETR annuelles obtenues par les trois méthodes (dans le cas de l'ETR annuelle déduite du calcul de l'ETP calculée par la méthode de Thornthwaite, on indique la valeur de la RFU max).

Sur la période 1976-1984, l'ETR totale calculée est de 4263 mm par la méthode de Turc, de 4429 mm par la méthode de Coutagne et de 4939 mm par la méthode de Thornthwaite, pour une RFU max. de 100 mm, cette dernière valeur paraissant alors trop élevée.

d) RFU max.trop élevée

La valeur de la RFU max. est à priori choisie égale à 100 mm. On peut faire varier cette valeur de 100 à 0 mm, ce qui diminue le stock d'eau dans lequel puise l'évapotranspiration et diminue donc l'ETR totale (document 97). On note alors une augmentation de l'excédent total, ce qui va dans le sens d'un comblement partiel de la différence entre l'excédent et l'écoulement. La baisse de la RFU max. va donc dans le sens d'une amélioration de la cohérence du bilan bien que l'écoulement reste supérieur à l'excédent quelle que soit la RFU.

Les valeurs de l'ETR Coutagne et Turc (document 98) se rapprochent de l'ETR Thornthwaite pour des RFU comprises entre 20 à 40 mm. Un ordre de grandeur de la RFU de 30 mm pourrait alors être conseillé. L'ETR moyenne est alors de 4300 mm et représente environ 59 % des précipitations.

Année	Thornthwaite (RFU 100 mm)	Thornthwaite (RFU 40 mm)	Thornthwaite (RFU 30 mm)	Thornthwaite (RFU 20 mm)	Turc	Coutagne
1976	429	369	359	349	406	399
1977	554	494	484	474	476	497
1978	551	491	481	471	453	473
1979	515	455	445	435	471	494
1980	576	516	506	496	479	501
1981	625	565	555	545	500	519
1982	637	577	567	557	501	525
1983	514	454	444	434	483	503
1984	538	478	468	458	494	518
Total :	4939	4399	4309	4219	4263	4429

98 : Valeurs des ETR annuelles calculées par les méthodes de Thornthwaite (RFU 100, 40 et 30 mm), de Turc et de Coutagne.

On insistera cependant sur le fait que le calcul de l'évapotranspiration reste approximatif et qu'il ne constitue qu'une présomption à la fois de la valeur réelle de l'ETR et de celle de la RFU. De même, les précipitations efficaces obtenues en soustrayant l'ETR des précipitations brutes sont des valeurs ne fournissant que des ordres de grandeur. Leur utilisation, pour des méthodes de modélisation de crue ou de calcul de potentiel d'alimentation des nappes reste difficile, les incertitudes correspondant au calcul de l'ETR se superposant à celles de la partition de l'excédent en ruissellement ou en infiltration.

e) Sous-estimation de l'excédent

Si l'on ne peut conclure à la surestimation de l'écoulement, on peut remettre en cause le mode de calcul de l'excédent.

L'examen des bilans annuels successifs montre que l'on observe des reprises d'écoulement alors même que les stocks d'eau sont insuffisants. Le mode de calcul des excédents dans le bilan de Thornthwaite impose en effet que la lame mensuelle précipitée sacrifie d'abord à l'évapotranspiration et à la reconstitution du stock d'eau du sol (à concurrence de la RFU max.) avant de produire un excédent, c'est-à-dire de l'infiltration ou du ruissellement.

Ce mode de calcul ne tient cependant pas compte de l'intensité des précipitations et la vitesse de saturation du sol est souvent insuffisante pour profiter de l'averse en cours, ce qui provoque un ruissellement avant que le stock d'eau du sol ne soit reconstitué.

Le pas de temps mensuel provoque également une sous-estimation de l'excédent du fait même de la répartition des précipitations sur le mois. A ce pas de temps, une forte pluie isolée survenant pendant un mois chaud sera mathématiquement destinée à la satisfaction de l'ETR et son complément sera affecté à reconstituer le stock d'eau, ce qui, dans la plupart des cas, n'entraînera pas d'excédent. Au pas de temps journalier, cette pluie sera utilisée pour reconstituer le stock d'eau du sol et l'ETR d'une seule journée, ce qui risque de dégager plus fréquemment un excédent. Il n'existe cependant pas de méthode permettant de calculer l'évapotranspiration au pas de temps journalier à moins de réaliser une interpolation de la méthode de Thornthwaite et de calculer l'ETP journalière en fonction de la température du jour et de s'assurer que le cumul mensuel de l'ETP soit compatible avec la formule mensuelle de Thornthwaite.

Il nous semble que cette dernière hypothèse soit la plus plausible et qu'il faille rechercher une méthode plus précise pour le calcul des excédents. Cette recherche sort cependant du cadre de cette étude.

CHAPITRE 5 : BASSES-EAUX ET ETIAGE

La prédétermination de valeurs d'étiage de fréquence donnée est à l'ordre du jour car ces valeurs, ou "quantiles", sont nécessaires pour la définition des objectifs de qualité des rivières, pour fixer l'ordre de grandeur et la modulation dans le temps des débits minimaux admissibles en aval d'ouvrages de retenues, des prises d'eau ou, de plus en plus, pour quantifier les autorisations de rejet ; sur ce dernier point, il faut préciser que le maintien de propriétés physiques et chimiques acceptables de l'eau des rivières passe par une meilleure connaissance des débits et des périodes d'étiage.

Pour cette étude, on cherchera à appliquer spécifiquement aux problèmes posés par les étiages les lois courantes en hydrologie statistique (Hlavec, 1973 - C.T.G.R.E.F, 1978).

Le problème réside dans le choix des variables à prendre en compte.

5.1. VARIABLES D'ETIAGE

L'analyse du phénomène "étiage" est assez délicate et exige que les variables utilisées pour le décrire ne soit pas trop influencées par les multiples prélèvements, dérivations et rejets dont la rivière est l'objet.

En milieu rural et de petite industrie, les interventions humaines sont multiples et perturbent le débit d'étiage ; dans ces conditions le débit instantané n'a pas de sens et on choisira ici de définir l'étiage par l'une ou l'autre des variables suivantes :

VCN3, VCN5, VCN10, VCN20, VCN30 : minimum, pour chaque année calendaire, du débit moyen sur 3, 5, 10, 20, 30 jours consécutifs, c'est à dire la moyenne mobile la plus faible de 3, 5, 10, 20, 30 jours.

QME: débit du mois d'étiage, c'est à dire débit moyen du mois dont la moyenne interannuelle est la plus faible. Dans cette notion, le mois d'étiage est fixé.

QMNA: débit mensuel minimal, c'est à dire minimum annuel des débits moyens mensuels, ce minimum pouvant tomber, selon les années, sur des mois civils différents. Il s'agit, en quelque sorte d'un QME flottant.

Suite aux considérations développées ci-dessus, le débit moyen journalier minimum de l'année ne sera pas pris en compte, cette variable étant trop sujette aux influences humaines.

DCNn: débit moyen journalier de rang n dans un classement décroissant des valeurs d'une année. Cette variable nous paraît peu adaptée aux études d'étiage et aux petits bassins à régime variable car elle ignore la chronologie et n'apporte rien sur les problèmes de continuité d'écoulement et de date d'occurrence du phénomène d'étiage. Pour cette raison, elle ne sera pas prise en compte ici.

Les observations annuelles de chacune de ces variables sont présentées dans le document 99.

ANNEES	VCN3	VCN5	VCN10	VCN20	VCN30	QME	QME	QMNA	MOIS QMNA
						AOÛT	SEPT		
1973	0,234	0,195	0,201	0,215	0,243	0,311	0,262	0,262	9
1974	0,371	0,19	0,206	0,225	0,248	0,273	0,496	0,273	8
1975	0,388	0,202	0,216	0,244	0,269	0,32	0,445	0,32	8
1976	0,427	0,128	0,156	0,193	0,213	0,234	0,268	0,234	8
1977	0,331	0,363	0,387	0,438	0,467	0,675	0,481	0,481	9
1978	0,435	0,294	0,294	0,294	0,294	0,488	0,467	0.M	-
1979	0,175	0,457	0,465	0,523	0,53	0,61	0,535	0,535	9
1980	0,19	0,479	0,492	0,536	0,564	0,779	0,598	0,598	9
1981	0,196	0,421	0,429	0,488	0,532	0,736	0,76	0,736	8
1982	0,294	0,391	0,419	0,429	0,487	0,57	0,501	0,501	9
1983	0,445	0,239	0,26	0,266	0,29	0,49	0,517	0,324	10
1984	0,118	0,438	0,465	0,475	0,54	0,585	0,722	0,585	8
Moyenne :	0,300	0,316	0,333	0,360	0,390	0,506	0,504	0,441	

99 : Variables d'étiage :

. Minima annuels des débits moyens sur 3, 5, 10, 20 et 30 jours (VCN3 à VCN 30).

. Débits annuels du mois d'étiage (QME août et QME septembre) : la moyenne interannuelle de ces deux mois étant très proche, les deux QME ont été considérés.

. Minima annuels des débits moyens mensuels (QMNA), chaque minimum annuel peut survenir en des mois différents (MOIS QMNA). Les valeurs sont exprimées en m³/s et concernent les débits mesurés sur la Solre à la station de Ferrière-la-Grande.

5.2. AJUSTEMENT DES ECHANTILLONS

5.2.1. Loi de Gumbel

5.2.1.1. Modification de la loi classique

La loi de Gumbel $F(Q) = \exp(-e^{-u})$ est fréquemment adéquate pour ajuster des valeurs extrêmes de pluie ou de débit (cf. annexe V : loi de Gumbel).

Elle peut être utilisée telle quelle pour étudier les étiages mais la lisibilité graphique de la probabilité au non dépassement y est difficile, et par conséquent imprécise vers les fréquences rares. Cette imprécision est due à la contraction croissante de l'échelle des fréquences correspondant à des valeurs décroissantes de la variable réduite u lorsque l'on veut faire des extrapolations pour des débits de plus en plus faibles.

Gumbel (Gumbel, 1959) a lui-même développé une théorie statistique des débits d'étiage. Si l'on nomme Q la variable traitée, on obtient une loi dérivée de la loi de Gumbel classique en changeant Q en $Q' = -Q$ et en notant qu'une fréquence au non dépassement de Q' , $F(Q')$, correspond à une fréquence au dépassement de Q , $F1(Q)$.

La loi a alors pour fonction de répartition :

$$F(Q') = F1(Q) = 1 - F(Q) = 1 - \exp(-e^{-u})$$

avec :

$$Q' = -Q$$

Q : Variable d'étiage choisie (VCNn, QME ou QMNA)

$$u = \frac{Q' - Q'o}{G'} \text{ , variable réduite}$$

G' : gradex = $s'/1,28$

s' : écart-type

$Q'o$: paramètre de forme $Q'o = Q' - 0,45 s'$

Q' : moyenne des Q' (toujours négative)

5.2.1.2. Utilisation de la loi

Le diagramme à utiliser est alors gradué de la manière suivante :

- échelle des abscisses : graduation de Gumbel ; on y porte la probabilité au non dépassement $F(Q')$. Les débits Q' restant classés par ordre croissant (en valeur algébrique), cette probabilité au non dépassement correspond à la fréquence expérimentale $(i-0,5/N)$ pour la i ème des N valeurs de l'échantillon ajusté.

- échelle arithmétique croissante des ordonnées :

on y porte les valeurs de $Q' = - Q$

On note que la période de retour de l'étiage rare (sec) Q sera :

$$T = \frac{1}{1 - F(Q')}$$

$$\text{soit : } T = \frac{1}{F1(Q')}$$

c'est-à-dire encore, puisqu'un classement croissant de Q' correspond à un classement décroissant de Q :

$$T = \frac{1}{F(Q)}$$

Le calcul de la droite se fait alors avec les formules habituelles en notant que la moyenne Q' sera négative.

Les équations liant la variable "étiage" à la variable réduite sont :

$$Q' = G'.u + Q'o$$

$$\text{ou bien : } Q = - G'.u - Q'o$$

A partir d'une fréquence au dépassement $F1(Q)$, on pourra déduire la fréquence au non dépassement $F(Q')$, calculer la variable réduite avec :

$$u = - \log_e (-\log_e F(Q')), \text{ puis } Q' \text{ par l'équation ci-dessus et en déduire } Q = - Q'.$$

Une routine du programme AJTRAC (cf. annexe informatique) exécute le calcul des paramètres et le tracé des ajustements sur table traçante.

Par un cheminement inverse, on peut également calculer la fréquence au dépassement $F1(Q)$ correspondant à une valeur donnée Q de la variable d'étiage choisie.

Remarque : D'autres lois, comme la loi de Gauss ou la loi Log Normale ont été testées graphiquement ; l'adéquation de ces lois aux présentes valeurs étant moins bonne, la loi de Gumbel a été conservée.

5.2.2. Résultats des ajustements de Gumbel

Le document 100 regroupe l'ensemble des résultats obtenus. Les paramètres des lois ainsi que les quantiles sont présentés dans le document 101.

L'étiage décennal sec, c'est à dire l'étiage sévère dont la période de retour moyenne est de 10 ans montre un débit moyen sur trois jours de 150 litres par seconde ; il peut se maintenir en moyenne à 200 litres par seconde pendant 30 jours, ce qui fixe les possibilités d'alimentation en eau de la Solre.

Ces valeurs ne concernent que les débits probables à la station de Ferrière-la-Grande ; pour utiliser ces valeurs en d'autres points du cours d'eau, on pourra les transformer en débit spécifique puis recalculer les valeurs en m³/seconde en planimétrant la surface du bassin versant drainé au point considéré.

5.3. PERIODE DE BASSES-EAUX

5.3.1. Méthodologie

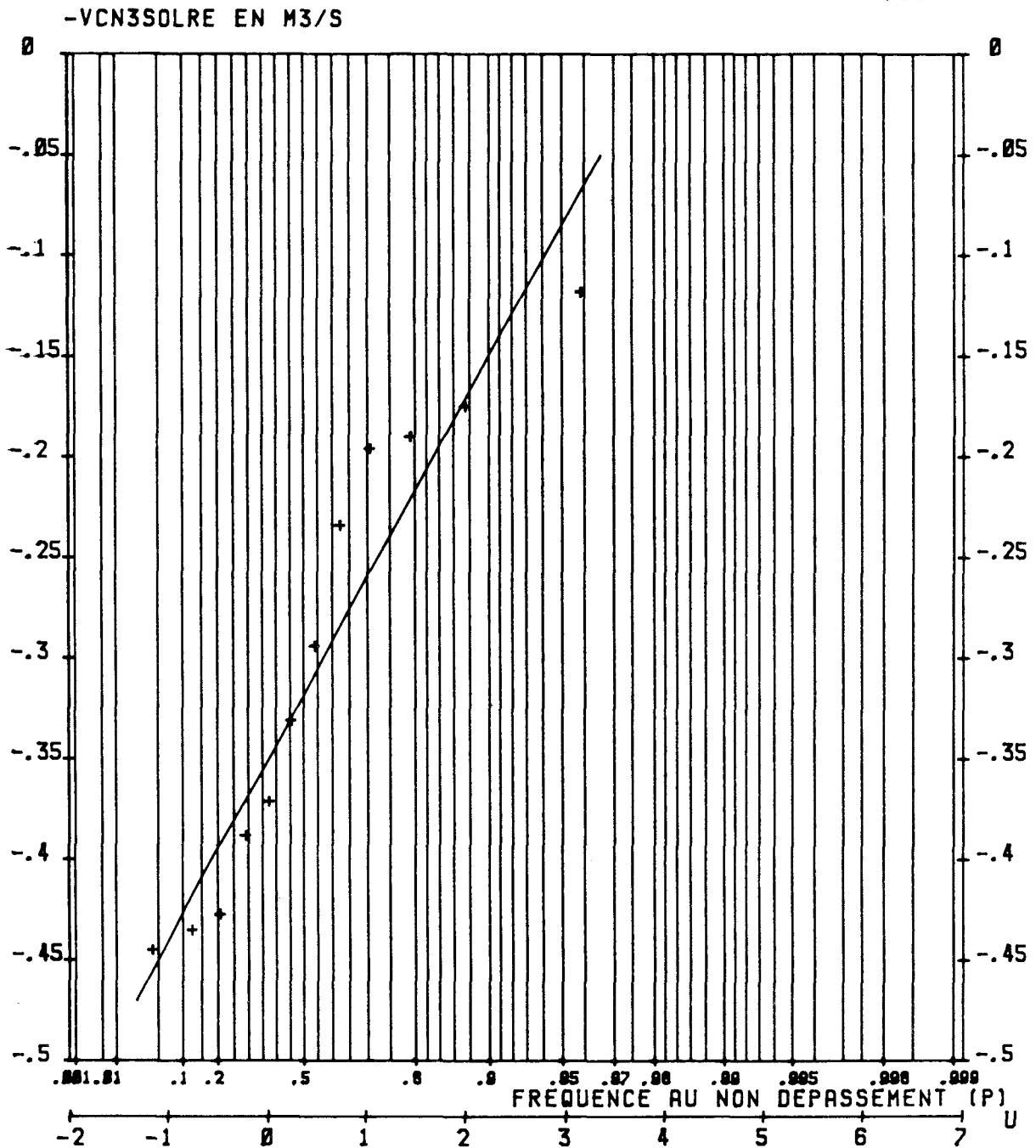
La gestion de la ressource en eau superficielle impose la connaissance des dates de début et de fin d'étiage. Ce "calendrier" d'étiage est utilisé notamment pour la gestion de systèmes hydrauliques (époque de lâchures pour soutenir les débits), pour la mise en place de moyens de suppléance au pompage en rivière durant l'étiage, ou pour la conduite de travaux d'entretien et d'aménagement des cours d'eau.

Suivant une méthode utilisée sur le bassin du Réal Collobrier, dans le département du Var (CEMAGREF, 1981), on a choisi de travailler sur les moyennes mobiles sur 3 jours (VCN3), la prise en compte des moyennes mobiles sur 5 et 10 jours fournissant des résultats comparables.

$$U = -\text{LOG}(-\text{LOG } P)$$

$$\text{VCN3SOLRE} = -.089 U + .353$$

PERIODE 1973-1984



100 : Exemple d'ajustement de Gumbel sur les minima annuels des débits moyens sur 3 jours (VCN3). Afin d'améliorer la lisibilité ou le calcul des quantiles pour des fréquences au non dépassement élevées, on réalise un ajustement de Gumbel sur - VCN3. Le quantile de période de retour $T = 1/1-P$ s'obtient en calculant (par les équations ci-dessus) la variable de Gumbel u et en la remplaçant dans l'expression de VCN3.

PARAMETRES DES AJUSTEMENTS :

VARIABLE AJUSTEE (12 valeurs par échantillon)	- VCN 3	-VCN 5	- VCN 10	- VCN 20	- VCN 30	- QME Août	- QME sept.	- QMNA
G' (GRADEX)	0,089	0,096	0,096	0,103	0,109	0,145	0,116	0,13
Q'0 (PARAMETRE DE FORME)	-0,353	-0,371	-0,388	-0,42	-0,453	-0,59	-0,571	-0,516

QUANTILES :

	Freq. non Dépasst	VCN 3	VCN 5	VCN 10	VCN 20	VCN 30	QME Août	QME sept.	QMNA
Etiage vingtennal sec	0,05	89	86	103	114	129	159	226	130
Etiage décennal sec	0,1	149	155	172	188	207	263	310	223
Etiage quinquennal sec	0,2	220	227	244	266	290	373	397	321
Etiage médian	0,5	319	336	353	382	413	537	528	468
Etiage non dépassé 2ans/3	0,666	361	380	397	430	463	604	582	528
Etiage quartile humide	0,75	381	402	419	454	489	637	609	559
Etiage quinquennal humide	0,8	395	417	434	469	505	659	626	578
Etiage décennal humide	0,9	427	451	468	506	544	711	668	624
Etiage vingtennal humide	0,95	451	476	493	533	573	749	698	659

101 : Résultats des ajustements de Gumbel sur les variables d'étiage (litres/seconde).

La variable ajustée est ici $Q' = -Q$, Q représentant la variable dont on cherche les quantiles.

Les paramètres calculés, soient le gradex G' et le paramètre de forme $Q'0$ le sont donc pour Q' .

Les quantiles de la variable Q sont directement obtenus par l'équation de la droite de Gumbel avec :

$$Q = -G' u - Q'0$$

On caractérise l'époque d'étiage par les dates à partir desquelles le débit moyen de 3 jours atteint, par valeurs supérieures ou inférieures, un débit seuil donné. Pour un seuil q , exprimé en débit spécifique, on note DDE q les dates de début d'étiage et DFE q les dates de fin d'étiage. Ces variables représentent ainsi le rang du jour dans l'année à partir duquel le débit de base devient inférieur ou supérieur à un seuil donné q . Une DDE4 de 184 signifie ainsi que le débit moyen de trois jours est devenu inférieur à 4 l/s/km² le 4 juillet.

Pour la Solre, on a formé les échantillons en se fixant deux seuils a priori, soit 4 l/s/km² et 5 l/s/km². Si on choisit un seuil supérieur, on élargit trop la notion d'étiage, si on choisit un seuil inférieur à 4 l/s/km², le débit moyen de certaines années ne descend pas sous ce seuil. On dispose ainsi de quatre échantillons de 12 valeurs (DDE4, DFE4, DDE5, DFE5) sur la période 1973-1984 (document 102). Ces échantillons ont été ajustés à une loi normale.

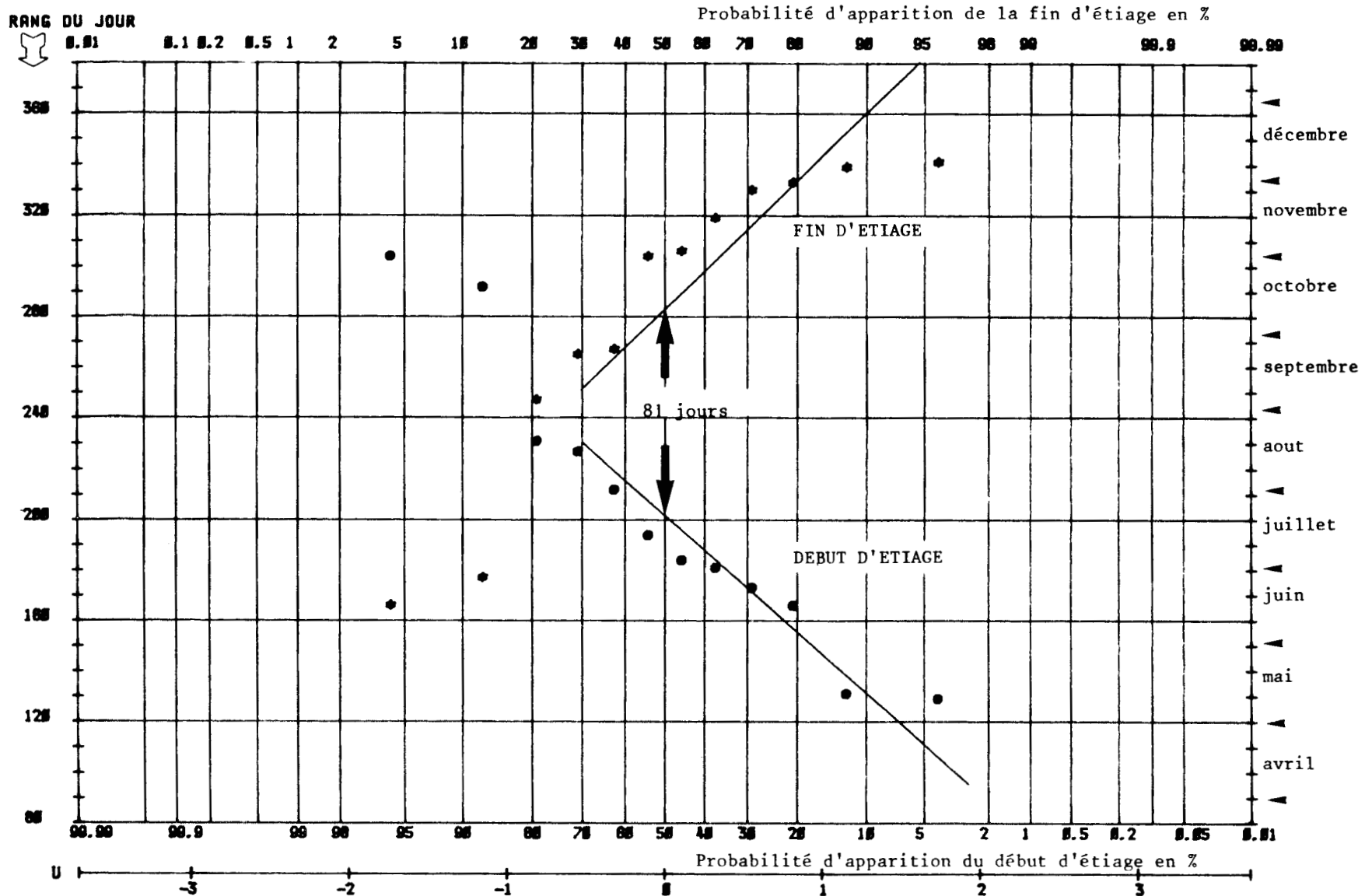
Année	seuil : 4 l/s/km ²		seuil : 5 l/s/km ²	
	D.D.E.	D.F.E.	D.D.E.	D.F.E.
1973	181	339	159	339
1974	131	267	127	268
1975	184	319	178	319
1976	129	333	111	375
1977	292	306	244	317
1978	227	341	215	343
1979	304	305	226	310
1980	166	167	157	280
1981	173	177	166	258
1982	194	265	190	280
1983	212	330	209	358
1984	231	247	230	249

D.D.E. : Date de début d'étiage
D.F.E. : Date de fin d'étiage

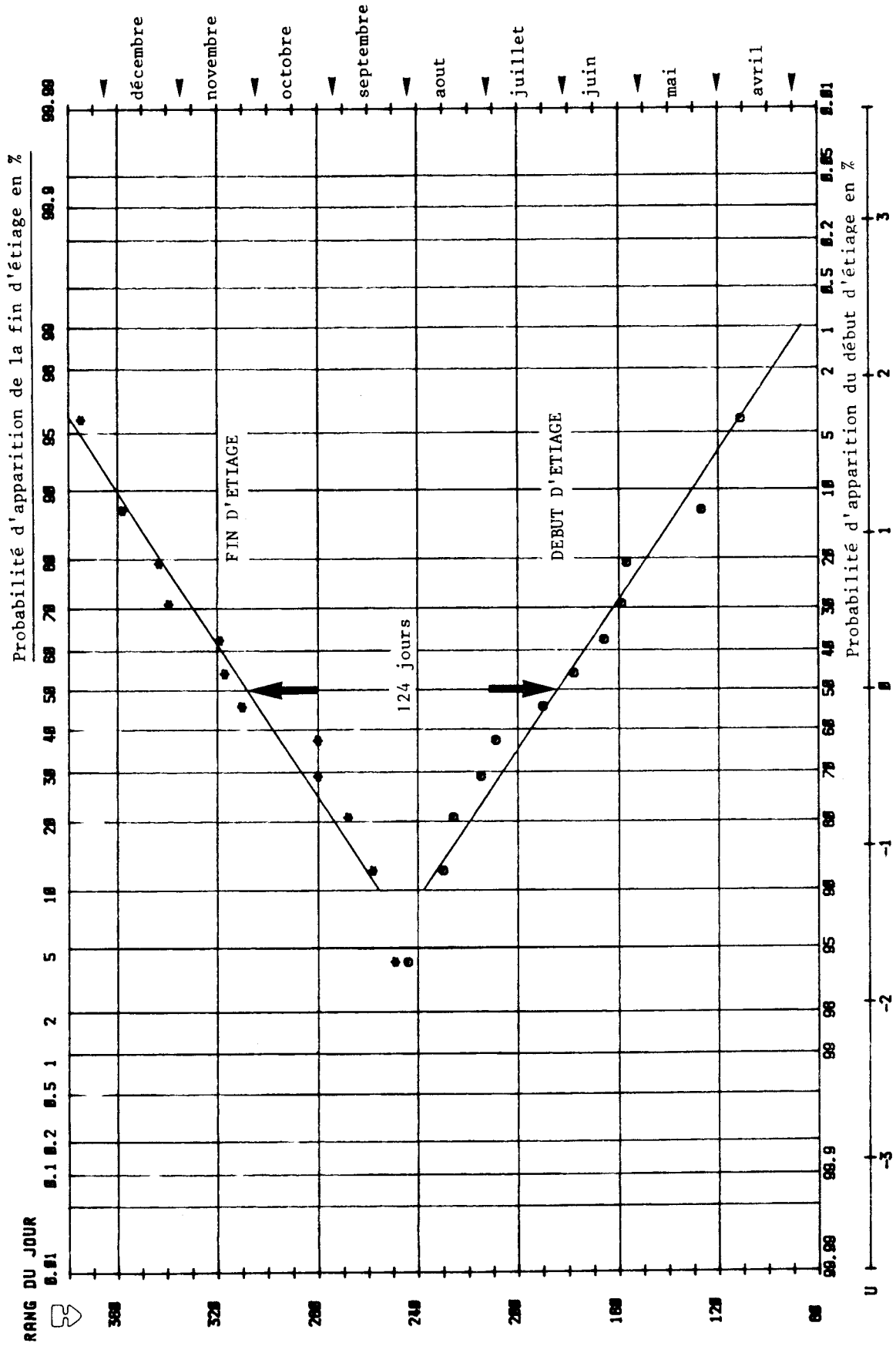
102 : Dates de début et de fin d'étiage (D.D.E. et D.F.E.) pour les seuils de 4 l/s/km² et de 5 l/s/km². Les dates sont traduites par leur rang dans l'année.

5.3.2. Résultats

Les documents 103 et 104 présentent les ajustements graphiques réalisés sur les dates de début et de fin d'étiage, respectivement pour des seuils de 4 l/s/km² et 5 l/s/km². La loi de Gauss est adéquate pour ajuster ces échantillons et les échantillons s'alignent correctement autour des droites d'ajustement.



103 : Ajustements de Gauss sur les dates de début et de fin d'étiage pour un seuil de 4 l/s/km².



104 : Ajustements de Gauss sur les dates de début et de fin d'étiage pour un seuil de 5 l/s/km²

Sur le document 103, pour un seuil d'étiage de 4 l/s/km², on note par exemple qu'il y a 70 chances sur cent que l'étiage commence après le 19 août (rang 230) et 10 % le 11 mai (rang 130). Il y a d'autre part 70 chances sur cent que le débit moyen soit supérieur à 4 l/s/km² (fin d'étiage) le 10 novembre (rang 313) et seulement 30 % le 10 septembre (rang 252). La date moyenne (probabilité de 50 %) de début d'étiage est le 22 juillet (rang 202), celle de fin d'étiage est le 11 octobre (rang 283). Ceci correspond à une durée moyenne d'étiage de 81 jours, centrée sur les mois d'août et de septembre, pendant laquelle le débit de base moyen reste inférieur à 4 l/s/km².

Le document 105 précise les dates probables d'apparition de début et de fin d'étiage pour les deux seuils retenus.

SEUIL : 4 l/s/km ²			SEUIL : 5 l/s/km ²	
Probabilité p en %	Date de début d'étiage ayant la probabilité p d'être dépassée	Date de fin d'étiage ayant la probabilité p d'être dépassée	Date de début d'étiage ayant la probabilité p d'être dépassée	Date de fin d'étiage ayant la probabilité p d'être dépassée
90	12 mai 131	25 juillet 205	12 mai 131	14 septembre 256
50	22 juillet 202	11 octobre 283	4 juillet 184	5 novembre 308
33	15 août 226	6 novembre 309	23 juillet 203	23 novembre 326
20	6 septembre 248	1er décembre 334	9 août 220	10 décembre 343
10	1er octobre 273	27 décembre 360	27 août 238	28 décembre 361
5	21 octobre 293	janvier suivant 382	11 septembre 253	janvier suivant 376

105 : Dates de début et de fin d'étiage ayant la probabilité p d'être dépassées

On insistera sur le fait que les valeurs fournies ne constituent que des estimations et la présentation d'une méthode, les intervalles de confiance étant très larges du fait du petit nombre d'années d'observation et de l'extrême variabilité de la période d'étiage. La méthode a le mérite d'estimer des dates moyennes d'apparition du phénomène étiage pour divers seuils mais elle s'adapte mieux à des cours d'eau dont la période d'étiage est plus tranchée, ce qui n'est pas le cas des cours d'eau du Nord de la France.

CHAPITRE 6 : CRUES DE LA SOLRE

La Solre est un cours d'eau dont le module annuel est faible mais dont les débits maxima peuvent être élevés. En période de fortes crues, des dommages sont causés sur les zones agricoles d'amont, et en aval sur les zones industrielles et urbanisées à Ferrière-la-Grande (SPIE Batignolles, CECIM) et à Rousies (Phénix). En tant qu'affluent de la Sambre, la Solre participe au gonflement des crues sur la Sambre et limite l'écoulement des eaux provenant de l'amont, et notamment des eaux collectées par les Helpes mineure et majeure. On peut mesurer l'étendue des dégâts par les coupures de presse relatant les fréquentes inondations survenant dans la région (Baras et Pitard, 1985).

On rappellera que le bassin de la Solre avait été choisi, à l'échelle nationale, comme l'un des 200 bassins expérimentaux destiné aux études "SOCOSE" et "CRUPEDIX" (CEMAGREF, 1982). L'information hydrologique relative aux bassins étudiés ayant été utilisée pour résoudre les problèmes d'estimation de la pointe de crue et de sa durée, du temps caractéristique de crue, du rapport entre débit instantané et débit moyen et de détermination d'un coefficient d'écoulement direct sur des petits bassins versants non jaugés. Au moment de la réalisation de ces études, la période d'observation des débits sur la Solre était très réduite et les paramètres obtenus devaient donc être réactualisés ; ceci fait l'objet des développements proposés ci-dessous.

6.1. - ETUDE STATISTIQUE DES DEBITS MAXIMA INSTANTANES ANNUELS

6.1.1. Répartition mensuelle des crues

On peut apprécier la distribution des crues dans l'année en consultant le document 106. Plus de 80 % des crues supérieures à 3,5 m³/s ont lieu d'octobre à avril et les mois fréquemment touchés sont ceux de décembre, février, janvier et mars.

Les mois d'août et de septembre n'ont jamais connu de débits instantanés atteignant 3 m³/s.

Sur un total de 9 crues dommageables (crues dont le niveau dépasse 10 m³/s), trois ont lieu en février contre deux en mars et une pour chacun des mois de janvier, mai, juillet et novembre.

Le débit maximum instantané le plus élevé connu sur la Solre survient en juillet 1980 et s'exprime par un niveau très élevé (54,8 m³/s) qui justifie une étude statistique particulière des débits de crue.

	JANV.	FEV.	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL.	AOÛT	SEPT.	OCT.	NOV.	DEC.
1973		6,0			4,3							
1974		8,3								4,2 8,3	8,2	4,4 9,3
1975	8,4		8,8									3,5
1976		9,4										
1977		4,0		3,9								
1978	3,8	5,8	4,8		8,1		4,5					
1979		9,1	8,9								6,3	6,5 4,7
1980	5,1	11,6	11,1	4,2			54,8				5,2	7,2 7,4
1981	7,6 21,8	3,7	11,1			6,0 7,3				7,3		9,4 8,4
1982	4,9		4,0	6,4	11,4					4,5	6,1	7,3
1983	5,9	13,0	3,9 8,1		9,2 4,9		4,3					
1984	5,8	10,3		5,4		4,1				4,0 4,4	13,0	5,5
TOTAL	8	10	8	4	5	3	3	0	0	6	5	11

106 : Répartition mensuelle des crues dont le débit maximum instantané est supérieur à 3,5 m³/s à Ferrière-la-Grande

6.1.2. Estimation des probabilités d'apparition des crues

La construction d'ouvrages de génie civil de franchissement, de barrages pose traditionnellement le problème du dimensionnement : celui-ci est résolu par l'estimation des probabilités des débits de crues. Le choix du niveau de la crue de projet est en dernier ressort un choix de nature économique où le critère d'optimisation est de minimiser le coût total de construction de l'ouvrage. L'aide à la décision est fournie par le coût d'investissement pour se protéger contre une crue donnée, par le coût des dégâts provoqués par cette crue et par la probabilité de ne pas dépasser cette crue. Cette probabilité est déterminée par l'étude hydrologique.

On dispose ainsi d'une estimation du débit (quantile) au delà duquel le concepteur prend un risque dont il sera averti. Dans tous les cas, il faut insister sur le fait que l'estimation obtenue est elle-même encadrée par les bornes d'un intervalle de confiance dont la largeur s'accroît avec la sécurité choisie et à l'intérieur duquel on doit trouver la valeur qui sera réellement observée.

Plus récemment se développent des demandes concernant la définition des zones inondables et leur classement en fonction du risque croissant d'inondabilité. L'étude topographique des zones inondables alliée à une étude statistique probabiliste des débits de crue permet en effet de connaître les zones exposées à une crue de probabilité donnée. Pour des probabilités d'occurrence de plus en plus fortes, on peut ainsi déterminer les zones dont le risque d'inondabilité est croissant et définir un plan d'exposition aux risques servant de référence pour les plans d'occupation des sols.

Les méthodes de recherche des risques associés aux phénomènes extrêmes sont très nombreuses et le but est de trouver celle qui s'ajuste le mieux possible aux différentes valeurs prises par la variable.

On a choisi de mesurer les risques de fortes crues par trois méthodes différentes :

- . méthode du renouvellement appliquée à tous les débits maxima instantanés supérieurs au seuil de 3,5 m³/s.
- . ajustement de Galton sur les débits maxima instantanés annuels (Q.M.I).
- . ajustement de Fréchet sur les débits maxima instantanés annuels (Q.M.I).

Ces trois méthodes ont été appliquées à l'échantillon des débits maxima instantanés observés à la station de Ferrière-La-Grande de 1973 à 1984. Pour la loi du renouvellement, l'échantillon comprend 63 valeurs supérieures à 3,5 m³/s ; pour les lois de Galton et de Fréchet, on choisit le débit maximum instantané le plus élevé de chaque année, ce qui fournit un échantillon de 12 valeurs.

On rappelle que le principe de l'ajustement statistique est de rechercher une loi adéquate représentant la fonction de probabilité et d'obtenir ainsi une expression mathématique reliant la valeur d'une variable à sa probabilité d'occurrence. Ceci permet alors, dans une mesure raisonnable, d'extrapoler vers les valeurs de la variable présentant de faibles probabilités d'occurrence, c'est à dire vers les quantiles rares de la distribution.

6.1.2.1. Ajustement des débits maxima instantanés supérieurs à un seuil par la méthode du renouvellement

a - Constitution des échantillons

Le nombre d'années d'observation étant faible, on crée des échantillons à la fois plus stables et de taille plus importante en sélectionnant les débits maxima supérieurs à un seuil en veillant à choisir des événements indépendants. Les débits successifs sont en effet fortement corrélés entre eux du fait de l'inertie du phénomène d'écoulement. L'abaissement du seuil de sélection élargit l'échantillon mais le risque de dépendance interne est plus élevé. Le choix du seuil (3,5 m³/s) est ici un compromis entre les exigences d'indépendance et la taille de l'échantillon.

L'ajustement de ces valeurs relève de la méthode du renouvellement (Miquel, 1984 - Michel, 1987).

Plus complexe à utiliser que la méthode des maxima annuels, la méthode de renouvellement prend en compte des crues qui n'ont pas eu la "chance" d'être le maximum de l'année.

L'exigence d'homogénéité impose que toutes les crues proviennent d'un même phénomène. Un examen sur l'origine des crues retenues permet de juger de cette homogénéité. Les causes d'hétérogénéité sont les différences de régime climatique sur un même bassin versant, les concomitances de crues en provenance de différents affluents, les causes accidentelles ou dues à l'intervention humaine.

Au niveau de la Solre :

. le régime climatique n'est pas parfaitement homogène ; au vu de la faible durée d'observation, on a cependant préféré conserver un seul échantillon.

. les problèmes de concomitance des crues d'affluents sont inconnus faute de renseignements en amont. Les crues de l'affluent du Stordoir influencent d'autant plus les débits maxima d'aval qu'elles sont en phase avec la Solre.

b - Application du modèle de renouvellement

Le modèle de renouvellement choisi combine ici une loi de Poisson et une loi de Weibull dont la forme générale est la suivante :

$$F(Q) = 1 - \mu e^{-\rho (Q - S_0)^P}$$

Le seuil S_0 est ici de 3,5 m³/s.

Ce modèle est décrit en détail en annexe VI (modèle de renouvellement). L'ensemble des calculs et le tracé des ajustements sont réalisés par le programme RENOUELEMENT (cf. annexe informatique).

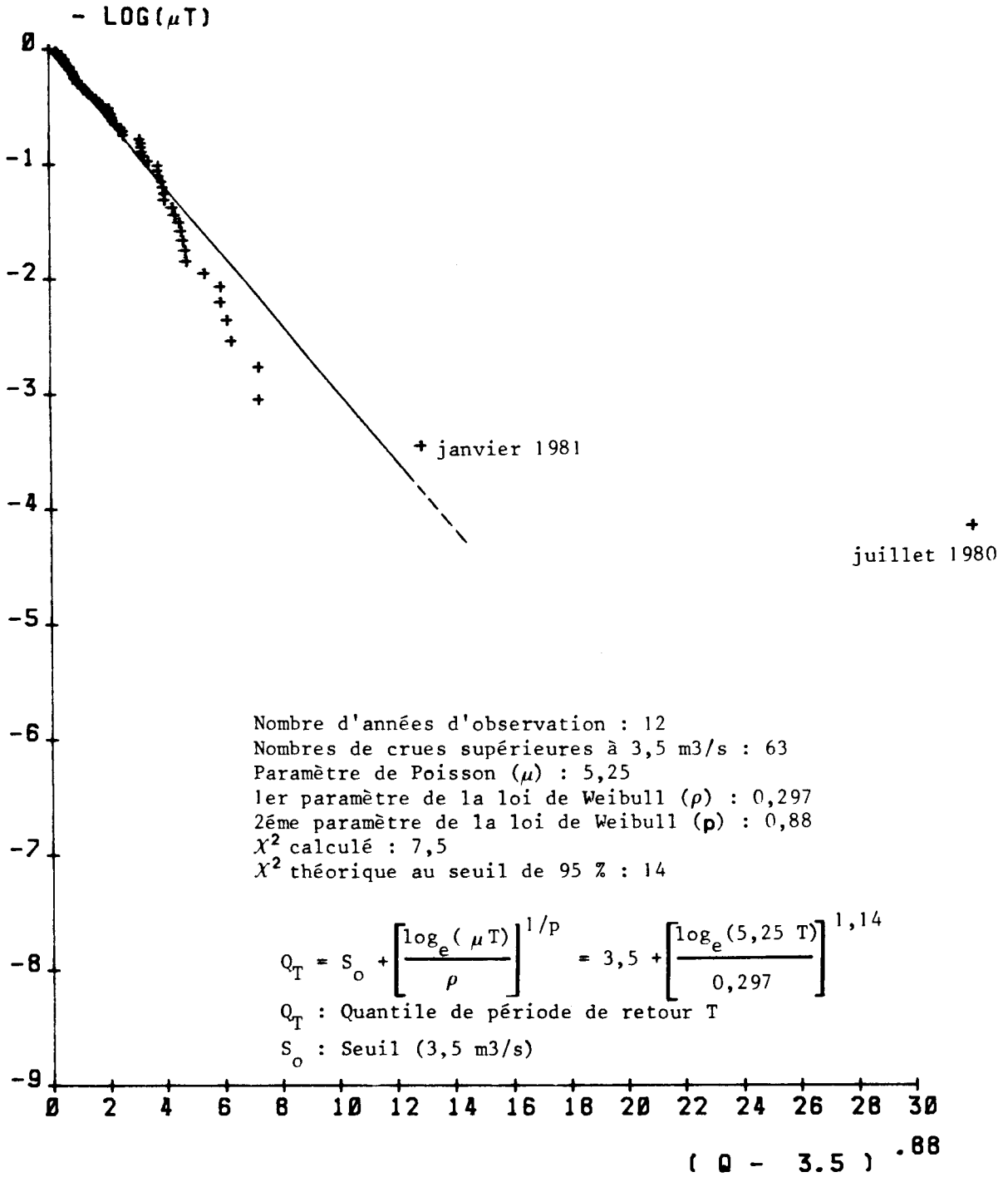
On peut juger de l'adéquation du modèle par la visualisation graphique présentée sur le document 107.

Les paramètres μ , ρ et p ainsi que leurs variances sont présentés sur ce même document. Ils sont calculés par la méthode du maximum de vraisemblance ou l'analyse bayésienne (cf annexe renouvellement).

La prise en compte de la crue de juillet 80 perturbe visiblement l'ajustement réalisé ; elle se trouve en effet nettement en dehors de l'ajustement. Il nous semble que la loi ne doit pas être utilisée au delà d'une probabilité d'occurrence de 20 ans. Les quantiles et les intervalles de confiance à 70 % obtenus par ce modèle seront présentés dans le document 110, conjointement avec les résultats des ajustements de Galton et de Fréchet.

c - Recherche du nombre moyen annuel de crues supérieures à Q.

Le modèle de renouvellement permet de calculer le nombre moyen annuel de crues supérieures à une valeur choisie Q.



107 : Ajustement des débits maxima instantanés de la Solre par la méthode du renouvellement (débits supérieurs à 3,5 m³/s)

En effet, la probabilité d'avoir k crues supérieures à Q se calcule en combinant la loi de Poisson et la loi binomiale et l'on obtient :

$$\begin{aligned} \text{Prob}(k \text{ crues } > Q) &= \text{Prob}(k \text{ crues et ces } k \text{ crues } > Q) \\ &+ \text{Prob}(k+1 \text{ crues et } k \text{ d'entre elles } > Q) \\ &+ \text{Prob}(k+2 \text{ crues et } k \text{ d'entre elles } > Q) \\ &+ \dots\dots\dots \\ &+ \dots\dots \\ &= \text{Prob}[N \text{ crues avec } k > Q \text{ et } N-k < Q] \end{aligned}$$

soit :

$$\text{Prob}(k \text{ crues } > Q) =$$

$$\sum_{N=k}^{\infty} e^{-\mu} \frac{\mu^N}{N!} \frac{N!}{(N-k)!k!} [e^{-\rho(Q-S_0)^P}]^k [1 - e^{-\rho(Q-S_0)^P}]^{N-k}$$

En simplifiant, on obtient :

$$e^{-\left(\mu e^{-\rho(Q-S_0)^P} \right)} \frac{\mu e^{-\rho(Q-S_0)^P}}{k!}$$

C'est à dire une loi de Poisson de paramètre $\mu e^{-\rho(Q-S_0)^P}$ qui représente sa moyenne et sa variance.

Le nombre moyen annuel de crues dépassant Q s'écrit donc :

$$\mu(Q) = \mu e^{-\rho(Q-S_0)^P}$$

La période de retour correspond ici à l'inverse du nombre moyen annuel de crues.

Le nombre moyen annuel de crues dont le débit de pointe dépasse Q (en m3/s) a donc été calculé en utilisant les paramètres de la loi de renouvellement définie précédemment :

Q :	4	5	6	7	8	9	10	12	14	20
$\mu(Q)$:	4,5	3,4	2,7	2,1	1,7	1,4	1,1	0,7	0,5	0,16

Il nous paraît bien refléter les risques de débordement encourus.

Il y a ainsi de fortes chances que l'on observe chaque année une pointe de crue supérieure à 10

m³/s (nombre moyen annuel de crues : 1,1) et une année sur six environ un débit supérieur à 20 m³/s.

N.B : On s'est volontairement limité cependant à des débits inférieurs à 20 m³/s car le débit de juillet 1980 montre que la loi est inadéquate pour les faibles probabilités d'occurrence. On précise en outre que ce nombre moyen annuel de crues ne donne que des valeurs probables du nombre de crues supérieures à Q effectivement observées chaque année, la stationnarité de l'échantillon n'étant pas parfaite.

6.1.2.2. Ajustement des débits maxima instantanés par la loi de Galton

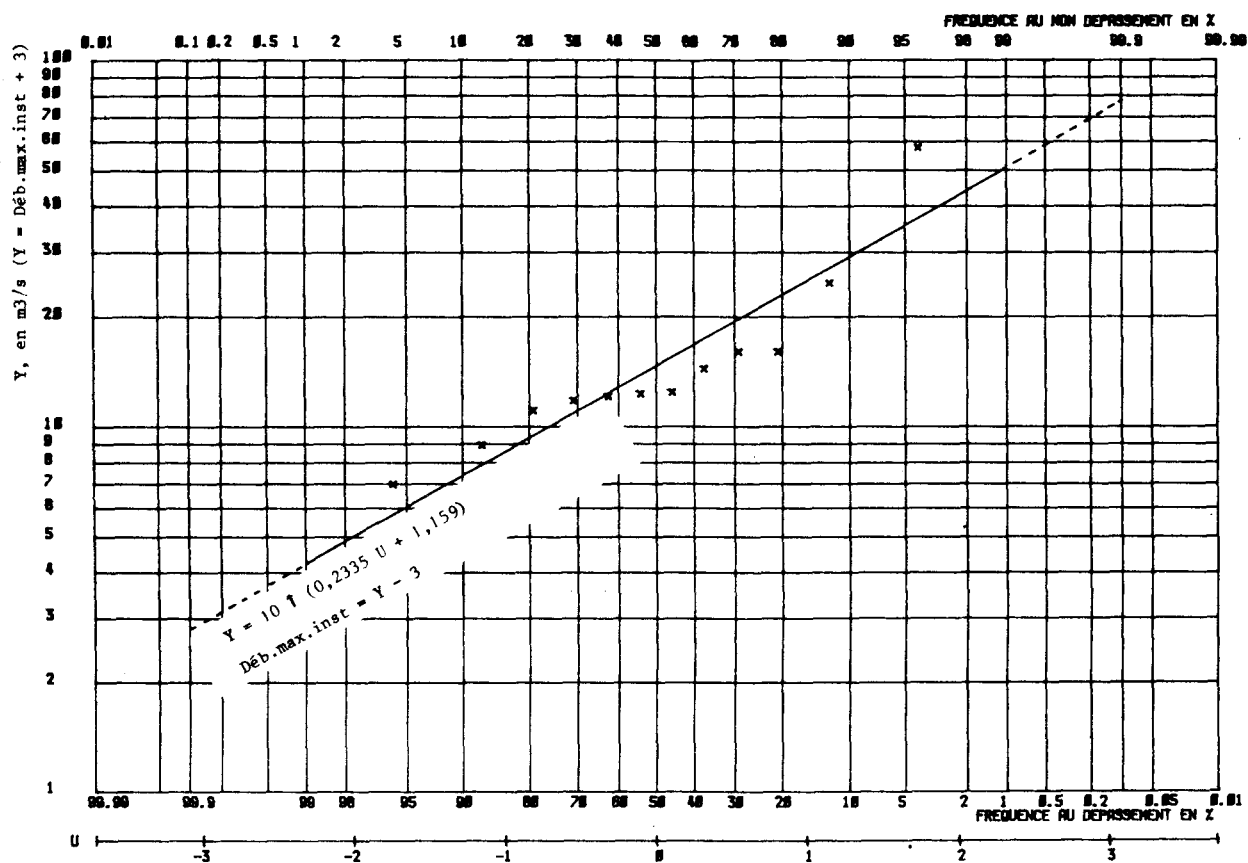
Les lois de renouvellement permettent habituellement de bonnes adéquations aux échantillons de variables extrêmes comme les débits de pointe. On a vu que la loi du renouvellement devenait inadéquate pour les faibles probabilités d'occurrence.

Le problème restant entier, on a choisi d'ajuster l'échantillon des logarithmes décimaux des débits maxima instantanés annuels de la Solre par une loi de Galton (annexe IV) en effectuant un changement de variable du type :

$$Y = \log_{10}(Q - x_0)$$

Par la méthode des moments (annexe IV), on obtient une valeur de - 3 pour le paramètre X_0 , ce qui fournit la variable :

$$Y = \log_{10}(Q + 3), \text{ sur laquelle on a pratiqué l'ajustement (document 108).}$$



108 : Tracé de l'ajustement de Galton sur les débits maxima instantanés annuels de la Solre à Ferrière-la-Grande de 1973 à 1984

On note que l'adéquation de la loi est meilleure bien que la crue de 1980 reste quelque peu à l'écart de la droite d'ajustement.

Les quantiles et les intervalles de confiance à 70 % obtenus par cette loi seront présentés dans le document 110, conjointement avec les résultats du modèle de renouvellement et de la loi de Fréchet.

6.1.2.3. Ajustement des débits maxima instantanés par la loi de Fréchet

La loi de Fréchet correspond à la loi de Gumbel, à un changement de variable d'ordre logarithmique prés (annexe V), soit :

$$Y = \log_{10} Q$$

Le document 109 présente le graphe d'ajustement et l'expression de la loi obtenus par une routine du programme AJTRAC (cf.annexe informatique). Il nous semble que la loi de Fréchet réalise la meilleure adéquation. Les résultats sont présentés ci-dessous.

6.1.2.4. Résultats obtenus par les trois méthodes

Les quantiles et les intervalles de confiance à 70 % calculés selon le modèle de renouvellement et les lois de Galton et Fréchet sont présentés dans le document 110. On note que le quantile décennal de la loi de Fréchet est de 25,9 m³/s ; il est quasiment identique à celui que l'on obtient par la loi de Galton (25,7 m³/s) et proche de celui que l'on obtient par le modèle de renouvellement (22,5 m³/s), moins adéquat mais plus stable puisqu'il contient 63 valeurs contre 12 pour les lois de Galton et Fréchet ; il nous semble qu'une valeur intermédiaire de 24 m³/s constitue une bonne estimation du débit de pointe décennal.

Pour les quantiles plus rares, on utilisera plutôt les quantiles obtenus par la loi de Fréchet dont l'adéquation est meilleure . Pour le quantile vingtenal, on obtient une valeur voisine de 37 m³/s.

Il faut extrapoler prudemment vers les quantiles cinquantennaux et centennaux car la loi du renouvellement n'est pas adéquate et les lois de Galton et de Gumbel portent sur un échantillon de petite taille ; on note que les lois de Galton et de Fréchet divergent fortement et que les quantiles centennaux des débits maxima instantanés annuels sont respectivement de 47 et 86 m³/s. Les intervalles de confiance deviennent très élevés, notamment pour la loi de Fréchet. Personnellement, j'estime que les estimations fournies par la loi de Fréchet sont les meilleures et qu'elles sont en accord avec l'information historique glanée auprès des riverains.

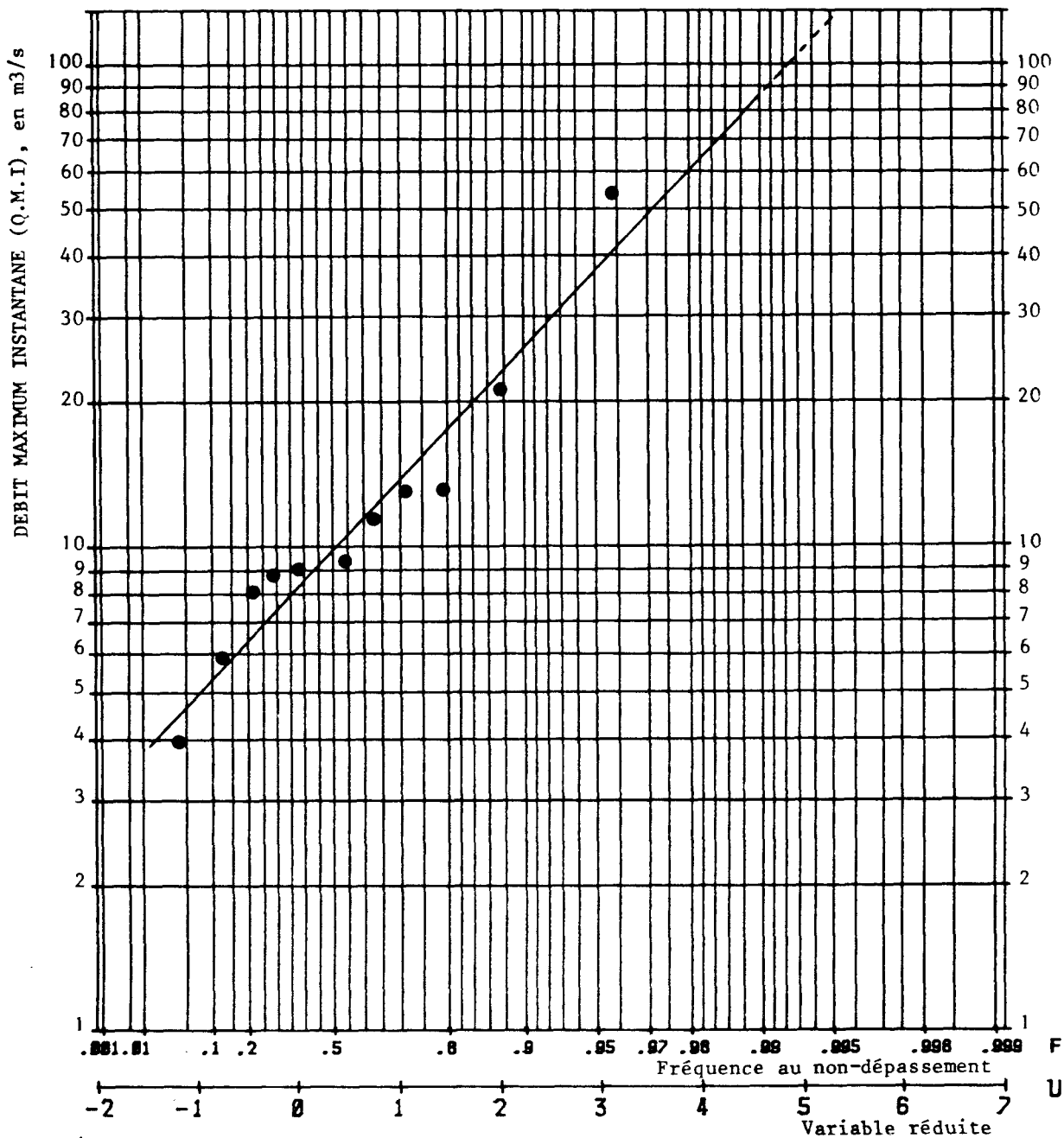
$$\text{LOG}_{10}(\text{Q.M.I.}) = 0,2222 U + 0,9128$$

$$\text{Q.M.I.} = 10 \uparrow (0,2222 U + 0,9128)$$

$$U = -\text{LOG}_e(-\text{LOG}_e F) \quad T = 1 / (1 - F)$$

F : Fréquence au non-dépassement

T : Période de retour en années



109 : Tracé de l'ajustement de Fréchet sur les débits maxima instantanés annuels de la Solre à Ferrière-la-Grande de 1973 à 1984

	DEBITS MAXIMA INSTANTANES seuil:3,5 m3/s (m3/s)	DEBITS MAXIMA INSTANTANES (m3/s)	DEBITS MAXIMA INSTANTANES (m3/s)
TYPE D'AJUSTEMENT	RENOUVELLEMENT	GALTON	FRECHET
QUANTILE 2 ANS I.C 70 %	-	11,4 9,2-14,1	9,9 8,2-12,6
QUANTILE 3 ANS I.C 70 %	-	15,2 12,3-18,7	13 10,6-18,1
QUANTILE 5 ANS I.C 70 %	-	19,7 15,6-24,6	17,6 13,6-27,8
QUANTILE 10 ANS I.C 70 %	22,5 19,2-25,8	25,7 19,9-33,1	25,9 18,5-48,5
QUANTILE 20 ANS I.C 70 %	26,3 22,1-30,5	31,9 23,9-42,2	37,4 24,6-83,3
QUANTILE 50 ANS I.C 70 %	(31,4) (26-36,8)	40,5 29,3-55,5	60,3 35,5-168
QUANTILE 100 ANS I.C 70 %	(35,4) (28,9-41,9)	47,3 33,4-66,7	86,2 46,6-286

110 : Quantiles et intervalles de confiance à 70 % calculés selon un modèle de renouvellement et les lois de Galton et Fréchet sur les débits maxima journaliers et instantanés de la Soire de 1973 à 1984

6.1.2.5. Crue du 21 juillet 1980

La crue du 21 juillet 1980 (document 115) pose un problème particulier pour plusieurs raisons :

- c'est la plus forte crue enregistrée sur le bassin de la Solre depuis l'installation de la station limnigraphique de Ferrière-la-Grande en 1973 ;
- elle survient pendant un mois d'été et elle est générée par une averse qui n'est pas de nature orageuse ;
- son débit maximum instantané (54,8 m³/s) est exceptionnel si on le compare aux crues d'intensités immédiatement inférieures (21,8 et 13 m³/s pour les seconde et troisième plus fortes crues). Sur le bassin d'Etroeungt, dont les débits maxima sont bien corrélés avec ceux de Ferrière (cf. paragraphe 6.1.3.), le débit maximum instantané estimé est de 28 m³/s;
- le volume de crue est voisin de 3 millions de m³ avec une décrue particulièrement rapide;
- l'averse génératrice de la crue n'est pas de nature orageuse mais elle est particulièrement forte. On note les valeurs suivantes : 11 mm le 18 (de 8 heures à 24 heures), 17 mm le 19 (de 0 heure à 24 heures) et 56 mm le 20 juillet (de 0 heure à 24 heures). L'averse cesse le 21 juillet à 2 heures ; la pointe de crue se produit le 21 juillet à 10 heures du matin.
- on note de fortes intensités en fin d'averse, ce qui est particulièrement dommageable puisque les coefficients de ruissellement sont alors maxima (lame moyenne de 14 mm le 20 juillet de 18 à 20 heures avec localement 20 mm à Sars-Poteries, de 10 mm de 20 heures à 22 heures). En fin d'averse, le 20 juillet au soir, la lame moyenne brute précipitée en six heures est proche de 29 mm.
- l'examen des précipitations observées sur les trois pluviographes montre que les précipitations du 20 juillet sont plus fortes et plus intenses vers l'amont du bassin (Eccles et Sars-Poteries).
- les pluies antérieures sont fortes (80 mm du 6 au 14 juillet) avec une courte accalmie du 15 au 17 (moins de 1 mm) et une température moyenne de 14°C. Le débit de base le 18 juillet au matin est voisin de 2 m³/s, ce qui n'est pas exceptionnel.

- on ne peut enfin exclure l'hypothèse d'une concordance des phases de crue au confluent de la Solre et du Stordoir, ce dernier affluent drainant les eaux provenant de la partie Sud-Ouest du bassin.

L'ensemble de ces raisons explique l'importance de cette crue et le fait qu'on l'intègre mal dans un ajustement statistique. Les ajustements sur les variables extrêmes sous-entendent en effet que les échantillons soient homogènes ; dans le cas contraire ceux-ci sont biaisés et les lois que l'on peut tirer de ces ajustements sont inadéquates.

L'intérêt des ajustements statistiques est cependant d'estimer la probabilité des événements graves et celle de la crue de 1980 doit être calculée même si les ajustements sont imparfaits.

Si l'on se réfère à l'équation de la droite de Fréchet obtenue précédemment (document 109) :

$$\log_{10} Q.M.I = 0,2222 u + 0,9128$$

(u, variable réduite)

le débit de pointe de 54,8 m³/s observé en juillet 1980 et qui a causé d'importants dégâts fournit la valeur de la variable réduite u suivante :

$$u = (\log_{10} 54,8 - 0,9128) / 0,2222 = 3,72$$

ce qui correspond à une fréquence au dépassement de :

$$F = \exp(-\exp(-u)) = 0,976$$

c'est à dire à une période de retour T :

$T = 1 / (1 - F) = 42 \text{ ans}$

Notons que le calcul de cette période de retour reste malgré tout imprécis vu le faible nombre d'années d'observation (12 années) et l'ampleur des intervalles de confiance.

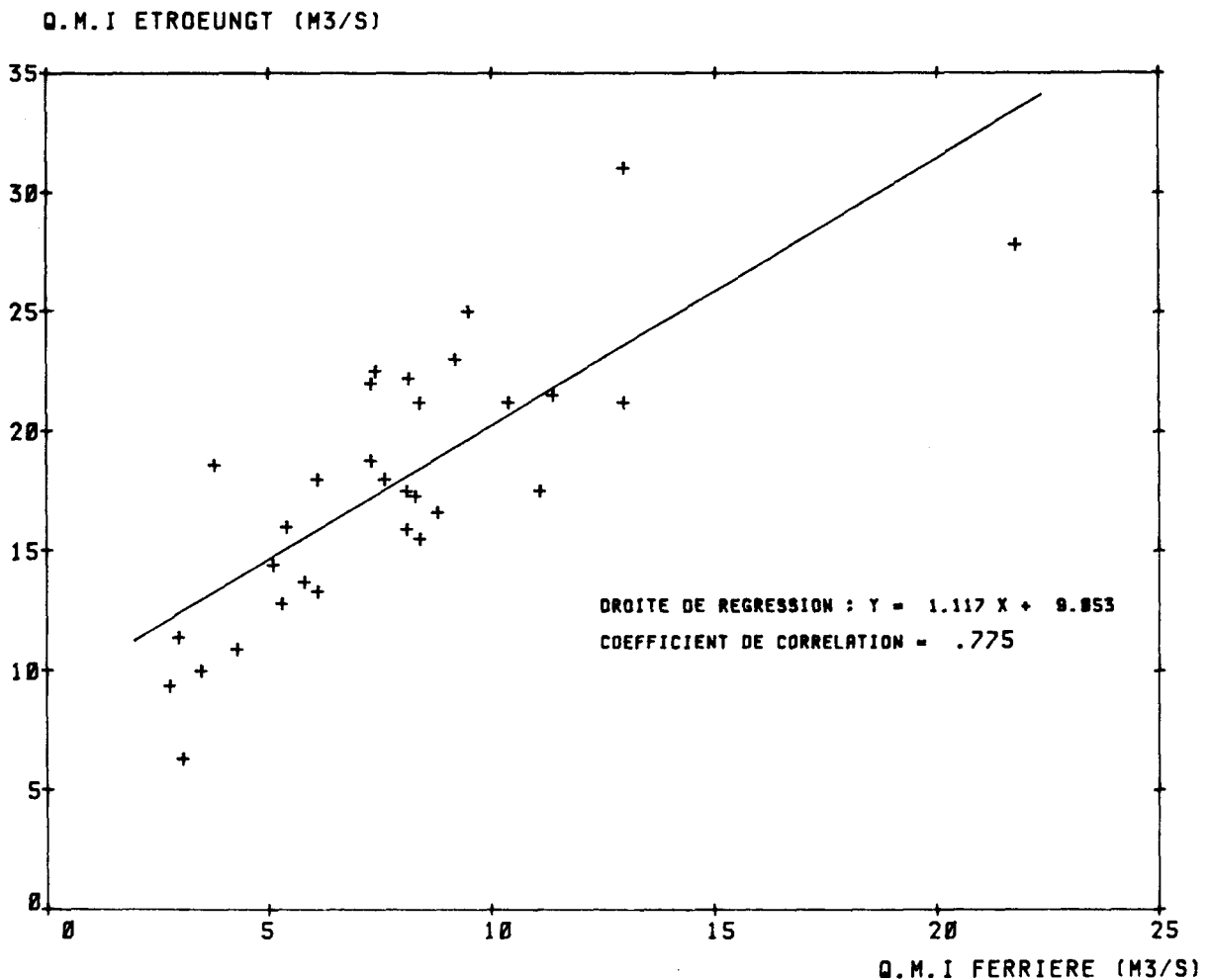
Ce type d'ajustement devra être réactualisé au jour de son utilisation en intégrant les nouvelles données recueillies.

Les hypothèses expliquant l'ampleur de la crue de 1980 par des causes artificielles ne paraissent pas fondées ; il semble que deux causes simultanées soient plus vraisemblables : celle d'une forte saturation du bassin associée à une forte pluviométrie ; ces hypothèses seront considérées ultérieurement dans le paragraphe 6.2. consacré à la simulation des débits moyens journaliers.

6.1.3. Comparaison avec les maxima d'Etroeungt

Les débits maxima instantanés entre les deux stations sont relativement bien corrélés (document 111). Sur un échantillon de 31 couples de crues concomitantes (hormis la crue de juillet 80), le coefficient de corrélation de 0,78 est significatif, ce qui correspond à une relation :

$$Q \text{ Etroeungt} = 1,12 Q \text{ Ferrière} + 9,1$$



111 : Corrélation des débits maxima instantanés observés à Ferrière-la-Grande (Solre) et à Etroeungt (Helpe Mineure), de 1973 à 1984

Les débits maxima instantanés sont cependant toujours très supérieurs à Etroeungt. Sur ce même échantillon de 31 crues, les débits maxima instantanés, pour des crues dont le temps de base est voisin, sont en moyenne 2,3 fois plus élevés à Etroeungt qu'à Ferrière, alors que les surfaces des bassins versants sont dans un rapport de 1,5 (175 km² à Etroeungt et 115 km² à Ferrière-la-Grande).

Une seule crue, celle du 15/1/81, présente des débits maxima dont le rapport est comparable à celui du bassin versant (21,8 contre 27,8 soit un rapport d'environ 1,3). On note que le débit maximal indiqué pour cette crue à Etroeungt est un débit estimé et qu'on se situe en fin de période de gel, ce qui accroît l'imperméabilité du sol et augmente la part du ruissellement.

Si l'on inclut la crue de juillet 80 dans l'échantillon, le coefficient de corrélation diminue fortement et chute à 0,59. Bien que ce coefficient reste supérieur au seuil de significativité ($r = 0,45$ au seuil de 1%), cette brusque diminution montre bien la particularité de la crue de juillet 1980 à Ferrière ; le calcul de corrélation devient lui-même inadéquat puisque les coefficients de variation de la série des débits à Ferrière-la-Grande évoluent alors de 0,49 à 1, ce qui montre que l'on passe à une distribution totalement dissymétrique. On sait (cf. annexe II) que ceci nous éloigne des conditions d'application de l'analyse de corrélation.

6.1.4. Comparaison avec les débits maxima à Maroilles

La station de Maroilles est située sur l'Helpe mineure, en aval de la station d'Etroeungt, et immédiatement à l'amont de la confluence avec la Sambre. Ce confluent correspond à une zone inondable, l'Helpe mineure apportant en ce point les eaux drainées par un bassin versant de plus de 275 km². On obtient des hydrogrammes de crue dont l'étalement est naturellement plus grand et dont on peut calculer le débit maximum par l'équation :

$$Q \text{ Maroilles} = 0,92 Q \text{ Ferrière} + 1,05 Q \text{ Etroeungt} + 2$$

Cette équation étant calée sur 29 crues concomitantes (l'échantillon n'inclut pas la crue de juillet 1980) avec une corrélation débit calculé-débit mesuré de 0,91.

Le délai de prévision des débits à Maroilles est cependant mince puisque les débits maxima à Maroilles y sont observés 1 à 2 heures après ceux d'Etroeungt et de Ferrière-la-Grande, avec un délai moyen de 1,7 heures, soit une centaine de minutes.

6.1.5. Niveau d'alerte dans le secteur de Ferrière-la-Grande

Pour un niveau voisin de 10 m³/s à la station de Ferrière-la-Grande, des problèmes d'inondation surviennent donc :

- . immédiatement en amont de Ferrière-la-Grande, dans l'entreprise Spie-Batignolles.
- . à l'aval, dans les usines situées sur la commune de Rousies.

On constate donc que le niveau critique d'inondation n'est pas rare, les méthodes exposées précédemment permettant d'estimer sa fréquence d'apparition.

La protection des entreprises situées sur les rives urbanisées de la Solre à partir de Ferrière-la-Grande paraît insuffisante. Cependant, l'examen de la zone inondable située immédiatement à l'amont de Ferrière-la-Grande amène les constatations suivantes :

. L'entreprise Spie-Batignolles de Ferrière-la-Grande se trouve placée perpendiculairement au cours de la Solre dès son entrée dans la ville, ce qui réalise un véritable barrage artificiel. Précédemment, le cours de la Solre a été détourné au niveau de l'aire de stockage faisant front au cours d'eau et la Solre présente ainsi un coude à 90 degrés contournant l'aire de stockage par l'Ouest.

. Quelques dizaines de mètres plus loin, le cours rencontre un goulot d'étranglement constitué par le pont de la voie ferrée, ce qui entrave l'écoulement correct des eaux et conduit à une montée des eaux qui menace directement l'aire de stockage et les équipements industriels eux-mêmes, dont certains sont implantés sous le niveau du sol de l'usine.

. L'aire de stockage est actuellement protégée par un léger remblaiement dont la hauteur est insuffisante. En l'absence d'un bassin de retenue en amont de Ferrière-la-Grande permettant de diminuer le débit de pointe, une solution de défense passive pourrait être étudiée pour dimensionner, en fonction des crues probables, un ouvrage de protection sur le pourtour de l'aire de stockage et des bâtiments. Cet aménagement serait réalisé directement contre les surfaces à protéger pour éviter de trop réduire les champs naturels d'épandage. Il convient de rappeler que ce type d'aménagement peut déplacer le problème vers l'aval et qu'il doit être replacé dans le contexte hydraulique local.

. On notera par ailleurs que le tronçon de voie ferrée reliant Ferrière-la-Grande à Sars-Poteries et Fourmies vers le Sud est maintenant démantelé et qu'il ne subsiste ni rails, ni traverses et crocodiles ; il ne reste de l'ancien tracé que le terre-plein, les banquettes et le ballast ; ceux-ci forment encore un remblai artificiel qui limite la zone inondable constituée par le lit mineur gauche de la Solre ; le pont de

la voie ferrée est lui-aussi inutile et il nous semble qu'un aménagement de la zone pourrait partiellement contenir les volumes de crue qui y transitent. Une étude détaillée de la zone doit être envisagée et pourrait combiner les impératifs de protection contre les crues et l'aménagement touristique.

Un suivi empirique de la montée de crue est, depuis peu, effectué aux abords de l'aire de stockage par l'entreprise Spie-Batignolles elle-même mais ce dispositif ne permet aucune prévision. Il semble qu'une station limnigraphique en amont et/ou son couplage avec un modèle de prévision permettrait de développer un système d'annonce de crue et d'améliorer la défense de la basse vallée de la Solre.

6.2. SIMULATION DES DEBITS MOYENS JOURNALIERS PAR MODELE A DEUX RESERVOIRS

6.2.1. Description générale du modèle

Nous avons choisi de tester un modèle global à réservoirs dérivé du modèle CREC (Comary et Guilbot, 1969) et adapté par l'équipe de la division hydrologie du CEMAGREF (Michel, 1983 - Leviandier, 1978). Ce modèle cherche à simuler les débits journaliers mesurés en une station à partir des pluies journalières et de l'évapotranspiration.

Ce modèle utilise deux réservoirs : (cf. schéma document 112)

- un réservoir sol de contenu S et de capacité A, matérialisant la fonction de rendement de la pluie.
- un réservoir "eau gravitaire" de contenu R et de capacité B matérialisant la fonction de transfert de la pluie "efficace" en débit.

A et B sont les paramètres du modèle. Le pas de temps est journalier.

Remarque : Dans ce qui suit, l'utilisation d'un indice j pour les valeurs de pluie, d'évapotranspiration et de débit désigne la valeur cumulée de la variable du début du jour j à la fin du jour j, exprimée en lame d'eau (mm).

Les températures T_j correspondent à la température moyenne du jour J, exprimée en degrés C.

Pour les réservoirs, l'indice j désigne leur état à la fin du pas de temps, c'est-à-dire à la fin du jour j. Il en est de même pour le coefficient de rendement CR_j .

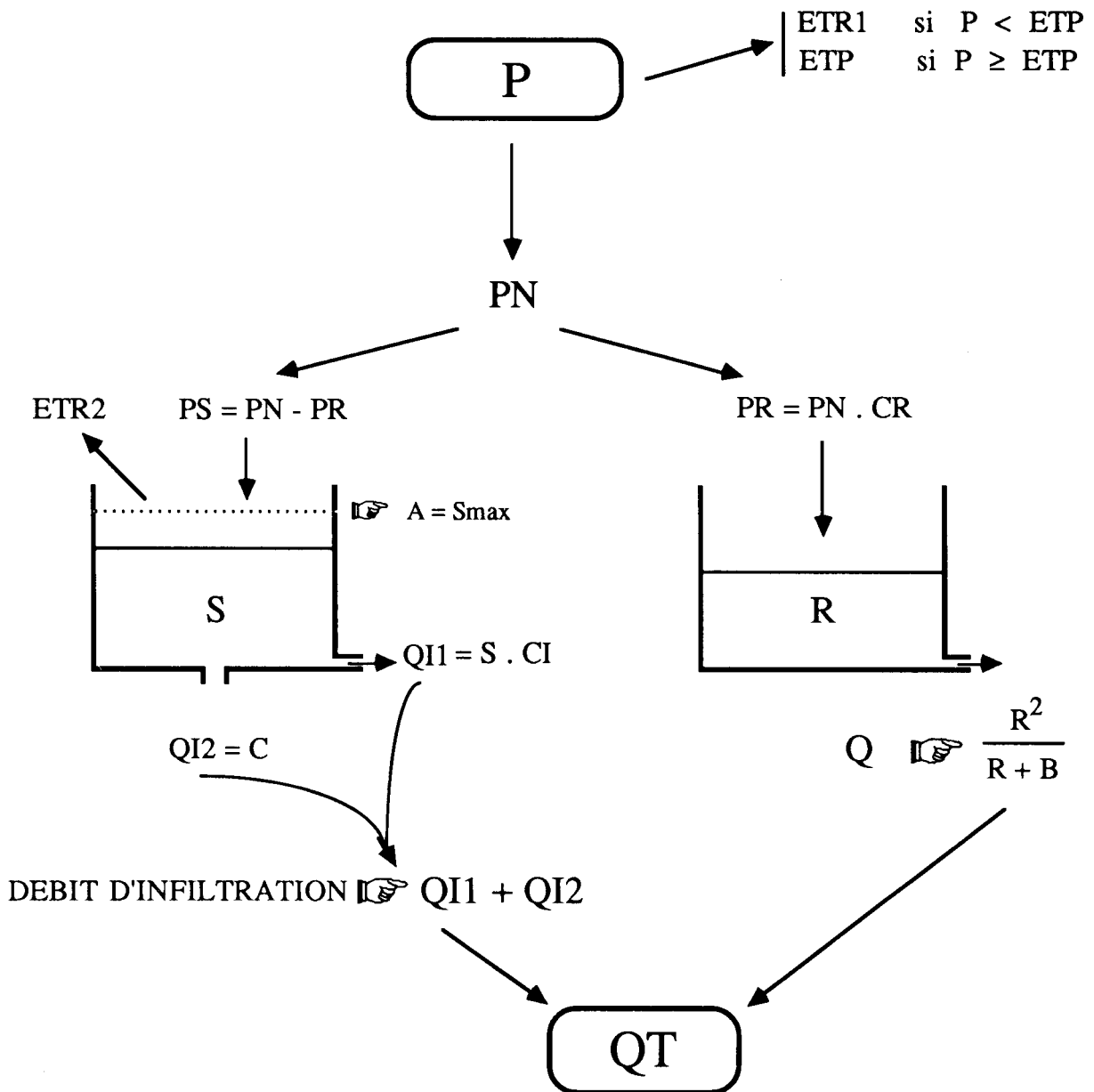
L'évapotranspiration potentielle (ETP) est calculée par une formule simple liée à la température moyenne journalière T_j :

$$ETP_j = f(T_j) \quad \text{cf. 6.2.3.2.}$$

L'évapotranspiration réelle (ETR) est la part de l'évapotranspiration qui s'exprime réellement compte tenu du stock d'eau disponible. Ce stock d'eau disponible est représenté par la pluie et le contenu S du réservoir sol limité par sa capacité A :

$$ETR_j = g(ETP_j, P_j, S_j, A)$$

Cette fonction peut prendre diverses formes et son choix optimum est confié à l'utilisateur du modèle.



112 : Schéma de fonctionnement du modèle GR2 :

P : Pluie journalière
ETP : Evapotranspiration potentielle
 $ETP = (T/6)^{1,4}$
T : Température journalière moyenne
ETR : Evapotranspiration réelle
ETR1, ETR2 : Composantes de l'ETR
S : Contenu du réservoir Sol
R : Contenu du réservoir R
PN : Pluie alimentant les réservoirs R et S

PR : Pluie alimentant le réservoir R
PS : Pluie alimentant le réservoir S
Q : Débit de sortie du réservoir R à $j+1$
QI : Débit d'infiltration du réservoir S à $j+1$
CI : Coefficient d'infiltration [$CI = F \cdot (S/A)^2$]
QI1, QI2 : Composantes de **QI**
QT : Débit moyen journalier simulé à $j+1$ ($Q + QI$)
A, B, C, F : Paramètres du modèle



La pluie PN_j , correspond à la part de la pluie brute P_j qui reste disponible pour l'alimentation des deux réservoirs S et R :

$$PN_j = P_j - ETR_j$$

Elle se fractionne pour alimenter ensuite les deux réservoirs S et R :

PR_j alimente le réservoir R proportionnellement au coefficient de rendement CR :

$$PR_j = PN_j \cdot CR$$

Le coefficient CR dépend du contenu S et de la capacité A du réservoir sol. Il varie avec l'état de saturation des terrains superficiels :

$$CR = h(S, A)$$

PS_j alimente le réservoir S et correspond à la pluie n'alimentant pas R :

$$PS_j = PN_j - PR_j = PN_j - PN_j \cdot CR$$

Globalement, on a :

$$PN_j = PS_j + PR_j$$

Le réservoir R représente donc le stock d'eau disponible pour l'écoulement. Il permet de calculer le débit Q'_{j+1} en fonction d'un second paramètre B, représentant la capacité du réservoir "eau gravitaire", et du contenu R du réservoir.

Ce dernier réservoir est de type quadratique, ce qui signifie qu'il fournit un débit proportionnel au carré de son contenu R :

$$Q' = k R^2$$

Le débit q' sortant du réservoir R peut s'exprimer par :

$$q' = - dR/dt$$

on obtient donc :

$$- dR/dt = k R^2 \quad \text{ou :}$$

$$- dR/R^2 = k dt$$

Si R' représente l'état du réservoir R à la fin d'un intervalle de temps Δt , on obtient :

$$1/R' - 1/R = k(t + \Delta t) - k t$$

$$\text{avec } R' = R - Q'$$

En remplaçant, on a :

$$1/(R-Q') - 1/R = k \Delta t$$

$$\text{soit } Q' = R^2 / (R + 1/k \Delta t)$$

Pour un intervalle de temps de 1 jour et en posant $B = 1/k$, on obtient finalement :

$$Q'_{j+1} = R_j^2 / (R_j + B)$$

6.2.2. CONTROLE DU MODELE

6.2.2.1. Erreur de prévision et critère de validité du modèle

La validité du modèle repose bien entendu sur son aptitude à fournir des débits calculés proches des débits observés. Outre la visualisation graphique, on retiendra la fonction critère suivante, par rapport aux pluies :

$$FC_p \% = \sqrt{\frac{\sum (Q'_j - Q_j)^2}{\sum P_j^2}} \cdot 100$$

Q'_j : lame écoulee observée pendant le jour J , en mm

Q_j : lame écoulee prévue pour le jour J , en mm

$Q'_j - Q_j$: erreur de prévision, en mm

P_j : Pluie du jour J

Cette fonction critère correspond à l'écart quadratique moyen entre débit observé et calculé, par rapport aux pluies. On cherche alors à minimiser cette fonction critère par itération en utilisant une grille

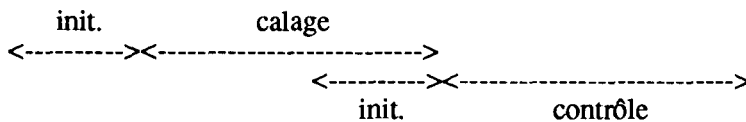
bornée par les limites inférieures et supérieures préalablement choisies pour chaque paramètre A et B.

6.2.2.2. Initialisation, période de calage et de contrôle

La période globale d'observation dont on dispose est divisée en deux périodes de durée sensiblement égale, soit une période de calage et une période de contrôle.

La minimisation de la fonction critère sur la période de calage permet d'obtenir les valeurs optima des paramètres A et B.

On applique ensuite ces valeurs à la période de contrôle et l'on calcule également la fonction critère. L'obtention d'une fonction critère faible et proche de celle obtenue pendant la période de calage constitue un bon résultat et le modèle ainsi défini peut être accepté.



En début de période, les contenus S_0 et R_0 des réservoirs S et R sont indéterminés. On ne peut qu'approcher leurs valeurs par deux relations empiriques :

$$S_0 = 0,7 A$$

$$R_0 = (Q'_1 / 2) (1 + \sqrt{1 + 4 B / Q'_1})$$

Cette seconde relation provient du mode de calcul du débit :

$$Q'_{j+1} = R_j^2 / (R_j + B)$$

Pour le premier pas de temps, cette relation devient :

$$Q'_1 = R_0^2 / (R_0 + B)$$

En remplaçant le débit calculé pour le jour 1 par le débit observé au jour 1, soit Q_1 , on obtient :

$$Q_1 = R_0^2 / (R_0 + B)$$

soit :

$$R_0^2 - Q_1 R_0 - B Q_1 = 0$$

La racine positive de cette équation fournit facilement la valeur de R_0 ci-dessus.

Ces relations restent peu précises et il faut attendre que les contenus se réajustent correctement au cours d'une période d'initialisation dont la durée sera égale à un an. L'ajustement correct des contenus permet alors de débiter le calcul de la fonction critère dès la fin de la période d'initialisation.

6.2.3. Définition du modèle adapté au cas du bassin de la Solre

Différentes versions du modèle GR2 ont été précédemment testées au service hydrologique du CEMAGREF (Edijatno, 1987) en utilisant les données du bassin de l'Orgeval au Theil de 1981 à 1983 (104 km²).

Disposant de plusieurs années d'observation pluviographique (1976-1984) sur le bassin de la Solre, j'ai conservé l'architecture générale du modèle tout en modifiant certaines relations afin de l'appliquer au cas spécifique du bassin.

6.2.3.1. Données utilisées

Les pluies journalières dont on dispose ici ne correspondent pas au jour vrai de 0 heure à 24 heures. Elles résultent d'un cumul de données pluviographiques réalisé par le SRAE Nord - Pas-de-Calais qui répond à la définition de la pluie journalière de la Météorologie Nationale ; la pluie affectée au jour J dans le modèle correspond donc à la pluie P_j tombée du jour J à 8 heures au jour J+1 à 8 heures. On sait par ailleurs que les débits moyens journaliers Q_j correspondent au jour J vrai de 0 heure à 24 heures. On discutera plus loin de ce décalage de temps qui pose la question de son utilisation en prévision.

Le modèle présenté ci-dessous cherche à trouver un ensemble de relations qui permettent d'estimer Q_{j+1} à partir de P_j et de la température. On notera que la relation est recherchée entre deux grandeurs dont le cumul est réalisé sur une durée de 24 heures.

Cette lame moyenne journalière P_j, exprimée en mm, est calculée à partir des pluies journalières mesurées aux pluviographes de Colleret, Eccles et Sars-Poteries en utilisant la méthode de Thiessen :

$$P_j = 0,286 P_{j\text{Colleret}} + 0,33 P_{j\text{Eccles}} + 0,384 P_{j\text{Sars-Poteries}}$$

Les températures journalières sont celles de la station de Thirimont. Elles correspondent à la moyenne de la température minimale et maximale du jour.

Les débits journaliers, exprimés en mm, sont ceux de la station de Ferrière-la-Grande ; ils n'interviennent que pour calculer la fonction critère et servent donc de guide pour le calcul optimal des paramètres.

La période globale d'observation s'étend de 1976 à 1984. Elle sera divisée en une période de calage s'étendant de 1976 à 1980 (zone d'initialisation en 1976) et en une période de contrôle s'étendant de 1980 à 1984 (zone d'initialisation en 1980).

6.2.3.2. Version retenue

Comme on l'a vu dans la présentation générale du modèle, il est possible d'obtenir plusieurs versions du modèle ; la version adoptée doit respecter les équilibres physiques du cycle de l'eau mais aussi converger vers un jeu de paramètres minimisant la fonction critère. La version présentée ci-dessous est le fruit de plusieurs essais visant à respecter ces deux exigences.

a) Calcul de l'évapotranspiration potentielle journalière

La formule utilisée par le CEMAGREF pour la région parisienne est la suivante :

$$ETP_j = (T_j/6)^{1,4}$$

Pour obtenir régionalement des valeurs de l'ETP annuelle compatibles avec les formules classiques, on a retenu la formule suivante :

$$ETP_j = (T_j/7)^{1,4}$$

b) Transformation de l'évapotranspiration potentielle en évapotranspiration réelle

L'évapotranspiration est prélevée sur les précipitations et, au delà, proportionnellement au contenu du réservoir sol .

Soit P_j , la pluie brute :

$$\text{Si } P_j \geq ETP_j, ETR_j = ETP_j.$$

Si $P_j < ETP_j$, l'ETR inclut deux composantes :

- La première (ETR1_j) est égale à la pluie :

$$ETR1_j = P_j$$

- La seconde (ETR2_j) correspond à la part non satisfaite par la pluie (ETP-P) modulée par un "coefficient d'extraction". Ce coefficient exprime la difficulté croissante de remobilisation du stock d'eau du sol au profit de l'évapotranspiration :

$$ETR2_j = (ETP_j - P_j) \cdot \sqrt[3]{S_{j-1} / A}$$

On obtient :

$$ETR_j = ETR1_j + ETR2_j$$

$$ETR_j = P_j + (ETP_j - P_j) \cdot \sqrt[3]{S_{j-1} / A}$$

Si le réservoir sol est saturé (S=A), l'évapotranspiration potentielle s'exprimera pleinement (ETR=ETP).

Dans les autres cas, l'ETR reste inférieure à l'ETP.

Un réservoir sol à demi-saturé (S=1/2 A) ne fournit que 80 % de ce complément. Un réservoir empli à 20 % (S=1/5 A) n'en fournit que 58 %.

c) Pluie disponible pour l'alimentation des réservoirs (PN)

$$PN_j = 0 \text{ si } P_j \leq ETP_j$$

sinon :

$$PN_j = P_j - ETR_j = PS_j + PR_j$$

PS_j : pluie alimentant le réservoir S

PR_j : pluie alimentant le réservoir R

A la fin du pas de temps J, on injecte toute la pluie PN_j dans les réservoirs R et S.

d) Alimentation du réservoir R (PR)

Si PN_j=0, PR_j=0

Si PN_j>0, PR_j dépend du coefficient de rendement :

$$PR_j = PN_j \cdot CR_j$$

avec :

CR_j = 1 si le contenu du réservoir sol est saturé (S=A)

S'il est sous-saturé ($S < A$) :

$$CR_j = (S/A)^2$$

- S peut être l'état du réservoir en début de pas de temps ($S = S_{j-1}$) :

$$CR_j = (S_{j-1}/A)^2$$

Dans ce cas, la pluie nette du jour J produit une pluie efficace PR qui ne tient pas compte de l'évolution du réservoir S pendant le pas de temps J, on risque de sous-estimer l'entrée dans le réservoir R et donc le débit calculé.

- S peut correspondre à l'état estimé (SE_j) du réservoir en fin de pas de temps (Michel, Edijatno, à paraître) :

$$CR_j = (SE_j/A)^2$$

SE_j est obtenu en appliquant le coefficient de rendement du pas de temps précédent :

$$SE_j = S_{j-1} + PN_j \cdot (1 - CR_{j-1})$$

On tient compte ainsi d'une brutale saturation du sol entraînant une hausse de la pluie efficace et un débit calculé plus élevé. On risque cependant de surévaluer la pluie efficace.

J'ai choisi un coefficient de rendement intermédiaire entre les deux précédents :

$$CR_j = (CR_1 + CR_2)/2$$

avec :

$$CR_1 = (S_{j-1}/A)^2$$

$$CR_2 = (SE_j/A)^2 \quad \text{où : } SE_j = S_{j-1} + PN_j(1 - CR_{j-1})$$

e) Alimentation du réservoir S (PS)

Si $PN_j = 0$, $PS_j = 0$

Si $PN_j > 0$, PS_j correspond à la pluie nette n'ayant pas alimenté R :

$$PS_j = PN_j - PR_j$$

f) Evolution du réservoir S

Entrée : PS_j

Sortie : ETR_{2j} , QI_{j+1} (cf. 6.2.3.4.)

avec : $S_j = S_{j-1} + PS_j - ETR2_j$

Si $P_j \geq ETP_j$:

$PS_j = PN_j - PR_j$

$ETR2_j = 0$

Si $P_j < ETP_j$:

$PS_j = 0$

$ETR2_j = (ETP_j - P_j) \cdot \sqrt[3]{S_{j-1} / A}$

g) Evolution du réservoir R

Entrée : PR_j

Sortie : Q calculé (Q'_j)

avec :

$R_j = R_{j-1} + PR_j - Q'_j$

Q'_j : débit calculé pour le jour j

h) Estimation du débit moyen journalier à j + 1

$Q'_{j+1} = R_j^2 / (R_j + B)$

6.2.3.3. Résultats

En itérant le modèle avec une grille de paramètres A et B, on constate que la fonction critère est minimisée pour :

A = 90 et B = 230

(valeurs en mm)

calage : $FC_p = 13 \%$ (période 1976-1980)

contrôle $FC_p = 10 \%$ (période 1980-1984)

6.2.3.4 Complément

Bien que la version adoptée fournisse par itération la fonction critère la plus faible, le tracé des hydrogrammes calculés et observés montre une sous-estimation chronique des faibles débits.

Ce phénomène peut s'expliquer par le mode de calcul du débit. Le débit calculé ci-dessus dépend en effet d'une équation quadratique du réservoir R qui simule une valeur globale incluant le débit de ruissellement mais aussi le débit retardé et le débit de base. En l'absence de pluie ($PR=0$), le réservoir R évolue comme suit :

$$R_j = R_{j-1} - Q'_j$$

Cette équation fournit des valeurs de R et de Q' dont l'évolution en fonction du temps s'exprime bien (en l'absence de pluie) par une équation logarithmique du type :

$$Q' = c t^{-d}$$

t : temps écoulé depuis l'arrêt des précipitations (en jours).

c et d dépendant du paramètre B et de l'état du réservoir R lors de l'arrêt des précipitations.

Dans ce modèle, le paramètre B est calé pour simuler à la fois des débits d'origines différentes :

- . un débit qui, en période de crue, provient principalement du ruissellement
- . un "débit de base" qui provient de la vidange des nappes.

La relation de calcul du débit présente bien une décroissance régulière en absence d'entrée dans le réservoir R mais cette simulation logarithmique du tarissement ne recouvre pas forcément la loi de tarissement du bassin étudié. On notera que la loi de Maillet, habituellement utilisée pour représenter le tarissement, est plutôt de nature exponentielle. En outre, le réservoir R est alimenté par des pluies de ruissellement, ce qui ne le destine pas au calcul des débits de tarissement dont l'origine se situe dans le drainage de nappes alimentées par l'infiltration à travers le réservoir sol.

Cette remarque ne concerne pas les bassins imperméables où la contribution des nappes est faible voire nulle mais s'impose pour des bassins perméables comme le bassin de la Solre. Le bassin de la Solre se caractérise en effet par divers degrés de perméabilité, lesquels sont en rapport avec des ensembles dont la lithologie et la structure sont distinctes.

Dans le cadre d'un modèle que l'on désire simple, il n'est pas question de détailler les implications hydrologiques de chaque structure géologique ou de modifier la formule de calcul du débit ; pour améliorer le calcul des faibles débits, j'ai choisi de corriger le débit calculé en lui ajoutant deux composantes :

- une composante $Q_{II j+1}$ générée par l'infiltration partielle ou totale d'une fraction F du réservoir S :

$$QI1_{j+1} = S_j \cdot CI_j$$

avec $CI_j = F \cdot S_j^2 / A^2$

CI_j : coefficient d'infiltration dépendant de l'état du réservoir sol

- une composante $QI2_{j+1}$ générée également par l'infiltration continue et considérée ici comme constante :

$$QI2_{j+1} = C$$

On a $QI_{j+1} = QI1_{j+1} + QI2_{j+1}$

Le débit total calculé est donc :

$QT_{j+1} = Q'_{j+1} + QI_{j+1}$

Le sous-programme représentant le modèle est fourni en annexe informatique. Il est écrit en turbo basic Borland.

Du point de vue statistique, la prise en compte des deux composantes permet de réduire l'erreur du modèle pour les faibles débits ; du point de vue physique, on peut associer $QI1_{j+1}$ au débit retardé provenant du drainage d'aquifères à temps de transit rapide ; $QI2_{j+1}$ est associé au drainage d'aquifères dont le temps de transit et donc de tarissement est beaucoup plus faible et dont l'apport journalier peut être considéré, dans le cadre de ce modèle, comme constant. De longues périodes sèches ne se sont en effet jamais traduites par un assèchement du cours d'eau.

On admet que les justifications a posteriori de ces composantes supplémentaires ne sont pas aussi nettes et que l'on peut rechercher également l'origine de l'erreur de prévision par de multiples hypothèses concernant par exemple la précision des mesures, les apports et pertes vers et hors du bassin hydrologique. Le calage de ces deux paramètres supplémentaires F et C permet cependant de diminuer encore la fonction critère.

6.2.4. Resultats

Les paramètres retenus sont les suivants :

$$A = 80 \quad B = 70 \quad F = 70 \quad C = 0,37$$

Fonction critère en calage (période 1976-1980): 11 %

Fonction critère en contrôle (période 1980-1984) : 8,8 %

Erreur moyenne positive : 0,29 mm ($Q' > Q$)

Erreur moyenne négative : - 0,3 mm ($Q' < Q$)

On note une légère amélioration de la fonction critère en contrôle, ce qui montre l'excellente stabilité du modèle.

Les résultats obtenus sur la période de contrôle sont présentés sur les documents 113 à 117.

La fonction critère étant faible, les équations retenues modélisent correctement la réaction du bassin. Le modèle établit donc une relation correcte entre deux grandeurs cumulées sur 24 heures, la pluie journalière et le débit moyen journalier.

Il est intéressant de comparer les valeurs globales obtenues pour l'ensemble de la période 1980-1984, soit sur cinq années :

Lame brute précipitée (moyenne de Thiessen des stations de Colleret, Eccles, Sarspoteries): 4439 mm

Evapotranspiration potentielle : 3171 mm

Evapotranspiration réelle : 2161 mm

Pluie nette : 3237 mm

Pluie alimentant S : 1962 mm

Pluie alimentant R : 1275 mm

Lame écoulee calculée dépendant du réservoir R : 1280 mm

Composantes dues à l'infiltration à partir de S (QI1 et QI2) : 1014 mm

Lame écoulee calculée totale : 2294 mm

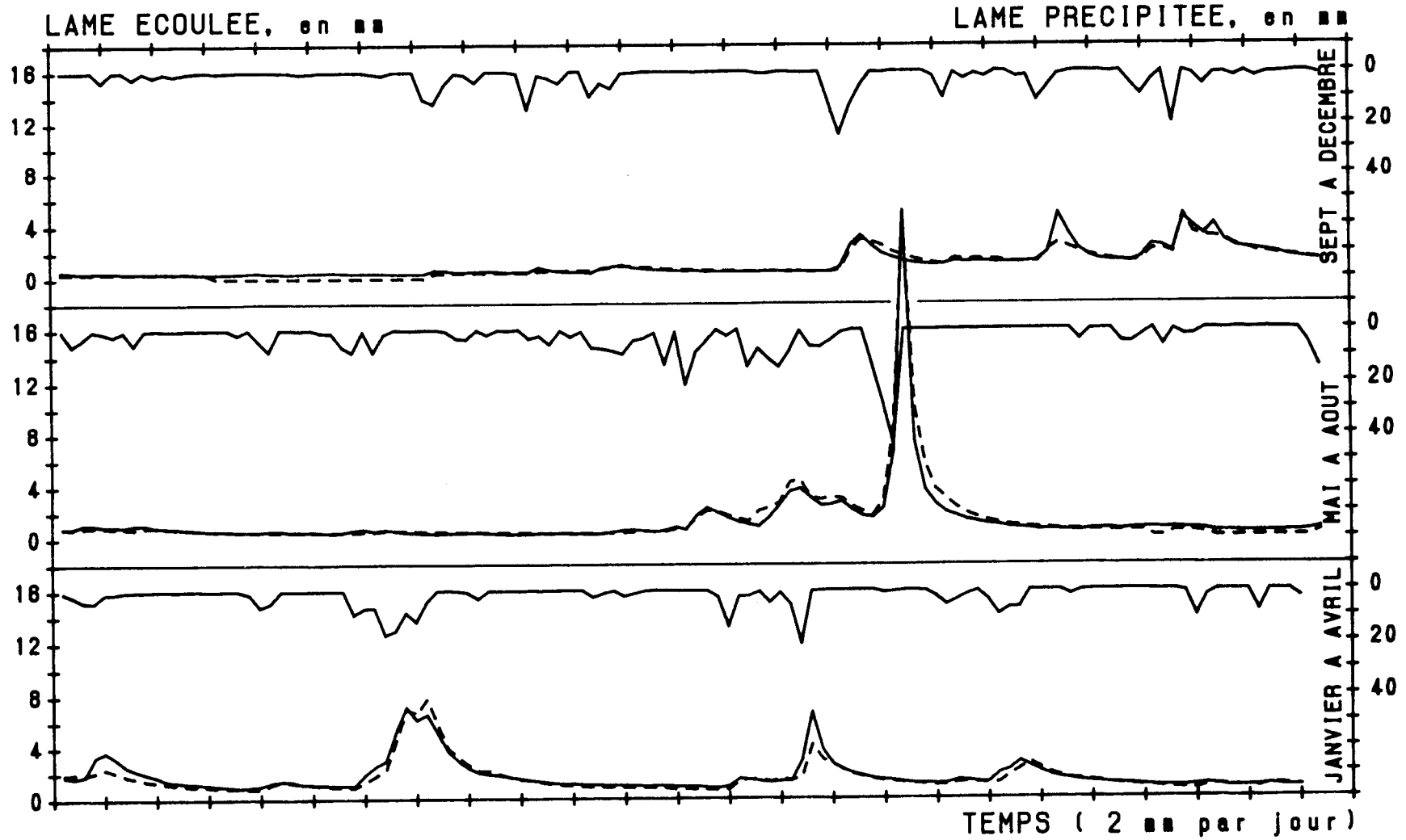
Lame écoulee observée : 2345 mm

On note la cohérence d'ensemble des valeurs globales obtenues.

L'évapotranspiration réelle est, en moyenne, de 49 %. Elle correspond à 68 % de l'évapotranspiration potentielle.

En annonce de crue, il convient de déclencher l'état de surveillance accru dès que le contenu du réservoir sol atteint un seuil critique . **L'utilisation d'un réservoir sol dans le modèle est un atout précieux qui permet d'anticiper les crues en se plaçant en état de pré-alerte avant même la prévision de débit.**

ANNEE 1980

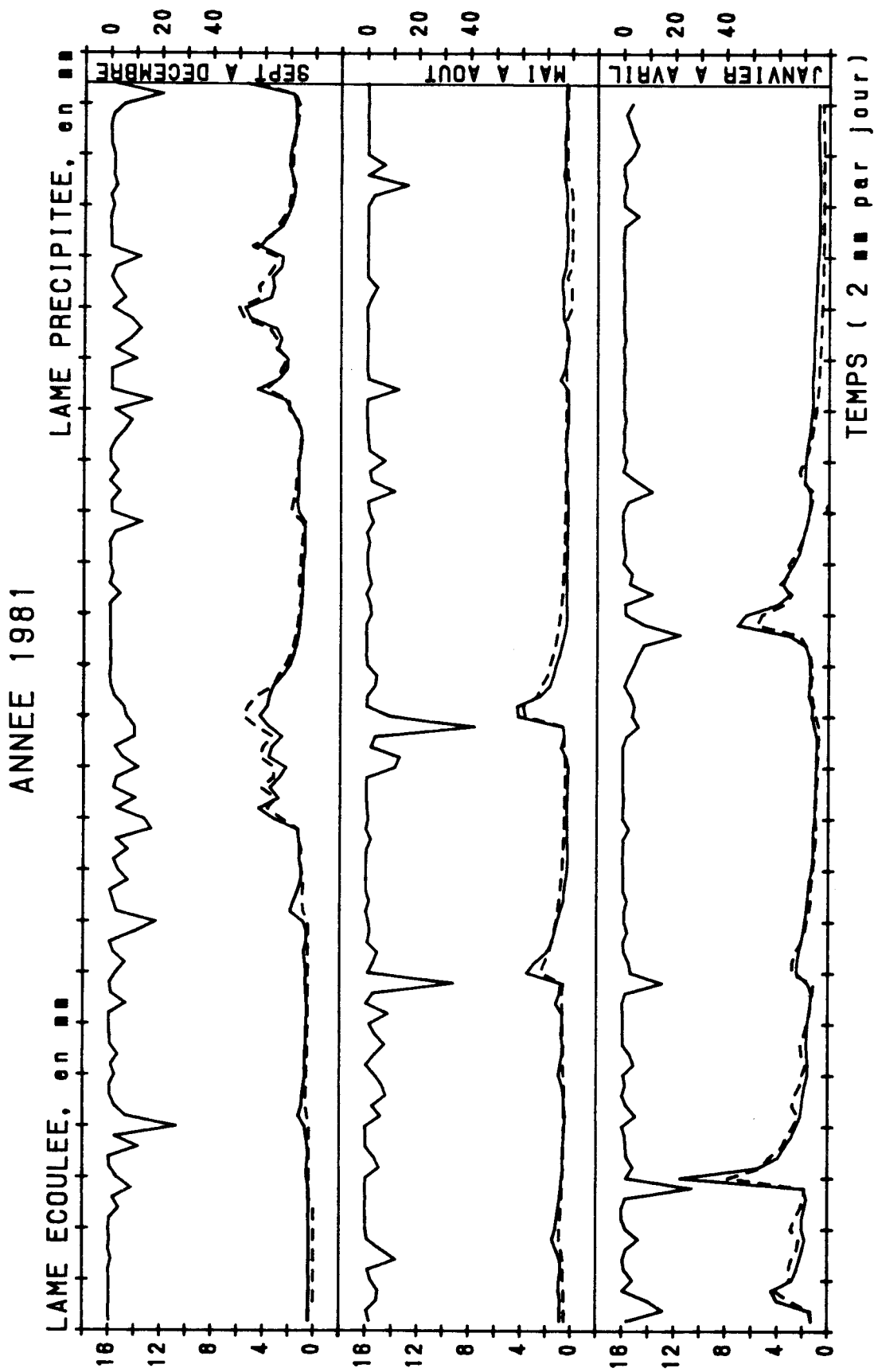


113 : Simulation des débits moyens journaliers de l'année 1980

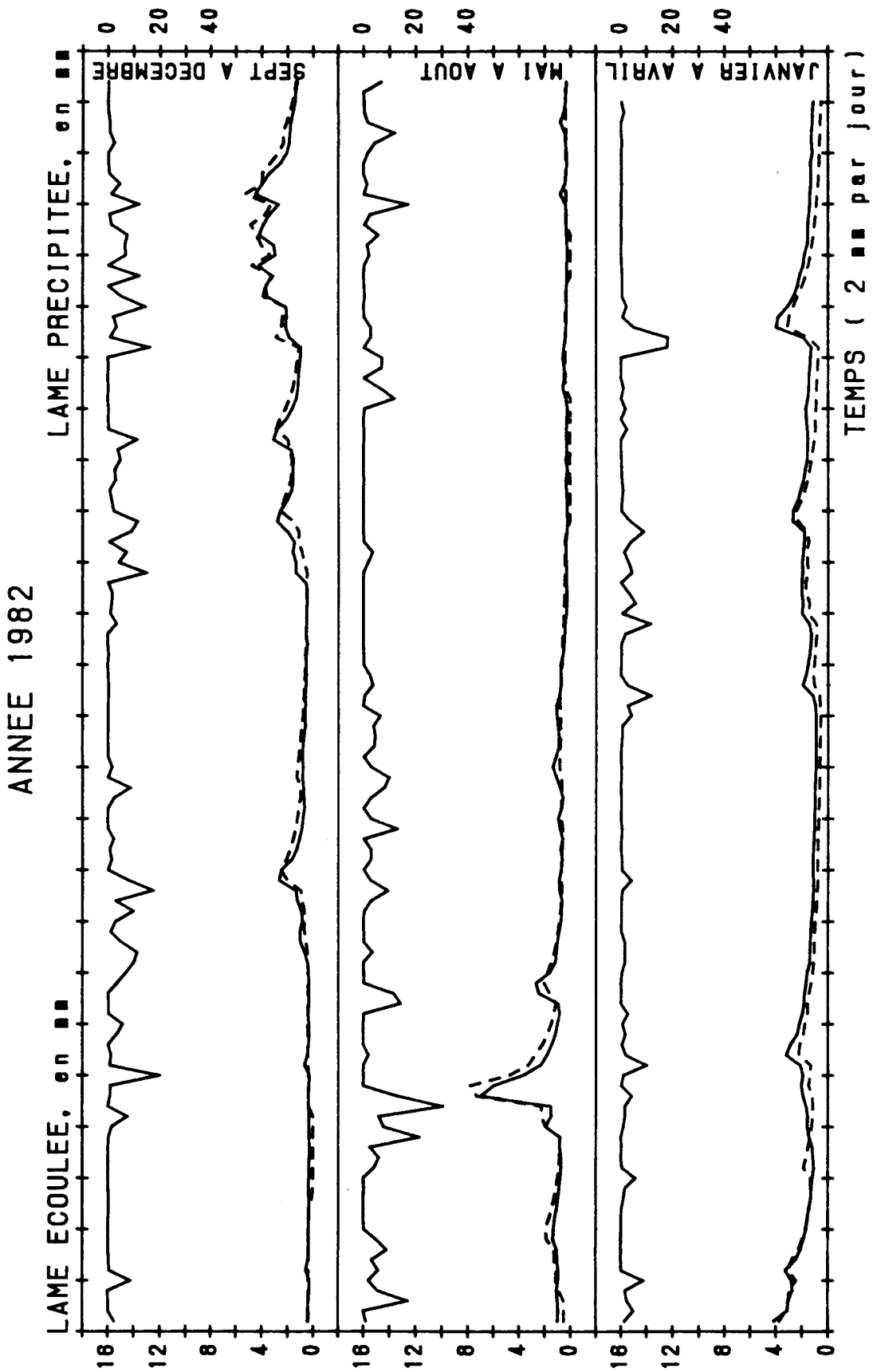
Courbe continue : Débit observé

Courbe discontinue : Débit calculé

Afin de bien visualiser les décalages, chaque année a été divisée en trois parties superposées sur la figure : janvier à avril, mai à août, septembre à décembre.

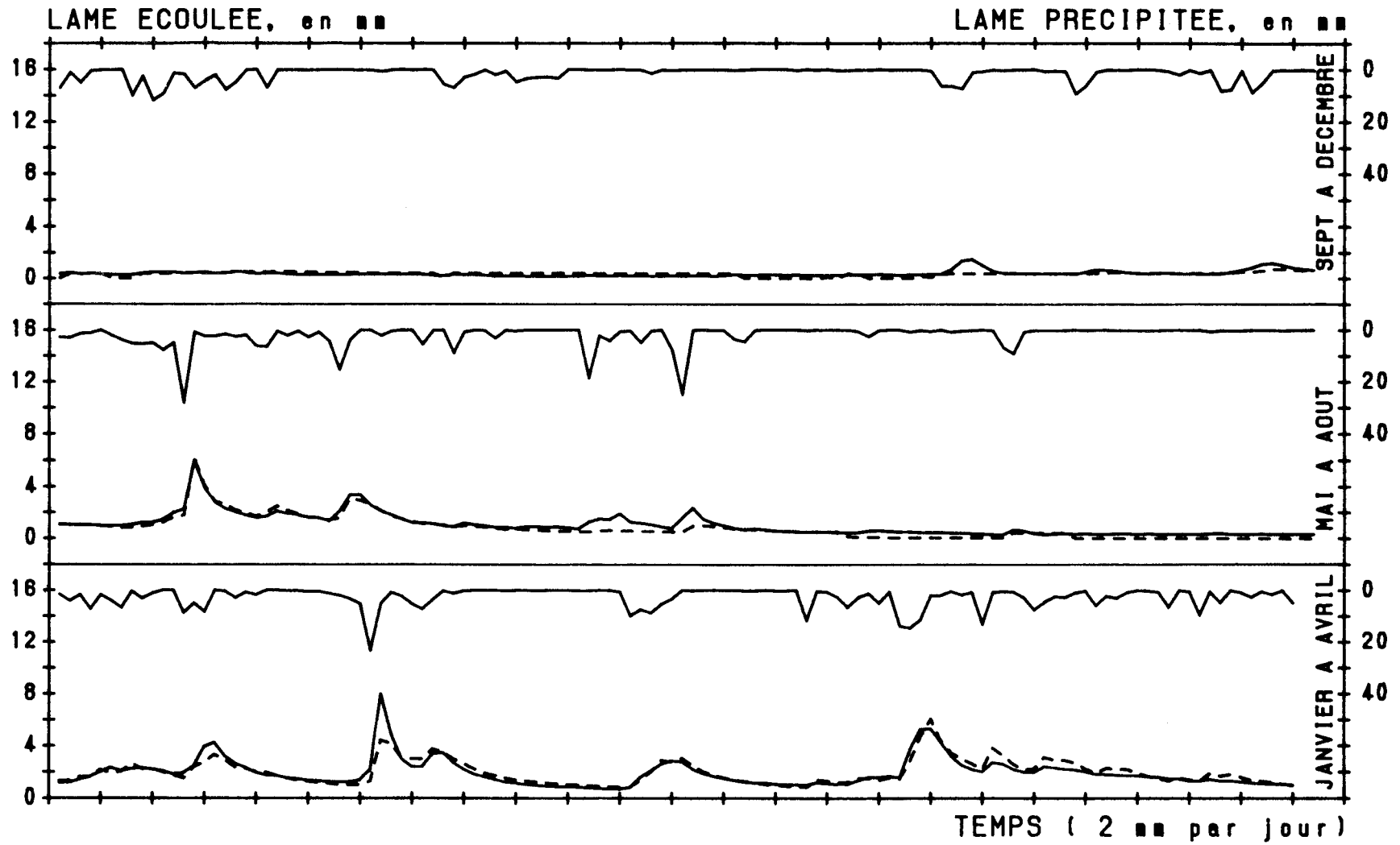


114 : Simulation des débits moyens journaliers de l'année 1981



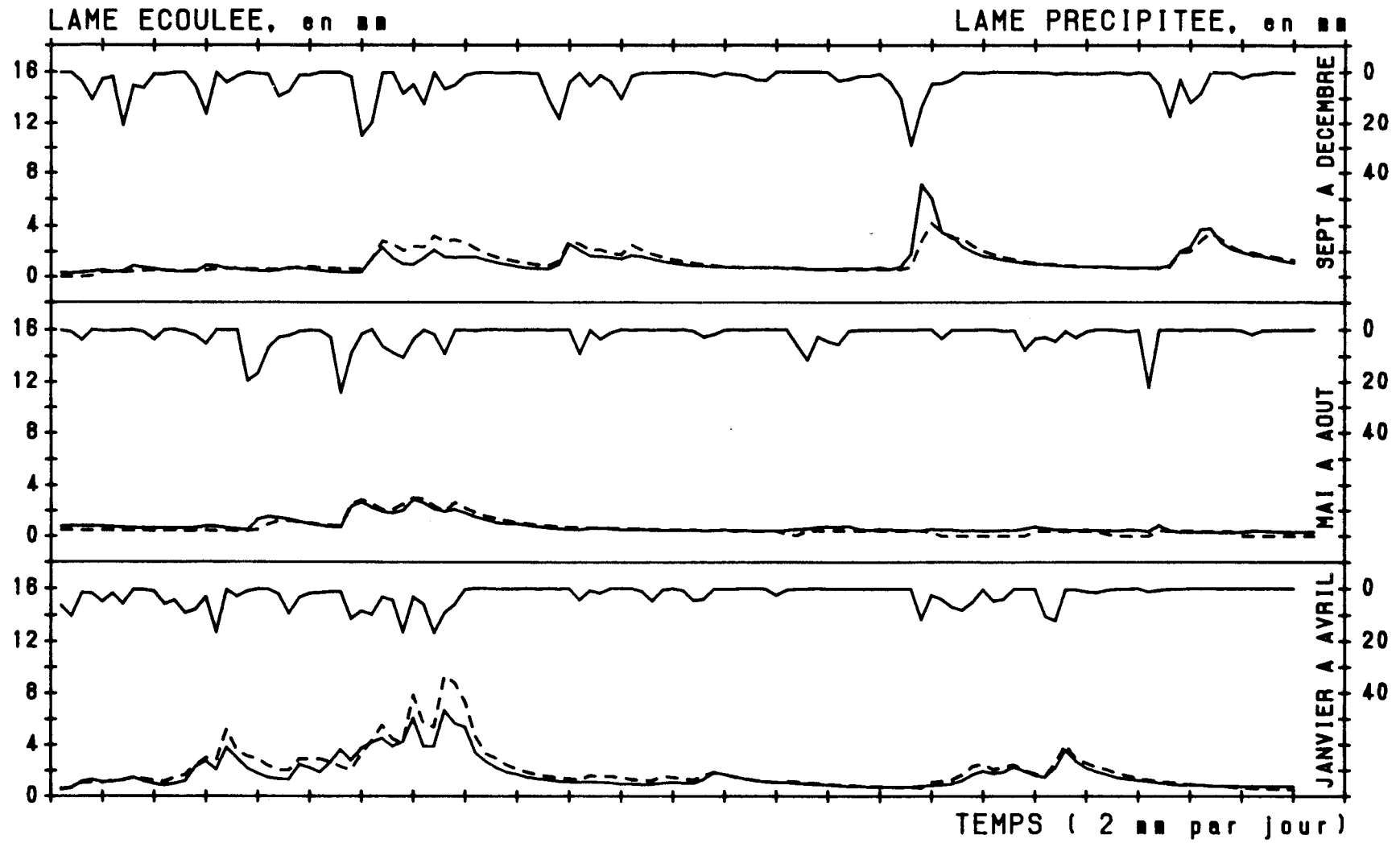
115 : Simulation des débits moyens journaliers de l'année 1982

ANNEE 1983



116 : Simulation des débits moyens journaliers de l'année 1983

ANNEE 1984



117 : Simulation des débits moyens journaliers de l'année 1984

6.2.5. Crue du 21 juillet 1980

On a évoqué plusieurs fois le cas de la forte crue du 21 juillet 1980. Dans le cadre de ce modèle, l'étude de l'évolution des réservoirs ayant mené à cette forte crue paraît constituer une bonne explication a posteriori du phénomène. Avec le modèle et compte tenu de l'état du réservoir sol, l'état de surveillance accru aurait été déclenché bien à l'avance. La crue de 21 juillet 1980 (33 m³/s) est largement annoncée par un réservoir sol rempli à plus de 75 % dès le 17 juillet ; les pluies du 18 (14mm), 19 (28mm) et 20 juillet (44mm) ont donc un rendement élevé et entraînent la forte crue et les dégâts que l'on connaît dans la région.

A contrario, les fortes pluies du 28 juin 1981 (42mm) surviennent sur un réservoir sol rempli à 34 %, elles entraînent une faible crue inférieure à 6 m³/s ; sur un terrain plus saturé, les dégâts de l'année précédente se seraient reproduits.

De façon générale, la quasi totalité des crues dont le débit moyen journalier est supérieur à 5 m³/s surviennent lorsque le contenu du réservoir sol dépasse 60 % de sa capacité. Il suffit alors de pluies relativement faibles pour provoquer une crue. Ceci montre qu'une surveillance particulière du réservoir sol doit être exercée.

Au dessous de ce seuil de remplissage, il faudra une très forte pluie pour déclencher une crue.

6.2.6. Perspectives d'utilisation en annonce de crue

Les relations utilisées fournissent une bonne estimation du débit moyen journalier, elles démontrent ainsi leur bonne adaptation au cas du bassin de la Solre.

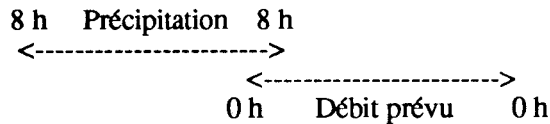
On a évoqué plus haut le problème du décalage de pas de temps. Il faut en effet apprécier le modèle en posant deux questions différentes :

- 1) Le modèle estime t'il correctement la variable recherchée ?
- 2) Le modèle est-il utilisable en prévision ?

La réponse à la première question est affirmative, la variable lame écoulée du jour j+1 à 0 heure au jour j+1 à 24 heures est correctement estimée à partir de la lame précipitée du jour j à 8 heures au jour j+1 à 8 heures et de la température.

La seconde question pose le problème de son utilisation en prévision et notamment pour

l'annonce de crue. On constate en effet que la période d'observation de chaque variable se chevauche pendant une durée de 8 heures, le jour $j+1$ de 0 heure à 8 heures :



Sachant que le débit de pointe des crues de la Solre se situe au plus tôt entre 16 et 20 heures après le début d'une averse bien individualisée, il est nécessaire d'effectuer des prévisions à un pas de temps inférieur au pas de temps journalier. Le schéma ci-dessus montre que l'utilisation du modèle permet une prévision toutes les 24 heures, mais qu'au moment de cette prévision, le débit prévu a commencé à se réaliser depuis une durée de huit heures.

L'automatisation du réseau permettant de réaliser à tout moment le cumul des pluies sur les 24 heures précédentes, une solution consiste à utiliser le modèle journalier ci-dessus en l'initiant à intervalles réguliers. On peut ainsi démarrer un modèle toutes les n heures, gérer en parallèle $24/n$ états des réservoirs S et R et obtenir une prévision $24/n$ fois par 24 heures, ce qui permet de détecter toute hausse brutale du débit. L'intérêt de ce procédé est de conserver un modèle journalier stable, calé sur une longue durée, utilisant des grandeurs cumulées sur 24 heures tout en augmentant la fréquence de la prévision. Son inconvénient est d'utiliser les données en continu, non seulement lors de la mise au point, mais aussi pour son utilisation en temps réel (en prévision).

Une autre voie à explorer pour le calage d'un modèle est de conserver le pas temps journalier pour définir les contenus des réservoirs S et R et de passer à un plus petit pas de temps lors des épisodes de crue. On utiliserait plusieurs jeux de paramètres, un jeu pour le fonctionnement continu d'un modèle journalier, un ou plusieurs jeux pour calculer, à petit pas de temps, les débits prévus pour différents délais de prévision. L'intérêt de cette dernière voie nous semble double, elle permettrait :

en calage et contrôle :

- de travailler sur des données journalières pour définir le modèle
- de ne dépouiller que les épisodes de crue nécessaires au calage du modèle fonctionnant sur un petit pas de temps.

en temps réel :

- de surveiller en permanence le contenu du réservoir S , c'est-à-dire l'état de saturation des terrains et donc de se placer en état de pré-alerte
- d'utiliser le modèle à petit pas de temps dès que l'état de saturation des terrains et les conditions météorologiques exigent de fournir des prévisions à intervalles rapprochés et pour différents délais.

6.2.7. Conclusion sur la modélisation

La transformation de la pluie en débit permet d'exploiter largement le vaste champ d'équations des mathématiques. L'étude bibliographique des innombrables modèles proposés par les hydrologues montre cependant que les modèles complexes ne donnent pas de résultats significativement meilleurs que les modèles simples utilisant un petit nombre de paramètres.

On note que le modèle présenté ici est un modèle simple qui se situe à mi-chemin entre un modèle purement physique ou purement statistique.

Son aspect physique est lié à la prise en compte :

- . de réservoirs qui traduisent une certaine réalité, celle des stocks d'eau superficiels et profonds
- . des capacités de ces réservoirs
- . de coefficients de rendement.

Son aspect statistique est lié à l'utilisation d'équations et de paramètres qui sont calés par itérations successives.

Globalement, ce type de modèle permet de garder le contact avec la réalité physique du cycle de l'eau même si les valeurs des paramètres incluent la part de mécanismes mal connus, difficiles à appréhender ou même des erreurs de mesure. Outre son aspect prévisionnel, le modèle journalier pourrait être utile pour combler des observations manquantes en débit ainsi que pour effectuer un bilan du bassin versant plus précis que celui de Thornthwaite (cf partie IV, chap.4).

Dans le cas des bassins du Nord où l'état de saturation des terrains est une condition préalable à la formation des crues, la surveillance continue de l'état des terrains nous paraît constituer une nécessité pour l'annonce correcte des crues. La mise au point d'un modèle opérationnel d'annonce de crue basé sur le modèle ci-dessus nous paraît souhaitable pour l'avenir, je souhaite qu'elle constitue la suite de cette recherche.

6.3. - CARACTERISTIQUES DES HYDROGRAMMES DE CRUES DE LA SOLRE A FERRIERE-LA-GRANDE

6.3.1. - Qualité des données

6.3.1.1. contrôle des données pluviographiques

Les averses ont été primitivement dépouillées au pas de temps de 30 minutes sur les pluviogrammes des trois stations de Colleret, Eccles et Sars-Poteries . Des contrôles de calage du temps, des comparaisons du cumul journalier avec les stations pluviométriques voisines (Maubeuge, Dimont, Thirimont) permettent de corriger les pannes et erreurs diverses.

6.3.1.2. Contrôle des données limnigraphiques

Avant de tracer les hydrogrammes de crue, on a procédé au contrôle de l'enregistrement des hauteurs d'eau par le limnigraphe. On peut imaginer en effet, que le niveau d'eau dans le puits de décharge ne suive pas fidèlement le niveau de la rivière ou que la course du flotteur soit entravée . Afin de vérifier cette hypothèse, on a comparé les niveaux d'eau enregistrés sur limnigramme et les niveaux d'eau lus directement à l'échelle par le technicien lors de son passage, soit environ 18 fois par an.

Ces écarts restent minimes, et on ne peut imputer d'erreurs grossières sur le débit maximum instantané observé à un défaut de fonctionnement de la station lors des crues. On peut ajouter que de nombreux jaugeages ont été effectués en fortes crues et que les hauteurs enregistrées étaient alors bien contrôlées (document 84). En ce qui concerne les crues récentes, j'ai personnellement vérifié l'adéquation entre niveau enregistré et niveau effectif.

6.3.2. Saisie informatique et visualisation

Chaque crue est saisie sur une période de douze jours .

6.3.2.1. Saisie des débits

Les limnigrammes sont dépouillés au pas de temps fixe de deux heures, soit 144 pas de temps pour chaque crue.

Les données sont saisies par le programme FICRUE dont la fonction est de transformer les hauteurs d'eau en débit en utilisant la routine "courbe de tarage".

Pour chaque crue on obtient donc un fichier séquentiel composé des hauteurs d'eau et des débits correspondant au pas de temps de 2 heures.

6.3.2.2. Saisie des pluies

Les données dépouillées au pas de temps fixe de trente minutes sont saisies par le programme FIPLUIE. Sur la période de crue, FIPLUIE crée trois fichiers correspondant aux lames précipitées à Colleret, Eccles et Sars-Poteries.

6.3.2.3. Averse génératrice de crue

L'averse génératrice de crue est calculée à partir des dépouillement des pluviogrammes de Colleret, Eccles et Sars-Poteries.

En appliquant les pondérations déduites de la méthode de Thiessen, on utilise la formule suivante :

$$LM = 0,286 C + 0,33 E + 0,384 S$$

LM : Lame moyenne correspondant à l'averse génératrice de crue, en mm

C : lame à Colleret

E : lame à Eccles

S : lame à Sars-Poteries

Aucun coefficient d'abattement n'est utilisé.

Le programme FIPLUIE lit sur disque les lames précipitées sur une durée fixe de trente minutes et les cumule sur deux heures afin de les adapter au pas de temps choisi ici (2 heures). Une routine du programme utilise ces pondérations pour créer un quatrième fichier correspondant à la lame moyenne sur deux heures calculée par les coefficients de Thiessen.

6.3.2.4. Visualisation

Les crues et les averses génératrices sont tracées par le programme TRACRUE.

On visualise la lame moyenne calculée et l'hydrogramme de crue.

Les caractéristiques des crues sélectionnées sont indiquées dans le document 118. Les tracés sont présentés sur les documents 119 à 132.

DATE Q.M.I	Q.M.I (m3/s)	Q.M.J (m3/s)	Q BASE (m3/s)	TEMPS MONTÉE (heures)	TEMP. MOY. (deg.C)	VOLUME CRUE (millions m3)	LAME RUISS. (mm)	LAME PRECIP. (mm)	COEFF. RUISSLMT (%)
13/2/76	9,4	7,0	2,0	29	4	0,86	7,5	30,0	24,9
14/3/80	11,0	9,0	1,8	38	4	0,84	7,3	28,0	26,1
4/1/81	7,8	6,0	2,4	36	6	0,62	5,4	26,0	20,7
15/1/81	21,9	15,3	2,1	22	1	1,73	15,0	26,0	57,9
10/3/81	11,0	9,5	2,3	48	12	1,04	9,0	38,0	23,8
4/6/81	6,0	4,7	0,7	24	15	0,58	5,0	34,5	14,6
29/6/81	7,0	5,8	0,5	30	10	0,62	5,4	51,0	10,6
21/10/81	7,4	5,9	1,9	28	8	0,35	3,0	29,0	10,5
23/5/82	11,5	9,3	1,8	20	14	1,25	10,9	43,0	25,3
1/2/83	12,9	10,7	2,3	22	6	1,00	8,7	27,0	32,2
25/3/83	8,3	7,1	2,0	32	4	1,04	9,0	28,5	31,7
14/5/83	9,4	8,0	2,8	15	10	0,4	3,1	28,0	11,2
31/3/86	14,7	12,1	4,1	28	5	0,6	5,0	29,0	17,4

118 : Caractéristiques des crues de la Soire à Ferrière-la-Grande

Q.M.I : Débit maximum instantané en m3/s

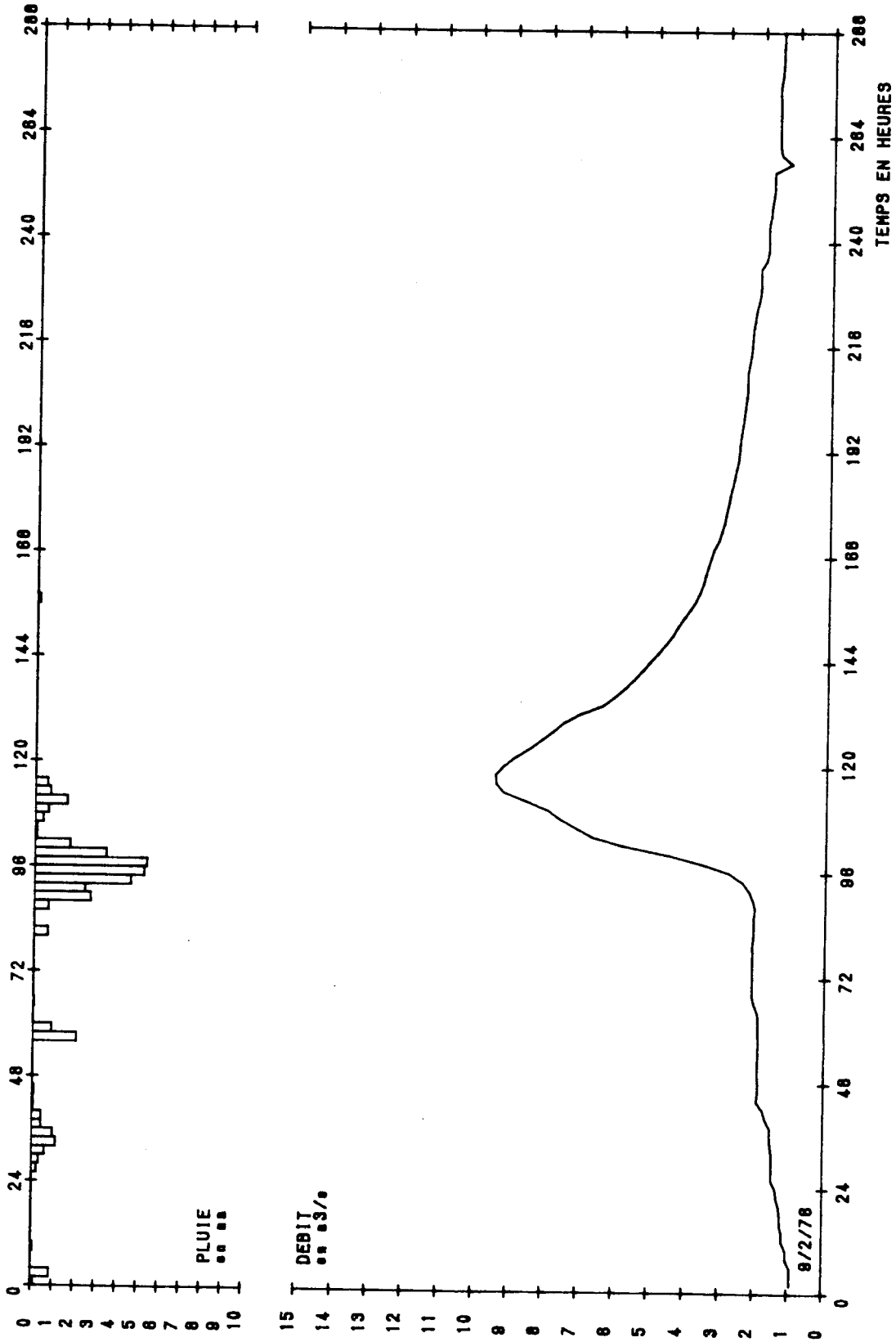
Q.M.J : Débit maximum journalier

Q.BASE : Débit de base

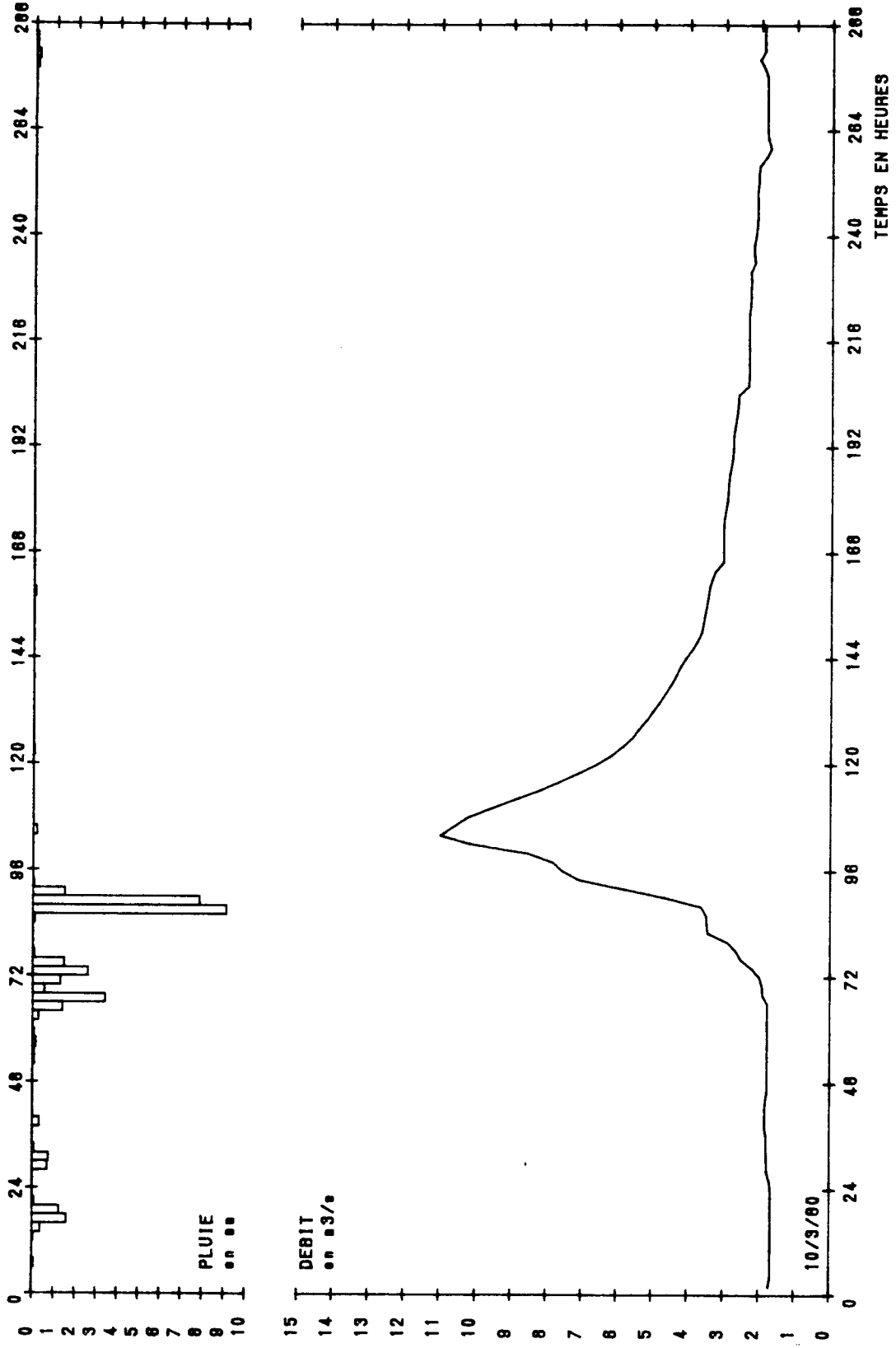
TEMP.MOY. : Température moyenne sur les 3 jours précédant la crue

COEFF.RUISSLMT : Lame ruisselée / Lame précipitée

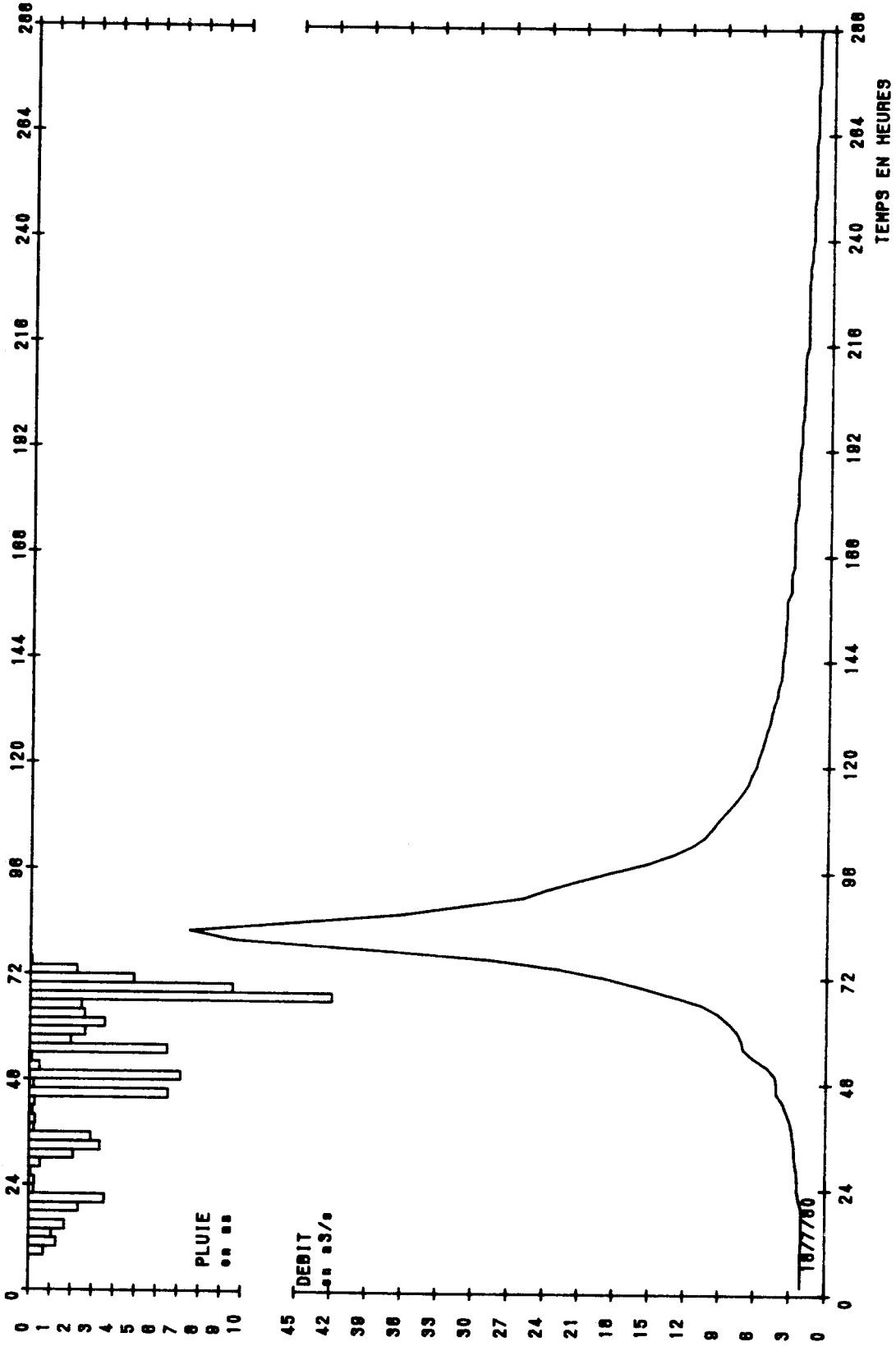
(31/3/86 : crue multiple, les valeurs concernent la dernière onde de crue)



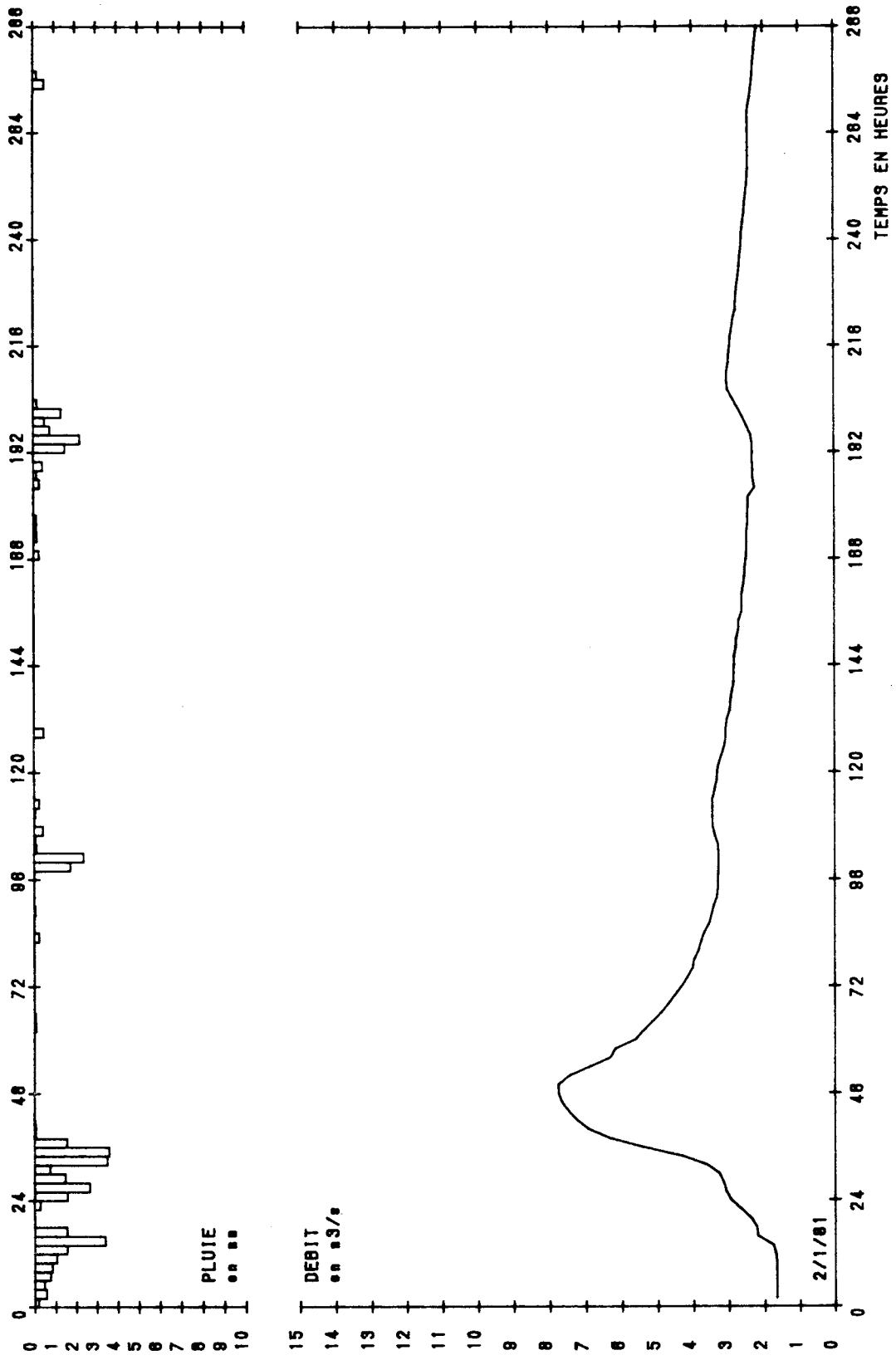
119 : Crue du 13/2/76



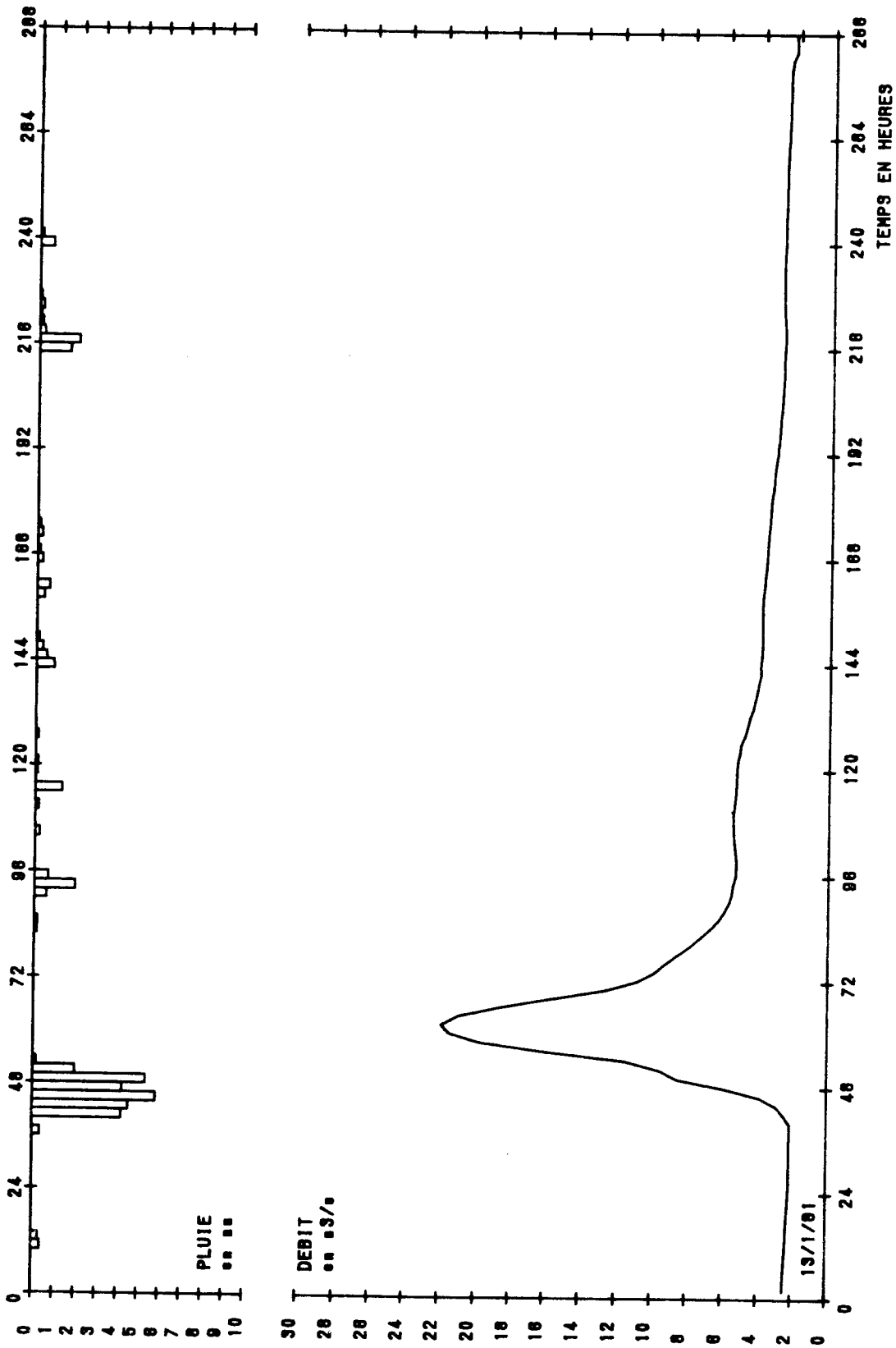
120 : Crue du 14/3/80



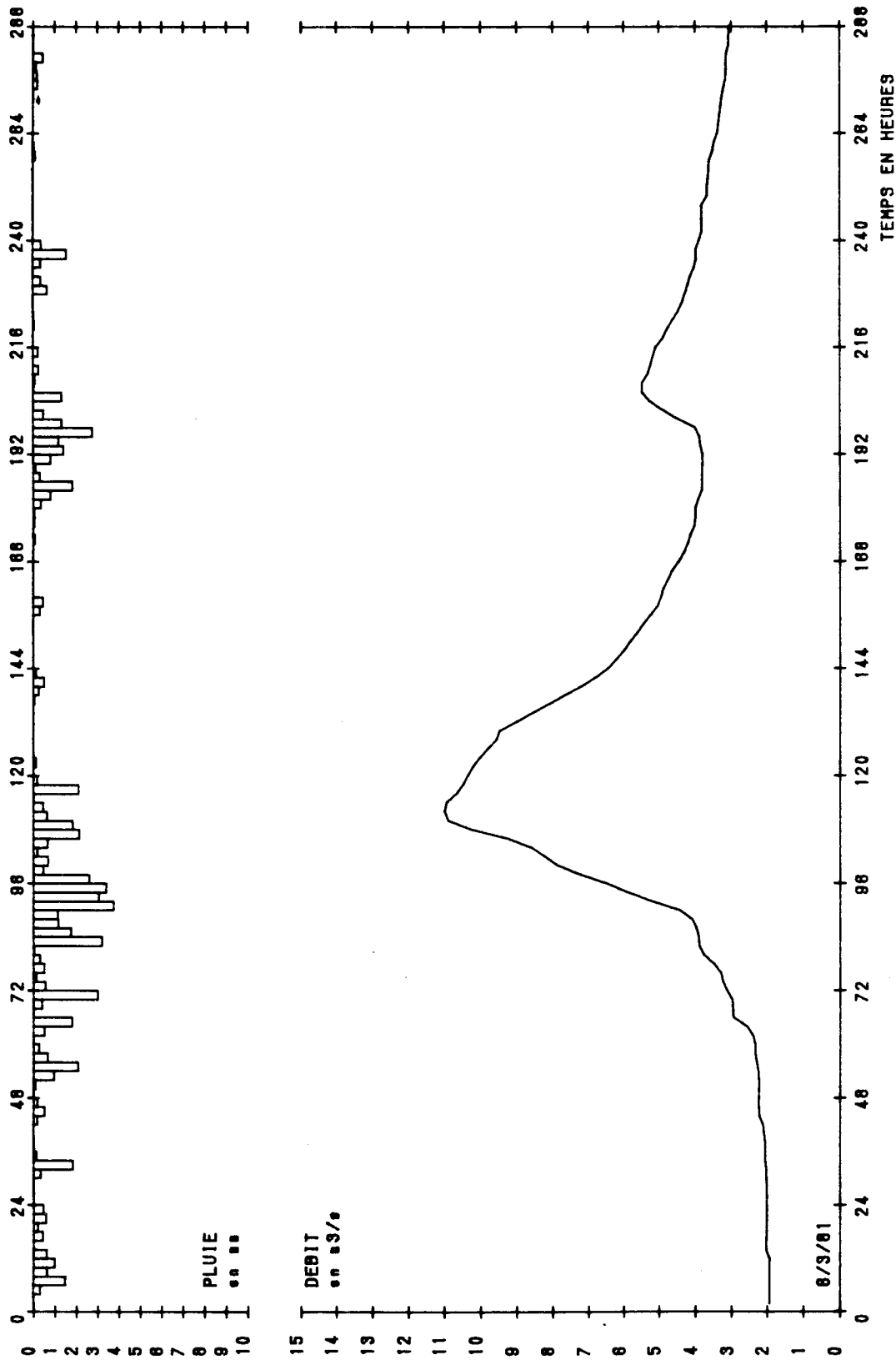
121 : Crue du 21/7/80



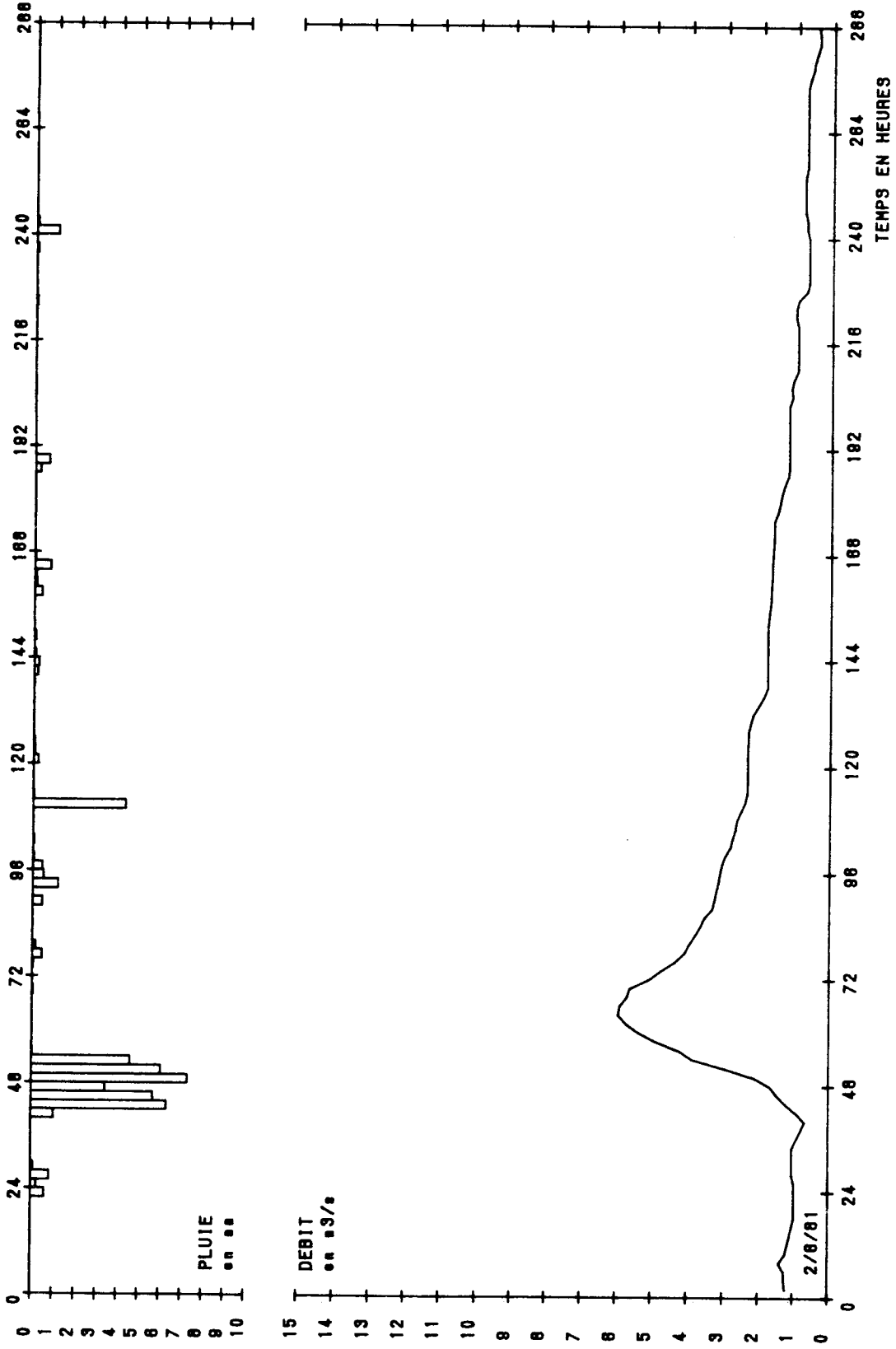
122 : Crue du 4/1/81



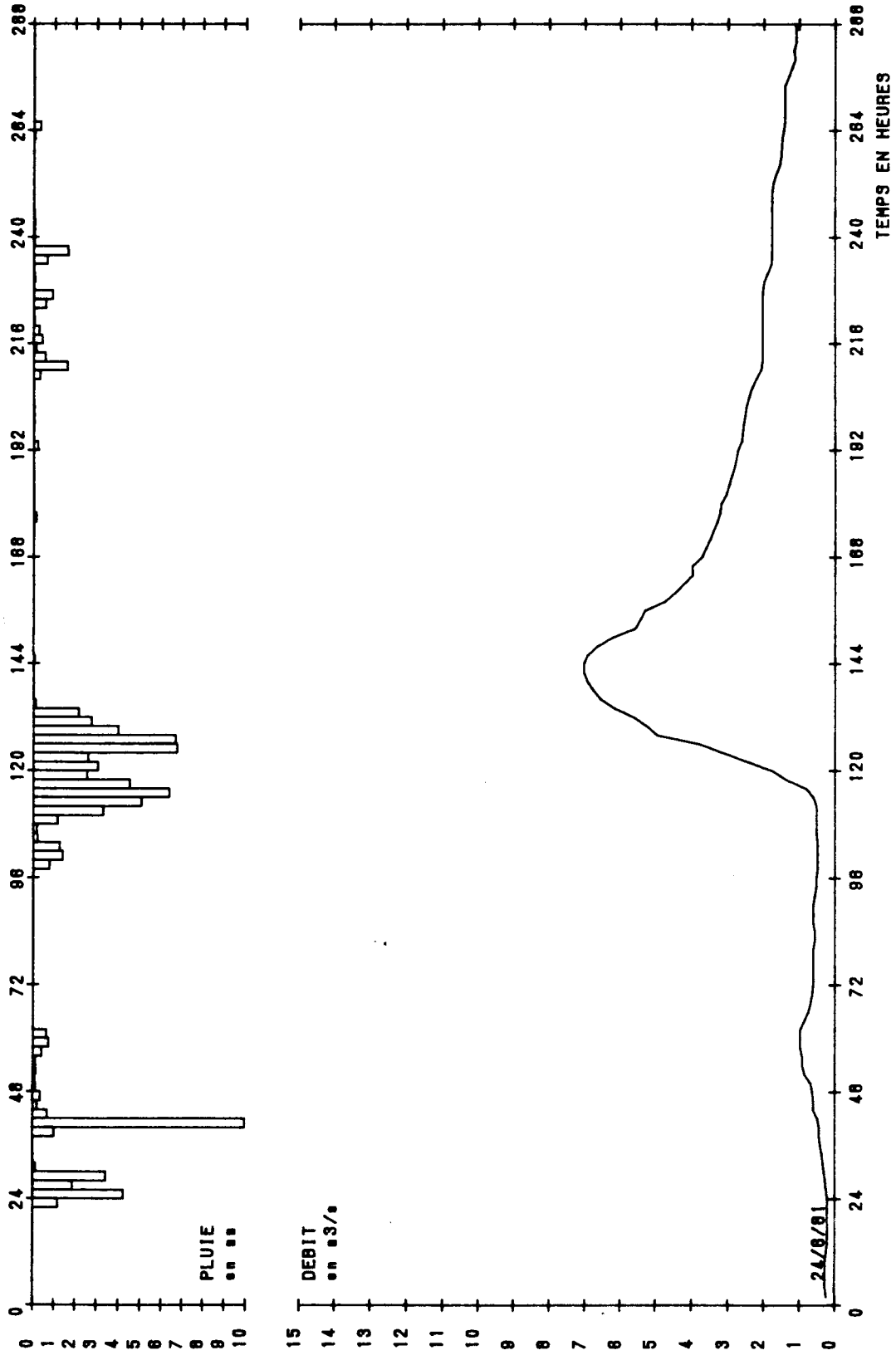
123 : Crue du 15/1/81



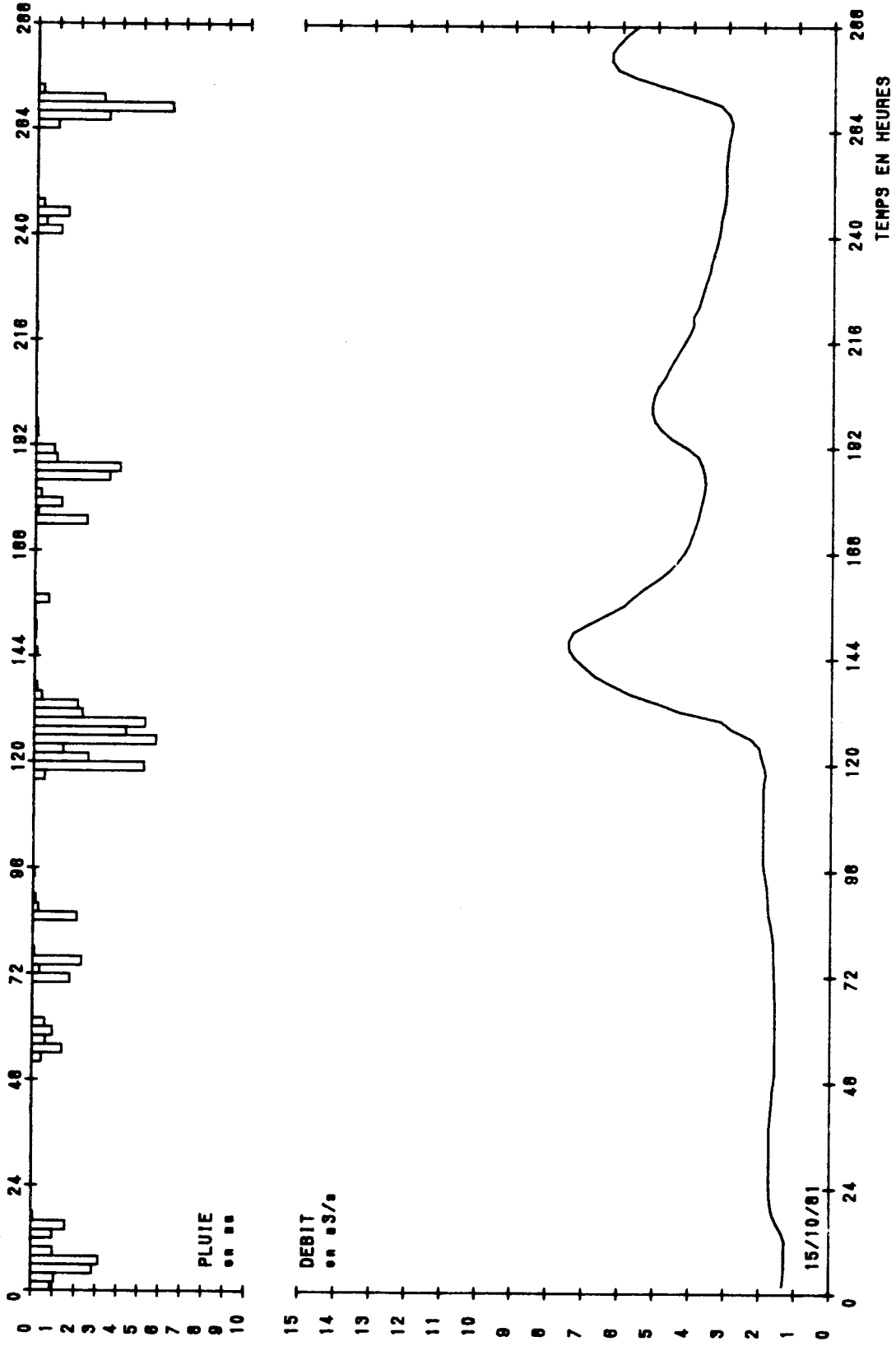
124 : Crue du 10/3/81



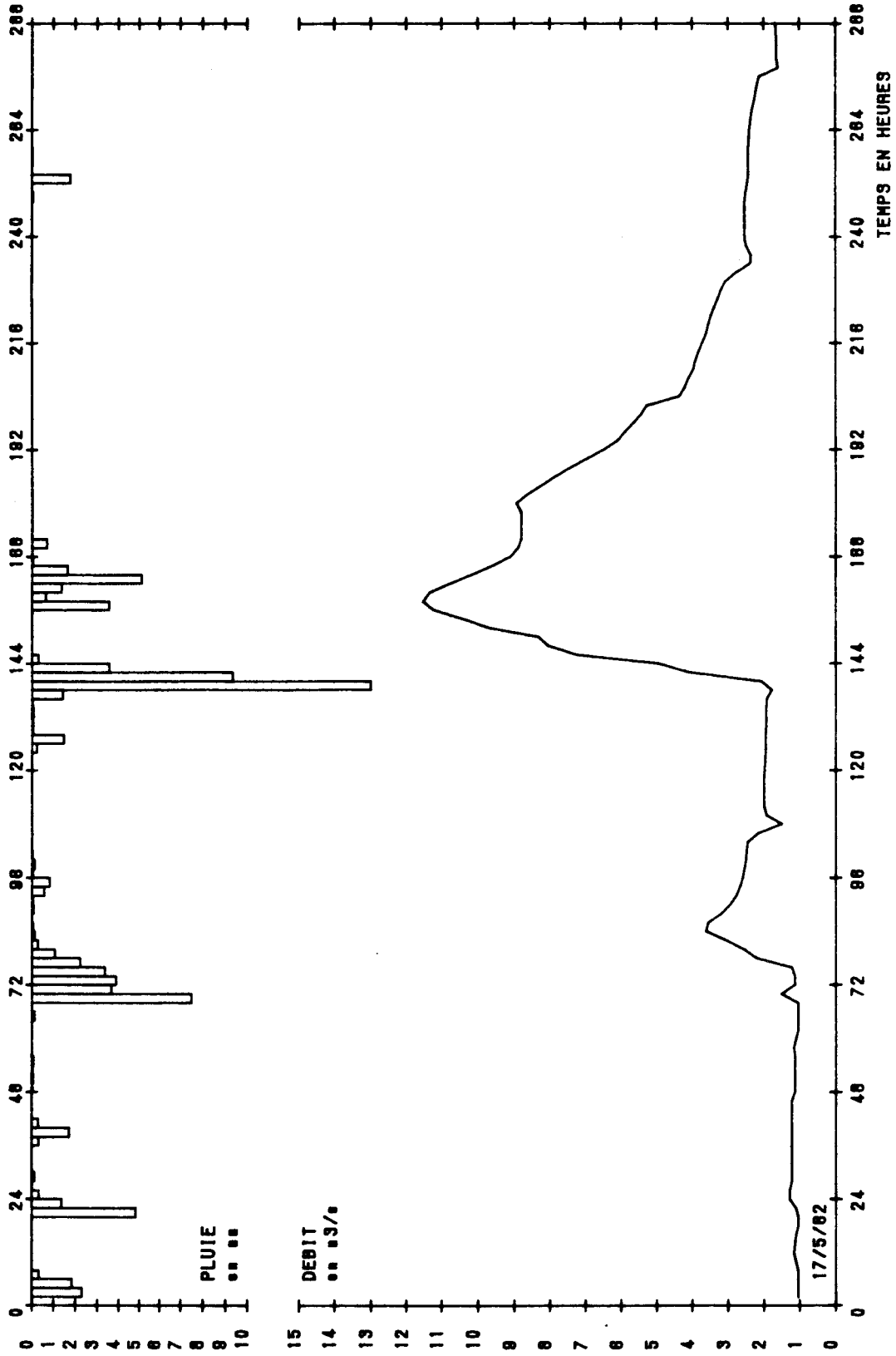
125 : Crue du 4/6/81



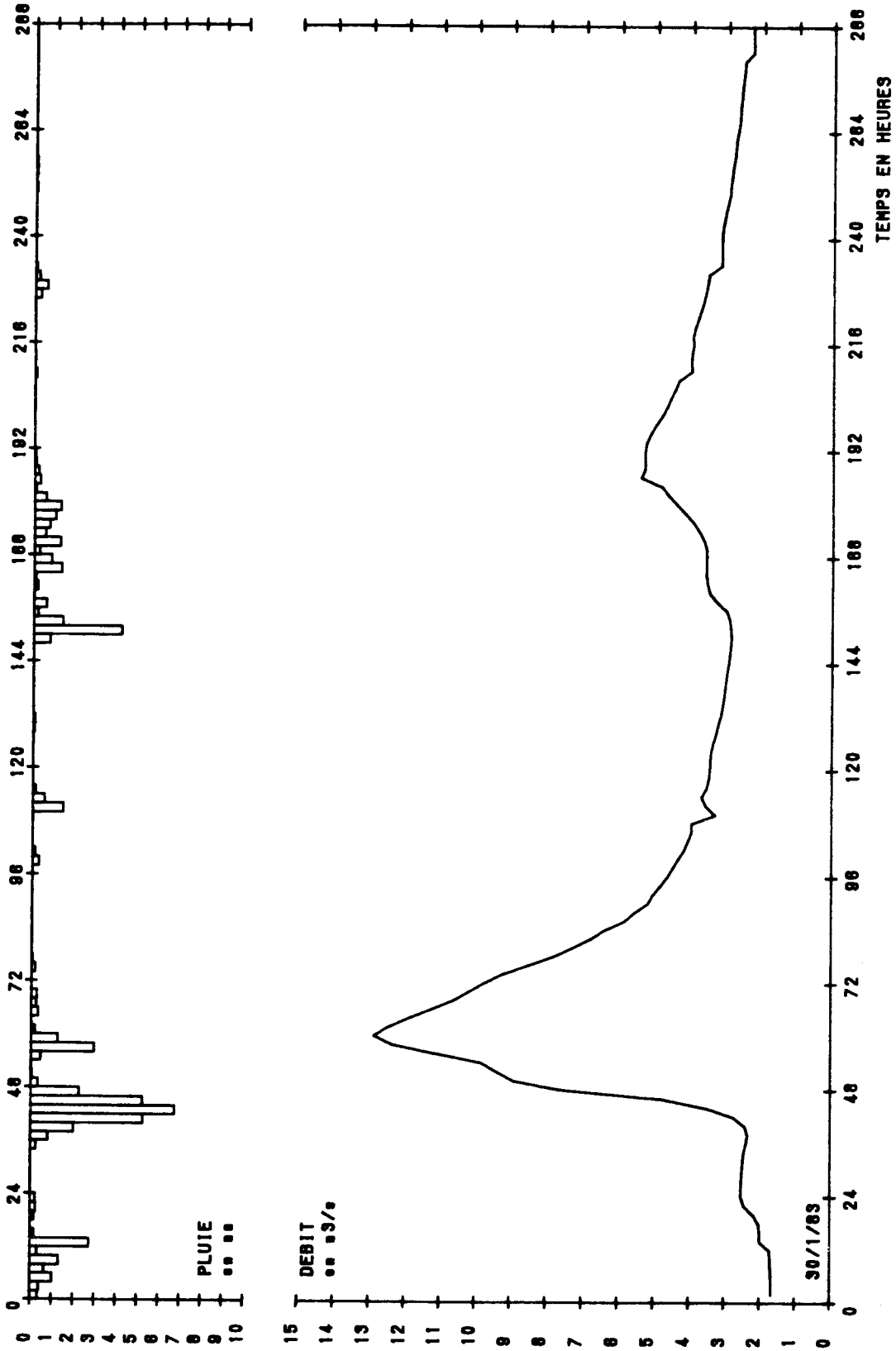
126 : Crue du 29/6/81



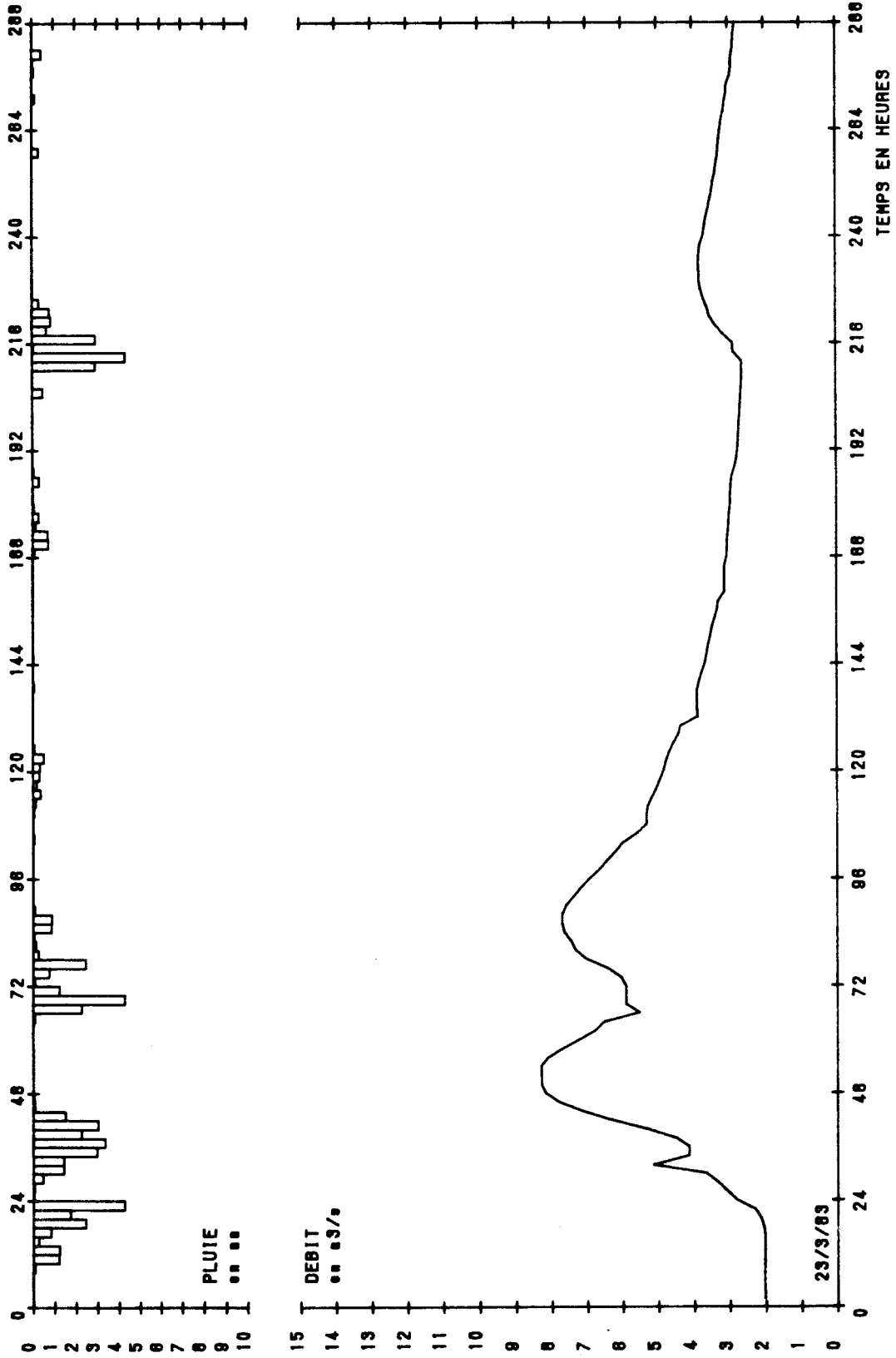
127 : Crue du 21/10/81



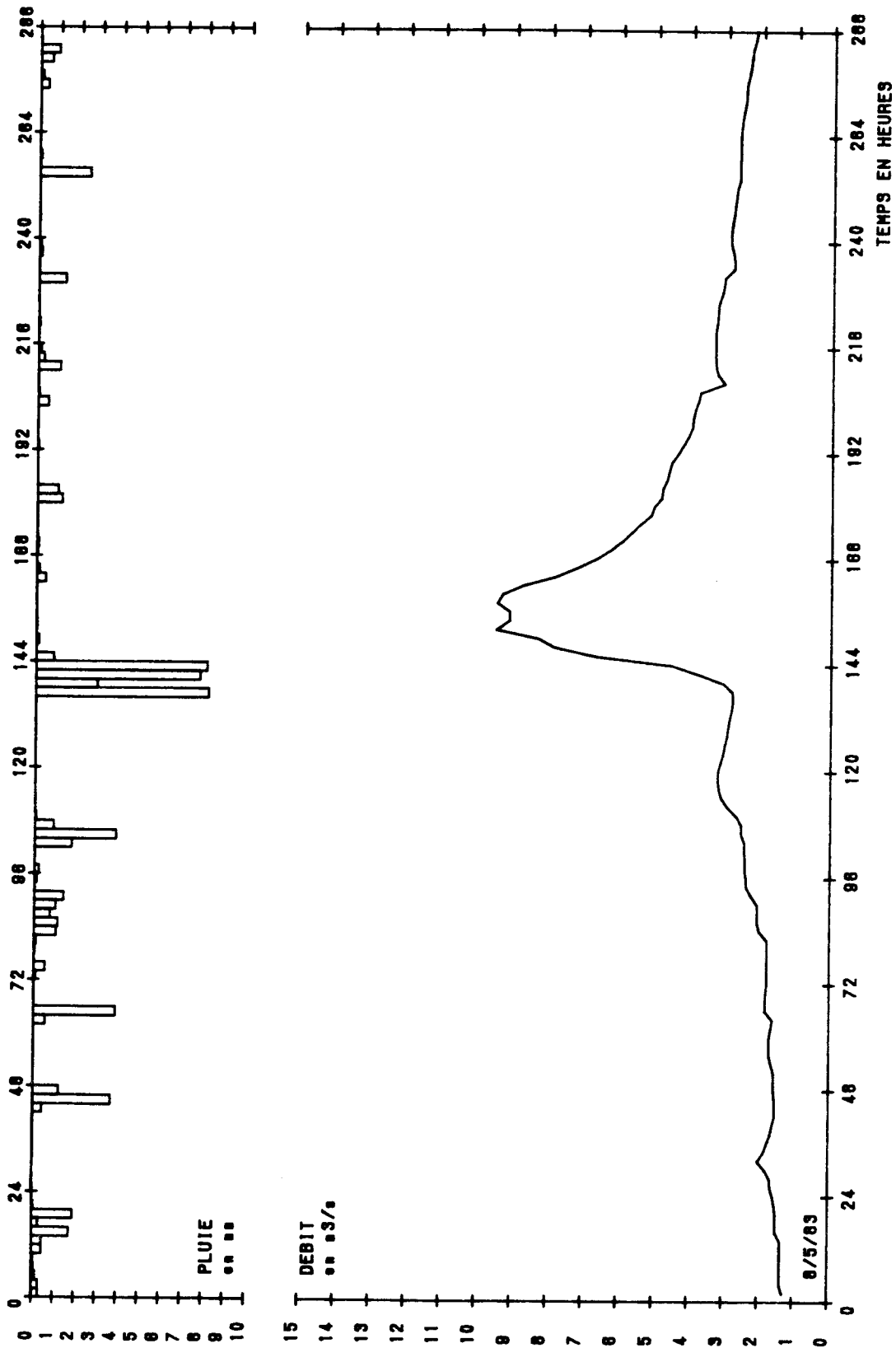
128 : Crue du 23/5/82



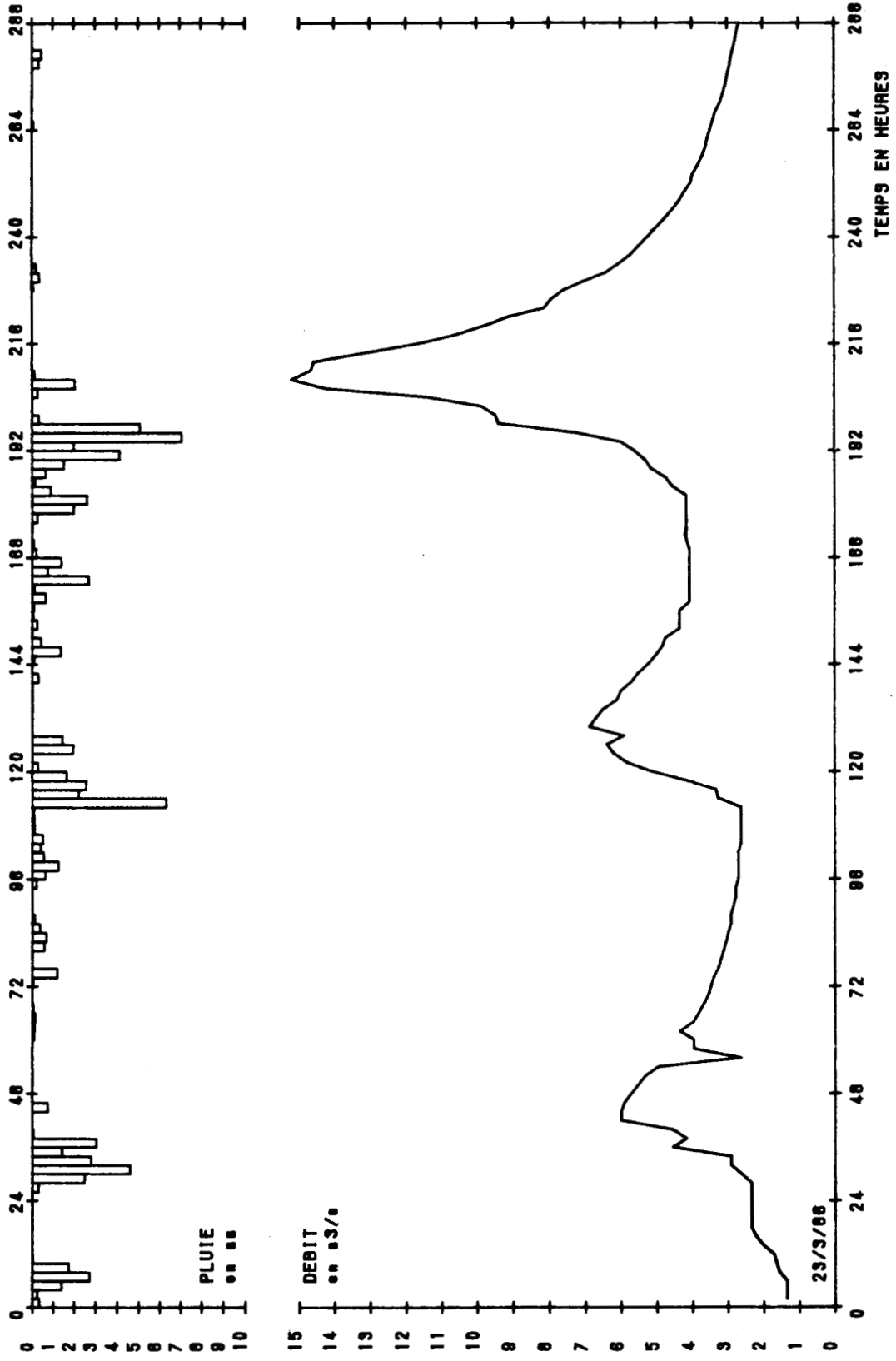
129 : Crue du 1/2/83



130 : Crue du 25/3/83



131 : Crue du 14/5/83



132 : Crue du 31/3/86

6.4. VOLUME DE CRUE ET COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT

6.4.1. Détermination de la part du ruissellement

L'observation des hydrogrammes montre un étalement important de la durée des crues. Ceci peut être attribué à la sinuosité du parcours mais surtout à des secteurs où le lit mineur est aisément franchi, ce qui constitue des zones de stockage de la crue. Ce stockage dans les zones inondables entraîne une baisse du débit maximum instantané observé à la station de Ferrière et un important retard à l'écoulement.

La détermination du volume ruisselé impose que l'on sépare préalablement l'hydrogramme de ruissellement de l'hydrogramme de crue. On estime que l'hydrogramme de ruissellement se termine lors de la rupture de pente que l'on observe habituellement à la fin de la courbe de décrue ; au-delà de ce point, on estime que l'écoulement correspond au débit de base, lequel est soutenu par l'écoulement de nappes, superficielles ou profondes, dont le niveau piézométrique est supérieur ou égal à la cote altimétrique de la vallée. Cette rupture de pente se perçoit mieux en portant la décrue sur papier semi-logarithmique (débits en graduation logarithmique). Le temps qui s'écoule entre le début de la crue et cette rupture de pente est appelé temps de base. On notera que la détermination du point de rupture de pente et donc du temps de base reste arbitraire et parfois délicate.

Le ruissellement direct correspond géométriquement à la surface comprise entre l'hydrogramme de ruissellement et une droite joignant l'origine de la montée en crue (débit de base) au point de rupture de pente de la décrue. Cette surface est alors planimétrée ; chaque unité de cette surface correspondant au produit d'un temps par un débit, c'est-à-dire à un volume, elle est transformée facilement en volume ruisselé. La lame écoulée qui correspond au volume ruisselé est égale au quotient du volume par la surface du bassin considéré, elle est habituellement exprimée en mm. On peut ainsi calculer un coefficient de ruissellement pour chaque crue (rapport lame moyenne brute génératrice / lame ruisselée). Les résultats obtenus sont présentés avec les caractéristiques des crues dans le document 118.

On note que les coefficients sont généralement faibles et que leur moyenne est proche de 24 %. La variabilité des coefficients peut, dans certains cas, s'expliquer par le rôle de la température ; on note en effet l'importance du coefficient de ruissellement de la crue du 15/1/81 qui survient en période de gel et les faibles coefficients de certaines crues d'été. Toutefois, ce facteur n'est pas toujours déterminant et il faut également considérer l'état de saturation des terrains, le débit de base et l'intensité des averses. On précise cependant que les essais de corrélation multiple entre ces divers facteurs et le coefficient de ruissellement n'ont pas donné de résultats significatifs.

6.4.2. Comparaison avec les hydrogrammes de crue observés à Etroeungt sur la partie amont de l'Helpe mineure

Les faibles coefficients de ruissellement calculés sur les crues du bassin de la Solre nous ont conduit à nous intéresser aux réactions enregistrées sur un autre sous-bassin de la Sambre, celui de l'Helpe mineure (cf. carte du bassin, document 4).

L'Helpe mineure est équipée de deux limnigraphes à Etroeungt (amont) et à Maroilles (aval). Le bassin versant limité par la station d'Etroeungt est situé dans la même zone climatique que celle du bassin de la Solre ; la surface de bassin délimitée par la station d'Etroeungt est de 175 Km², soit 52 % de plus que celle du bassin de la Solre (115 Km²). On a donc choisi de comparer les hydrogrammes de crue observés simultanément à Etroeungt et à Ferrière (documents 133 à 139).

(les données dont on dispose sur l'Helpe majeure ne sont pas utilisées ici ; cet affluent est équipé de deux limnigraphes à Liessies (amont) et à Taisnières (aval) mais ceux-ci se situent en aval du barrage d'Eppe sauvage et les hydrogrammes de crue sont modifiés par le présence de la retenue de Val Joly).

6.4.2.1. Lames moyennes à Etroeungt

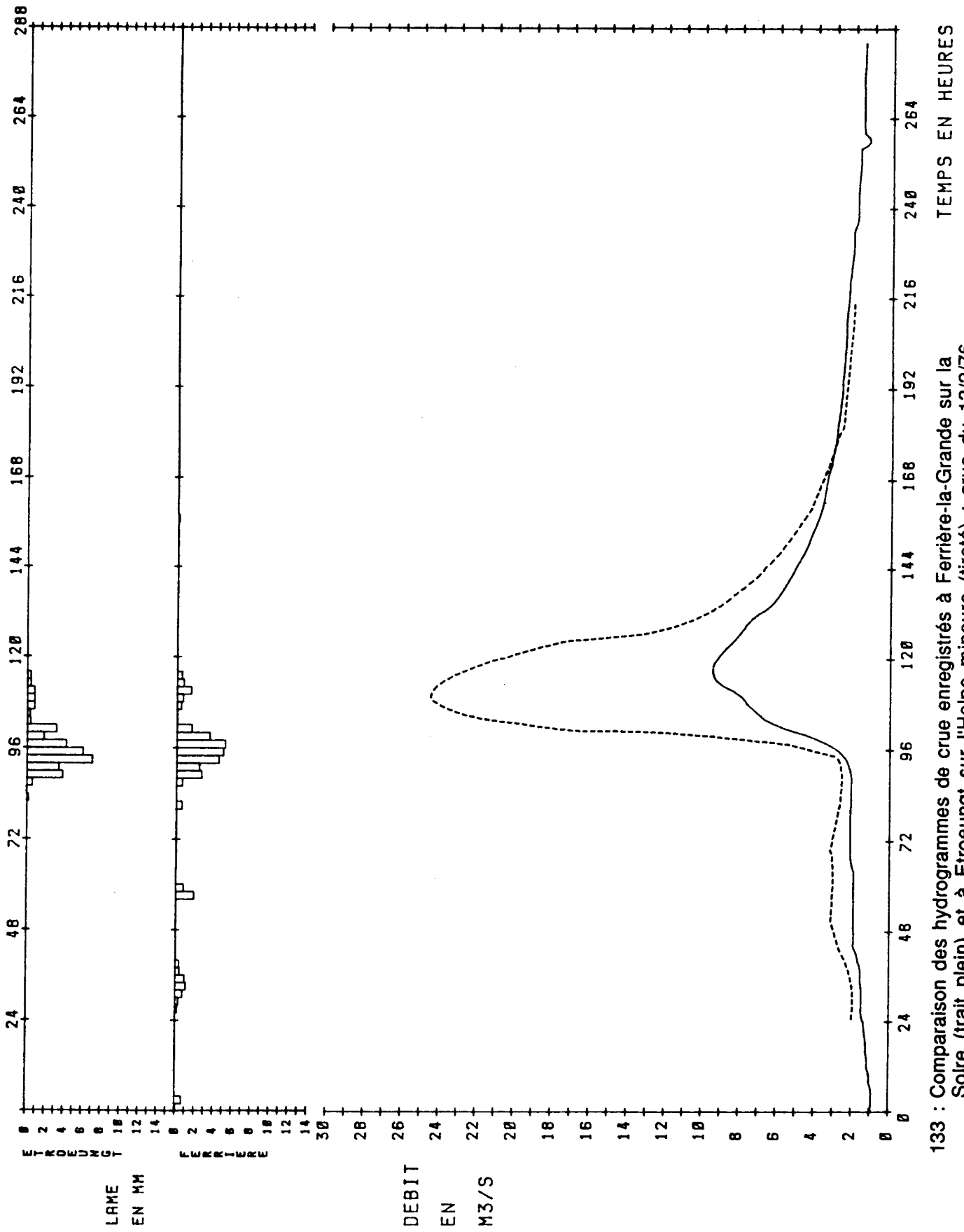
La lame moyenne précipitée est cumulée sur une durée de deux heures.

La quasi-totalité du bassin versant de l'Helpe mineure à Etroeungt correspond à la zone d'influence du pluviographe de Fourmies. En cas de défaillance de ce dernier, on dispose des enregistrements du pluviographe d'Avesnes ou, en dernier recours, de celui de Maubeuge.

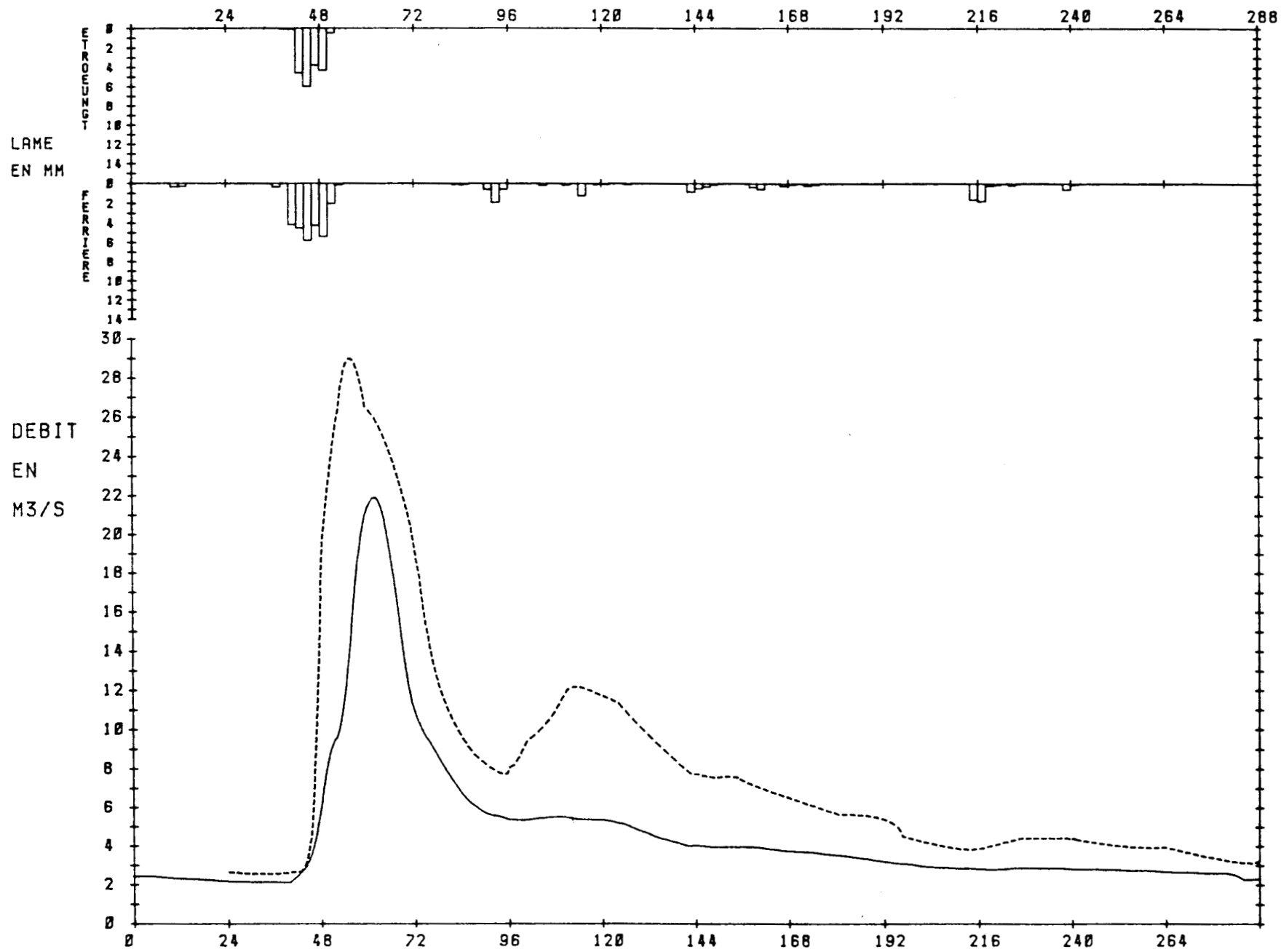
L'observation des lames moyennes calculées pour le bassin de la Solre et celui de l'Helpe mineure montre :

- . que les lames précipitées sur les deux bassins sont en phase ;
- . qu'elles sont proches les unes des autres, en total cumulé et en intensité.

Ces observations préliminaires autorisent donc les comparaisons des hydrogrammes observés simultanément sur les deux bassins.

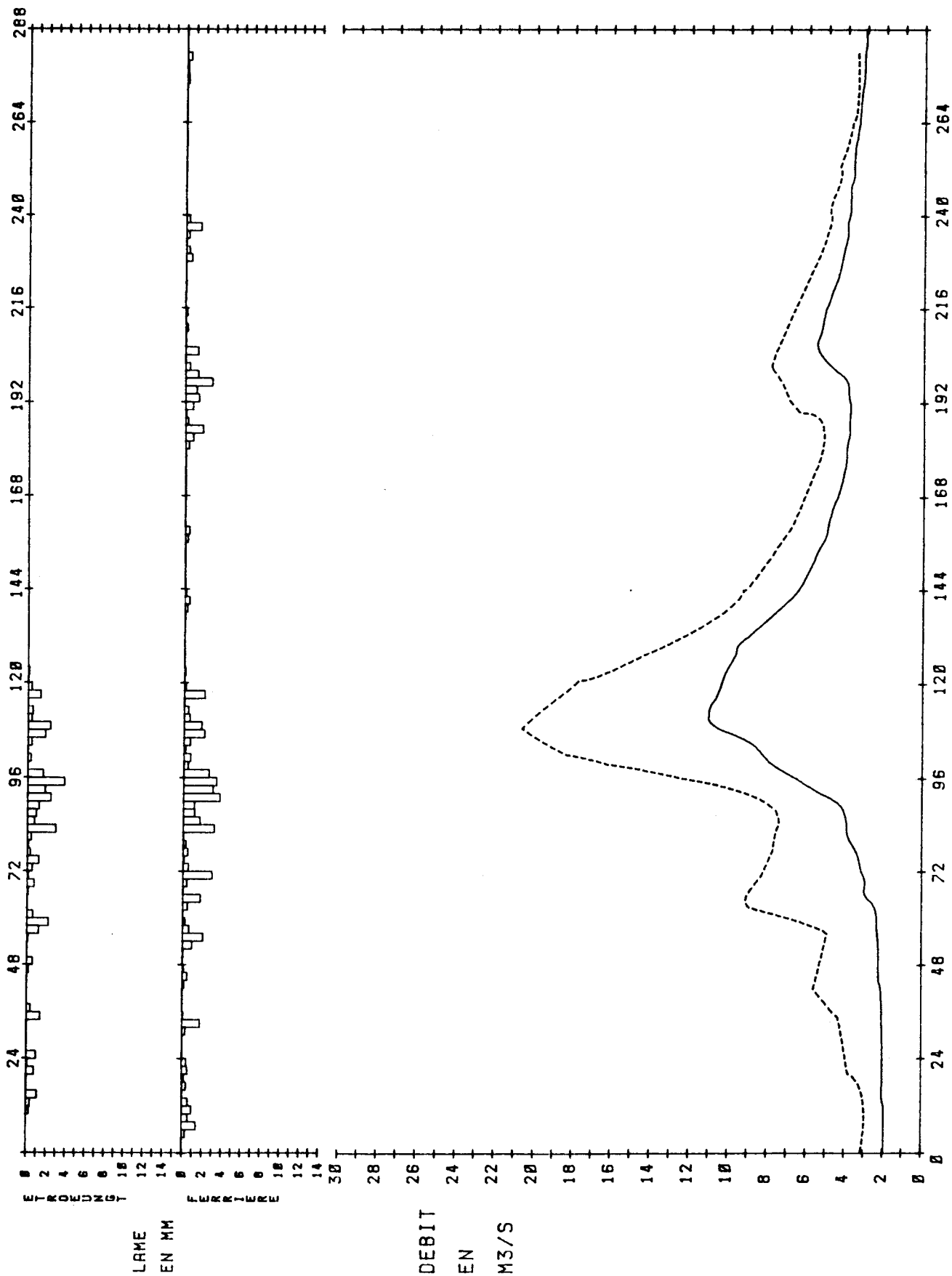


133 : Comparaison des hydrogrammes de crue enregistrés à Ferrière-la-Grande sur la Solre (trait plein) et à Etroeungt sur l'Helpe mineure (tireté) : crue du 13/2/76

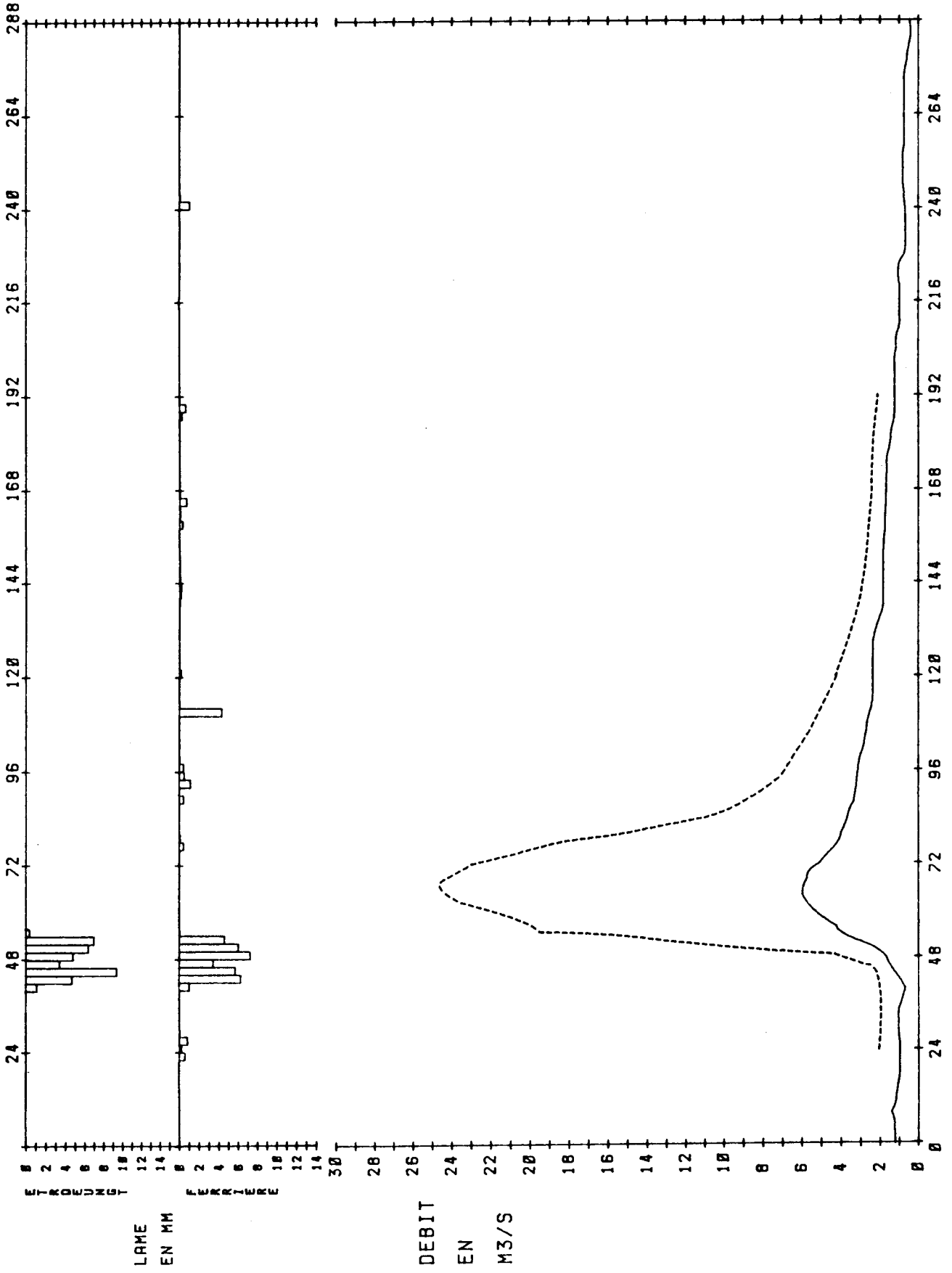


134 : Comparaison des hydrogrammes de crue enregistrés à Ferrière-la-Grande sur la Solre (trait plein) et à Etroingt sur l'Helne mineure (tireté) : crue du 15/1/81

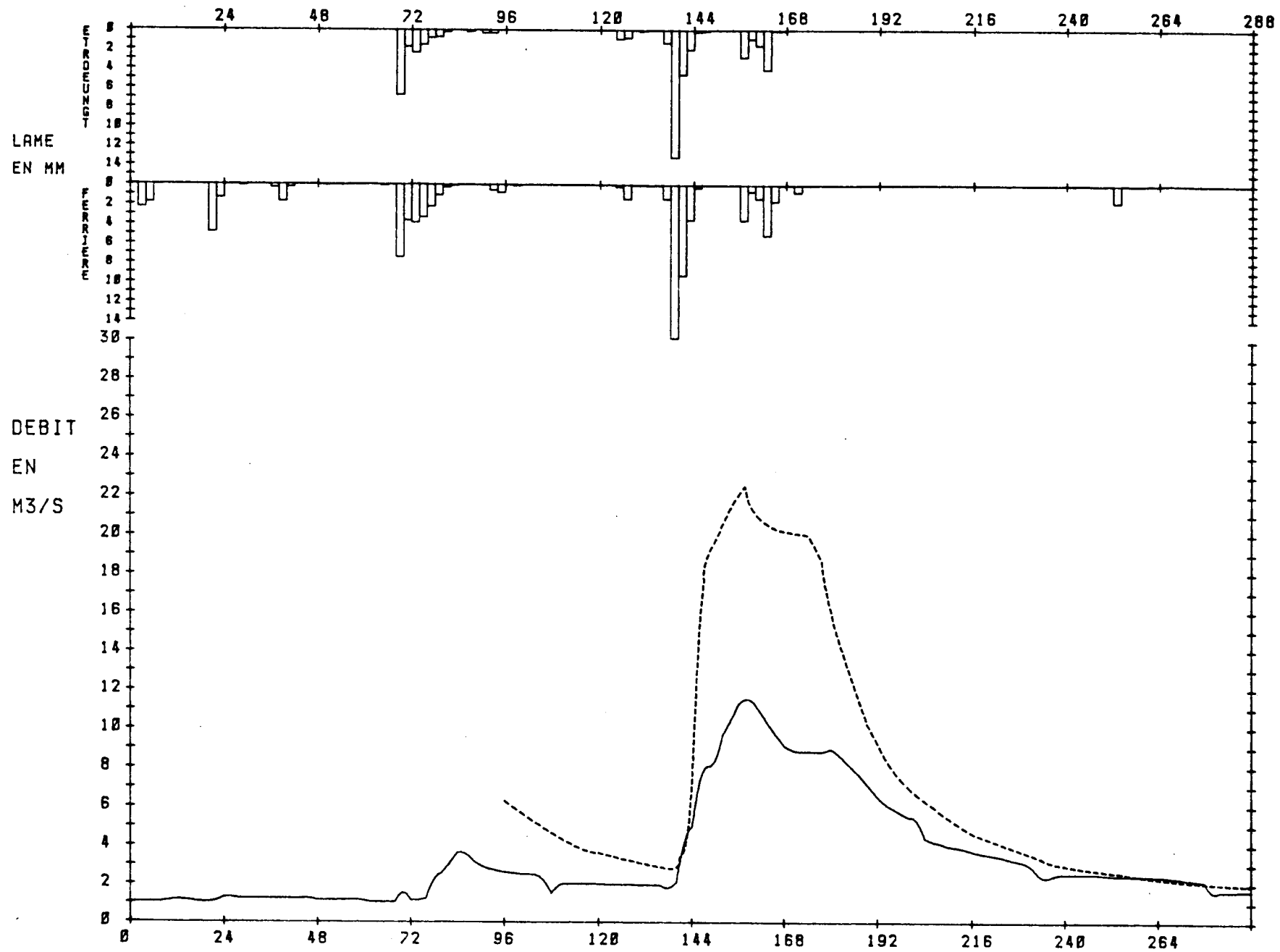
TEMPS EN HEURES



135 : Comparaison des hydrogrammes de crue enregistrés à Ferrière-la-Grande sur la Solre (trait plein) et à Etroeungt sur l'Helpe mineure (tirété) : crue du 10/3/81

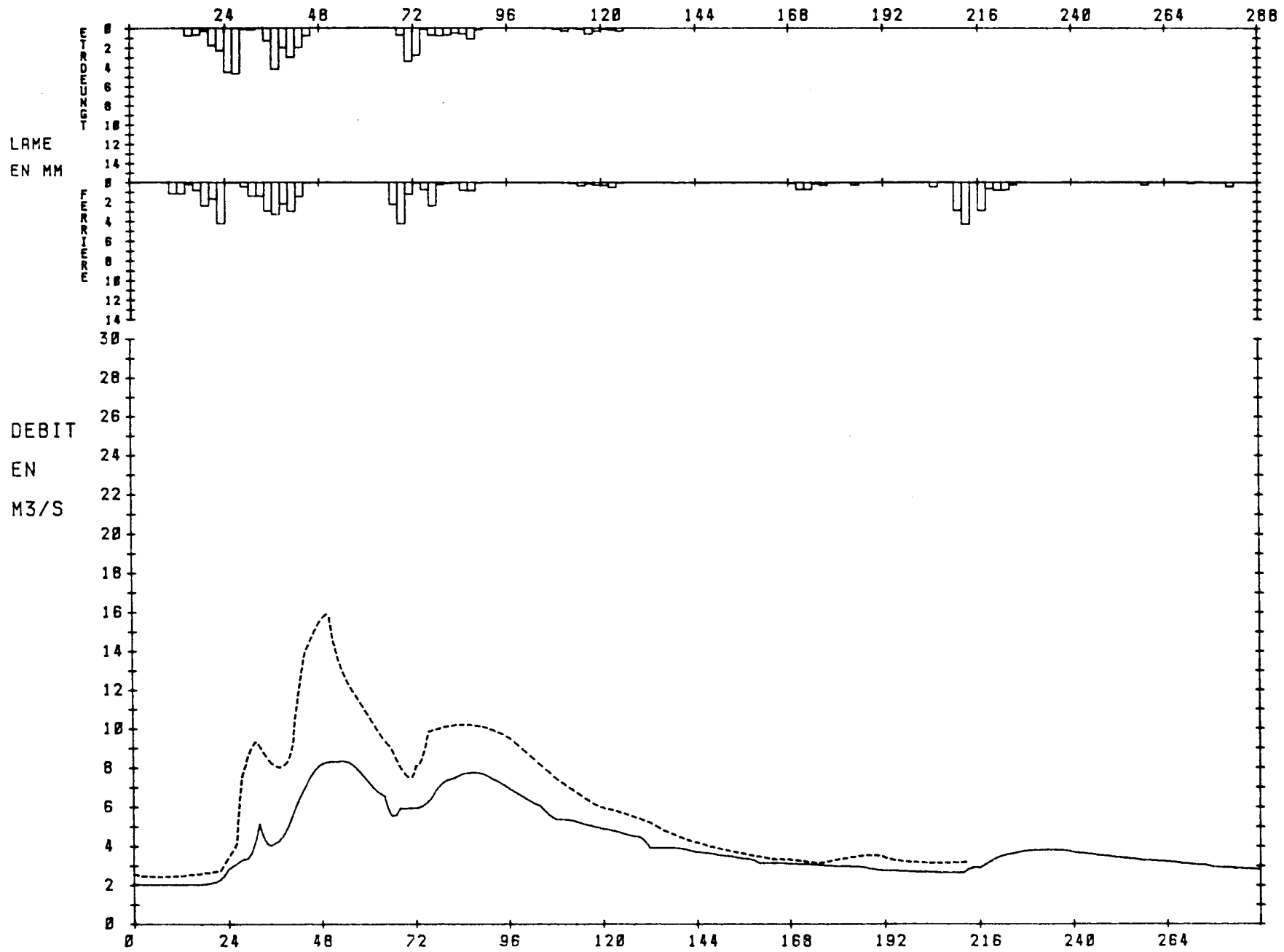


136 : Comparaison des hydrogrammes de crue enregistrés à Ferrière-la-Grande sur la Salre (trait plein) et à Firocourt sur l'Helme mineure (trait A) - cours d. 4/6/04



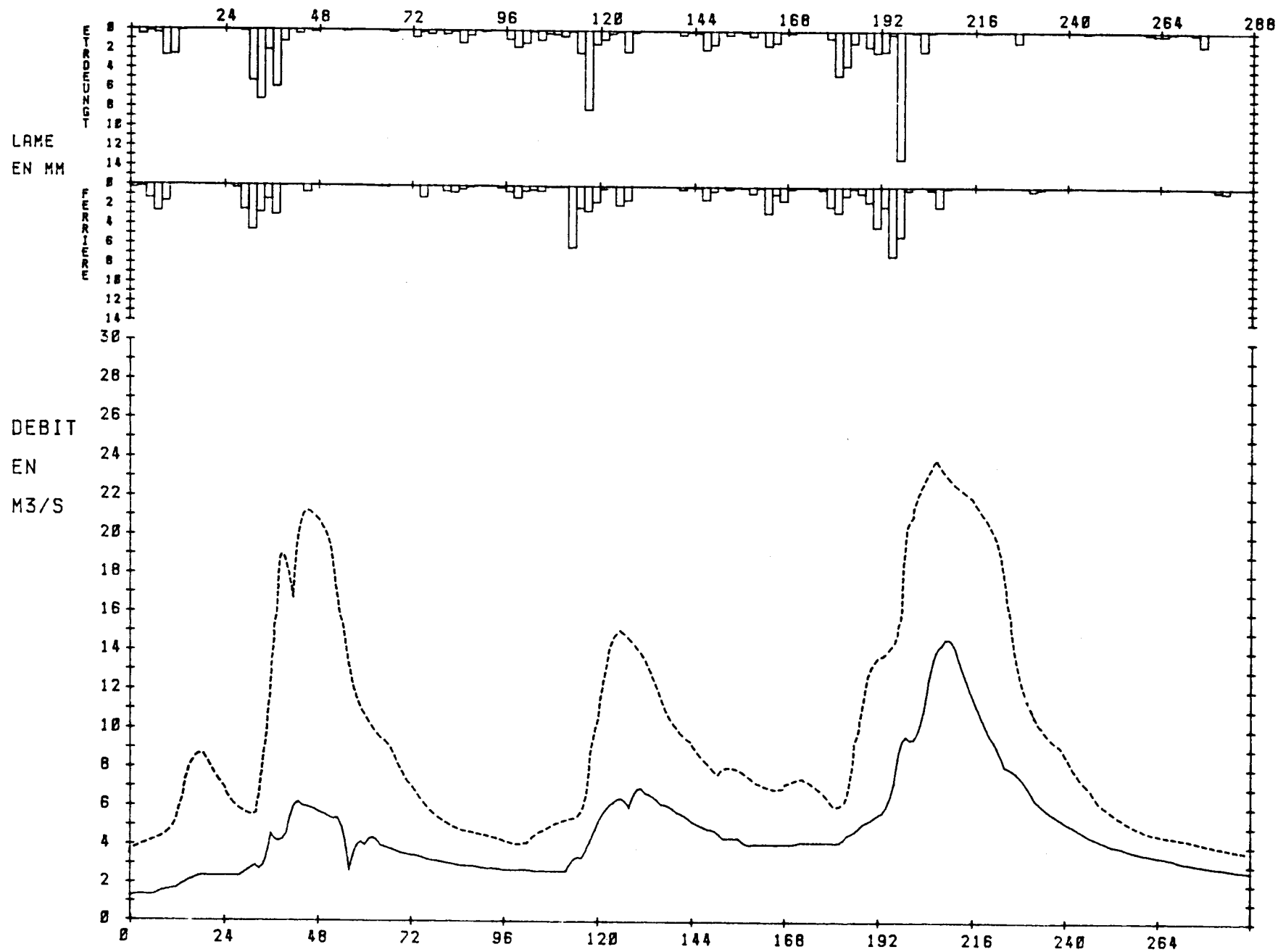
137 : Comparaison des hydrogrammes de crue enregistrés à Ferrière-la-Grande sur la Solre (trait plein) et à Etroeungt sur l'Helpe mineure (tireté) : crue du 23/5/82

TEMPS EN HEURES



138 : Comparaison des hydrogrammes de crue enregistrés à Ferrière-la-Grande sur la Solre (trait plein) et à Etroeungt sur l'Helpe mineure (tireté) : crue du 25/3/83

TEMPS EN HEURES



139 : Comparaison des hydrogrammes de crue enregistrés à Ferrière-la-Grande sur la Solre (trait plein) et à Etroeuingt sur l'Helpe mineure (tireté) : crue du 31/3/86

TEMPS EN HEURES

6.4.2.2. Volumes de crue

Les hydrogrammes enregistrés à Etroeungt ont une forme comparable et l'on note une bonne synchronisation des mouvements de hausse ou de baisse des débits, ce qui est une preuve supplémentaire de l'homogénéité des lames précipitées, ce qui est remarquable sur un pas de temps de deux heures. Les temps de base sont comparables à Ferrière et à Etroeungt pour chaque crue.

On note que les volumes de crue enregistrés à Etroeungt sont beaucoup plus importants que ceux de Ferrière, ceci dans des proportions qui dépassent largement la différence de taille des deux bassins versants. Pour une surface de bassin de moitié supérieure, les volumes de crue sont près de deux voire trois fois plus élevés à Etroeungt qu'à Ferrière. Les volumes ruisselés n'autorisant pas la comparaison entre deux bassins dont la surface est différente, on a calculé les lames ruisselées qui correspondent au quotient des volumes par les surfaces respectives des deux bassins.

6.4.2.3. Coefficients de ruissellement

Le coefficient de ruissellement direct s'obtient simplement en rapportant la lame ruisselée à la lame précipitée. Les coefficients de ruissellement observés à Ferrière-la-Grande et à Etroeungt ont été calculés pour les sept crues et sont présentés sur le document 140. Les coefficients de ruissellement obtenus pour Ferrière et pour Etroeungt sont très bien corrélés puisqu'on obtient un coefficient de corrélation de 0,93 .

On note cependant que les coefficients de ruissellement sont systématiquement très supérieurs à Etroeungt. Si l'on prend l'exemple de la crue du 13/2/76, la différence entre les coefficients de ruissellement (25,4 % à Ferrière contre 37,1 % à Etroeungt) exprime que, pour une portion de surface identique de 100 km², une lame précipitée de 20 mm va provoquer un volume de ruissellement de 508 000 m³ à Ferrière et de 740 000 m³ à Etroeungt. Pour la crue du 15/1/81, les volumes respectifs seraient de 1,126 et 1,69 millions de m³. Toutes les crues simultanées à Ferrière et à Etroeungt montrent de telles différences.

La mise au point de modèles n'exige pas toujours que le déterminisme des phénomènes étudiés soit élucidé, ce qui est le cas des modèles stochastiques de type "boite noire" qui prennent en compte un nombre très limité de variables. L'existence de telles différences dans les volumes de ruissellement doit cependant être élucidée :

Date de la pointe de crue	Volume de crue (millions de m ³)		Lame ruisselée (mm)		Lame précipitée (mm)		Coefficient de ruissellement (%)	
	Ferrière	Etroeungt	Ferrière	Etroeungt	Ferrière	Etroeungt	Ferrière	Etroeungt
13/2/76	0,86	2,25	7,5	12,9	29,5	34,7	25,4	37,1
15/1/81	1,73	2,87	15,0	16,4	26,7	19,4	56,3	84,5
10/3/81	1,04	2,06	9,0	11,8	39,9	31	22,7	38,0
4/6/81	0,58	2,46	5,0	14,1	41,7	40,5	12,1	34,7
23/5/82	1,25	2,56	10,9	14,6	43,4	33,7	25,0	43,4
25/3/83	1,04	2,05	9,0	11,7	43,6	42,9	20,7	27,3
31/3/86	0,88	2,1	7,7	12,0	29	31,7	26,4	37,9

140 : Volumes de crue et comparaison des lames ruisselées et précipitées sur le bassin de la Solre à Ferrière et le bassin de l'Helpe mineure à Etroeungt.

6.4.3. Facteurs des différences constatées entre les coefficients de ruissellement du bassin de Ferrière-la-Grande et d'Etroeungt

6.4.3.1. Défaillance systématique des limnigraphes

On a déjà évoqué le problème d'un mauvais enregistrement des hauteurs à Ferrière-la-grande (cf. chap.3, paragraphe 3.1.2.). En ce qui concerne le limnigraphe d'Etroeungt, celui-ci aurait plutôt tendance à minimiser les hauteurs d'eau enregistrées et une correction irait dans le sens d'un accroissement des écarts sur les coefficients de ruissellement à Etroeungt et à Ferrière. On ajoutera que de nombreux jaugeages ont été effectués et que les débits déduits des hauteurs ne peuvent pas souffrir d'erreurs importantes.

6.4.3.2. Différences d'évapotranspiration entre bassins.

Si le prélèvement par évapotranspiration est différent sur les deux bassins, ceci entraînera bien entendu une différence sur les coefficients de ruissellement.

Cette hypothèse n'est pas recevable pour trois raisons :

- . Le couvert végétal, notamment la densité des zones boisées est comparable sur les deux bassins
- . les températures sont peu différentes entre les deux bassins et les altitudes sont comparables
- . on ne note pas d'hétérogénéité climatique entre les deux bassins

6.4.3.3. Rôle du sous-sol

Les deux bassins étudiés sont en partie perméables ; la perméabilité y est très variable selon la lithologie et l'état de fracturation des formations. On observe ainsi différents types de perméabilité : perméabilité faible mais relativement homogène dans les limons et dans les sables argileux, perméabilité limitée en profondeur dans les franges d'altération des formations schisteuses et perméabilité forte (de fracture) dans les calcaires.

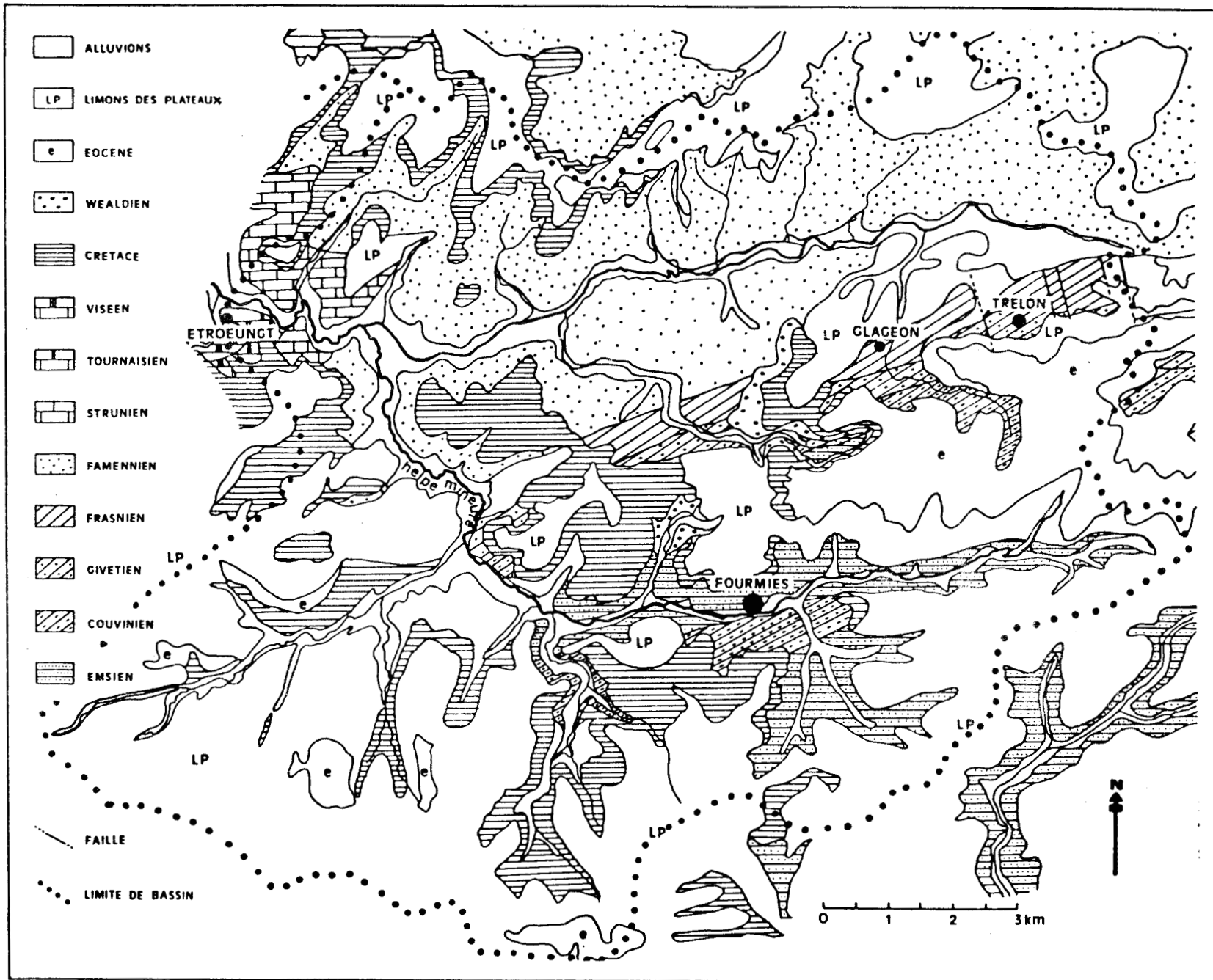
Le prélèvement sur le ruissellement direct par infiltration est donc variable et difficile à quantifier.

Ces différents terrains sont indiqués sur les schémas géologiques des deux bassins (document 66 pour le bassin de la Solre, document 141 pour le bassin de l'Helpe mineure à Etroeungt).

Le bassin d'Etroeungt comprend des terrains plus ou moins perméables. Les terrains calcaires du Couvinien, Givétien et Frasnien inférieur sont bien fissurés et de type karstique ; ils sont encadrés, au Sud, par les terrains schisto-gréseux du Dévonien inférieur (Emsien), fissurés, qui contiennent une nappe dont le niveau piézométrique reste proche de la surface topographique (Clément, 1970) et, au Nord, par les schistes famenniens qui contiennent une nappe superficielle. Les calcaires et schistes de la région d'Etroeungt (Strunien ou Etroeungtien) contiennent également une nappe. L'ensemble des terrains calcaires correspond à un peu plus de 12 km², soit 7 % de la surface du bassin versant. Tous ces terrains sont en partie recouverts par les terrains mameux crétacés, les sables éocènes et les limons des plateaux.

Le bassin de la Solre est globalement schisteux (Famennien) et recoupé d'Est en Ouest par deux synclinaux de calcaire carbonifère et un anticlinal calcaire Frasnien au niveau de Ferrière-la-Grande. L'ensemble est recouvert en discordance par des terrains sableux éocène et des limons. On retrouve donc des terrains du même type que ceux d'Etroeungt mais avec davantage de secteurs perméables. L'ensemble des terrains calcaires couvre environ 37 km², soit 32 % du bassin versant.

Ces observations montrent que l'obtention de coefficients de ruissellement plus élevés à Etroeungt s'explique par une proportion moins importante de terrains perméables en grand et donc une plus forte aptitude au ruissellement (cette aptitude est encore plus forte dans le cas du bassin de l'Helpe majeure dont le caractère schisteux entraîne une rapide saturation des terrains et un ruissellement important).



141 : Carte géologique schématique du bassin versant de l'Helpe mineure à Etroeuingt.

La question posée ici est celle de savoir si ces eaux d'infiltration sont susceptibles ou non d'influencer la forme de l'hydrogramme de crue. Ceci est une question de vitesse d'infiltration, de vitesse d'écoulement à travers la nappe et des positions relatives du niveau piézométrique et du plan d'eau du cours d'eau :

. Si les eaux d'infiltration participent à l'hydrogramme de crue par un transit rapide dans les aquifères, l'onde de crue est alors amortie puis étalée. Ceci peut être vérifié en s'assurant que le niveau piézométrique de la nappe se soit rapidement élevé au niveau du lit du cours d'eau. On ne dispose cependant pas d'enregistrement piézométrique continu. C'est le cas de terrains perméables en grand comme les calcaires fissurés givétiens, frasnien et dinantiens, qui se constituent en aquifères localement libres et dans lesquels la circulation des eaux est rapide et que l'on pourrait qualifier de "mésokarstiques". A la différence des aquifères localisés et superficiels, on sait que ces aquifères sont susceptibles d'absorber et de restituer un volume important d'eaux d'infiltration.

. Si les eaux d'infiltration ne participent pas à l'hydrogramme de crue du fait d'une faible vitesse de transit, elles pourront participer ultérieurement à l'écoulement de base, ceci à condition que la surface piézométrique soit à un niveau tel qu'il puisse y avoir drainage par le cours d'eau. C'est le cas de terrains perméables localisés ponctuellement sur le bassin ou de terrains dont les zones perméables sont limitées à la frange de surface.

. Certaines eaux d'infiltration ne participent ni à l'hydrogramme de crue ni à l'écoulement de base du fait d'un transit rapide des eaux (infiltration rapide) vers des aquifères dont le niveau piézométrique ne rejoint jamais celui du plan du cours d'eau. De plus, si les surfaces d'inondation coïncident avec les zones d'infiltration, il peut y avoir prélèvement direct sur le débit du cours d'eau. Dans ce cas, l'amplitude de la crue est diminuée mais la durée de l'onde de crue est conservée.

Ce dernier phénomène pourrait se produire sur la partie amont de l'Helpe mineure dont le cours traverse le calcaire givétien aux environs de Fourmies et les calcaires carbonifères en amont de la station d'Etroeungt. Afin de rester dans le cadre de notre étude, nous avons examiné ce phénomène sur le bassin de la Solre.

Le lit de la Solre traverse deux importants synclinaux de calcaires perméables en grand qui sont exploitées pour l'alimentation en eau potable : le synclinal de Sars-Poteries au Sud du bassin et celui de Ferrière-la-petite au Nord. Si le synclinal de Sars-Poteries n'est pas susceptible de détourner d'importantes quantités d'eau sur les débits des cours d'eau, puisqu'il se situe sur la partie amont du bassin de la Solre, on note que le synclinal de Ferrière, très exploité, est recoupé par le cours aval de la Solre où les débits sont importants, notamment en période de crue. Ces observations nous ont amené à analyser plus en détail la zone perméable de Ferrière-la-Petite et son rôle lors des crues.

CHAPITRE 7 : **LIAISONS EAUX DE SURFACE-EAUX SOUTERRAINES**

7.1. POSITION DES NAPPES PAR RAPPORT A LA SOLRE

7.1.1. Information sur les niveaux piézométriques

En rive gauche de la Solre, on dispose de niveaux dynamiques au niveau des captages d'alimentation en eau potable du S.I.D.E.N et d'Eau et Force (FI, FII, F1, F2, F3, F5) et d'un niveau influencé par les captages proches (F4). Ces captages alimentent en partie le secteur central du bassin de la Sambre, c'est à dire la zone de Ferrière-la-Grande, Rousies, Maubeuge, Louvroil et Boussois. A titre d'exemple, le réseau d'alimentation en eau du bassin de la Sambre par la société Eau et Force est présenté sur le document 142.

En rive droite, on dispose de deux niveaux :

- . Le puits Auwercxz à Ferrière-la-petite (indice 30-5-152).
- . L'ancien puits du S.I.D.E.N (P1) au lieu-dit "la dannée" (indice 30-5-10).

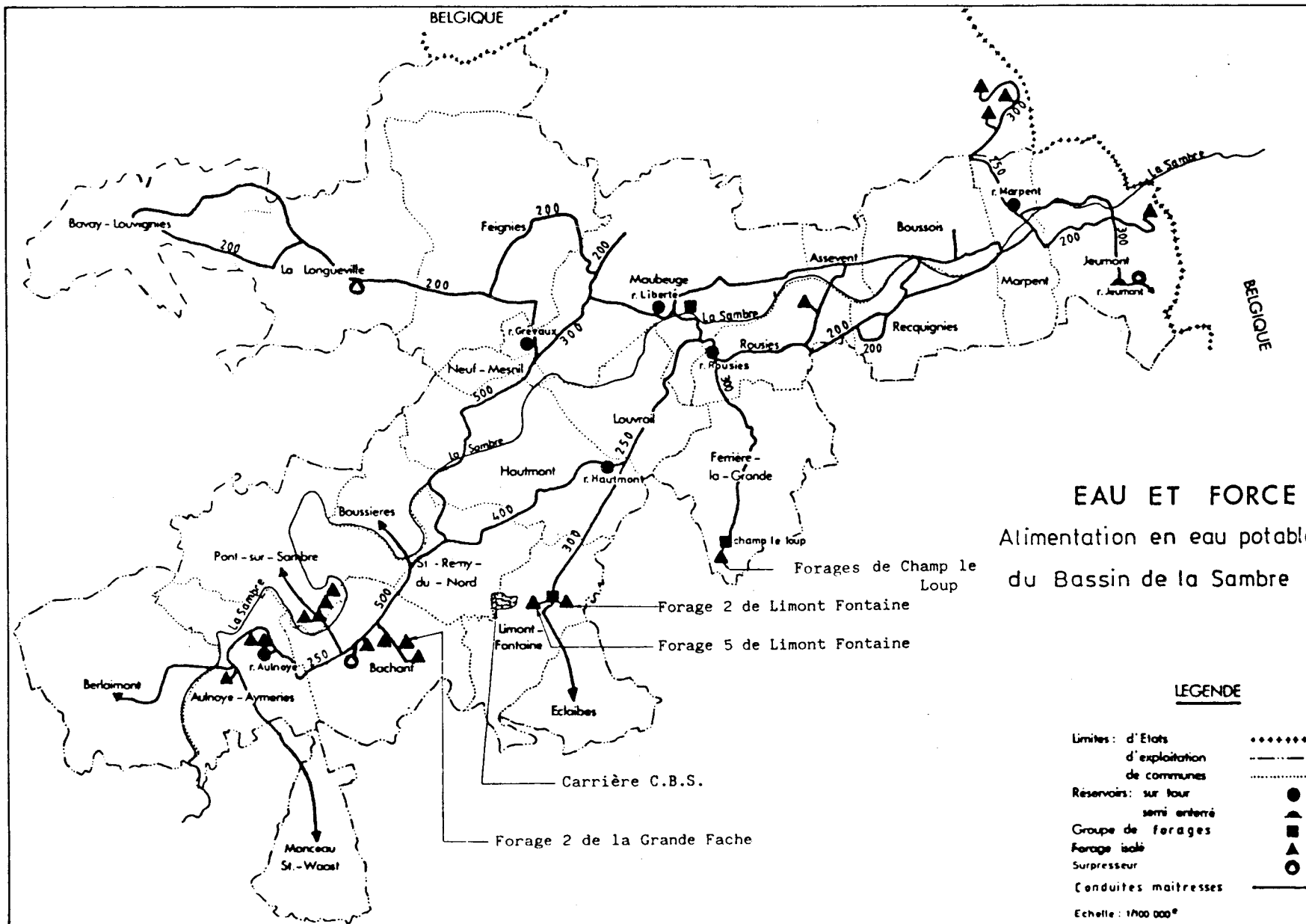
Les caractéristiques de ces captages et puits ont été précisées antérieurement dans le document 67. Leur position par rapport au synclinal est précisée par le document 143.

7.1.2. Evolution des niveaux piézométriques

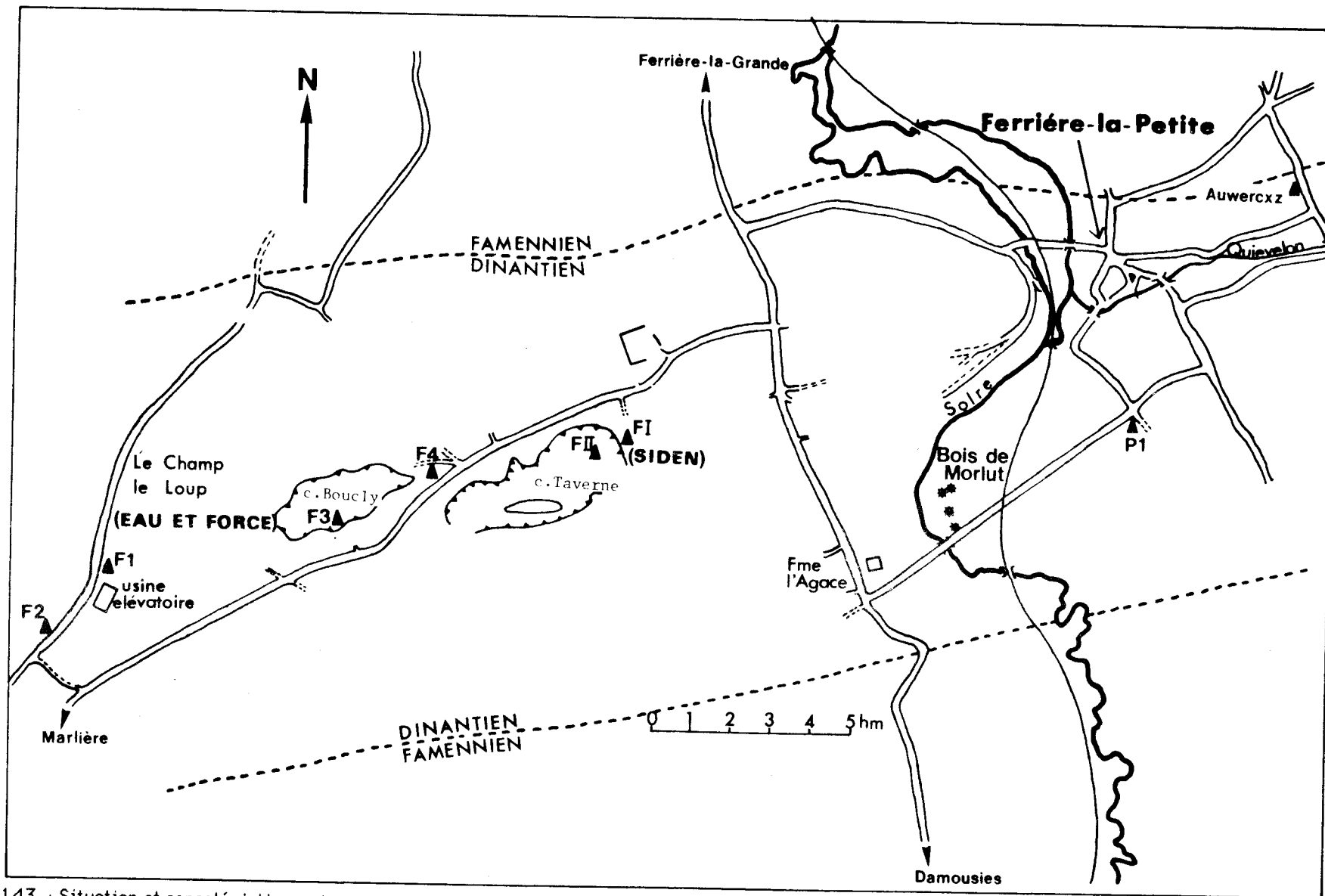
7.1.2.1. Comparaison des niveaux piézométriques au coeur du synclinal de Ferrière-la-petite, de part et d'autre de la Solre.

La nappe carbonifère de la zone de "Champ-le-loup" est largement exploitée par les captages d'alimentation en eau potable de la société Eau et Force et du S.I.D.E.N. Cette exploitation intensive (l'exhaure y est voisine de 3 millions de m³, cf. document 144), entraîne d'importantes fluctuations de la nappe.

Dans la zone de captage de "Champ-le-loup", les niveaux des captages évoluent de façon parallèle et l'on a choisi de représenter l'évolution des niveaux influencés des seuls captages F1 (Eau et Force : 30-5-17) et FI (SIDEN :30-5-106). Parallèlement sont indiqués les niveaux de l'ancien captage P1 (SIDEN : 30-5-10), en rive droite de la Solre.



142 : Réseau d'alimentation en eau potable de la société eau et force sur le bassin de la Sambre



143 : Situation et caractéristiques des ouvrages implantés sur le synclinal carbonifère de Ferrière-la-Petite.

ANNEE	EAU ET FORCE FERRIERE-LA-G.	S. I. D. E. N FERRIERE-LA-G	S. I. D. E. N SARS-POTERIES
1973	2,42	0,35	0,62
1974	2,56	0,42	0,67
1975	1,93	0,36	0,68
1976	2,13	0,38	0,63
1977	2,37	0,37	0,57
1978	2,09	0,41	0,64
1979	2,32	0,48	0,68
1980	2,39	0,49	0,72
1981	2,5	0,47	0,82
1982	2,42	0,51	0,78
1983	2,31	0,48	0,8
1984	2,41	0,47	0,76

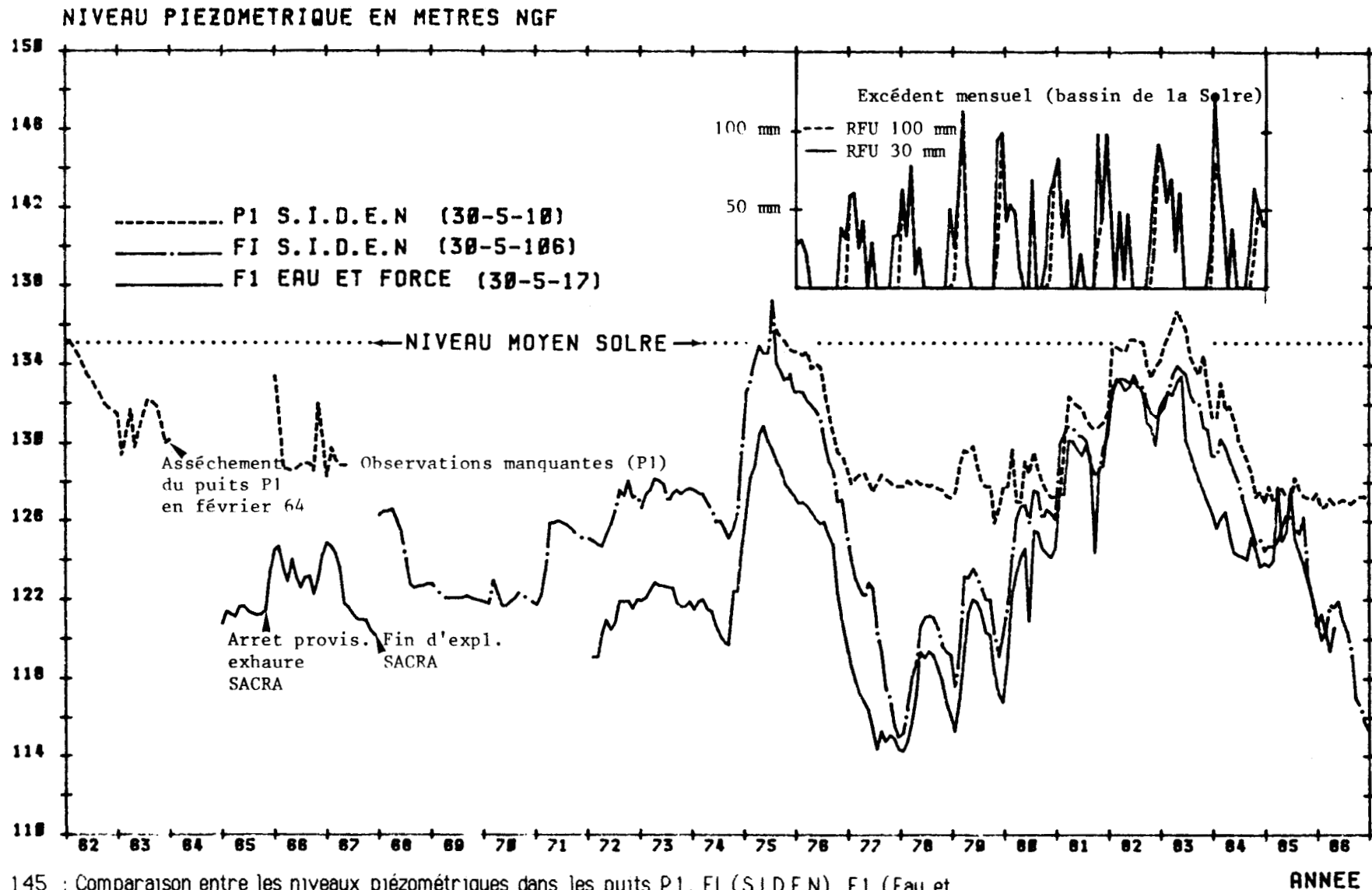
144 : Exhaure sur le bassin de la Solre en millions de m³.

Ce dernier puits est implanté au centre du synclinal dans les niveaux viséens à 250 mètres de la rive droite de la Solre. Son niveau statique s'établissait à 137 mètres en 1954, date de sa mise en service.

L'évolution des niveaux piézométriques de 1962 à 1986 est présentée sur le document 145.

L'historique des implantations est la suivante :

- De 1951 à 1965 : Exploitation de la carrière Boucly par la société SACRA et rabattement de la nappe à la cote 130 mètres ;
- 1954 : Mise en service du premier captage P1 (SIDEN) à Ferrière-la-Petite ;
- 1959 : Mise en service du captage F1 et de l'usine élévatoire de "Champ-le-loup"(Eau et Force) ;
- 1962 : Mise en service du captage F2 (Eau et Force) ;
- Février 1964 : Approfondissement de la carrière Boucly par la société SACRA et rabattement de la nappe à la cote 124, 6 mètres. Les captages F1 et F2 (Eau et Force) sont moins productifs. Le puits P1 du SIDEN (fond du puits à 126 mètres) est asséché ;
- Juin 1964 : Mise en service du captage F3 dans l'ancienne carrière Boucly ;
- Décembre 1965 : Arrêt provisoire d'exploitation de la SACRA et remontée du niveau piézométrique à 132 mètres dans la carrière Boucly et à 133 mètres dans le captage P1 ; cette remontée permet de calculer une bonne transmissivité de la nappe de l'ordre de 5 à 8.10⁻³ m²/s dans la zone de rabattement (Dassonville et Plat, 1968).
- Février 1966 : Reprise d'activité de la SACRA dans la carrière Taverne et rabattement de la nappe à 126,4 mètres ;



145 : Comparaison entre les niveaux piézométriques dans les puits P1, FI (S.I.D.E.N), F1 (Eau et Force) et le niveau moyen du plan d'eau de la Solre sur le flanc sud du synclinal de Ferrière-la-Petite. Le puits P1, à l'Est, et les puits FI et F1, à l'Ouest, sont disposés de part et d'autre de la Solre. On constate que le plan d'eau de la Solre se trouve la plupart du temps au dessus de la surface de la nappe du calcaire carbonifère.

- A titre indicatif, de février à décembre 1966, les pompages d'exhaure de la SACRA correspondent à un volume voisin de 1,4 millions de m³ ; en ajoutant les volumes pompés pour les captages d'alimentation en eau potable, le prélèvement total pour 1966 avoisine 4 millions de m³ dans la zone synclinale de Ferrière-la-petite - champ-le-Loup ;
- Septembre 1967 : Arrêt total d'exploitation de la SACRA et mise en service du captage FI (SIDEN) ;
- 1973 : Mise en service du captage F II (SIDEN) ;
- Janvier 1975 : submersion du captage F3 ;
- 1976 : Baisse généralisée des niveaux (sécheresse). Dans le secteur de "Champ-le-loup", le niveau influencé atteint 115 mètres en fin 1977 ;
- 1977-1983 : Oscillations et remontée des niveaux ;
- Mars 1983 : Submersion du captage FII ;
- Fin 1986 : le niveau influencé atteint 115 mètres.

Le battement occasionné par les anciennes exploitations et les captages atteint donc plus de vingt mètres.

L'ensemble de ces observations montre :

- que le cône d'influence des pompages effectués dans le secteur de "Champ-le-loup" s'étend largement vers la Solre et au delà de la rive droite ;
- que les reprises ou les arrêts d'exhaure sont immédiatement ressentis en rive droite, ce qui montre la bonne conductivité hydraulique de la nappe au centre du synclinal ;
- que le niveau de la nappe du calcaire carbonifère, au centre du synclinal, se trouvait dès 1961 largement sous le niveau de la Solre dont le lit mineur se trouve, dans ce secteur, à une cote voisine de 135 mètres ;

7.1.2.2. Niveaux aquifères en bordure du synclinal - Relations entre nappes

Depuis 1971, le niveau en 30-5-152 (Auwercxz) oscille entre 135 et 137 mètres d'altitude avec de très faibles fluctuations. Ce puits est situé en bordure nord du synclinal. Des observations ponctuelles sur un autre puits et dans les carrières situées en rive gauche sur cette même bordure confirment ce niveau élevé . Le niveau de la nappe du calcaire carbonifère se trouve ainsi systématiquement plus élevé en bordure qu'au centre du synclinal.

Sur cette bordure synclinale, l'aquifère carbonifère est en contact avec l'aquifère superficiel famennien (coupe, document 68). A ce niveau, il semble que la nappe superficielle contenue dans la

frange d'altération des schistes famenniens alimente la nappe du calcaire carbonifère par déversement le long du contact Strunien-Famennien supérieur. Le niveau de la nappe du calcaire carbonifère en limite Nord du synclinal se trouve donc soutenu en permanence par les apports famenniens. Aucune information piézométrique ne permet de montrer que ce phénomène se produit le long du contact sud, mais les structures géologiques sont équivalentes.

7.2. PERTES DE LA SOLRE PAR INFILTRATION DANS LA NAPPE DU CALCAIRE CARBONIFERE.

Les remarques précédentes montrent que la Solre est en position de participer à l'alimentation de la nappe carbonifère.

On doit noter l'étendue du cône de rabattement dû, anciennement, aux pompages de la SACRA et des captages d'AEP (Alimentation en Eau Potable) et, actuellement, aux seuls captages d'AEP et la rapidité des réactions du niveau statique enregistré en rive droite de la Solre. Ce comportement hydrogéologique est à relier à la nature karstique de l'altération calcaire par les eaux, altérations dont l'ampleur s'accroît vers l'Est et qui sont à l'origine des magnifiques grottes observées en territoire belge. Pour le secteur de Ferrière-la-Petite, on peut désigner les conséquences de l'altération par le terme "mésokarst", terme recouvrant une karstification décimétrique utilisant comme guides les plans de stratification et les fractures ouvertes par la tectonique.

Ces pertes du lit mineur de la Solre sont évoquées dans plusieurs études : Dassonville et Plat (1968) indiquaient l'influence des pompages au "Champ-le-loup".

Les travaux de Philippart (1974) font état d'un écoulement de la nappe vers la Sambre et vers la zone captive à l'Ouest ; ceux de Delporte (1979) font état d'un écoulement de la nappe du calcaire carbonifère, d'une part vers l'Est par la Solre et le Quiévelon, d'autre part vers l'Ouest par drainage vers la Sambre. De nombreux travaux font ensuite état de pertes de la Solre au niveau du synclinal (Droz, 1982 - Carlier, 1983).

7.2.1. Jaugeages dans le secteur de Ferrière-la-petite

Préalablement aux conclusions précédentes, une série de jaugeages était entreprise en octobre et novembre 1967 sur la Solre et ses affluents, au niveau du synclinal carbonifère (Dassonville, 1968). Les résultats furent les suivants :

24 octobre 1967

- débit d'entrée dans le synclinal : 400 l/s ;
- apport du ruisseau du Quiévelon : 20 l/s ;
- débit de sortie : 220 l/s ;
- pertes : 200 l/s.

20 novembre 1967

débit d'entrée dans le synclinal : 515 l/s
apport du ruisseau du Quiévelon : 25 l/s
débit de sortie : 550 l/s
gain : 10 l/s

Ces résultats contradictoires et situés en limite de la précision de mesure ne permettaient pas d'élucider le problème.

Dès 1968, la Solre a donc été soumise à des jaugeages réguliers dans sa traversés du synclinal carbonifère de Ferrière-la-petite (Caudron et Clément, 1972). Deux échelles limnimétriques furent posées à l'entrée et à la sortie du synclinal et les débits furent mesurés en continu de mars 71 à novembre 72.

Outre l'observation purement hydrologique de crues brèves et brutales à n'importe quelle période de l'année et de décrues rapides, on note que la différence des débits entre la station amont et aval est très souvent négative. Ce fait est également noté lors des jaugeages instantanés (23 valeurs négatives pour 28 jaugeages instantanés).

De mars 1971 à novembre 72, on a estimé les pertes moyennes à 165 l/s sur la Solre. Des pertes étant également signalées sur le Quiévelon et sur la Radiève. Les pertes moyennes du réseau hydrographique lors de sa traversée du synclinal de Ferrière seraient voisines de 200 l/s sur cette période.

La comparaison entre le niveau moyen de la Solre, dans sa traversée du synclinal, et celui de la nappe carbonifère, en rive gauche et droite (P1) confirme pour nous l'hypothèse de pertes constantes de la Solre vers l'aquifère carbonifère.

7.2.2. Pertes par infiltration rapide

7.2.2.1.- Observations géologiques dans le secteur du bois de Morlut

Les mesures de piézométrie et les pertes mesurées sur la Solre au droit du synclinal montrent qu'une ponction est effectuée sur le débit moyen de la Solre. Les observations complémentaires menées sur le terrain conduisent à s'interroger sur les possibilités d'un prélèvement, en hautes-eaux, c'est-à-dire sur les débits des crues dont les ondes transitent par le synclinal.

Le lit majeur de la Solre occupe périodiquement la surface du synclinal au niveau du bois de Morlut (document 143). En rive droite, j'ai constaté l'existence, au milieu des alluvions limoneuses, de véritables effondrements (document 146 a) dont le diamètre et la profondeur sont voisins de deux mètres, certains effondrements adjacents dessinant une direction grossièrement Est-Ouest. Les parois des cavités sont parsemées de conduits décimétriques et le fond présente un ou plusieurs orifices dont le diamètre varie de dix à trente centimètres. Les terrains calcaires se trouvent à quelques mètres sous la surface des limons.

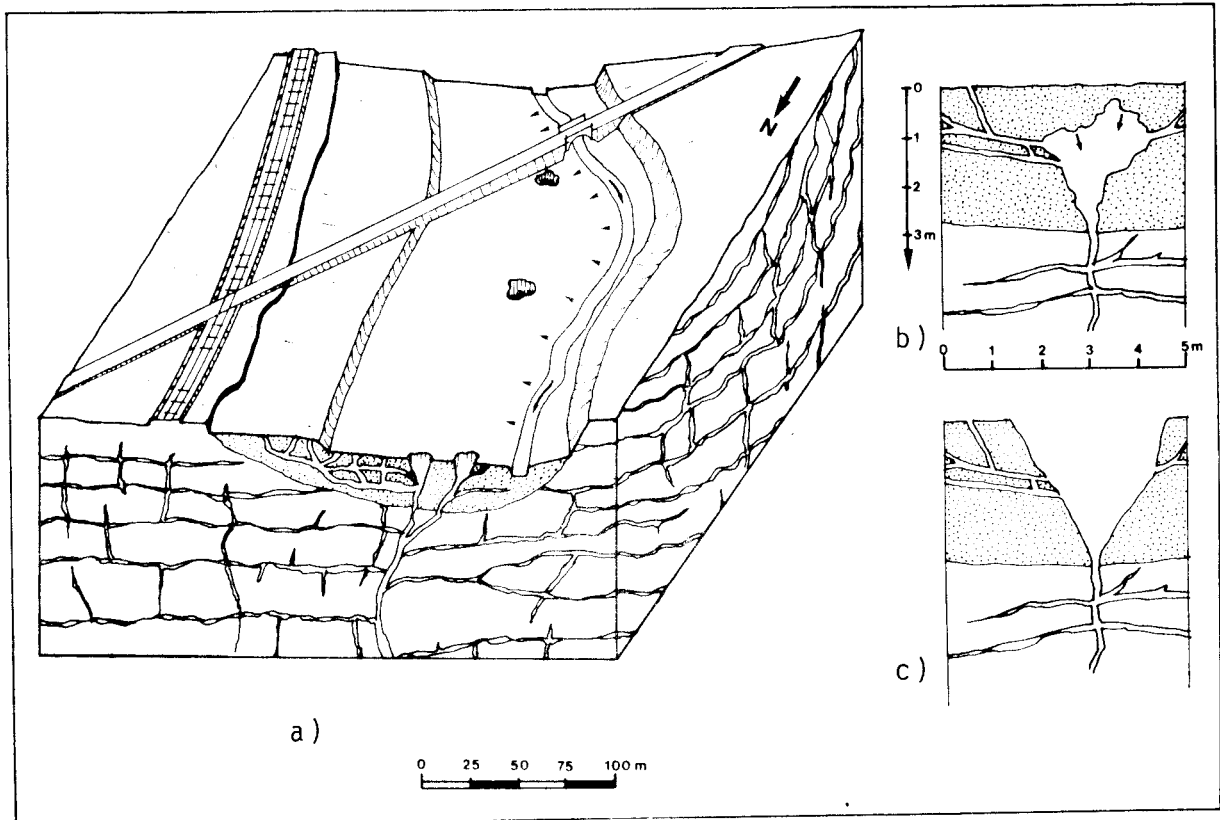
7.2.2.2. Observations en période de crue

Pour un débit que l'on estime voisin de 5 m³/seconde, le lit majeur commence à être occupé et les effondrements sont recouverts par les eaux de la Solre. La question s'est alors posée de quantifier d'éventuelles pertes par infiltration rapide par ces drains largement ouverts.

Lors des crues, la largeur du lit est telle qu'il n'est pas possible d'envisager des jaugeages à l'entrée et à la sortie du synclinal et sur les affluents de la Radiève et du Quiévelon. La montée en crue étant rapide, il est par ailleurs impossible de mobiliser une équipe de jaugeurs à cette occasion.

A défaut d'une mesure parfaite, nous avons voulu connaître l'influence de ces effondrements en période de crue. L'observation sur place de trois crues a pu mettre en évidence les faits suivants :

Dès le début d'une crue, les eaux s'avancent sur le bois de Morlut et forment des chenaux. Lors de la progression dans les chenaux, les eaux sont absorbées par les très nombreux terriers d'insectivores qui colonisent cette zone de limons.



146 : Schéma d'interprétation des effondrements dans le secteur du bois de Morlut.
a) Bloc-diagramme montrant le cours de la Solre dans la traversée du secteur du bois de Morlut et les effondrements dans la zone inondable, au droit du synclinal de Ferrière-la-Petite
b et c) Formation des effondrements dans les limons.

Le débit augmentant, certains chenaux aboutissent aux effondrements mais la plupart des effondrements ne sont pas directement alimentés par les autres chenaux. En quelques heures, le bois de Morlut est inondé. Après submersion des effondrements eux-mêmes, aucun appel d'eau par dépression n'est observé au droit de ces effondrements.

La décrue est rapide et le bois de Morlut est ensuite dégagé par les eaux. Au niveau des effondrements, le plan d'eau montre la poursuite de l'abaissement du niveau d'eau dans les limons et l'on observe de nombreuses venues d'eaux sur les flancs des effondrements.

Dès le tarissement des venues d'eaux, les effondrements sont littéralement siphonnés en quelques minutes par les orifices décimétriques visibles au fond des effondrements.

7.2.2.3. Interprétation

L'exploitation intensive des eaux souterraines entraîne une importante dénivellation entre le niveau de la Solre et le niveau piézométrique de la nappe du calcaire carbonifère ; ceci favorise les

infiltrations directes dans la nappe sous-jacente. Le mouvement de ces eaux semble avoir dégagé les fractures et développé la conductivité hydraulique de ce secteur.

L'ensemble de la zone inondable du bois de Morlut est ainsi drainée non seulement par le cours aval dont le débit est freiné par les zones inondées d'aval mais aussi par de nombreux drains traversant les alluvions limoneuses et aboutissant aux zones de fracture du calcaire carbonifère qui collectent ces eaux. A l'aplomb de ces fractures, le mouvement des eaux entraîne les particules limoneuses, ce qui provoque peu à peu des cavités puis les effondrements observés dans le secteur (document 146 b et c). Il est vraisemblable que d'autres cavités sont en formation et que le phénomène d'effondrement se poursuivra.

La zone inondée occupant les zones calcaires carbonifères peut couvrir une surface dépassant six hectares. La quantification du volume infiltré pendant le phénomène de crue du phénomène nous paraît difficile compte tenu de la difficulté des mesures évoquée plus haut. Les volumes infiltrés dans ce secteur sont susceptibles de déterminer une diminution de l'amplitude des crues et donc du débit maximum instantané enregistré, en aval, à la station de Ferrière-la-Grande. Cette diminution d'amplitude n'est cependant pas quantifiée avec précision.

7.3.- ALIMENTATION DE LA NAPPE DU CALCAIRE CARBONIFERE ET PROTECTION DES CAPTAGES

Les faits précédents montrent que la nappe du calcaire carbonifère exploitée par les captages est alimentée :

- . par les précipitations directes sur le synclinal
- . par les pertes du lit mineur de la Solre
- . par ses bordures avec l'aquifère superficiel famennien selon son niveau de remplissage et l'orientation de sa surface topographique.
- . par les pertes du lit majeur au coeur du synclinal en période de crue
- . par l'aquifère famennien dont une partie des eaux retourne à la Solre et participe au soutien des étiages et dont l'autre partie est entraînée dans le sens d'écoulement de la nappe carbonifère vers les zones d'exhaure de "Champ-le-loup"
- . par les sources issues des sables tertiaires et des limons quaternaires dont les points d'émergence se situent sur le synclinal.

Les zones d'alimentation doivent être protégées et il convient :

- . d'exercer une surveillance stricte sur la qualité des eaux de la Solre en amont de Ferrière-la-Petite.
- . d'étendre le périmètre de protection des captages de "Champ-le-loup" au secteur du bois de Morlut.

A terme, l'amélioration de la qualité des eaux de la Solre pourra permettre son utilisation pour l'alimentation en eau potable. Les importantes fluctuations de la nappe du calcaire carbonifère montrent qu'une période prolongée d'étiage pourrait entraîner le recours à l'utilisation des eaux de surface.

Une étude complémentaire pourrait étayer l'idée d'une réalimentation de la nappe du calcaire carbonifère en favorisant la réinfiltration dans le secteur du bois de Morlut. Celle-ci pourrait prendre la forme d'une retenue dont la gestion favoriserait l'aménagement touristique et piscicole de la zone, l'écrêtage des crues et la réinfiltration des eaux.

En conclusion, la zone du bois de Morlut est un excellent exemple de communication entre les eaux de surface et les eaux souterraines, nous souhaitons qu'elle soit étudiée plus en détail et qu'un projet d'aménagement y soit envisagé.

CONCLUSIONS GENERALES



Le thème présenté ici est vaste car il correspond à des demandes d'organismes dont les buts sont différents. Il englobe tous les aspects de l'hydrologie et certains aspects de l'hydrogéologie dont certains mériteraient un plus long développement. Chacun des aspects traités, qu'il s'agisse de la critique des données, des méthodes de calcul des lois statistiques utilisées pour les ajustements, des méthodes de bilan, de la modélisation des débits, pose des questions différentes. Si l'expression mathématique des lois est correcte, il y a de multiples écueils dans la recherche de la bonne estimation : erreurs d'un appareil, erreurs humaines, échantillon par définition limité à l'information disponible et toujours trop court, méthodes d'obtention de la variable (transformation d'une hauteur d'eau en débit par exemple), variables non naturelles dues à des causes autres que les causes climatiques, échantillons hétérogènes dont les valeurs sont générées par des causes différentes, échantillons non stationnaires dont les valeurs dépendent du temps. La recherche d'échantillons plus homogènes ou plus stationnaires diminue le biais des échantillons mais diminue leur taille, ce qui augmente l'incertitude d'estimation. A tout moment, la recherche de la bonne estimation est donc un compromis entre les hypothèses d'application des lois et la limitation des incertitudes.

L'application des lois statistiques reste cependant une nécessité pour passer du stade qualitatif et descriptif au stade quantitatif ; cette quantification répond en effet aux besoins de ceux qui aménagent l'espace et dimensionnent les ouvrages (définition des disponibilités en eau potable et industrielle, dimensionnement des ouvrages riverains, définition des zones inondables, protection des eaux, annonce de crue).

RECUEIL, CRITIQUE ET MISE A JOUR DES DONNEES

La présente étude a permis de regrouper et de mettre à jour les données pluviométriques, pluviographiques et hydrologiques dispersées au sein de plusieurs organismes. La connaissance des entrées d'eaux moyennes constitue en effet un renseignement précieux pour l'hydrologue et l'hydrogéologue car elle permet d'établir un bilan qui mesure les possibilités du bassin en écoulement et en infiltration.

Le premier stade a permis de corriger les données des erreurs accidentelles dont elle étaient entachées (mauvaise transcription, décalages de temps, erreurs de calcul et de saisie). Les bordereaux des observateurs ont été consultés lorsqu'ils étaient disponibles.

Le traitement des données annuelles par double-cumuls et corrélation permet de rechercher les erreurs systématiques commises sur la pluviométrie annuelle. Quelques données manquantes ont été obtenues par extension par corrélation simple ou multiple. La période commune d'observation s'étend de 1963 à 1984.

On constate globalement une bonne homogénéité des précipitations annuelles à l'échelle du bassin avec quelques réserves sur les données des stations d'Eccles et de Liessies. On constate un accroissement de la pluviométrie avec l'altitude, c'est-à-dire vers l'Est du bassin.

A l'échelle mensuelle, la comparaison des données inter-stations et l'analyse de corrélation avec des stations de référence a permis de relever de nombreuses erreurs ; les différences non expliquées par des causes artificielles n'ont pas été corrigées.

L'analyse du régime des précipitations montre que les précipitations mensuelles moyennes des mois de Novembre, Juin et Décembre sont les plus élevées sur la période 1963-1984.

L'ensemble des données est saisi sur le matériel informatique compatible P.C au Service Hydrologique Centralisateur à Lambersart (59) et au laboratoire d'hydrogéologie de l'U.S.T.L.

ANALYSE STATISTIQUE

L'ensemble des vérifications ci-dessus constitue un préalable indispensable à l'analyse statistique des données. Pour être exploitées efficacement, cette masse de données pluviométriques et débitométriques moyennes et maximales (environ deux cent mille pour le seul bassin de la Sambre) ont été ajustées par des lois statistiques convenables ; on dispose ainsi, en tout point du bassin, de relations liant les valeurs des variables à leur probabilité d'apparition.

La lame moyenne interannuelle est de 834 mm sur la période 1963-1984. Les lames moyennes mensuelles montrent une pluviométrie marquée tout au long de l'année avec une forte lame moyenne en Novembre (91 mm).

Près des deux-tiers des maxima annuels des pluies journalières sont observés de Mai à Août. Leur ajustement statistique montre que les quantiles décennaux varient de 43 à 53 mm. Alors que les valeurs moyennes annuelles et mensuelles étaient influencées par l'altitude, les valeurs maximales journalières en sont indépendantes. On note également de fortes différences entre pluies maximales observées le même jour en différents points du bassin. Ce dernier fait est surprenant, si l'on élimine les périodes des pluies de nature orageuse dont la variabilité régionale est forte. On peut évoquer une certaine hétérogénéité spatiale des précipitations mais il faut également penser à un mauvais recueil et à des cumuls de données pluviométriques journalières, l'observateur ne relevant pas le pluviomètre à 6 heures T.U. comme le lui imposent les normes de la Météorologie Nationale.

Bien que les cumuls soient parfois décelables, il est très difficile de corriger des pluies maximales a posteriori et il nous semble important de contrôler les données au fur et à mesure de leur obtention. Ce contrôle peut être fait régulièrement si l'on utilise la télétransmission des données provenant de différentes stations au sein d'un même service, ce qui n'est que partiellement le cas actuellement. Dans le cadre de ce contrôle et de l'utilisation des données en temps réel pour la prévision des crues, on préconise que le réseau de télétransmission soit géré par un seul organisme. L'accumulation de données pluviographiques non dépouillées et dont le recueil est coûteux montre qu'il vaut mieux diminuer le nombre de stations et installer un réseau comprenant des doublets pluviomètre-pluviographe à Eppe sauvage, Fourmies, Avesnes, Landrecies (ou Berlaimont), et Sars-Poteries.

ETUDE DU SOUS-BASSIN DE LA SOLRE

L'étude de la pluviométrie annuelle et mensuelle sur le sous-bassin de la Solre montre que celle-ci est peu différente de celle du bassin de la Sambre.

Le dépouillement à petit pas de temps des pluviogrammes enregistrés à la station de Colleret a permis d'obtenir des équations saisonnières de la loi de Montana et d'estimer la probabilité d'apparition de la pluie maximale saisonnière d'une durée donnée pour des durées de 30 minutes à 24 heures. On a montré que l'on pouvait étendre cette relation à la ville de Maubeuge ; pour une portion définie du bassin urbain, cette relation permet de calculer les volumes d'eaux optima qui devront être collectés par les réseaux d'évacuation.

L'étude statistique des débits permet d'estimer les valeurs probables des débits annuels et mensuels et d'assurer la gestion des écoulements en fonction des besoins.

Lors du calcul du bilan sur le bassin de la Solre, on a confronté l'excédent de longue période (1976-1984) à l'écoulement correspondant. On constate que, pour une RFU de 100 mm, l'excédent calculé est inférieur à l'écoulement obtenu. Le mode de calcul de l'évapotranspiration reste encore très approximatif et le choix d'une RFU de 100 mm est excessif ; une RFU voisine de 30 mm paraît plus adéquate. Le système de calcul du bilan est lui-même critiquable, des reprises d'écoulement étant constatées alors que les excédents calculés sont nuls. En outre, l'utilisation des bilans pour définir les ressources en eau souterraine d'un bassin doit obligatoirement être précédée d'une confrontation avec les données de l'écoulement lorsqu'elles sont disponibles sur le bassin versant.

L'étude du phénomène d'étiage montre que l'étiage se situe en août et en septembre. La prise en compte des moyennes mobiles permet d'éviter les variations artificielles du débit et de mieux quantifier les débits probables d'étiage ; l'étiage décennal moyen de 3 jours est voisin de 150 litres par seconde ; un débit moyen de 200 litres par seconde peut se maintenir pendant trente jours. L'étiage quinquennal moyen de 3 jours est voisin de 220 l/s ; un débit moyen de 290 l/s peut se maintenir pendant 30 jours. Un essai de prédétermination des dates d'étiage a permis de fournir un calendrier prévisionnel d'étiage que l'on pourra utiliser pour la prévision des travaux d'aménagement, les autorisations de prélèvements au fil de l'eau et les autorisations de rejet qui permettent de maintenir la qualité du cours d'eau. On signale toutefois que la pluviométrie estivale reste forte et que l'échantillon des dates d'apparition et de fin d'étiage est affecté d'une forte dispersion ; ceci entraîne des intervalles de confiance importants autour des estimations calculées.

L'étude des débits maxima instantanés est basée sur l'utilisation et la confrontation de plusieurs lois statistiques. On estime que le débit décennal à la station de Ferrière-la-Grande est voisin de 24 m³/s et que la forte crue du 21 juillet 1980 a une période de retour voisine de 40 ans. Une crue semblable, au moins en ce qui concerne la cote atteinte, est survenue une vingtaine d'années auparavant d'après les riverains.

Le calcul des quantiles intermédiaires permet d'estimer les débits de pointe auxquels devront faire face les constructions riveraines, les ouvrages de protection ou de franchissement. Il permet également, après étude topographique fine, de classer les zones riveraines en fonction de leur inondabilité. Cette définition des zones inondables rentre dans le cadre du plan d'exposition aux risques.

On situe le seuil d'alerte à 10 m³/s à la station de Ferrière-la-Grande. L'analyse statistique montre que ce seuil est atteint, en moyenne, près d'une fois par an et justifie la mise en place d'un plan d'annonce de crue sur la Solre.

Le besoin d'une annonce de crue sur le bassin de la Solre m'a amené à tester un modèle à deux réservoirs permettant la simulation des débits moyens journaliers enregistrés à la station de Ferrière-la-Grande. Ce modèle utilise l'information pluviométrique recueillie aux trois pluviographes installés sur le bassin. Les bons résultats de cette simulation nous incitent à proposer au service responsable l'adaptation du modèle et son application à l'annonce de crue du bassin de la Solre puis de l'ensemble du bassin (Helpes mineure, majeure et Sambre). L'utilisation de ce modèle et son adaptation régulière aux nouvelles données nécessite l'utilisation d'un réseau de télétransmission des données.

L'étude des crues sur le bassin de la Solre montre cependant que le traitement des seules variables hydrologiques ne suffit pas à comprendre le fonctionnement des bassins hétérogènes perméables. Les modèles purement statistiques sont utiles et indispensables pour répondre aux demandes croissantes des organismes de gestion des eaux car ils permettent de quantifier les variables hydrologiques. Ces modèles doivent cependant déboucher vers des modèles (partiellement) déterministes capables d'expliquer les phénomènes observés ; ces modèles demandent une bonne connaissance du terrain et doivent donc être élaborés localement, ils exigent aussi une excellente collaboration entre statisticiens, hydrologues et hydrogéologues.

L'étude du terrain montre l'importance de la géologie et son impact sur la circulation des eaux.

A l'échelle des bassins, la comparaison des hydrogrammes de crue de la Solre à Ferrière-la-Grande et de l'Helpe Mineure à Etroeungt montre que les coefficients de ruissellement direct sont très inférieurs pour le bassin de la Solre. Cette différence est attribuée à la plus forte proportion de terrains primaires fissurés et karstifiés sur le bassin de la Solre, terrains dont la forte perméabilité exerce une ponction sur le ruissellement.

Localement, elle permet d'expliquer la liaison eaux de surface - eaux souterraines. Au niveau du synclinal de Ferrière-la-petite, le calcaire carbonifère contient une nappe dont le rabattement par les captages en eau potable provoque les pertes de la Solre mises en évidence en période de basses-eaux par des études réalisées par le B.R.G.M. Les effondrements que je signale dans le secteur du bois de Morlut montrent que des pertes se produisent lorsque cette zone est inondée en période de crue. J'émetts l'hypothèse que des pertes par infiltration rapide provoquent une diminution de l'amplitude des crues et donc de la part du ruissellement direct mesuré en aval à la station de Ferrière-la-Grande. La quantification de ce phénomène en hautes eaux nécessite la mise en place d'un dispositif de jaugeage en amont et en aval du synclinal ainsi que sur les affluents aboutissant dans le secteur dans un délai très rapide. Il est probable que le volume d'eau alimentant la nappe calcaire sous-jacente soit cependant limité d'une part par la hauteur du niveau piézométrique, d'autre part par la transmissivité des terrains. On peut encore tenter de mettre en évidence les liaisons entre le secteur du bois de Morlut et les captages d'alimentation par traçage. Il paraît souhaitable que ce secteur soit inclus dans le périmètre de protection des captages d'alimentation en eau potable.

PERSPECTIVES

La réorganisation du réseau pluviométrique du bassin de la Sambre en un réseau de télétransmission complet géré par un seul organisme doit permettre une critique régulière des données afin d'assurer les bases correctes et la mise à jour de la modélisation de la Sambre et de ses affluents. Helpe majeure. Helpe mineure et Solre.

Il est souhaitable de créer un système d'annonce de crue sur la Solre, permettant d'alerter la population quelques heures avant l'amplitude maximale de l'onde de crue. Cette annonce de crue doit s'appuyer sur un modèle pluie-débit. Le modèle à réservoirs présenté permet d'estimer l'état de saturation des terrains qui, sur nos bassins, détermine largement la montée en crue. Nous souhaitons, qu'au-delà d'un certain taux de saturation, un état de surveillance accrue soit initié en activant préventivement le modèle.

On peut citer également la gestion future du barrage du Val Joly, implanté sur l'Helpe majeure en amont de Liessies. Sa destination primitive répondait à la nécessité d'une réserve en eau pour la centrale E.D.F de Pont-sur-Sambre ; L'arrêt de cette centrale amenant les services de l'E.D.F à confier la gestion du barrage au département du Nord, le service hydrologique pourra définir une gestion automatique de ce barrage en utilisant en partie les résultats de cette étude.

En ce qui concerne la défense effective contre les crues, on peut évoquer l'idée d'une retenue installée en amont. On rappelle que le Comité technique de l'eau, dans son ancien inventaire (1967) des ressources en eau du département, avait proposé un site de retenue à Choisies, immédiatement en amont du confluent Solre-Stordoir, capable de retenir 4,5 millions de m³. On peut également envisager de favoriser la réinfiltration des eaux en aménageant un site dans le secteur perméable du bois de Morlut, ou de créer un bassin d'écrêtage immédiatement en amont de Ferrière-la-Grande.

Nous souhaitons qu'une partie des tâches de gestion des eaux sur le bassin de la Sambre trouve quelques éléments de réponse dans le travail de synthèse présenté ici.

BIBLIOGRAPHIE



BIBLIOGRAPHIE CITEE EN REFERENCE

BARAS P. et PITARD C. (1985) - Les crues de la Sambre vues des médias. Direction Régionale de la Navigation Nord - Pas-de-Calais.

BERNIER (1981) - Le modèle de renouvellement non stationnaire, Rapport E.D.F.

BOUROZ A. (1969) - Le Carbonifère du Nord de la France. *Ann. Soc. Géol. Nord*, t. LXXXIX, 1, p.47-65.

CALVET C. (1980) - Les fortes intensités de précipitations à Paris. *La Météorologie*, VIème série, n° 20-21.

CARLIER E. (1983) - Influence de la fracturation sur le comportement hydrodynamique et hydrodispersif des calcaires paléozoïques de l'Avesnois (Nord). Thèse 3ème cycle, Univ. Lille I, 224 p.

CARLIER E. et CRAMPON N. (1981) - Circulation et vulnérabilité des eaux souterraines de l'Avesnois : 1ère phase - Résultats de traçages qualitatifs sur sites témoins. S.R.A.E. Nord - Pas-de-Calais, 20 p.

CARLIER E., CRAMPON N. (1983) - Circulation et vulnérabilité des eaux souterraines de l'Avesnois : 2ème phase - Recherche des guides structuraux de l'écoulement souterrain et vérification par traçage. S.R.A.E. Nord - Pas-de-Calais, 66p.

CARLIER E., COLBEAUX J.P et CRAMPON N. (1983) - Détermination des écoulements souterrains en milieu calcaire fissuré à l'aide des traits morphologiques. *Bull. B.R.G.M.Hydrogéologie, Géologie de l'ingénieur*, n° 4, p.p. 279-286

CARLIER E., CRAMPON N. (1986) - Elaboration d'un modèle d'aquifère fissuré à régime d'écoulement variable à partir des données de fracturation et des transmissivités directionnelles. *Bull. B.R.G.M.Hydrogéologie, Géologie de l'ingénieur* n°1, p.19-23.

CARPENTIER A. (1913) - Contribution à l'étude du Carbonifère du Nord de la France. *Mém. Soc. Géol. Nord*, t. VII, 2, 434 p.

- CAUDRON M. et CLEMENT J.P. (1972) - Données géologiques et hydrogéologiques acquises à la date du 31 décembre 1972 sur le territoire des feuilles topographiques au 1/25000 de Maubeuge 1-2-5-6-7 et Trélon 1-2-3. Rapport 72 SGN 428 NPA
- CEMAGREF (1981) - Bassin versant du Real Collobrier - Date de début et de fin d'étiage - calendrier de probabilité et prévision. Note technique, Groupement d'Aix-en-Provence
- CEMAGREF (1982) - Synthèse nationale sur les crues des petits bassins versants. Ministère de l'agriculture. Fascicules 1 à 4.
- CEMAGREF (1985) - Analyse des fortes pluies de 1 à 10 jours sur 300 postes du sud-est de la France (rive gauche du Rhône et extrême Sud-Est). *Informations techniques*, 58-1
- CHAMBRE DE COMMERCE ET D'INDUSTRIE DE L'ARRONDISSEMENT D'AVESNES (1987) - Principales données sur l'arrondissement d'Avesnes. Publication du service Etudes-Documentation, 8 p.
- CLEMENT J.P (1970) - Données géologiques et hydrogéologiques acquises à la date du 31 décembre 1969 sur le territoire des feuilles topographiques au 1/25000 de Trélon 5-6, 7-8 et Hirson 1-2-3 (Nord). Rapport 70 SGN 183 NPA.
- COLIN E. et BREDEL J.A (1980) - Essais d'ajustements régionaux sur les intensités de pluie. *La Météorologie*, VIème série, n° 20-21.
- CONIL R. (1973) - Intérêt de certaines coupes de l'Avesnois dans la séquence classique du Dinantien. *Ann. Soc. Géol. Nord*, t. XCIII, 3, p.169-175.
- CORDA R., L'HOTE Y. (1970) - Techniques d'hydrométrie. S.R.A.E.Lorraine, 41 p., Metz
- COUDOUX J. (1985) - L'Avesnois-Thiérache vu des satellites. *Hommes et Terres du Nord*, N° 3, p. 201-212
- CRAMPON N., CARLIER E., COLBEAUX J.P. et LEMPEREUR R. (1987) - Guides structuraux de l'écoulement souterrain dans les formations paléozoïques carbonatées de l'Avesnois. *Bull. Soc. Géol. Fr.*

- CRAMPON N., LEMPEREUR R., CARLIER E., DROZ B., MANIA J., PREAUX C. et VREULX M. (1983) - Etude de vulnérabilité des eaux souterraines susceptibles d'être captées sur le site de Moranrieux (Avesnois) - Commune de Wallers-Trélon (Nord). Rapport S.I.D.E.N, 118 p., 39 fig., 17 tab.
- C.T.G.R.E.F. (1978) - Utilisation de quelques tests en hydrologie et calcul d'intervalles de confiance. *Informations techniques*, N° 2.
- C.T.G.R.E.F. (1978) - Distribution de fréquence adaptée aux étiages - Méthodes manuelles et graphiques. Note technique N° 6, Antony
- DEBELMAS J. (1974) - Géologie de la France. Vol. 1, 296 p., 138 fig. Edit. Doin
- DASSONVILLE G., PLAT R. et WATERLOT G. (1968) - Données géologiques et hydrogéologiques acquises sur le synclinorium carbonifère de Bachant - Ferrière-la-Petite (Nord). Rapport 68 SGL 059 NPA.
- DELATTRE C., MERIAUX E., WATERLOT M., MARLIERE R. et al. (1973) - Région du Nord - Bassin de Mons, Guide géologique régionaux, 176 p.
- DELATTRE C., POLVECHE J., WATERLOT B et WATERLOT G. (1967) - Aperçu de la structure des terrains carbonifères de l'Avesnois. *Ann. Soc. Géol. Nord*, LXXXVII, 4, p. 203-209.
- DELPORTE B. (1979) - Traitement de l'information hydrogéologique, socio-économique et économique - Application au bassin de la Sambre (Nord de la France). Thèse 3ème cycle, Univ. Lille I, 202 p.
- DE MARSILY G. (1981) - Hydrogéologie quantitative. Ed. Masson, Paris, 215 p.
- DROZ B. (1982) - Circulation des eaux souterraines dans le synclinorium de Bachant-Ferrière-la-petite - Avesnois Nord. D.E.A, Univ. Lille I, 31 p.
- DUBANT C., MAIRE G., SCHWARTZ J. (1980) - Analyse des fortes pluies de 1h à 48h pour une quinzaine de postes alsaciens. *La Météorologie*, VIème série, n° 20-21

- DUBREUIL P. (1966) - Les caractères physiques et morphologiques des bassins versants - Leur détermination avec une précision acceptable. *Cah. O.R.S.T.O.M*, sér. Hydrol., N° 5, déc 1966.
- DUBREUIL P. (1974) - Initiation à l'analyse hydrologique. Masson éd., Paris, 216 p.
- DUJARDIN J.M (1980) - Exemples concrets d'annonce des crues dans de petits bassins versants. *La houille blanche*, n° 4/5
- EDIJATNO (1987) - Amélioration des modèles simples de transformation pluie-débit au pas de temps journalier sur des petits bassins versants. D.E.A CEMAGREF, Antony - Univ L.Pasteur - E.N.I.T.R.T.S, Strasbourg, 114 p.
- ESTORGES J.L (1978) - Estimation des pluies de durée et de période de retour données en Lorraine. D.E.A Inst. nat. polytechnique, 57 p.
- FOUQUET P., COSTE C., BEDEL A., BLANIC R., CHERON J., COSTE J.F, DERVIL J.L., DESBORDES M., LAFOND M., MARCHAND J. et ROUSSET J. (1978) - Evacuation des eaux pluviales urbaines. Collection de la formation continue de l'école nationale des ponts et chaussées.
- GRISOLLET H., GUILMET B. et ARLERY R. (1962) - Climatologie - Méthodes et pratiques. Gauthier-Villars éd., Paris, 401 p.
- GROSSE J.Y., GIVONNE C., GIVONNE P., COLIN E., OBERLIN G. et SCHWARTZ J. (1980) - Analyse des pluies de 1 à 10 jours sur 300 postes métropolitains. *La Météorologie*, VIème série, n° 20-21.
- GUMBEL E.J. (1959) - Théorie statistique des débits d'étiage. *La houille blanche*, N° 1, p. 57-65
- HLAVEK R. (1973) - Etiages et besoins en eau. Stage de Strasbourg
- LAMBOLEY A. (1978) - Techniques de l'ingénieur. Vol. A1, tome II, (Probabilités et Statistiques).
- LAVABRE J. (1980) - La pluviométrie du bassin expérimental du Réal Collobrier. *La Météorologie*, VIème série, n° 20-21.

- LEMPEREUR R. (1983) - Etude hydrogéologique et structurale du site de Moranrieux : (Avesnois), Nord. D.E.A, Univ. Lille I, 57 p.
- LEVIANDIER T. (1978) - Un modèle pour la simulation des débits journaliers. *La technique de l'eau et de l'assainissement*, n° 377.
- LOISEAU B. (1977) - La Sambre, voie navigable en France et en Belgique (de Landrecies à Monceau s/Sambre).- Mémoire de maîtrise, Univ. Lille I, 81 p.
- MICHEL C. (1983) - Que peut-on faire avec un modèle conceptuel à un seul paramètre ? *La houille blanche*, n° 1, p. 39-44
- MICHEL C. (1987) - Hydrologie appliquée aux petits bassins ruraux. CEMAGREF Hydrologie-Hydraulique fluviale et souterraine, 429 p.
- MANGIN A. - Probabilités et statistiques : leur emploi en géologie. Cours D.E.A, Lab. C.N.R.S., Moulis, 141 p.
- MANIA J., FOCQUENOY-NIEMCZYK E., RAMON S. et VERBEKE B. (1982) - Caractérisation de la réponse des diverses unités hydrogéologiques calcaires du Nord de la France. Ann. sc. univ. Franche-Comté, Géologie, fasc. 4, 4ème série, p. 27-36, Besançon
- MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT, SOCIETE HYDROTECHNIQUE DE FRANCE. (1986) - Guide de prévision des crues, édition provisoire
- MIQUEL J. (1984) - Guide pratique d'estimation des probabilités de crues. Eyrolles éd. Coll. dir. ét. rech. E.D.F, Paris, 158 p.
- NORMAND D. (1971) - Modèles pour l'étude du ruissellement urbain. *La houille blanche*, n° 3.
- OBERLIN G. (1969) - Utilisation des barèmes Q(H). C.T.G.R.E.F., Note Interne.
- PHILIPPART A. (1974) - Données géologiques et hydrogéologiques acquises à la date du 31/12/1973 sur le territoire des feuilles topographiques au 1/25000 d'Avesnes et du Cateau 4 et 8. Rapport 74 SGN 269 NPA

- REMENIERAS G. (1960) - L'hydrologie de l'ingénieur. Eyrolles éd., Coll. Lab. Nat. Hydraulique, 413 p.
- ROCHE M. (1963) - Hydrologie de surface. O.R.S.T.O.M, Gauthier-Villars éd., Paris, 430 p.
- S.R.A.E Lorraine (1974) - Détermination des étiages de la région Lorraine. 43 p.
- VALIRON F. (1985) - Gestion des eaux - Alimentation en eau - Assainissement. Presse éc. nat. Ponts et Chaussées, Paris
- VEN TE CHOW (1964) - Handbook of applied hydrology. Mac Graw hill book company, New York,
- VERBEKE B. (1981) - Identification des composantes hydrologiques de deux bassins versants de l'Avesnois (Nord), D.E.A, Univ. Lille I, 41 p.
- VERDEVOYE P., TETART C. (1976) - La Solre - Etude qualitative des eaux. S.R.A.E. Nord - Pas-de-Calais, Lille
- WEMANS G. (1985) - Utilisation des modèles stochastiques en géographie hydrologique. *Bull. Soc. Belg. Et. Geogr.*, 2, p. 233-257
- WEMANS G. (1984) - Regime characteristics of the Sambre. *Bull. Soc. Belg. Et. Geogr.* p.115-142
- YOUSSEF H. (1972) - Hydrologie karstique du calcaire carbonifère de la Belgique et du Nord de la France - Synthèse des données disponibles en 1972. B.R.G.M.

BIBLIOGRAPHIE GENERALE

- AMAFTIESEI R., IONESCU F. - Some remarks on the use of digital computers and hydraulic methods for flood routing and flood forecasting problems. Inst.rech.res.hydr., Budapest
- BELLOSTAS J.M (1975) - Etude de la variabilité des pluies mensuelles sur le bassin de la Moselle en aval de Frouard. Lab. hydr.amgmt. eaux.,
- CATANA C. (1969) - La programmation des méthodes numériques servant à résoudre un système de caractéristiques, appliquée à un modèle théorique de l'écoulement maximum pour un bassin hydrographique d'étendue réduite.- Inst.Rech.Hydrotech., Bucarest.
- CEMAGREF (1984) - La consultation des logiciels de la division hydrologie-hydraulique : une documentation informatisée. *Informations techniques*, Cahier 54, N° 3
- COLIN E. et MICHEL C. (1980) - Approche statistique du coefficient d'écoulement et utilisation pour la prédétermination des crues. *La Houille Blanche*, N° 4/5. p. 251-258
- DUBAND D. (1986) - Evaluation de la crue de projet. E.D.F - D.T.G, service Ressources en eau,
- GUILLOT P. - Précisions sur la méthode du gradex
- GUILLOT P (1980) - Débits et pluies extrêmes. *La Météorologie*, VIème série, n° 20-21.
- HEBSON C., WOOD E.F. (1982) - A derived flood frequency distribution using Horton order ratios. *Water res. research*, Vol. 18, n° 5, p. 1509-1518
- HOPE A.S (1982) - An assessment of the R-index method for calculating stormflow volumes in Natal, South Africa. *Journal of Hydrology*, 60, p. 243-255
- LEVIANDIER T. (1982) - Deux approches empiriques de la répartition spatiale des pluies : visualisation, simulation. *La houille blanche*, n° 4.
- LICHTY R.W., DAWDY D.R. et BERGMANN J.M. - Rainfall-runoff model for small basin flood hydrograph simulation

- MAILHOL J.C et LEVIANDIER T. (1985)) - Modélisation pluie-débit des bassins vosgiens. L'III à Colmar. La Thur à Willer. C.E.M.A.G.R.E.F, Division Hydrologie.
- MAYS L.W., CHENG-KANG TAUR (1982) - Unit hydrographs via nonlinear programming. *Water res. res*, Vol. 18, n°4, p. 744-752
- O.R.S.T.O.M. (1987) - Les compétences de l'O.R.S.T.O.M. en matière de gestion des réseaux hydrologiques et télétransmission satellitaire. Note Lab. Hydr., Montpellier
- PETIT-RENAUD G. (1980) - Les principaux aspects de la variabilité des précipitations dans le Nord de la France. *Recherches Géographiques*, N° 13-14.
- PREISSMANN A. - Modèles pour le calcul de la propagation des crues. S.O.G.R.E.A.H.
- RAHAL J. (1979) - Etude de la pluviométrie à l'échelle annuelle, mensuelle, journalière sur le bassin versant de la Chiers. Thèse doc.ing., Inst. nat. polyt. Lorraine, Nancy, 244 p.
- REMENIERAS G., JACQUET J. - Comparaison de quelques méthodes de détermination d'un hydrogramme de ruissellement pluvial. Service des études hydrauliques
- REVFEIM K.J.A. (1982) - Seasonal patterns in extreme 1-hour rainfalls.- *Water Resources Research*, Vol.18, N°6,p.1741-1744
- SOTTY J.M. (1980) - Défense passive, défense active contre les inondations. Centre interrég. prof. équipement, Arras, 68 p.
- THEROND R. (1972) - Recherche sur l'étanchéité des barrages en milieu calcaire. Th. doc. ing., Univ. Grenoble, 227 p.
- THIRRIOT C. (1980) - Le devenir prochain de la pluie : infiltration ou ruissellement. *La houille blanche*, n°4/5, p.259-265

CARTOGRAPHIE

CARTES TOPOGRAPHIQUES

JEUMONT (1/25 000).- N° 2806 Ouest, I.G.N.

MAUBEUGE (1/25 000).- N° 2706 Est, I.G.N.

TRELON (1/25 000).- N° 2807 Ouest, I.G.N.

AVESNES-SUR-HELPE (1/25 000).- N° 2707 Est, I.G.N.

FOURMIES (1/25 000).- N° 2808 Ouest, I.G.N.

CHARLEVILLE-MEZIERES-MAUBEUGE (1/100 000). I.G.N.

CARTES GEOLOGIQUES

LE QUESNOY (1/50 000).- B.R.G.M.

MAUBEUGE (1/50000).- B.R.G.M.

AVESNES (1/50 000).- B.R.G.M.

TRELON (1/50 000).- B.R.G.M.

GUISE (1/50 000).- B.R.G.M.

HIRSON (1/50 000).-B.R.G.M.

CARTES A L'ECHELLE DU 1/25 000 DU BASSIN DE LA SOLRE (S.R.A.E Nord - Pas-de-Calais)

Carte structurale

Carte hypsométrique

Carte oro-hydrographique et profils en long rives droite et gauche

Carte géologique

Carte avec indications des caractéristiques de forme

Carte des sous-bassins versants avec ordre des rivières

Carte de couverture végétale

ANNEXES



ANNEXE 1 : METHODES STATISTIQUES

I : Méthode des double-cumuls

II : Corrélacion

III : Loi de Gauss

IV : Loi de Galton

V : Lois de Gumbel et de Fréchet

VI : Modèle de Renouvellement

ANNEXE I : DOUBLE-CUMULS

Lorsque des séries de variables présentent une distribution statistique à peu près normale, ce qui est notamment le cas pour les totaux pluviométriques observées sur d'assez grands intervalles de temps (année, saison, trimestre) et dans une même grande région climatique, la régression entre deux séries a de fortes chances d'être linéaire et on peut tester le degré d'association de ces deux séries par corrélation. Il en est de même pour toute combinaison linéaire des termes de ces séries, en particulier des totaux cumulés à partir d'une même origine des temps.

Si on consulte le graphique des pluies annuelles comparées entre deux postes, il est difficile de voir si les points représentatifs des années successives présentent simplement des écarts aléatoires autour de la droite de régression ou si ces écarts sont systématiquement positifs jusqu'à une certaine année puis systématiquement négatifs (ou inversement) d'autant que la chronologie des observations n'apparaît pas.

Dans la méthode des doubles-cumuls ("double mass curve"), on dispose au départ de deux échantillons de taille m et n des variables X et Y . On rétablit la séquence des observations en remplaçant le graphe des couples X_i, Y_j par celui des couples X_i, Y_i , i variant de l'intervalle de temps 1 à l'intervalle de temps k , ce qui représente la période d'observation commune aux deux séries.

Supposons qu'on applique cette loi à la pluviométrie annuelle de deux stations A et B de l'année 1 à l'année k ; la courbe des totaux cumulés de B en fonction des totaux cumulés de A présentera des points qui, si chaque série est homogène, seront tous situés à proximité d'une droite de pente m voisine du rapport des moyennes interannuelles des deux séries et la direction générale de la courbe sera approximativement rectiligne. En pratique, on trace manuellement deux droites rapprochées en essayant d'y contenir tous les points, l'écart entre les deux droites ne représentant que l'oscillation aléatoire des points ; si on peut tracer nettement deux droites ou plus du fait d'alignements successifs de plusieurs points, on conclut à des ruptures d'homogénéité.

Si l'homogénéité de la série B est rompue à partir d'une année i , le graphique présentera une rupture de pente à compter de cette année i .

Les deux variables sont toujours corrélées mais la pente et l'ordonnée à l'origine de la droite de régression seront différentes

En pratique, on calcule les totaux cumulés en remontant le temps à partir de la dernière année car les lacunes concernent le plus souvent des années anciennes et ceci permet de tracer les droites à partir de la dernière année d'observation, qui est, sauf lacune, la même pour toutes les stations.

Un tel graphique permet donc de repérer si, dans une série, il existe des anomalies systématiques qui modifient la liaison avec une autre série prise comme référence.

Le problème est bien sûr celui du choix de la station de référence. Pour s'assurer du bon choix, il faut vérifier que, pour une région donnée, les graphiques successifs entre la station de référence et chaque station à critiquer ne présentent pas systématiquement une rupture de pente aux environs de la même année, ce qui indiquerait alors l'hétérogénéité de la station de référence elle-même.

Une fois localisée l'année de la rupture de pente, le problème est alors de repérer la portion de série défectueuse et surtout de faire un diagnostic fondé sur une base déterministe : changement de site, d'observateur, d'éprouvette etc...

Si l'année de la cassure correspond à un événement relevé dans l'historique de la station ou recueilli auprès de l'observateur, on peut envisager une correction en multipliant la demi-série incriminée par le rapport des pentes des deux demi-séries ; si la nature de l'erreur n'a pu être déterminée, il devient dangereux d'effectuer des corrections et il est préférable, si on peut se le permettre, d'éliminer purement et simplement la série défectueuse.

Il convient de noter que cette méthode est assez empirique et qu'elle permet de ne détecter que des erreurs systématiques grossières. Elle convient pour une première vérification mais doit être complétée par d'autres investigations, telles que corrélations et visualisations graphiques.

ANNEXE II : CORRELATION LINEAIRE

L'analyse de la corrélation permet d'étudier et de mesurer par un coefficient le degré d'association entre deux (corrélation simple) ou plusieurs variables (corrélation multiple). On notera qu'un fort degré d'association ne correspond pas toujours à l'existence d'une relation fonctionnelle entre les variables, celles-ci pouvant évoluer parallèlement du fait d'une cause commune (concomitance).

Si 2 variables, représentées par deux séries de valeurs successives (x_i, y_i) , montrent une concentration autour d'une courbe lorsqu'elles sont reportées sur un diagramme rectangulaire, on peut en déduire qu'il existe une corrélation entre ces variables. Dans le cas de la corrélation linéaire simple, le nuage de points peut être ajusté à une droite dite de régression.

Droite de régression

Soient deux séries de variables x, y , la droite de régression de y en x est définie par une droite donnant la meilleure estimation de y pour une valeur donnée de x .

Son équation s'écrit :

$$y = a.x + b$$

a est le coefficient de régression de y en x et b l'ordonnée à l'origine.

Pour calculer le coefficient de régression a , on utilise la méthode des moindres carrés qui consiste à rendre minimale la somme des carrés des distances des points à la droite de régression.

Soient y_i , la valeur observée de y et y la valeur de l'ordonnée de la droite de régression pour une valeur donnée x_i .

Si \bar{x} et \bar{y} sont les moyennes obtenues pour chaque échantillon de taille n :

$$\sum_{i=1}^n (y_i - y)^2$$

est minimisée si :

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \cdot \bar{x} \bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \cdot \bar{x}^2}$$

ou encore :

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i \Delta y_i)}{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}$$

avec :

$$\text{avec } \Delta x_i = x_i - \bar{x} \quad \Delta y_i = y_i - \bar{y}$$

L'ordonnée à l'origine a pour valeur :

$$b = \bar{y} - a \cdot \bar{x} = \bar{y} - \bar{x} \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i \Delta y_i)}{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}$$

On détermine de la même façon les paramètres de la régression de x en y en remplaçant x par y dans les équations ci-dessus.

Coefficient de corrélation

Ce coefficient mesure le degré d'association entre deux variables linéairement dépendantes :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i \cdot \Delta y_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2 \sum_{i=1}^n (\Delta y_i)^2}} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \cdot \bar{x} \bar{y}}{n \cdot s_x s_y}$$

où s_x et s_y sont respectivement les écart-types de x et de y.

Comme s_x et s_y sont positifs, le signe de r dépend de la somme de $x_i \cdot y_i$ qui varie entre $+ s_x \cdot s_y$ et $- s_x \cdot s_y$, donc r varie de -1 à +1.

Ecart-type des résidus

Des résidus $(y_i - \hat{y}_i)$ sont observés pour chaque valeur de x_i , leur écart-type est défini par :

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta y_i)^2}{n}} = s_y \sqrt{1 - r^2}$$

Pour de petits échantillons, l'écart-type sans biais des résidus est donné par :

$$S_y = \sqrt{\frac{n-1}{n-2}} \cdot s_y \sqrt{1 - r^2}$$

Plus S_y est élevé, plus large est le nuage de points autour de la droite de régression et moins précises sont les valeurs de y déterminées par la droite de régression.

Pour interpréter correctement les différents aspects d'une corrélation linéaire, les trois paramètres a , r et S_y sont nécessaires :

- a montre le degré d'accroissement (ou de décroissement) d'une variable pour un changement de valeur de l'autre variable.
- r mesure le degré d'association entre variables
- S_y mesure l'étendue des points autour de la droite de régression.

L'étude de la corrélation s'applique à des variables hydrologiques dont la distribution est proche de la normalité ; ceci implique que les variables soient "intérieurement indépendantes", c'est à dire que les valeurs successives des variables d'un même échantillon ne soient pas liées.

En climat tempéré, c'est habituellement le cas des variables hydrologiques observées sur une période suffisante (précipitations annuelles, trimestrielles parfois mensuelles, débits moyens annuels).

Signification du coefficient de corrélation

Le coefficient de corrélation est calculé à partir de deux échantillons. Il n'est donc qu'une estimation du coefficient de corrélation entre les deux populations. Pour apprécier la signification du coefficient, on utilise le test de Student-Fisher en calculant la variable t :

$$t = \frac{r}{\sqrt{1 - r^2}} \cdot \sqrt{n - 2}$$

$n - 2$: nombre de degrés de liberté (n)

Des tables de Fisher dispensent du calcul de t et donnent directement, en fonction de n , la probabilité pour qu'on obtienne un coefficient de corrélation supérieur au coefficient effectivement trouvé, cet échantillon étant supposé extrait d'une population caractérisée par une absence totale de corrélation entre x et y . Plus simplement, on accepte le coefficient de corrélation calculé si la probabilité qu'il soit atteint par le seul fait du hasard est faible. A titre d'exemple, voici quelques valeurs du coefficient de corrélation à dépasser pour s'assurer d'une signification supérieure à 95 ou 99 %.

Nombre d'observations communes	Seuil de 5 %	Seuil de 1 %
6	0,8114	0,9172
8	0,7067	0,8343
11	0,6021	0,7348
12	0,5760	0,7079
15	0,5139	0,6411
21	0,4329	0,5487

Extension et efficacité de l'extension.

On peut utiliser, dans une certaine mesure, la droite de régression calculée pour combler une lacune ou pour étendre une série courte à partir d'une série longue, à condition que les deux séries soient normales et liées linéairement. Le gain d'information obtenu par cette extension peut se mesurer par le terme d'efficacité relative E . Si on cherche à étendre une série de k valeurs de y à l'aide d'une série longue de n valeurs de x , les deux séries étant liées par un coefficient de corrélation r , l'efficacité relative E de l'extension peut être calculée de la façon suivante (R. Véron dans Dubreuil, 1974):

$$E = 1 + \left(1 - \frac{k}{n} \right) \left(\frac{1 - (k - 2) \cdot r^2}{k - 3} \right)$$

Il est plus parlant de traduire cette efficacité relative en l'exprimant en nombre de valeurs fictivement observées k' :

$$k' = \frac{k}{E}$$

Par exemple, l'extension d'une série de 12 observations de y par une série de 30 observations de x , les deux séries étant liées par un coefficient de corrélation de 0,9, correspond à une efficacité relative de 0,527, ce qui fournit un nombre de valeurs fictivement observées de 23. La prise en compte des 30 valeurs de x permet donc de déterminer y avec la même précision que si l'on avait réellement observé 23 valeurs de y .

C'est ce nombre de valeurs fictivement observées qui sera pris en compte pour le calcul des intervalles de confiance.

ANNEXE III : AJUSTEMENT DE VARIABLES PAR UNE LOI DE GAUSS

FONCTION DE REPARTITION

Lorsqu'une variable aléatoire x prend plusieurs valeurs x_i , i variant de 1 à n observations, on obtient un échantillon que l'on peut ajuster par une loi de répartition, c'est à dire par une relation entre les valeurs possibles de la variable et leur probabilité. L'intérêt de définir une telle relation est, d'une part, de résumer par une formule analytique comportant divers paramètres les nombreuses données de l'échantillon, et, d'autre part, de permettre l'interpolation et, dans une certaine mesure, l'extrapolation.

Parmi les lois de répartition, la loi de Gauss est la plus utilisée et correspond à la loi limite de la loi binomiale lorsque n devient grand. Son expression est la suivante :

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{u^2}{2}} \cdot du$$

La dérivée de cette loi ou densité de probabilité est une courbe symétrique (courbe en cloche).

u est la variable centrée réduite :

$$u = \frac{x - \bar{x}}{s}$$

\bar{x} et s sont des paramètres calculés d'après l'échantillon et représentent respectivement les estimations de la moyenne m et de l'écart-type s , inconnus, de la population.

ESTIMATION DES PARAMETRES

Les deux premiers moments fournissent l'expression de \bar{x} et de s :

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n} \qquad s = \frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1} = \sqrt{\frac{n}{n - 1} \cdot (\overline{x^2} - \bar{x}^2)}$$

Ce sont donc les moyenne et écart-type de l'échantillon.

ADEQUATION

L'adéquation est bonne si l'échantillon est correctement ajusté par la loi choisie.

Test d'adéquation

On peut utiliser le test du χ^2 dont l'utilisation est classique (Roche, 1963). Ce test est cependant peu efficace lorsque le nombre d'observations est inférieur à 30 et la visualisation graphique nous paraît préférable.

Visualisation graphique

Le papier de Gauss permet d'obtenir une représentation linéaire de la loi de répartition. La comparaison de la droite d'ajustement et de la position des points observés permet de juger de l'adéquation de l'échantillon à la loi de Gauss. En rangeant les observations dans un ordre décroissant, on calcule leur probabilité au dépassement empirique par la formule :

$$F1(x_i) = \frac{i - 0,5}{n}$$

où i est le rang et n le nombre d'observations dans l'échantillon.

Les points sont placés en reportant en abscisse les probabilités au dépassement et en ordonnée arithmétique les valeurs correspondantes prises par la variable.

Tracé de la droite d'ajustement

L'expression de la variable centrée réduite fournit l'équation de la droite d'ajustement et l'on a :

$$x_T = s.u + \bar{x}$$

Il suffit de prendre deux valeurs de la variable réduite, de calculer les quantiles x_T correspondant et de joindre les deux points ainsi obtenus pour juger de la qualité de l'ajustement et donc de l'adéquation de la loi normale à l'échantillon.

Calcul des quantiles

L'équation ci-dessus permet de calculer les valeurs prises par la variable pour une fréquence au dépassement $F1$ choisie, c'est à dire les quantiles x_T de période de retour $T = 1/F1$, T étant exprimée en années. La valeur d'une variable dont la probabilité au dépassement est de 0,1 est le quantile x_{10} , de

période de retour 10 ans ou quantile décennal.

L'ajustement réalisé permet ainsi d'extrapoler vers de faibles probabilités au dépassement et d'estimer les valeurs probables de la variable pour différentes périodes de retour. On évitera cependant de dépasser des périodes de retour supérieures à cinq fois la durée d'observation.

N.B : On notera que le choix d'une probabilité au dépassement impose la détermination de la variable réduite théorique u . La loi de Gauss ayant une forme intégrale non définie, la valeur de u s'obtient par la table de Gauss qui fournit les valeurs prises par la variable réduite pour toute probabilité au dépassement $F1$.

Le calcul des quantiles par les méthodes informatiques s'accommode mal de cet état de fait. On peut, en effet, désirer connaître la probabilité de dépassement d'une valeur quelconque prise par la variable. Le tracé des points représentatifs de l'échantillon impose par ailleurs que l'on connaisse la longueur de l'abscisse correspondant à la probabilité au dépassement empirique. Dans ces deux cas, on peut utiliser une relation approchée de la loi de répartition. Pour calculer, avec une précision de 3 décimales, la variable de Gauss correspondant à une fréquence au dépassement $F1$, on pose :

$$y = -2 \log_e F1$$

Le calcul de u s'effectue par l'expression :

$$u = y - \frac{a_0 + a_1 \cdot y + a_2 \cdot y^2}{1 + b_1 \cdot y + b_2 \cdot y^2 + b_3 \cdot y^3}$$

avec :

$a_0 = 2,515517$	$a_1 = 0,802853$	$a_2 = 0,010328$
$b_1 = 1,432788$	$b_2 = 0,189269$	$b_3 = 0,001308$

Inversement, on obtiendra la probabilité au dépassement correspondant à une valeur de u :

$$F1 = Q.(c_1 \cdot S - c_2 \cdot S^2 + c_3 \cdot S^3 - c_4 \cdot S^4 + c_5 \cdot S^5)$$

avec :



$$S = \frac{1}{1 + 0,2316419 \cdot u} \quad \text{et} \quad Q = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{u^2}{2}}$$

$c_1 = 0,31938153$

$c_2 = 0,356563782$

$c_3 = 1,78147937$

$c_4 = 1,821255978$

$c_5 = 1,330274429$

Intervalle de confiance

Au delà des paramètres d'un échantillon, ce sont ceux de la population qui le contient que l'on désire préciser :

- soient m , la moyenne et s l'écart-type de cette population.
- soient \bar{x} la moyenne, s l'écart-type et n le nombre de réalisations dans l'échantillon.

On peut situer, en terme de probabilité, les vraies valeurs des paramètres m et s par rapport à leurs estimations \bar{x} et s . On cherchera ainsi à déterminer, autour de l'estimation, un intervalle dans lequel le paramètre de la population a une probabilité $1 - \alpha$ de se trouver, le risque α étant faible. Cet intervalle porte le nom - $1 - \alpha$ d'intervalle de confiance . L'estimation par intervalle de confiance mesure, en quelque sorte, la précision de l'estimation ponctuelle.

Intervalle de confiance sur la moyenne

Echantillons de taille inférieure à 30.

L'erreur-type (ou erreur standard) sur la moyenne correspond à :

s / \sqrt{n}

Les bornes de l'intervalle de confiance à $(1 - \alpha)\%$ sont donc :

$$\bar{x}_1 = \bar{x} - t_{\alpha} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$$

$$\bar{x}_2 = \bar{x} + t_{\alpha} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$$

t_{α} est la variable de Student à $n - 1$ degrés de liberté

Echantillons de taille supérieure à 30.

La loi de Student tend vers la loi de Gauss et t_{α} correspondra à la variable de Gauss.



Intervalle de confiance sur la variance

Echantillons de taille inférieure à 50.

L'erreur-type sur la variance suit une loi du χ^2 à $n - 1$ degrés de liberté. Les deux bornes de l'intervalle de confiance sur la variance sont donc :

$$s_1^2 = s^2 - \frac{n \cdot s^2}{\chi_{\alpha/2}^2} \qquad s_2^2 = s^2 + \frac{n \cdot s^2}{\chi_{(1 - \alpha/2)}^2}$$

On en déduira ensuite les bornes de l'écart-type.

Echantillons de taille supérieure à 50.

L'erreur-type sur la variance correspond à $s^2 / 2n$ et l'on en déduit les bornes de l'intervalle sur l'écart-type :

$$s_1 = s - t_{\alpha} \cdot \frac{s}{\sqrt{2n}} \qquad s_2 = s + t_{\alpha} \cdot \frac{s}{\sqrt{2n}}$$

Intervalle de confiance sur les quantiles

On a vu que le quantile de période de retour T s'obtenait par l'expression :

$$x_T = s \cdot u + \bar{x}$$

En admettant que la variance du quantile soit la somme des variances de la moyenne et du produit $s \cdot u$, on peut écrire la variance du quantile comme suit :

$$s_{x_T}^2 = \frac{s^2}{n} + \frac{s^2}{2n} \cdot u^2 = \frac{s^2}{n} \left(1 + \frac{u^2}{2} \right)$$

On obtient donc l'écart-type du quantile :

$$s_{x_T} = \sqrt{\frac{s^2}{n} \left(\frac{2 + u^2}{2} \right)} = \frac{s}{\sqrt{2n}} \cdot \sqrt{2 + u^2}$$

Un calcul approché fournit les bornes de l'intervalle :

$$x_1 = x_T - t_{\alpha} \cdot \frac{s}{\sqrt{2n}} \cdot \sqrt{2 + u^2}$$

$$x_2 = x_T + t_{\alpha} \cdot \frac{s}{\sqrt{2n}} \cdot \sqrt{2 + u^2} \quad \text{avec :}$$

$$\text{Prob} (x_1 \leq x_T \leq x_2) = 1 - \alpha$$

Pour des précisions complémentaires, on consultera les nombreux ouvrages traitant de ces questions (ROCHE, 1963 ; VEN TE CHOW, 1964 ; DUBREUIL, 1974)

ANNEXE IV : LOI DE GALTON

Certains échantillons ne présentent pas une distribution symétrique et il est donc impossible de les représenter correctement par une loi normale. On peut cependant rendre la loi de Gauss dissymétrique par un changement de variable de type logarithmique. On obtient la loi de Galton ou loi log-normale que l'on représente sous la forme :

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-u^2/2} .du$$

identique à celle d'une loi normale, mais dans laquelle :

$$u = a.\log_{10}(x - x_0) + b$$

Calcul des paramètres

Les paramètres a, b et x_0 doivent être déterminés pour définir l'ajustement effectué sur un échantillon donné.

Le paramètre x_0 peut s'obtenir graphiquement ou par le calcul ; les paramètres a et b sont calculés par la méthode des moments ou celle du maximum de vraisemblance.

Estimation graphique empirique de x_0

Le report des points se fait sur un papier à abscisse de probabilité gaussique et à ordonnée logarithmique (papier de Galton). Chaque point correspond au couple : logarithme de la variable - fréquence expérimentale . Dans le calcul de la fréquence expérimentale $(i - 0,5) / n$, i est le rang de la valeur prise par la variable lorsque celle-ci est classée par ordre décroissant, n est le nombre d'observations de l'échantillon. Ainsi définie, la fréquence expérimentale peut être assimilée à la fréquence au dépassement.

Si les points s'alignent mal, on corrige par un x_0 négatif ou positif selon que la concavité est tournée vers le bas ou vers le haut.

Estimation de x_0 , a et b par le calcul des moments (cf. lexique)

La méthode précédente est peu adaptée au traitement informatique et on calculera les trois paramètres en utilisant les trois premiers moments de l'échantillon. Pour simplifier l'écriture, on adoptera la formulation suivante :

$$u = a \cdot \log_{10}(x - x_0) + b \quad \text{d'où} \quad x = x_0 + e^{A(u - b)}$$

en posant :

$$A = \frac{2,30259}{a}$$

Moment d'ordre 1

$$m_1 = E\{X\} = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f(x) \cdot dx$$

soit :

$$m_1 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} (x_0 + e^{A(u - b)}) \cdot e^{-u^2/2} \cdot du$$

ou :

$$m_1 = x_0 + e^{A(A/2 - b)} = \bar{x} \tag{1}$$

Moment d'ordre 2 :

$$m_2 = E\{X^2\} = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 \cdot f(x) \cdot dx$$

soit :

$$m_2 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} (x_0 + e^{A(u - b)})^2 \cdot e^{-u^2/2} \cdot du$$

ou :

$$m_2 = x_0^2 + 2x_0 + e^{A(A/2 - b)} + e^{2A(A - b)}$$

$$\text{or :} \quad m_2 = \sigma^2 + \bar{x}^2$$

Il vient :

$$\sigma^2 = -\bar{x}^2 + m_2 = -\bar{x}^2 + x_0^2 + 2.x_0.e^{A(A/2 - b)} + e^{2A(A - b)} \quad (2)$$

Moment d'ordre 3 :

$$m_3 = E\{X^3\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} (x_0 + e^{A(u-b)})^3 . e^{-u^2/2} . du$$

soit :

$$m_3 = x_0^3 + 3.x_0^2.e^{A(A/2 - b)} + 3.x_0.e^{2A(A - b)} + e^{3A(3A/2 - b)}$$

$$\text{or : } \mu^3 = -x^3 - 3.\bar{x}.\sigma^2 + m_3$$

(m^3 : moment centré d'ordre 3)

ou :

$$\mu^3 = -(\bar{x} - x_0)^3 - 3.(\bar{x} - x_0).\sigma^2 + e^{3A(3/2A - b)} \quad (3)$$

En éliminant successivement A et b dans les équations (1), (2) et (3), on obtient :

$$\frac{\sigma^4}{\mu^3} = \frac{(\bar{x} - x_0)^3}{\sigma^2 + 3.(\bar{x} - x_0)^2} \quad (4)$$

L'équation (4) se prête à une recherche de x_0 par approximations successives ; on peut ainsi utiliser une routine de calcul qui recherche la valeur de x_0 égalisant les deux membres de l'équation (4) ; cette méthode est utilisée par le programme AJTRAC qui calcule d'abord le moment centré de l'échantillon par l'expression développée suivante :

$$\mu^3 = \frac{1}{(n-1)(n-2)} \left[n \sum_1^n x_i^3 - 3 \sum_1^n x_i . \sum_1^n x_i^2 + \frac{2}{n} \left(\sum_1^n x_i \right)^3 \right]$$

Calcul de a et de b

A partir des équations (1) et (2), on obtient :

$$A^2 = \log_e \left(1 + \frac{\sigma^2}{(\bar{x} - x_0)^2} \right)$$

ou :

$$a = \frac{1,517}{\sqrt{\log_{10} \left[1 + \frac{\sigma^2}{(\bar{x} - x_0)^2} \right]}}$$

$$b = \frac{1,1513}{a} - a \cdot \log_{10}(\bar{x} - x_0)$$

Quantiles et intervalles de confiance

La variable $y = \log_{10}(x - x_0)$ suivant une loi normale, il suffit de rechercher dans la table de Gauss la valeur de la variable réduite u_p correspondant à la probabilité au dépassement p choisie. La résolution de l'équation de la droite d'ajustement fournit la valeur de l'expression logarithmique recherchée :

$$y_p = \log_{10}(x_p - x_0) = u_p / a - b / a$$

et donc du quantile x_p recherché :

$$x_p = 10^{(u_p/a - b/a)} + x_0$$

Les bornes y_1 et y_2 de l'intervalle de confiance à $1 - \alpha\%$ sont calculées sur l'expression logarithmique du quantile y_p , soient :

$$y_1 = + t_{\alpha} \cdot s_y \cdot \sqrt{u_p^2 + 2}$$

$$y_2 = - t_{\alpha} \cdot s_y \cdot \sqrt{u_p^2 + 2}$$

avec :

s_y : écart-type de y_p

t_{α} : variable réduite pour l'intervalle de confiance $1 - \alpha$ choisi

On passe ensuite aux bornes de l'intervalle de confiance sur x_p par extraction des logarithmes, en corrigeant ensuite ces valeurs de x_0 .

Pour calculer l'intervalle de confiance sur la moyenne, on procède comme pour un simple quantile en remarquant que la moyenne de la variable x ne suit pas une loi de Gauss mais une loi de Galton dans laquelle le mode, la moyenne et la médiane sont distincts.

ANNEXE V : AJUSTEMENT DES VALEURS EXTREMES **LOI DE GUMBEL OU DE FRECHET**

La distribution de fréquence des valeurs extrêmes présente généralement une dissymétrie positive, le mode ou valeur la plus fréquente (maximum de la densité de probabilité) est alors inférieur à la médiane x_m , elle-même inférieure à la moyenne x . La courbe en cloche des densités de probabilité monte plus vite qu'elle ne descend ou, sur papier gaussique où les fréquences au dépassement sont portées en abscisses, montre une concavité souvent tournée vers les valeurs croissantes. Les lois de Gumbel permettent souvent d'ajuster de telles distributions.

On décrit ci-dessous l'expression et le calcul des paramètres de la loi de Gumbel. La loi de Fréchet consistant à ajuster le logarithme décimal de la variable, on remplacera x par $\log_{10}x$ dans tout ce qui suit. On ne pratiquera l'extraction des logarithmes décimaux qu'après le calcul des quantiles et intervalles de confiance calculés sur la variable logarithmique.

La fonction de répartition peut s'écrire :

$$F(x) = \exp(-e^{-u})$$

u est la variable réduite de Gumbel avec $u = a(x - x_0)$

$$f(x) = a.e^{-u}.\exp(-e^{-u})$$

est la densité de probabilité.

ESTIMATION DES PARAMETRES

La méthode la plus simple pour estimer les paramètres de la loi de Gumbel est la méthode des moments.

Les deux premiers moments suffisent pour estimer les deux paramètres de la loi :

-le paramètre d'échelle ou "gradex" : $G = 1 / a$

-le paramètre de forme x_0

Le moment du premier ordre ou moyenne s'écrit :

$$\bar{x} = \int_{-\infty}^{+\infty} x.a.e^{-u}.exp(-e^{-u}).dx$$

Si on pose :

$$e^{-u} = v$$

L'intervalle de variation devient $(+\infty, 0)$. On a :

$$x = x_0 - \frac{1}{a}.\log_e v$$

$$dx = -\frac{1}{a.v}.dv$$

d'où :

$$\bar{x} = - \int_{+\infty}^0 \left(x_0 - \frac{1}{a}.\log_e v \right) e^{-v}.dv$$

$$\bar{x} = x_0 \int_0^{+\infty} e^{-v}.dv - \frac{1}{a} \int_0^{+\infty} \log_e v.e^{-v}.dv$$

or :

$$\int_0^{+\infty} e^{-v}.dv = 1$$

et :

$$- \int_0^{+\infty} \log_e v.e^{-v}.dv$$

est une constante d'Euler dont la valeur approchée est 0,577.

On a donc :

$$\bar{x} = x_0 + \frac{0,577}{a}$$

Le moment centré du second ordre ou variance s'écrit :

$$s^2 = m_2 - m_1^2 = -\bar{x}^2 + \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 \cdot a \cdot v \cdot \exp(-v) \cdot dx$$

on obtient :

$$s^2 = \frac{1}{a^2} \left[\int_0^{+\infty} (\log_e v)^2 \cdot e^{-v} \cdot dv - \left(\int_0^{+\infty} \log_e v \cdot e^{-v} \cdot dv \right)^2 \right]$$

et :

$$s = \frac{1}{0,78 \cdot a}$$

On peut donc estimer simplement les paramètres de la loi de Gumbel au moyen des deux premiers moments par le système :

$$x_0 = \bar{x} - \frac{0,577}{a} \quad (x_0 : \text{mode})$$

$$\frac{1}{a} = \text{Gradex } G = 0,78 \cdot s$$

CALCUL DES QUANTILES

Le quantile x_T de probabilité au non dépassement F et de période de retour $T = 1 / (1 - F)$ s'obtient par l'expression :

$$x_T = \frac{1}{a} \cdot u + x_0 = G \cdot u + x_0$$

u est la variable réduite de Gumbel et s'obtient par :

$$u = - \log_e(- \log_e F)$$

Le choix d'une probabilité au non dépassement F permet donc de calculer la valeur de la variable réduite de Gumbel u, puis celle du quantile correspondant x_T .

ADEQUATION

On jugera de l'adéquation de la loi de Gumbel en reportant les valeurs observées sur un papier qui linéarise la fonction de répartition de la loi de Gumbel. La fréquence au non dépassement de chaque valeur de l'échantillon est calculée par l'expression :

$$F(x_i) = \frac{i - 0,5}{n}$$

n est le nombre d'observations

i est le rang dans un classement croissant des valeurs observées

Le report des points est effectué en portant en abscisse la fréquence au non dépassement dont la graduation correspond à la variable réduite de Gumbel et en ordonnée la valeur de l'observation. La droite d'ajustement est tracée selon l'équation du quantile x_T . Le nuage de points représentant l'échantillon devra s'aligner correctement autour de cette droite.

INTERVALLE DE CONFIANCE

(C.T.G.R.E.F., 1978)

On peut déterminer l'intervalle de confiance dans lequel le quantile x_T a une probabilité

1- a de se trouver, le risque a étant faible

On a :

$$\text{Prob} \{ x_T - T_2 \cdot s < x_T < x_T + T_1 \cdot s \} = 1 - \alpha$$

avec :

$$T_{1,2} = \frac{\frac{y}{\sqrt{n}} \sqrt{1 + 1,13 \cdot t + 1,1 \cdot t^2} \pm \frac{y^2}{n} \cdot (1,1 \cdot t + 0,57)}{1 - (1,1 \cdot y^2/n)}$$

(signe + pour T 1 et signe - pour T 2)

$$t = \frac{-\log_e (-\log_e F) - 0,577}{1,28}$$

F : probabilité au non dépassement du quantile considéré x_T

(on rappelle que $T = 1/(1 - F)$)

y est la variable réduite de Gauss pour l'intervalle de confiance choisi ($y = 1,04$ pour un intervalle de confiance à 70 %, $y = 1,96$ pour un intervalle de confiance à 95 %).

$$F(Q) = \sum_{k=0}^{\infty} \text{Prob} (k \text{ crues et toutes} < Q \text{ sur l'année})$$

soit :

$$F(Q) = \sum_{k=0}^{\infty} P(k) \cdot G(Q)^k$$

Le modèle de renouvellement choisi pour ajuster un échantillon donné combinera donc deux lois de probabilité. On choisira ces deux lois de telle façon que leur adéquation à l'échantillon soit la meilleure.

Si le nombre k de crues supérieur à S_0 chaque année suit une loi de Poisson, de moyenne et de variance m , la probabilité $P(k)$ pourra être écrite :

$$P(k) = e^{-\mu} \cdot \frac{\mu^k}{k!}$$

La probabilité $G(Q)$ est estimée par une loi exponentielle simple :

$$G(Q) = 1 - e^{-\rho(Q - S_0)}$$

ou par une loi exponentielle à 2 variables (loi de Weibull) :

$$G(Q) = 1 - e^{-\rho(Q - S_0)^P}$$

B) EXPRESSION DU MODELE

La combinaison des lois de Poisson et de la loi de Weibull fournit l'expression approchée suivante :

$$F(Q) = 1 - \mu e^{-\rho(Q - S_0)^P}$$

La combinaison des lois de Poisson et de la loi exponentielle simple fournit la solution analytique suivante :

$$F(Q) = 1 - \mu e^{-\rho(Q - S_0)}$$

C) TEST D'ADEQUATION DE LA LOI DE POISSON

Un test du χ^2 peut être effectué pour vérifier l'adéquation de la loi de Poisson à l'échantillon du nombre de crues observées chaque année.

Soient:

NA, le nombre d'années d'observation des crues

NC, le nombre de crues supérieures au seuil

m, le paramètre de Poisson (NC/NA)

N(k) le nombre d'années où l'on observe k crues (k variant de 0 à k_{\max} , k_{\max} étant le nombre maximal de crues observé sur une année)

$\tilde{N}(k)$ le nombre théorique d'années où l'on devrait avoir k crues

On a :

$$\tilde{N}(k) = NA \cdot e^{-\mu} \cdot \frac{\mu^k}{k!}$$

On calcule :

$$\chi^2 = \sum_{k=0}^{k_{\max}} \frac{[N(k) - \tilde{N}(k)]^2}{N(k)}$$

Le nombre de degrés de liberté est $n = k_{\max} - 2$

On acceptera la loi de Poisson si le χ^2 ainsi calculé est inférieur au quantile 0,95 de la distribution théorique du χ^2 à n degrés de liberté. Le risque d'accepter à tort la loi de Poisson est alors inférieur à 5 %.

En cas de non adéquation, on peut essayer la loi binomiale négative.

D) ESTIMATION DES PARAMETRES

1) Modèle de renouvellement construit avec la loi de Weibull

Les paramètres m, r et p peuvent être obtenus par le maximum de vraisemblance ou par l'analyse bayésienne.

a) Maximum de vraisemblance

La méthode du maximum de vraisemblance consiste à rechercher le jeu de paramètres m, r et p qui maximise la vraisemblance de l'échantillon. Ceci est réalisé pour les valeurs des paramètres qui annulent les dérivées partielles de la fonction de vraisemblance (V maximum).

Dans le cas d'un échantillon de NC crues sur NA années qui sont les crues Q1 > Q2 > ... > QNC, la vraisemblance n'est autre que la probabilité d'observer effectivement cet échantillon de NC crues avec exactement la répartition temporelle de cet échantillon.

$$\begin{aligned}
 V = & [\text{Prob}(n_1 \text{ crues la 1ère année})] \\
 & \cdot [\text{Prob}(n_2 \text{ crues la 2ème année})] \\
 & \cdot [\dots\dots\dots] \\
 & \cdot [\text{Prob}(N_{NA} \text{ crues la NA ième année})] \\
 & \cdot [\text{Prob}(1ère crue = Q_1)] \\
 & \cdot [\text{Prob}(2ème crue = Q_2)] \\
 & \cdot [\dots\dots\dots] \\
 & \cdot [\text{Prob}(NC ième crue = Q_{NC})]
 \end{aligned}$$

(les événements sont supposés indépendants)

Ceci peut s'écrire :

$$V = P(n_1) \cdot P(n_2) \cdot \dots \cdot P(n_{NA}) \cdot \frac{\delta G}{\delta Q}(Q_1) \cdot \frac{\delta G}{\delta Q}(Q_2) \cdot \dots \cdot \frac{\delta G}{\delta Q}(Q_{NC})$$

Sachant que :

$$P(k) = e^{-\mu} \cdot \frac{\mu^k}{k!} \quad \text{et :} \quad \frac{\delta G}{\delta Q} = p \cdot \rho \cdot (Q - S_o)^{p-1} \cdot e^{-p(Q - S_o)^p}$$

On obtient :

$$V = e^{-\mu} \cdot \frac{\mu^{n_1}}{n_1!} \cdot e^{-\mu} \cdot \frac{\mu^{n_2}}{n_2!} \dots e^{-\mu} \cdot \frac{\mu^{n_{NA}}}{n_{NA}!} \cdot p \cdot \rho \cdot (Q_1 - S_0)^{p-1} \\ \cdot e^{-\rho(Q_1 - S_0)^p} \dots p \cdot \rho \cdot (Q_{NC} - S_0)^{p-1} \cdot e^{-\rho(Q_{NC} - S_0)^p}$$

soit :

$$V = \lambda \cdot e^{-\mu \cdot NA} \cdot \mu^{NC} \cdot p^{NC} \cdot \rho^{NC} \cdot \left(\prod_{i=1}^{NC} (Q_i - S_0) \right)^{p-1} \cdot e^{-\rho \sum_{i=1}^{NC} (Q_i - S_0)^p}$$

avec :

$$\lambda = \frac{1}{n_1! n_2! \dots n_{NA}!}$$

Le jeu de paramètres maximisant V sera tel que :

$$\frac{\delta V}{\delta \mu} = \frac{\delta V}{\delta \rho} = \frac{\delta V}{\delta p} = 0$$

ce qui fournit les trois équations suivantes :

$$\frac{NC}{\mu} - NA = 0$$

$$\frac{NC}{\rho} - \sum_{i=1}^{NC} (Q_i - S_0)^p = 0$$

$$\frac{NC}{p} + \sum_{i=1}^{NC} \log_e (Q_i - S_0) - \rho \cdot \sum_{i=1}^{NC} (Q_i - S_0)^p \cdot \log_e (Q_i - S_0) = 0$$

On obtient finalement :

$$\frac{NC}{p} + \sum_{i=1}^{NC} \log_e (Q_i - S_0) - \frac{NC}{\sum_{i=1}^{NC} (Q_i - S_0)^p} \cdot \sum_{i=1}^{NC} (Q_i - S_0)^p \cdot \log_e (Q_i - S_0) = 0$$

où p est résolu par approximations successives.

On a également :

$$\rho = \frac{NC}{\sum_{i=1}^{NC} (Q_i - S_0)^p}$$

$$\mu = \frac{NC}{NA}$$

b) Analyse bayésienne

L'utilisation du théorème de Bayes pour estimer les paramètres de la loi de Weibull sort du cadre de cette étude et on se reportera aux ouvrages traitant spécifiquement de ce sujet (MIQUEL, 1984 - BERNIER, 1981).

Dans le cas simple, on retrouve les valeurs déjà obtenues par la méthode du maximum de vraisemblance. L'intérêt de l'analyse bayésienne est de fournir les incertitudes sur les paramètres calculés.

On obtient le résultat approché suivant :

$$\text{Var } \rho = \frac{A_{22} \cdot A_{33}}{\text{Det}} \qquad \text{Var } \mu = \frac{A_{11} \cdot A_{13} - A_{13}^2}{\text{Det}}$$

$$\text{Var } p = \frac{A_{11} \cdot A_{22}}{\text{Det}} \qquad \text{Cov } \rho p = - \frac{A_{22} \cdot A_{13}}{\text{Det}}$$

avec :

$$A_{11} = \frac{NC}{\rho^2} \qquad A_{22} = \frac{NC}{\mu^2} \qquad A_{13} = \sum_{i=1}^{NC} (Q_i - S_0)^p \cdot \log_e (Q_i - S_0)$$

$$A_{33} = \frac{NC}{p^2} + \sum_{i=1}^{NC} \rho \cdot (Q_i - S_0)^p \cdot \log_e^2 (Q_i - S_0)$$

Det est le déterminant de la matrice des A_{ij}

Ces variances et covariance permettront de calculer l'incertitude sur les quantiles obtenus par le modèle.

2) Modèle de renouvellement construit avec la loi exponentielle simple

Les expressions précédentes sont simplifiées puisque le modèle ne comprend plus que deux paramètres ($p=1$). Pour calculer les quantiles dont la période de retour est supérieure ou égale à 10 ans, les expressions des paramètres et de leurs variances à utiliser sont les suivantes :

$$\mu = \frac{NC}{NA} \quad \text{Var } \mu = \frac{\mu^2}{NC}$$

$$\rho = \frac{NC}{\sum_{i=1}^{NC} (Q_i - S_0)}$$

$$\text{Var } \rho = \frac{\rho^2}{NC}$$

E) CALCUL DES QUANTILES

Le but du modèle de renouvellement est bien entendu de calculer la crue de période de retour T.

Lorsque T est assez grand (>10), le modèle de renouvellement construit avec la loi de Poisson et la loi de Weibull fournit l'expression du quantile Q_T :

$$Q_T = S_0 + \left[\frac{\log_e(\mu.T)}{\rho} \right]^{1/p}$$

avec la loi exponentielle simple :

$$Q_T = S_0 + \frac{\log_e(\mu.T)}{\rho}$$

F) INCERTITUDE SUR LES QUANTILES

Le calcul des variances des paramètres permet de calculer les variances sur les quantiles. En supposant que les écarts d'estimation sont Gaussiens, on a :

Loi de Weibull :

$$\begin{aligned} \text{Var}(Q_T) = & \frac{(Q_T - S_0)^2}{\rho^2 \cdot p^2} \cdot \text{Var } \rho + \frac{(Q_T - S_0)^{2 \cdot (1-p)}}{\rho^2 \cdot \mu^2 \cdot p^2} \cdot \text{Var } \mu \\ & + \frac{(Q_T - S_0)^2 \cdot \log_e^2(Q_T - S_0)}{p^2} \cdot \text{Var } p + 2 \cdot \frac{(Q_T - S_0)^2 \cdot \log_e(Q_T - S_0)}{\rho \cdot p^2} \text{Cov } \rho \cdot p \end{aligned}$$

Loi exponentielle simple :

$$\text{Var}(Q_T) = \frac{(Q_T - S_0)^2}{NC} + \frac{1}{\rho^2 \cdot NC}$$

On peut ainsi calculer l'intervalle de confiance :

$$Q_T - u \cdot s(Q_T) < Q_T < Q_T + u \cdot s(Q_T)$$

$s(Q_T)$ est l'écart-type du quantile considéré

u est la variable de Gauss.

(pour un intervalle à 70 %, $u = 1,03$)

(pour un intervalle à 95 %, $u = 1,96$)

G) MODALITES PRATIQUES

Soient :

S_0 , le seuil de débit

NC, le nombre de crues supérieures à S_0

NA, le nombre maximum de crues supérieures à S_0 observé sur une année

Pour appliquer un modèle de renouvellement, on effectue les opérations suivantes :

- . Constitution du catalogue Q_i , i variant de 1 à NC, des débits maxima supérieurs à S_0
- . Constitution du catalogue n_j , j variant de 1 à NA, du nombre de crues ayant dépassé S_0 chaque année (crues indépendantes)
- . Ajuster l'échantillon (n_j) à la loi de Poisson en calculant le paramètre de poisson (m) et tester l'adéquation de cette loi. Si l'adéquation n'est pas bonne, essayer la loi binomiale négative.
- . Ajuster l'échantillon à la loi exponentielle simple en calculant l'estimation des paramètres.
- . Tracer le graphe correspondant et vérifier l'adéquation. Classer les crues par ordre décroissant et calculer le logarithme népérien de leur fréquence expérimentale f

Abscisse : $(Q - S_0)$

Ordonnée : $\log_e f$

- . Si l'adéquation n'est pas bonne, essayer des changements de variables en utilisant dans la loi exponentielle simple, le logarithme népérien ou le carré de la variable débit.
- . Si l'adéquation n'est toujours pas correcte, ajuster l'échantillon à la loi de Weibull et estimer les paramètres par la méthode du maximum de vraisemblance ou l'analyse bayésienne

Pour le tracé graphique :

Abscisse : $(Q - S_0)^p$

Ordonnée : $\log_e f$

- . Calcul des quantiles en utilisant les expressions correspondant à la loi choisie
- . Calcul des variances des paramètres et des quantiles
- . Calcul de l'intervalle de confiance à 70 ou 95 % sur chaque quantile

N.B : Le programme "RENOUVELLEMENT" (cf.annexe informatique) effectue l'ensemble de ces opérations et trace l'ajustement réalisé sur table traçante Graphtec MP 1000.

ANNEXE 2 : INFORMATIQUE

Programme CORAN (Corrélation)

Programme AJTRAC (Ajustement de Gauss, Galton,
Gumbel et Fréchet)

Programme RENOUELEMENT (Modèle de renouvellement)

Programme SAISIDIF (Saisie des données pluviographiques)

Programme IDF (Sélection des données pluviographiques)

Programme BIL (Bilan à l'échelle mensuelle et annuelle)

Programme FIPLUIE (Saisie des hyétogrammes)

Programme FICRUE (Saisie des hydrogrammes de crue)

Programme GR2 (Simulation des débits moyens journaliers
par modèle à deux réservoirs)

Programme CORAN (Corrélation)

```
7 REM
10 DIMS(30),A(30,10),Z(30),TT(30)
20 GOTO29000
30 REM*****REGRESSION LINEAIRE MULTIPLE
31 PRINT"REGRESSION LINEAIRE MULTIPLE"
60 REM*****DEBUT TRAITEMENT CORRELATION MULTIPLE
70 V=NV-2
80 Z(1)=1
90 FORI=1TON
110 FORJ=1TOV
130 Z(J+1)=U(I,J+1)
140 NEXTJ
150 Z(V+2)=U(I,V+2)
170 FOR K=1TOV+1
180 FORL=1TOV+2
190 A(K,L)=A(K,L)+Z(K)*Z(L)
200 S(K)=A(K,V+2)
210 NEXTL
220 NEXTK
230 S(V+2)=S(V+2)+Z(V+2)*2
240 NEXTI
250 FORI=2TOV+1
260 TT(I)=A(1,I)
270 NEXTI
280 FORI=1TOV+1
290 J=I
300 IF A(J,I)<>0 THEN 340
305 J=J+1
310 IF J<=V+1 THEN 300
320 PRINT"PAS DE SOLUTION UNIQUE"
330 GOTO810
340 FOR K=1 TO V+2
350 B=A(I,K)
360 A(I,K)=A(J,K)
370 A(J,K)=B
380 NEXTK
390 Z=1/A(I,I)
400 FORK=1TOV+2
410 A(I,K)=Z*A(I,K)
420 NEXTK
430 FORJ=1TOV+1
440 IF J=I THEN 490
450 Z=-A(J,I)
460 FORK=1TOV+2
470 A(J,K)=A(J,K)+Z*A(I,K)
480 NEXTK
490 NEXTJ
500 NEXTI
505 OPEN4,4:CMD4
510 PRINT#4,"REGRESSION MULTIPLE";PRINT#4,"POUR "CHR$(1);R$(NV)
512 PRINT#4,"EN UTILISANT LES FICHIERS ";FORQ=2TONV-1:PRINT#4,CHR$(1);R$(Q)"-"
520 NEXTQ:PRINT#4,"COEFFICIENTS DE L'EQUATION:"
```



```
45020 BY=(INT(BY*1000))/1000
45030 AY=(INT(AY*1000))/1000
45040 B2=(INT(B2*1000))/1000
45050 A2=(INT(A2*1000))/1000
45060 IFBY<>B2ORAY<>A2THENPRINT"MAUVAIS CALCUL":END
45070 SR=SY*SQR(1-(R^2))
45080 ZB=.5*LOG((1+R)/(1-R))
45090 SZ=1/SQR(N-3)
45095 REM*****CALCUL DES IC SUR R PAR LA TRANSFORMEE DE FISCHER
45100 Z1=(1.96*SZ)+ZB;Z2=(-1.96*SZ)+ZB
45110 Z3=(1.28*SZ)+ZB;Z4=(-1.28*SZ)+ZB
45120 R1=(EXP(2*Z2)-1)/(1+EXP(2*Z2))
45130 R2=(EXP(2*Z1)-1)/(1+EXP(2*Z1))
45140 R3=(EXP(2*Z4)-1)/(1+EXP(2*Z4))
45150 R4=(EXP(2*Z3)-1)/(1+EXP(2*Z3))
45160 REM*****CALCUL DE LA VARIABLE REDUITE POUR L'IC SUR LE COEFFICIENT BY
45170 RA=(N-2)/(1-(R^2));TT=R*SQR(RA)
45400 INPUT"EDITION DES RESULTATS SUR IMPRIMANTE (O/N)";ER#
45410 IFER#="N"THEN51100
45500 REM*****EDITION SUR IMPRIMANTE
45502 OPEN3,4,8:PRINT#8:CLOSE3:POKE59468,14
45510 OPEN4,4:CMD4
45520 PRINT#4,"CORRELATION LINEAIRE ENTRE LES VARIABLES "
45521 PRINT#4,CHR$(1);R$(2)"-R$(3)
45522 PRINT#4,"NOMBRE DE VALEURS COMMUNES:"N
45525 PRINT#4,"PERIODE "TO" A "TF
46000 PRINT#4,"MX:"MX
47000 PRINT#4,"MY:"MY
48000 PRINT#4,"SX:"SX
49000 PRINT#4,"SY:"SY
49050 PRINT#4,"CVX:"SX/MX
49060 PRINT#4,"CVY:"SY/MY
50000 PRINT#4,"R:"R
50010 PRINT#4,"Y="BY"*X+"AY,"X="1/BY"*Y-"AY/BY
50020 PRINT#4,"ECART-TYPE DES RESIDUS:"SR
50025 PRINT#4,"IC SUR R PAR LA TRANSFORMEE DE FISCHER"
50030 PRINT#4,"IC 95% SUR R:"R1"<R<"R2
50040 PRINT#4,"IC 80% SUR R:"R3"<R<"R4
50050 PRINT#4,"VARIABLE STANDARD SUR BY:"TT
50051 INPUT"NOMBRE DE VALEURS DE LA SERIE DE REFERENCE";N2
50052 E=1+(1-(N/N2))*((1-(N-2)*(R^2))/(N-3));KP=N/E
50053 PRINT#4,"EFFICACITE :";E
50054 PRINT#4,"NOMBRE FICTIF DE VALEURS :";KP:POKE59468,12:CLOSE4:CLOSE8
50055 INPUT"EXTRAPOLER Y PAR X (1), X PAR Y (2) OU PAS D'EXTRAPOLATION (3)";EX
50060 IFEX=3THEN51000
50065 IFEX=1THENINPUT"NOMBRE D'EXTRAPOLATIONS DE Y PAR X";NE:FORI=1TONE
50070 IFEX=1THENINPUT"VALEUR DE X";X:Y=BY*X+AY
50075 IFEX=1THENOPEN4,4:CMD4:PRINT#4,Y "(POUR X="X)":CLOSE4:NEXT
50085 IFEX=2THENINPUT"NOMBRE D'EXTRAPOLATIONS DE X PAR Y";NE:FORI=1TONE
50090 IFEX=2THENINPUT"VALEUR DE Y";Y:X=(Y-AY)/BY
50095 IFEX=2THENOPEN4,4:CMD4:PRINT#4,X "(POUR Y="Y)":CLOSE4:NEXT
51000 POKE59468,12:CLOSE4:CLOSE8
51020 PRINT"*****"
51100 INPUT"GRAPHE DE CORRELATION(O/N)";U#
51101 IFU#<>"O"THEN29000
51103 OPEN10,10 :PRINT#10,"":
51110 INPUT"SEULEMENT LES POINTS O/N";SP#
51120 IFSP#="O"THEN52189
52000 INPUT"NOM DU FICHIER A CRITIQUER";V#
52005 INPUT"NATURE DE LA VARIABLE ETUDIEE";VE#
52011 PRINT#10,"O"25:A=1145
52012 PRINT#10,"M"2350,1150:PRINT#10,"X1",-100,22
52013 PRINT#10,"X0",100,14:PRINT#10,"X1",100,22:PRINT#10,"X0",-100,14:B=0
52014 FORI=0T01400STEP200:PRINT#10,"H"
52015 PRINT#10,"R"B,A:A=200+A
52016 PRINT#10,"P"1
```

```
52017 NEXTI
52019 PRINT#10,"M"0,2650:PRINT#10,"P"V#
52021 PRINT#10,"M"0,2600:PRINT#10,"P"VE#
52022 PRINT#10,"P EN MM
52170 PRINT#10,"M"1300,1050
52189 FORJ=1TON
52190 X=X(J):Y=Y(J)+1150
52191 PRINT#10,"M"X,Y:PRINT#10,"N"1
52196 PRINT#10,"S"2:YE=TD+J-1:PRINT#10,"P"YE
52197 NEXTJ:PRINT#10,"S"3
52200 PRINT"ABSCISSES DE DEBUT ET DE FIN DE LA DROITE DE REGRESSION:"
52210 INPUT"ORD DEBUT":M:X=(M-AY)/BY:M=M+1150
52215 INPUT"ORD FIN":N:Y=(N-AY)/BY:N=N+1150
52232 PRINT#10,"T"3
52235 PRINT#10,"M"X,M:PRINT#10,"T"5
52240 PRINT#10,"L"2:PRINT#10,"O"X,M,Y,N
52250 SS=SS+160:PRINT#10,"M"SS,1500:INPUT"NOM DU FICHER DE REFERENCE":RR#
52260 PRINT#10,"P"RR#
52500 INPUT"TITRE 1ERE LIGNE":H#
52510 INPUT"TITRE 2EME LIGNE":G#
52525 PRINT#10,"S"3
52530 PRINT#10,"M"200,900:PRINT#10,"P"H#
52532 PRINT#10,"M"200,850:PRINT#10,"P"G#
52535 PRINT#10,"M"2000,0:CLOSE10:CLOSE8:CLOSE15:GOTO29000
53000 REM****LECTURE FICHER
53001 PRINT"TAPEZ 1 POUR DE LA CORRELATION SIMPLE A DEUX VARIABLES"
53002 INPUT"OMBRE DE VARIABLES INDEPENDANTES ":V:NV=V+2
53004 PRINT"☐"
53005 DIMR$(20)
53008 DIMT(35,20):DIMU(35,20):J=2
53010 INPUT"NOM DU FICHER ":R#:R$(J)=R#
53020 PRINT"LECTURE DU FICHER"
53030 OPEN15,8,15,"I0"
53040 OPEN2,8,2,"0":"+R#+",S,R"
53042 IFJ>2THEN53060
53045 INPUT"TEMPS DEBUT ET TEMPS FIN":TD,TF
53060 INPUT#2,T,U
53072 IFT=TO THENI=1
53073 T(I,J)=T:U(I,J)=U
53085 IFT(I,J)=TF ANDJ=NV THENRETURN
53086 IFT(I,J)=TF THENN=I:I=0:CLOSE2:CLOSE15:J=J+1:GOTO53010
53087 I=I+1
53088 GOTO53060
```

Programme AJTRAC (Ajustement de Gauss, Galton, Gumbel et Fréchet)

```
20 CLR:H=1:PRINT"☐"
22 FORI=1TO4
23 PRINT"PROGRAMME AJTRAC":PRINT"AJUSTEMENT STATISTIQUE":PRINT:PRINT:PRINT
25 FORJ=1TO200:NEXTJ:NEXTI:PRINT"☐"
30 DIMX(100),T(100),V(100),W(100),FE(100),F1(10),F(10)
60 PRINT
80 REM*****ENTREE VALEURS
85 PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:INPUT"ENTREE MANUELLE OU FICHER : M/F";L#
90 IFL#="F"THENGOSUB1000
100 NO#=R#:PRINT
116 IFL#="F"THEN141
117 REM*****ENTREE MANUELLE
118 INPUT"NATURE DE LA VARIABLE";R#
119 PRINT"POUR TERMINER TAPPEZ 10000":J=1
120 PRINT"VAL NO";J
130 INPUT"X=";X(J)
135 IFX(J)=10000THENN=J-1:GOTO141
140 J=J+1:GOTO120
141 INPUT"ETUDE DE DEBIT D'ETIAGE O/N";ET#
142 PRINT"A QUEL TYPE DE LOI DESIREZ VOUS AJUSTER CES VALEURS"
150 INPUT"CHOIX :GAUSS/GALTON/GUMBEL/FRECHET";LO#
151 IFLO#="GAUSS"THENPRINT"SI L'ECHANTILLON TRAITÉ A ÉTÉ ÉTENDU"
152 IFLO#="GAUSS"THENINPUT"TAPEZ E SINON N";EE#
156 REM*****ANALYSE DU CHOIX
158 IFLO#="GAUSS"ANDET#="O"THENTR#="C":GOSUB300:GOSUB170:GOSUB2300:GOTO10000
159 IFLO#="GAUSS"THENTR#="D":GOSUB300:GOSUB170:GOSUB2300:GOTO10000
160 IFLO#="GALTON"ANDET#="O"THENTR#="C":GOSUB300:GOSUB170:GOSUB2700:GOTO10000
161 IFLO#="GALTON"THENTR#="D":GOSUB300:GOSUB170:GOSUB2700:GOTO10000
162 IFLO#="GUMBEL"ANDET#="O"THENTR#="D":GOSUB300:GOSUB170:GOSUB1800:GOTO10000
164 IFLO#="GUMBEL"THENTR#="C":GOSUB300:GOSUB170:GOSUB1500:GOTO10000
165 IFLO#="FRECHET"THENTR#="C":GOSUB300:GOSUB170:GOSUB1500:GOTO10000
170 REM*****CALCUL DES PARAMETRES
184 A=0:B=0:C=0
186 FORI=1TON:A=X(I)+A:B=(X(I)2)+B:C=(X(I)3)+C:NEXTI
188 MO=A/N:T1=(B-(N*(MO2)))/(N-1)
190 T3=SQR(T1):PRINTT3
191 MC=(1/((N-1)*(N-2)))*((N*C)-(3*A*B)+((2/N)*(A3)))
194 FORI=1TON:FE(I)=(I-.5)/N:NEXTI
195 IFEE#="E"THENN2=N:GOSUB200
197 CV=T3/MO
199 RETURN
200 REM*****CALCUL DES PARAMETRES DANS LE CAS DU TRAITEMENT D'UNE SERIE ETENDUE
205 INPUT"NBRE DE VALEURS OBSERVEES FICTIVEMENT";N1
210 INPUT"MOYENNE ET ECART-TYPE DE LA SERIE COURTE REELLEMENT OBSERVEE";M2,S2
220 INPUT"MOYENNE ET EC-TYPE DE LA SERIE LONGUE AYANT SERVI A L'EXTENSION";M3,S3
230 INPUT"MOYENNE ET ECART-TYPE DE LA PARTIE COMMUNE DE LA SERIE LONGUE ";M4,S4
240 INPUT"COEFFICIENT DE CORRELATION";R
250 M1=M2+(R*(S2/S4)*(M3-M4)):M0=M1
260 S1=S22+((R2)*((S22)/(S42))*((S32)-(S42)))
270 IFS1<(S22)ANDR<.95THENS1=S22
280 S1=SQR(S1):T3=S1
290 RETURN
```

```

300 REM*****TRI DES VALEURS
305 FLOF#="FRECHET" THENFORI=1TON:V(I)=T(I):M(I)=(LOG(X(I))/2.302585093)
306 IFLOF#="FRECHET" THENX(I)=M(I):NEXTI:GOTO315
310 FORI=1TON:V(I)=T(I):M(I)=X(I):NEXTI
315 IFTR#="0" THENFORJ=1TON:X(J)=-X(J):NEXTJ
320 FORI=1TON-1
330 FORJ=1+1TON
340 IFX(J)<X(I) THENR=X(I):X(I)=X(J):X(J)=R
350 NEXTJ
360 NEXTI
364 IFET#="0" ANDLOF#="GUMBEL" THEN396
365 IFTR#="0" THENFORI=1TON:X(I)=-X(I):NEXTI
370 FORI=1TON
375 FORJ=1TON
380 IFX(I)=M(J) THENM(J)=0:T(I)=V(J):J=N
385 NEXTJ:NEXTI
390 FORI=1TON:PRINT(I);X(I):NEXTI
399 RETURN
1000 REM*****LECTURE FICHIER
1010 INPUT"NUM DU FICHIER";R#
1020 PRINT"LECTURE DU FICHIER"
1030 OPEN5,8,15,"I9"
1040 OPEN2,8,2,"0":"+R#+",S,R"
1050 J=1
1060 INPUT#2,V(J),M(J)
1061 IFM(J)=.1 THENPRINT"OBSERVATION MANQUANTE EN "V(J)
1062 PRINTV(J);M(J)
1063 IFM(J)<10000 THENJ=J+1:GOTO1060
1065 N=J-1
1066 INPUT"TEMPS DEBUT ET TEMPS FIN";TD,TF
1067 FORJ=1TON
1068 IFM(J)=.1 THENNEXTJ
1070 IFV(J)=TOTHENI=1
1075 T(I)=V(J):X(I)=M(J)
1080 IFT(I)=TF THENN=I:FORI=1TON:PRINT(I);X(I):NEXTI:CLOSE2:CLOSE1:RETURN
1085 I=I+1:NEXTJ
1500 REM*****LOI DE GUMBEL
1505 PRINT"5":PRINT"CALCUL GUMBEL"
1510 RG=1/(T3*.78):00=(M-(.577/RG))
1515 I=0:F1(0)=.9:GOSUB1600
1520 I=1:F1(1)=.5:GOSUB1600
1530 F1(2)=.3333:GOSUB1600
1540 F1(3)=.2:GOSUB1600
1550 F1(4)=.1:GOSUB1600
1560 F1(5)=.05:GOSUB1600
1570 F1(6)=.02:GOSUB1600
1580 F1(7)=.01:GOSUB1600
1590 F1(8)=.001:GOSUB1600
1595 PRINT"9":PRINT"CALCUL DES INTERVALLES DE CONFIRANCE " :IC#="0"
1596 IFIC#="0" THENGOSUB1700
1599 RETURN
1600 TR(I)=1/F1(I):F(I)=1-F1(I):FG=-LOG(F(I)):V(I)=-LOG(FG):R(I)=V(I)/RG+00
1610 I=I+1:RETURN
1620 REM
1630 REM
1640 REM
1700 REM*****CALCUL DES INTERVALLES DE CONFIRANCE DE LA LOI DE GUMBEL
1710 I1=95:I2=80:NU=N-1
1720 PRINT"11 (95%) ET 12 (80%) POUR "NU" DEGRES DE LIBERTE":INPUTC1,C2
1725 IFET#="0" THENFORI=1TO6:GOTO1740
1730 FORI=0TO8
1740 TP(I)=(V(I)-.577)/1.28
1750 UI=(C1/(NT.5))*((1+(1.13*TP(I)))+(1.1*(TP(I)+2)))+.5)
1752 U2=(C1+2)/N*(1.1*TP(I)+.57)
1755 U3=(1-(1.1*(C1+2)/N))
1756 T1(I)=(U1+U2)/U3

```



```
1757 T2(I)=(U1-U2)/U3
1758 Q2(I)=Q(I)-(T2(I)*T3):Q1(I)=Q(I)+(T1(I)*T3)
1760 U4=(C2/(N↑.5))*((1+(1.13*TP(I)))+(1.1*(TP(I)↑2)))↑.5)
1762 U5=((C2↑2)/N)*(1.1*TP(I)+.57)
1765 U6=(1-(1.1*(C2↑2)/N))
1766 T3(I)=(U4+U5)/U6
1767 T4(I)=(U4-U5)/U6
1768 Q4(I)=Q(I)-(T4(I)*T3):Q3(I)=Q(I)+(T3(I)*T3)
1780 NEXTI
1785 IFLO$="FRECHET"THENFORI=1TO8:Q2(I)=10↑(Q2(I)):Q1(I)=10↑(Q1(I))
1786 IFLO$="FRECHET"THENQ4(I)=10↑(Q4(I)):Q3(I)=10↑(Q3(I)):Q(I)=10↑(Q(I)):NEXTI
1790 RETURN
1800 REM*****GUMBEL ETIAGE
1807 AG=1.28/T3:Q0=M0-(.45*T3)
1810 I=1:F(1)=.1:GOSUB1865
1820 F(2)=.5:GOSUB1865
1830 F(3)=.666:GOSUB1865
1840 F(4)=.75:GOSUB1865
1850 F(5)=.8:GOSUB1865
1860 F(6)=.9:GOSUB1865
1862 F(7)=.99:GOSUB1865
1863 F(8)=.01:GOSUB1865
1864 GOSUB1595:RETURN
1865 FP=1-F(I):FG=-LOG(FP):Y(I)=-LOG(FG):Q(I)=(Y(I)/AG)+Q0
1867 TR(I)=1/F(I):I=I+1:RETURN
2000 REM*****ANNEXE ETIAGE POUR GAUSS ET GALTON
2005 F(1)=.1:U(1)=-1.28
2010 F(2)=.5:U(2)=0
2015 F(3)=.666:U(3)=.44
2020 F(4)=.75:U(4)=.675
2025 F(5)=.8:U(5)=.84
2030 F(6)=.9:U(6)=1.28
2040 RETURN
2300 REM*****LOI NORMALE
2305 IFET$="0"THENGOSUB2000:FORI=1TO6:Q(I)=M0+(U(I)*T3):NEXTI:GOTO2410
2310 T(0)=10:F1(0)=.9:U(0)=-1.2816
2320 T(1)=2:F1(1)=.5:U(1)=0
2330 T(2)=3:F1(2)=.333:U(2)=.4345
2340 T(3)=5:F1(3)=.2:U(3)=.8416
2350 T(4)=10:F1(4)=.1:U(4)=1.2816
2360 T(5)=20:F1(5)=.05:U(5)=1.645
2370 T(6)=50:F1(6)=.02:U(6)=2.053
2380 T(7)=100:F1(7)=.01:U(7)=2.326
2390 T(8)=1000:F1(8)=.001:U(8)=3.09
2400 FORI=0TO8:Q(I)=M0+T3*U(I):NEXTI
2410 INPUT"VOULEZ VOUS VERIFIER L'ADEQUATION DE LA LOI 0/N":AD$
2420 IFAD$="0"THENGOSUB2600
2440 PRINT"§":INPUT"CALCUL DES INTERVALLES DE CONFIANCE 0/N":IC$
2450 IFIC$="0"THENGOSUB2900
2460 RETURN
2600 REM*****TEST D'ADEQUATION DU KHI2
2602 PRINT"§":NI=0
2605 PRINT"LE NOMBRE DE CLASSES CHOISI DOIT ETRE INFERIEUR OU EGAL A "INT(N/5)
2610 INPUT"NOMBRE DE CLASSES SOUHAITE":NC
2615 ET=N/NC
2620 FORJ=1TONC:FD=ET/N+FD
2622 IFJ=NCTHENNI(J)=N-NI:GOTO2650
2625 PRINT"VALEUR DE LA VARIABLE REDUITE DE GAUSS POUR FD = "FD:INPUTUU(J)
2630 XC(J)=M0-T3*UU(J)
2635 FORI=1TON
2640 IFX(I)≤XC(J)THENNI(J)=NI(J)+1
2645 NEXTI
2647 NI(J)=NI(J)-NI:NI=NI(J)+NI
2650 S(J)=((NI(J)-ET)↑2)/ET
2655 SM=S(J)+SM
2660 NEXTJ
```

```
2665 ND=ND-2-1
2670 PRINT"QUEL RISQUE DE NON ADEQUATION DESIREZ VOUS PRENDRE (EN CHANCES/100)"
2675 INPUTAF
2680 PRINT"SI P<"SM"> A "ND" DEGRES DE LIBERTE EST > A "AF" %, LA LOI EST ACCEPTEE"
2685 INPUT"CONSULTEZ UNE TABLE DU KHI2 ET ENTREZ P<SM>";PS
2690 RETURN
2700 REM*****LOI DE GALTON
2701 IFAL#="0"THEN2705
2702 DIMLX(N+2)
2703 INPUT"RECHERCHE DE X0";RX#
2704 IFRX#="0"THENGOSUB3000;GOTO2710
2705 INPUT"CHOIX DE X0";X0
2710 INPUT"LOG DECIMAUX OU NEPERIEN:D/N";DN#
2720 IFDN#="0"THENFORI=1TON:LX(I)=LOG(X(I)-X0)/2.302585093;NEXT:GOTO2760
2730 FORI=1TON:LX(I)=LOG(X(I)-X0);NEXTI
2760 FORI=1TON:AA=LX(I)+AA:BB=(LX(I)2)+BB;NEXTI
2770 ML=AA/N:T4=(BB-(N*(ML2)))/(N-1):T4=SQR(T4)
2791 AL=1.517/SQR((LOG(1+(T32))/(M0-X0)2))/2.302585093)
2793 BL=(1.1513/AL)-AL*(LOG(M0-X0)/2.302585093)
2794 AM=SQR(1/((BB/N)-(AA2/N2)));BM=(-AM*AA)/N
2795 IFET#="0"THENGOSUB2000;FORI=1TO6:Q(I)=10↑((T4*U(I))+ML)+X0;NEXTI:GOTO2850
2798 T(0)=10:F1(0)=.9:U(0)=-1.2816
2800 T(1)=2:F1(1)=.5:U(1)=0
2805 T(2)=3:F1(2)=.333:U(2)=.4345
2815 T(3)=5:F1(3)=.2:U(3)=.8416
2820 T(4)=10:F1(4)=.1:U(4)=1.2816
2825 T(5)=20:F1(5)=.05:U(5)=1.645
2830 T(6)=50:F1(6)=.02:U(6)=2.053
2835 T(7)=100:F1(7)=.01:U(7)=2.326
2840 T(8)=1000:F1(8)=.001:U(8)=3.09
2841 PRINT"CALCUL DES QUANTILES EN COURS SELON LES TROIS METHODES :":PRINT
2842 PRINT"PAR LA METHODE DES MOMENTS, DU MAXIMUM DE VRAISEMBLANCE ET "
2843 PRINT"POUR N PETIT "
2847 FORI=0TO8:LQ(I)=1/AM*(U(I)-BM):Q2(I)=(10↑LQ(I))+X0;NEXTI
2848 FORI=0TO8:LQ(I)=1/AL*(U(I)-BL):Q1(I)=(10↑LQ(I))+X0;NEXTI
2849 FORI=0TO8:Q3(I)=10↑((T4*U(I))+ML)+X0;NEXTI
2850 INPUT"VOULEZ VOUS VERIFIER L'ADEQUATION DE LA LOI D/N";AL#
2855 IFAL#="0"THENGOSUB2600
2857 INPUT"DESIREZ VOUS UN CALCUL D'INTERVALLE DE CONFIANCE D/N";IC#
2858 IFIC#="0"THENGOSUB2862
2860 RETURN
2862 REM*****CALCUL DES INTERVALLES DE CONFIANCE DE LA LOI DE GALTON
2864 INPUT"CONFIANCE CHOISIE EN %";IC:NU=N-1
2867 PRINT"VALEUR DE T OU DE U A "IC "% POUR "NU" DEGRES DE LIBERTE":INPUTTS
2868 YI=LOG(M0-X0)/2.302585093
2869 U=(YI-ML)/T4
2870 IM=TS*T4*SQR(U2+2)/SQR(2*N)
2872 M1=YI-IM:M2=YI+IM:M1=(10↑M1)+X0:M2=(10↑M2)+X0
2876 IFET#="0"THENFORI=1TO6:YI=LOG(Q(I)-X0)/2.302585093;GOTO2883
2878 FORJ=1TO3:FORI=0TO8
2879 IFJ=1THENQ(I)=Q1(I)
2880 IFJ=2THENQ(I)=Q2(I)
2881 IFJ=3THENQ(I)=Q3(I)
2882 YI=LOG(Q(I)-X0)/2.302585093
2883 UL(I)=(YI-ML)/T4
2884 LQ(I)=TS*T4*SQR(UL(I)2+2)/SQR(2*N)
2885 Q1=YI-LQ(I):Q2=YI+LQ(I):AQ(I)=(10↑Q1)+X0:BQ(I)=(10↑Q2)+X0
2886 IFJ=1THENA1(I)=AQ(I):B1(I)=BQ(I)
2887 IFJ=2THENA2(I)=AQ(I):B2(I)=BQ(I)
2888 IFJ=3THENA3(I)=AQ(I):B3(I)=BQ(I)
2890 NEXTI;NEXTJ
2895 RETURN
2900 REM*****CALCUL DES INTERVALLES DE CONFIANCE DE LA LOI NORMALE
2905 IFEE#="E"THENN=N1
2910 INPUT"CONFIANCE CHOISIE EN %";IC:NU=N-1
2920 PRINT"VALEUR DE T OU DE U A "IC "% POUR "NU" DEGRES DE LIBERTE":INPUTTS
```

```
2930 IM=(T3/SQR(N))*TS
2935 IFN>50THEN2962
2940 PRINT"VALEUR DU KHI2 A "<math>(100-IC)/2</math>" % ET POUR "NU" DEGRES DE LIBERTE"
2945 INPUTK1
2950 PRINT"VALEUR DU KHI2 A "<math>IC+(100-IC)/2</math>" % ET POUR "NU" DEGRES DE LIBERTE"
2953 INPUTK2
2960 I1=(N*T3↑2)/K1:I2=(N*T3↑2)/K2
2962 IFN>50THENI1=(T3-((T3/SQR(2*N))*TS))↑2:I2=(T3+((T3/SQR(2*N))*TS))↑2
2965 IFET#="0"THENFORI=1TO6:GOTO2980
2970 FORI=0TO8
2980 IQ(I)=TS*T3*SQR(U(I)↑2+2)/SQR(2*N)
2990 NEXT
2992 IFEE#="E"THENN=N2
2995 RETURN
3000 REM*****RECHERCHE DE X0 PAR LA METHODE DES MOMENTS
3005 INPUT"NOMBRE D'ESSAIS";NE:INPUT"ESSAYER X0 DEPUIS ....";X1
3007 DIMGA(NE),DR(NE),DD(NE),X0(NE)
3010 MI=1000000:X0=X1-1:FORI=1TONE:X0=X0+1:X0(I)=X0
3040 DR=((MO-X0)↑3)/((T3↑2)+(3*((MO-X0)↑2))):DR(I)=DR
3050 GA=(T3↑4)/MC:GA(I)=GA:DD(I)=ABS(GA-DR)
3060 NEXTI
3070 FORI=1TONE:PRINTGA(I);DR(I);DD(I)
3072 IFDD(I)<MITHENDD=DD(I):XX=X0(I):MI=DD
3075 NEXTI
3078 PRINTXX:X0=XX
3080 RETURN
4000 REM*****EDITION DES RESULTATS SUR IMPRIMANTE
4002 OPEN#4,8:PRINT#8:CLOSE#8:POKE59468,14
4003 IFLO#="GUMBEL"ANDET#="N"THENGOSUB4900:RETURN
4004 IFLO#="FRECHET"THENGOSUB4900:RETURN
4005 OPEN#4,4:INPUT"EDITION DES VALEURS";EV#
4006 PRINT"☐":PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT"EDITION DES RESULTATS POUR "R#
4007 PRINT#4:PRINT#4:PRINT#4,"AJUSTEMENT DE "LO# " SUR "R#
4008 IFEV#="N"THEN4020
4015 FORI=1TON:PRINT#4,X(I),FE(I):NEXTI
4020 PRINT#4,"NOMBRE DE VALEURS :";N
4030 PRINT#4,"MOYENNE : "MO
4040 PRINT#4,"ECART-TYPE";T3
4050 PRINT#4,"COEFF. VAR";CV
4080 CMD4
4090 IFLO#="GAUSS"ANDET#="0"THENGOSUB4150:RETURN
4100 IFLO#="GAUSS"THENGOSUB4400:RETURN
4120 IFLO#="GUMBEL"ANDET#="0"THENGOSUB4800:RETURN
4130 IFLO#="GALTON"ANDET#="0"THENGOSUB4300:RETURN
4135 IFLO#="GALTON"THENGOSUB4600:RETURN
4140 IFLO#="GUMBEL"THENGOSUB4900:RETURN
4150 REM*****RESULTATS GAUSS ETIAGE
4152 PRINT#4,"RESULTATS GAUSS ETIAGE POUR LA VARIABLE "R#
4155 FORI=1TO6:Q(I)=INT(Q(I)*1000)/1000:NEXT
4190 PRINT#4,"EQUATION DE LA DROITE DE GAUSS"
4195 PRINT#4,"Q ="MO" + U*"T3
4200 PRINT#4,"U = Q -"MO/T3
4205 IFAD#="0"THENGOSUB4455
4210 IFIC#="0"THENGOSUB4510
4215 RETURN
4225 IFLO#="GAUSS"THEN4240
4230 IFLO#="GALTON"THENGOSUB4600:RETURN
4235 IFLO#="GUMBEL"THENGOSUB4900:RETURN
4240 IFIC#="0"THENGOTO4510
4300 REM*****RESULTATS GALTON ETIAGE
4302 PRINT#4,"RESULTATS GALTON ETIAGE POUR LA VARIABLE "R#
4305 FORI=1TO6:Q(I)=INT(Q(I)*1000)/1000:NEXT
4350 PRINT#4,"EQUATION DE LA DROITE DE GALTON"
4355 PRINT#4,"Q = 10↑( "T4" U + "ML" ) + "X0
4360 PRINT#4,"U =(LOG Q -"ML")/" T4
4365 IFAD#="0"THENGOSUB4455
```

```
4370 IFIC#="0"THENGO SUB4700
4375 RETURN
4400 REM*****RESULTATS GAUSS
4405 PRINT#4,"PER.RETOUR      FREQ.DEPT      "NC#" EN "UN#"
4410 FORI=0T08:PRINT#4,T(I);F1(I);INT(Q(I)*1000)/1000:NEXTI
4412 IFAD#="0"THENGO SUB4455
4415 IFIC#="0"THENGO SUB4510
4430 PRINT#4,"EQUATION DE LA DROITE:"
4440 PRINT#4,"U ="1/T3" Q -"MO/T3
4450 PRINT#4,"Q = "T3" U +"MO
4452 RETURN
4455 REM*****RESULTATS DU TEST D'ADEQUATION
4458 PRINT#4,"NO LIM  EF.TH  EF.OBS  SS.TOT
4460 FORJ=1TONC:PRINT#4,J;N/NC;NI(J);S(J) :NEXTJ
4470 PRINT#4,"  KHI2 CALCULE = "SM
4480 IFPS>AF/100THENPRINT#4,"LOI ADEQUATE AVEC "PS "> A "AS
4490 IFPS<AF/100THENPRINT#4,"LOI INADEQUATE AVEC "PS "< "AS
4500 RETURN
4510 REM*****IMPRESSION DES INTERVALLES DE CONFIANCE DE GAUSS
4515 PRINT#4,"INTERVALLE DE CONFIANCE SUR LA MOYENNE MO ="MO" A "IC"%"
4520 PRINT#4,"ET POUR "NU" DEGRES DE LIBERTE"
4525 PRINT#4,MO-IM" < MO < "MO+IM
4530 PRINT#4,"SUR L'ECART-TYPE T3 ="T3
4535 PRINT#4,SQR(I1)" < T3 < "SQR(I2)
4540 PRINT#4,"SUR LES QUANTILES"
4542 IFET#="0"THENFORI=1T06:F1(I)=F(I):GOTO4550
4545 FORI=0T08
4550 PRINT#4,Q(I)-IQ(I)" < Q("F1(I)"):"Q(I)" < "Q(I)+IQ(I):NEXTI
4570 RETURN
4600 REM*****RESULTATS GALTON
4602 PRINT#4,"RESULTATS GALTON POUR LA VARIABLE "R#"
4610 PRINT#4,"PER.RET  FREQ.DEPT  Q(I)"
4615 PRINT#4,"ET POUR "NU" DEGRES DE LIBERTE"
4620 FORI=0T08
4628 T(I)=INT(T(I));F1(I)=INT(F1(I)*1000)/1000;Q1(I)=INT(Q1(I)*1000)/1000
4629 Q2(I)=INT(Q2(I)*1000)/1000;Q3(I)=INT(Q3(I)*1000)/1000
4631 PRINT#4,T(I);F1(I);"MOMENTS:";Q1(I);"MAX.VRAIS:";Q2(I);"NPETIT:";Q3(I)
4632 NEXTI
4635 IFAD#="0"THENGO SUB4455
4640 IFIC#="0"THENGO SUB4700
4650 PRINT#4,"EQUATION DE LA DROITE DE GALTON (LOG DECIMAL)"
4652 PRINT#4,"METHODE DES MOMENTS :"
4655 PRINT#4,"Q = 10↑( "1/AL" U - "BL/AL" ) + "X0
4660 PRINT#4,"U = "AL "LOG DECIMAL DE ( Q- "X0" ) + "BL:PRINT#4
4665 PRINT#4,"METHODE DU MAXIMUM DE VRAISEMBLANCE :"
4670 PRINT#4,"Q = 10↑( "1/AM" U - "BM/AM" ) + "X0
4675 PRINT#4,"U = "AM "LOG DECIMAL DE ( Q- "X0" ) + "BM
4680 PRINT#4:PRINT#4,"SI N EST PETIT : "
4685 PRINT#4,"Q = 10↑( "T4" U + "ML" ) + "X0
4690 PRINT#4,"U =(LOG Q -"ML")/" T4
4697 RETURN
4700 REM*****IMPRESSION DES INTERVALLES DE CONFIANCE GALTON
4710 PRINT#4,"INTERVALLE DE CONFIANCE SUR LA MOYENNE MO ="MO" A "IC" %"
4715 PRINT#4,"ET POUR "NU" DEGRES DE LIBERTE"
4720 PRINT#4,M1" < MO < "M2
4736 IFET#="0"THENFORI=1T06:F1(I)=F(I):GOTO4745
4738 PRINT#4,"LAME DECENNALE FORTE"
4740 FORI=0T08
4745 PRINT#4,A1(I)" < Q("F1(I)"):"Q1(I)" < "B1(I)
4746 PRINT#4,A2(I)" < Q("F1(I)"):"Q2(I)" < "B2(I)
4747 PRINT#4,A3(I)" < Q("F1(I)"):"Q3(I)" < "B3(I):PRINT#4:NEXTI
4795 RETURN
4800 REM*****RESULTATS ETIAGE
4802 PRINT#4,"RESULTATS GUMBEL ETIAGE POUR LA VARIABLE "R#"
4805 FORI=1T06:Q(I)=-INT(Q(I)*1000)/1000:NEXTI
4810 PRINT#4,"ETIAGE DECENNAL SEC");F(1);Q(1)
```

```
4820 PRINT#4,"ETIAGE MEDIAN";F(2);Q(2)
4830 PRINT#4,"ETIAGE NON DEPASSE 2ANS/3";F(3);Q(3)
4840 PRINT#4,"ETIAGE QUARTILE HUMIDE";F(4);Q(4)
4850 PRINT#4,"ETIAGE QUINQUENNAL HUMIDE";F(5);Q(5)
4860 PRINT#4,"ETIAGE DECENNAL HUMIDE";F(6);Q(6)
4869 PRINT#4,"EQUATION DE LA DROITE DE GUMBEL"
4870 PRINT#4,"U = "1/AG"Q" - Q0/AG
4875 PRINT#4,"Q = "AG"U + "Q0
4877 IFIC#="0"THEN GOSUB 4970
4890 RETURN
4900 REM*****RESULTATS GUMBEL OU FRECHET
4902 M#="DEBITS MAXIMA INSTANTANES"
4903 INPUT"STATION (0 SI NOM DU FICHIER INFO)";N#
4904 INPUT"TTRE 3";Q#
4905 OPEN1,4:OPEN2,4,1:OPEN3,4,2:OPEN4,4,4:PRINT#4
4906 FORI=1TO10:PRINT#1:NEXTI
4907 PRINT#1,CHR$(1)"          AJUSTEMENT DE GUMBEL OU FRECHET      ":PRINT#1
4908 PRINT#1,"          "CHR$(1)M#:PRINT#1
4909 PRINT#1,"          "CHR$(1)N#:PRINT#1:PRINT#1
4910 PRINT#1,"          "Q#:PRINT#1:PRINT#1
4912 PRINT#1,"          ANNEE   Q.M.I   FREQ EXP"
4913 PRINT#1,"          (M3/S)          ":PRINT#1
4914 A#="          ZZZZ   ZZ.9   .999"
4917 FORI=1TON:T(I)=T(I)+1900:PRINT#3,A#:PRINT#2,T(I),X(I),FE(I)
4918 T(I)=T(I)-1900
4920 NEXTI:PRINT#1
4930 MO=INT(M0*1000)/1000:PRINT#1,"          MOYENNE : "MO"M3/S":PRINT#1
4935 T3=INT(T3*1000)/1000:PRINT#1,"          ECART-TYPE : "T3"M3/S":PRINT#1
4940 PRINT#1,"          EQUATION DE LA DROITE DE GUMBEL:" :PRINT#1
4942 G3=INT((1/AG)*10000)/10000
4943 G4=INT(Q0*10000)/10000
4955 PRINT#1,"          Q = "G3"U + "G4:PRINT#1
4960 PRINT#1,"          U:VARIABLE REDUITE DE GUMBEL=-LOG(-LOGP)
4961 PRINT#1,"          P:FREQUENCE AU NON DEPASSEMENT DE L'EVENEMENT Q":PRINT#1
4962 IFIC#<>"0"THEN 4990
4963 CLOSE1:CLOSE2:CLOSE3
4970 REM*****IMPRESSION DES QUANTILES ET INTERVALLES DE CONFIANCE DE GUMBEL
4972 OPEN1,4:OPEN2,4,1:OPEN3,4,2
4975 PRINT#1,"          TEMPS DE RETOUR   QUANTILE (M3/S)   IC"11" %          IC"12" %
4976 PRINT#1
4980 B#=" 999.999 AAA          999.999          999.999 A 999.999 999.999 A 999.999"
4981 S#="ANS":Q#="-"
4982 IFET#="0"THEN FORI=1TO6:PRINT#3,B#:GOTO 4992
4986 FORI=1TO7
4987 PRINT#3,B#
4988 PRINT#2,TR(I),S#CHR$(29),Q(I),Q2(I),Q#CHR$(29),Q1(I),Q4(I),Q#CHR$(29),Q3(I)
4989 GOTO 4995
4992 PRINT#2,TR(I),S#CHR$(29),Q(I),-Q1(I),Q#CHR$(29),
4993 PRINT#2,-Q2(I),-Q3(I),Q#CHR$(29),-Q4(I)
4995 NEXTI:POKE 59468,12:CLOSE1:CLOSE2:CLOSE3:CLOSE4:RETURN
5000 REM*****TRACE SUR GRAPHTEC MP 1000/11
5020 OPEN10,10
5030 IFLO#="GUMBEL"THEN GOSUB 6000:RETURN
5100 REM*****TRACE GAUSS ET GALTON
5102 PRINT#10,"S"2:GOSUB 5550
5105 IFAL#="0"THEN 5200
5110 DIMZ(50):DIMB(50):DIMDF(50)
5200 GOSUB 5900
5340 FORI=1TON:Z(I)=((Z(I)+3.715)*MU)+480:DF(I)=Z(I)-Z(I-1):NEXTI
5345 IFLO#="GALTON"THEN 5600
5347 INPUT"ORDONNEE A L'ORIGINE ET ORDONNEE MAX";Q0,MX:MN=Q0:UR=Q0
5348 INPUT"NBRE DE DIVISIONS EN ORDONNEE";ND:O=1500
5350 VD=O/ND:RR=(MX-Q0)/ND
5355 INPUT"TRACE DE L'ORDONNEE";TT#
5357 IFTT#="N"THEN 5380
5358 PRINT#10,"M"480,1060
```

```
5359 NA=ND*2:PRINT#10,"X2",0,NA
5361 PRINT#10,"M"2800,1060
5362 PRINT#10,"X2",0,NA
5364 VO=1060+2*VD:PRINT#10,"M"360,1060:PRINT#10,"P"00
5365 FORI=1TOND/2
5370 PRINT#10,"M"360,VO:00=00+2*RR:PRINT#10,"P"00
5375 PRINT#10,"M"480,VO:PRINT#10,"I"MM,0:VO=VO+(2*VD):NEXTI
5376 IFVO<>2560THENPRINT#10,"M"480,2560:PRINT#10,"I"MM,0
5380 VV=(MX-MN)/ND:00=MN*VD/VV
5390 00=MN*VD/VV
5400 FORI=1TON:B(I)=((VD/VV)*X(I))-00+1060:NEXTI:INPUT"TYPE DE POINT";PT
5405 PRINT#10,"S"3
5410 FORI=1TON:PRINT#10,"M"Z(I),B(I):PRINT#10,"N"PT:NEXTI:PRINT#10,"H"
5420 PRINT"TRACE DE LA DROITE D'AJUSTEMENT"
5430 A1=-2.325:A2=-A1
5440 MI=(T3*A1)+M0:O1=MI
5450 MA=(T3*A2)+M0:O2=MA
5500 A1=((A1+3.715)*MU)+480
5510 A2=((A2+3.715)*MU)+480
5515 IFTR#="C"THENO1=MA:O2=MI
5520 O1=((VD/VV)*O1)+1060-00
5530 O2=((VD/VV)*O2)+1060-00
5540 PRINT#10,"M"A1,O1:PRINT#10,"D"A1,O1,A2,O2:PRINT#10,"H":GOSUB55840
5545 RETURN
5550 REM*****TRACE DE LA GRILLE DE GAUSS OU GALTON
5555 DIMK(50):0=-1500
5556 DIMF(50):DIMG(50)
5557 PRINT#10,"T"3
5560 MM=23.2:MM=MM*100:MU=(MM/2):MU=(MU/3.715)
5562 INPUT"TRACE DE LA GRILLE";TG#
5563 IFTG#="N"THENRETURN
5564 FORI=1TO25:READK(I),F(I),G(I)
5566 K(I)=K(I)*MU
5568 K1=K(I)+1620:PRINT#10,"M"K1,2590:PRINT#10,"O"17
5570 PRINT#10,"P"F(I):PRINT#10,"M"1640,2560
5572 PRINT#10,"R"K(I),0:0=-15:V=-30
5573 IFI=10RI=25THENPRINT#10,"R"0,0:GOTO5575
5574 PRINT#10,"I"0,0
5575 PRINT#10,"R"0,V:PRINT#10,"P"G(I)
5576 NEXT
5577 PRINT#10,"M"430,950:PRINT#10,"PU
5578 ME=460+(.715*MU):FORI=-3TO3:PRINT#10,"M"ME,920:PRINT#10,"P"1:ME=ME+MU
5579 NEXT
5580 PRINT#10,"M"480,960:G=.715*MU:PRINT#10,"X3",G,1:PRINT#10,"X1",MU,6
5581 PRINT#10,"X3",G,1
5582 Q=480+MM:PRINT#10,"M"Q,1060:E=-MM
5583 IFLO#="GALTON"THENPRINT#10,"I"0,1500:PRINT#10,"R"E,0:PRINT#10,"I"0,-1500
5584 IFLO#="GAUSS"THENPRINT#10,"I"E,0
5586 PRINT#10,"M"2240,2630:PRINT#10,"PFREQUENCE AU NON DEPASSEMENT EN %"
5587 PRINT#10,"M"2300,1000:PRINT#10,"PFREQUENCE AU DEPASSEMENT EN %"
5589 DATA-3.715,0.01,99.99,-3.29, , , -3.09,0.1,99.9,-2.878,0.2,
5590 DATA-2.576,0.5, , -2.321,1.99,-2.053,2.98,-1.645,5.95,-1.28,10,90
5591 DATA-.84,20,80,-.524,30,70,-.253,40,60,0,50,50
5592 DATA.253,60,40,.524,70,30,.84,80,20,1.28,90,10,1.645,95,5,2.053,98,2
5594 DATA2.321,99,1,2.576, ,0.5,2.878, ,0.2,3.09,99.9, ,3.29, ,0.05
5596 DATA3.715,99.99,0.01
5599 RETURN
5600 REM*****ANNEXE TRACE GALTON
5610 A=1:0=1060:0G=1060
5611 INPUT"NOMBRE DE MODULES";NM:00=1500/NM:FORJ=1TONM
5613 PRINT"ORDONNEE MIN ET MAX DU MODULE "J":INPUT00(J),MX(J)
5614 ND=9:RR=(MX(J)-00(J))/ND
5615 IFJ>1THENS620
5617 00=00(J):PRINT#10,"S"2:PRINT#10,"M"360,0:PRINT#10,"P"00
5618 MM=MM:PRINT#10,"M"480,0:PRINT#10,"I"MM,0
5620 FORI=2TOND+1:VO=0+(LOG(I)/2.302585093)*00:PRINT#10,"M"360,VO
```

```
5630 Q0=00+RR:PRINT#10,"P"00:PRINT#10,"M"480,V0:PRINT#10,"I"MM,0
5631 NEXT I:0=0+00
5632 NEXT J:0=00:FOR J=1:TONM:
5635 M=1/000J)
5637 F=N:FOR I=FT01:STEP-1
5640 IF X(I)>MX(I) THEN 0=0+00:F=I:NEXT J
5645 B(I)=(LOG((X(I)-X0)*M)/2.302585093)*00+0
5647 NEXT I
5650 FOR I=1:TON:PRINT#10,"M"2(I),B(I):PRINT#10,"N"7:NEXT I:PRINT#10,"H"
5660 PRINT"DESIREZ VOUS UN AJUSTEMENT
-PAR LA METHODE DES MOMENTS ?"
5662 PRINT"-PAR LA METHODE DU MAXIMUM DE VRAISEMBLANCE ?"
5663 PRINT"-POUR N PETIT ?"
5665 PRINT"CHOIX :1,2 OU 3 ":INPUTMM
5666 IF MM=2 THEN AL=AM:BL=BM
5668 PRINT"ORD DEBUT ET FIN A CHOISIR RESPECTIVEMENT DS LE 1ER ET DERNIER MODUL
5670 0=00:INPUT"ORDONNEE DEBUT ET ORDONNEE FIN";MI,MA
5675 IF MM=3 THEN ET#="0"
5680 IF ET#="0" THEN MA1=(LOG(MI)/2.302585093)-ML)/T4:A2=((LOG(MA)/2.30258)-ML)/T4
5690 IF ET#="N" THEN MA1=AL*(LOG(MI-X0)/2.30258)+BL:A2=AL*(LOG(MA-X0)/2.30258)+BL
5695 IF MM=3 THEN ET#="N"
5700 A1=((A1+3.715)*MU)+500
5710 A2=((A2+3.715)*MU)+500
5711 PRINT A1,A2
5712 IF MI<1 THEN NM=10
5714 IF MI>1 AND MI<=10 THEN NM=1
5716 IF MI>10 AND MI<=100 THEN NM=.1
5717 IF MI>100 AND MI<=1000 THEN NM=.01
5718 IF MI>1000 AND MI<=10000 THEN NM=.001
5720 01=(LOG((MI-X0)*M)/2.302585093)*00+0
5722 IF M<=1 THEN M=10
5724 IF M>1 AND M<=10 THEN M=1
5726 IF M>10 AND M<=100 THEN M=.1
5727 IF M>100 AND M<=1000 THEN M=.01
5728 IF M>1000 AND M<=10000 THEN M=.001
5730 02=(LOG((MA-X0)*M)/2.302585093)*00+0+(NM-1)*00)
5735 PRINT#10,"T"2
5740 PRINT#10,"M"1,01:PRINT#10,"D"1,01,A2,02:PRINT#10,"H"
5810 GOSUB 5840:RETURN
5830 REM*****ECRITURE DES INTITULES POUR GAUSS ET GALTON
5840 INPUT"NOM DE L'ORDONNEE AVEC UNITES";V$:PRINT#10,"M"350,2630
5845 PRINT#10,"S"2:PRINT#10,"P"V$
5865 INPUT"TTITRE";T$
5867 T#="FIGURE : AJUSTEMENT DE "+LO$+" SUR "+T$
5870 PRINT#10,"S"3:PRINT#10,"O"23:PRINT#10,"M"850,860:PRINT#10,"P" T$
5875 PRINT#10,"M"2900,0:RETURN
5900 REM*****CALCUL DES VARIABLES REDUITES U
5905 DIM X(N),Z(N),ZC(N),ZC(N),ZC(N),F(N)
5907 FOR I=1:TON
5908 IF FE(I)<.5 THEN FI(I)=1-FE(I):GOTO 5910
5909 FI(I)=FE(I)
5910 XG(I)=(-2*LOG(1-FI(I)))↑.5
5912 ZN(I)=2.515517+(.802853*XG(I))+(.010328*(XG(I)↑2))
5914 ZC(I)=1+(1.432788*XG(I))+(.189269*(XG(I)↑2))+(.001300*(XG(I)↑3))
5916 Z(I)=-XG(I)+(ZC(I)/ZC(N))
5918 IF FE(I)<.5 THEN Z(I)=-Z(I)
5919 NEXT I
5920 RETURN
6000 REM*****TRACE GUMBEL
6010 DIM O(55):DIM G(130):DIM O(55):DIM B(100):DIM C(52)
6020 IF TR#="O" THEN A=X(I):MI=X(N)
6030 IF TR#="C" THEN MA=X(N):MI=X(I)
6040 MA=MA+(MA/10):MI=(MI-MI/10)
6060 W$="FREQUENCE AU NON DEPASSEMENT (P)":INPUT"NOM DE L'ORDONNEE";V$
6062 INPUT"UNITE DE L'ORDONNEE";UR$
6065 INPUT"TTITRE 2EME LIGNE EN COMPLETANT AJUSTEMENT DE GUMBEL..... ":T1$
6067 INPUT"TTITRE 3EME LIGNE";T2$
```

```

6070 INPUT"PERIODE ETUDIEE";Z#
6080 CLOSE10:OPEN10,10:PRINT#10,";"
6090 A=500:OO=1800:B=A+OO:OA=1600:UA=OA/9
6092 INPUT"ORDONNEE MIN ET ORDONNEE MAX";MN,MX:MM=MN
6093 INPUT"NBRE DE DIVISIONS EN ORDONNEE";ND:VD=OO/ND:RR=(MX-MN)/ND:RS=RR
6100 PRINT#10,"M"100,500
6104 INPUT"SANS LA GRILLE O/N";RP#
6105 PRINT#10,"T"3
6107 FORI=1TO125:READG(I)
6108 NEXT
6110 FORI=76TO125:G(I-75)=G(I): DG=-LOG(G(I)):DG=-LOG(DG)
6120 DG(I-75)=((DG+2)*UA)+100 :NEXT
6121 IFRP#="0"THENPRINT#10,"M"DG(50),500:GOTO6140
6122 PRINT#10,"D"100,500,100,2300,DG(1),2300,DG(1),500
6125 FORI=2TO48STEP2
6130 PRINT#10,"D"DG(I),500,DG(I),2300,DG(I+1),2300,DG(I+1),500:NEXT
6135 PRINT#10,"D"DG(49),500,DG(50),500
6140 PRINT#10,"X2",OO,ND:OA=-OA:PRINT#10,"I"OA,0:OA=-OA
6150 PRINT#10,"X2",-OO,ND:PRINT#10,"I"OA,0
6152 FORI=1TO50:G*(I)=STR*(G(I)):NEXT:PRINT#10,"S"2
6153 PRINT#10,"O"18:I=1:G*(1)="."001":GOSUB6400:I=3:G*(3)="."01":GOSUB6400
6154 I=5:GOSUB6400:I=7:GOSUB6400
6156 I=13:GOSUB6400:I=19:GOSUB6400
6158 I=24:GOSUB6400:I=29:GOSUB6400:I=31:GOSUB6400:I=33:GOSUB6400:I=38:GOSUB6400
6160 I=43:GOSUB6400:I=47:GOSUB6400:I=49:GOSUB6400
6165 PRINT#10,"S"3
6178 PRINT#10,"M"100,400:PRINT#10,"X1",UA,9:PRINT#10,"R"80,-20:PRINT#10,"PU
6180 BB=240:T=-2:PRINT#10,"M"80,350:FORI=1TO10:PRINT#10,"P"1
6190 PRINT#10,"M"BB,350:BB=BB+UA:T=T+1:NEXT
6200 DATA.001,.005,.01,.05,.1,.15,.2,.25,.3,.35,.4,.45,.5,.55,.6,.65,.7,.75
6202 DATA.8,.82,.84,.86,.88,.9,.91,.92,.93,.94,.95,.96,.97,.975,.98,.982,.984
6204 DATA.986,.988,.99,.991,.992,.993,.994,.995,.996,.997,.9975,.998,.9985,.999
6205 DATA.999088534
6207 REM*****ECRITURE DES GRADUATIONS EN Y
6208 PRINT#10,"O"23
6211 VO=500+VD:PRINT#10,"M"0,500:PRINT#10,"P"MN:FORI=1TOND:PRINT#10,"M"0,VO
6212 INPUT"MN";MN
6213 VO=VO+VD:RR=RS:PRINT#10,"P"MN:NEXTI
6215 MN=MM:VO=500+VD:PRINT#10,"M"1730,500:PRINT#10,"P"MN:FORI=1TOND
6217 INPUT"MN";MN
6218 PRINT#10,"M"1730,VO:VO=VO+VD:RR=RS:PRINT#10,"P"MN:NEXTI
6220 PRINT"VALEUR DE LA VARIABLE CORRESPONDANT A UNE DIVISION DE "VO/100" CM"
6222 INPUTVV
6225 IFET#="0"THENINPUT"ORIGINE ORDONNEE";OO:OO=-OO*VO/VV
6230 FORI=1TON:B(I)=((VO/VV)*X(I))-((VO/VV)*MN)+500
6235 IFET#="0"THENB(I)=B(I)+OO
6240 DG=-LOG(FE(I)):DG=-LOG(DG)
6250 DE(I)=((DG+2)*UA)+100:NEXTI
6255 PRINT#10,"S"3
6260 FORI=1TON:PRINT#10,"M"DE(I),B(I):PRINT#10,"N"8:NEXTI:PRINT#10,"H"
6275 INPUT"ORDONNEE DEBUT ET ORDONNEE FIN DE LA DROITE D'AJUSTEMENT";MI,MA
6280 A1=(AG*MI)-(AG*OO):O1=MI
6290 A2=(AG*MA)-(AG*OO):O2=MA
6295 IFET#="0"THENA1=(MI-OO)/AG:A2=(MA-OO)/AG:O1=MI:O2=MA
6300 A1=((A1+2)*UA)+100:
6310 A2=((A2+2)*UA)+100:
6320 O1=((VO/VV)*O1)+500-((VO/VV)*MM)
6330 O2=((VO/VV)*O2)+500-((VO/VV)*MM)
6335 IFET#="0"THENO1=O1+OO:O2=O2+OO
6340 PRINT#10,"M"A1,O1:PRINT#10,"D"A1,O1,A2,O2
6341 PRINT#10,"M"100,2600:PRINT#10,"PU =-LOG(-LOG P)
6342 OO=(INT(OO*1000))/1000:GA=(INT((1/AG)*1000))/1000
6343 PRINT#10,"M"100,2500:PRINT#10,"P"V# "="+GA"U + "OO
6345 PRINT#10,"M"100,2350:PRINT#10,"P"V# EN "UN#
6350 PRINT#10,"M"1200,2400:PRINT#10,"P"PERIODE "Z#
6355 PRINT#10,"M"900,420:PRINT#10,"P"W#

```



```
6360 PRINT#10,"M" 90,250:PRINT#10,"PFIGURE : AJUSTEMENT DE GUMBEL
6365 PRINT#10,"M"400,200:PRINT#10,"P"T1#
6367 PRINT#10,"M"400,150:PRINT#10,"P"T2#
6390 RETURN
6400 PRINT#10,"M"DG(I),500:PRINT#10,"N"8:PRINT#10,"M"DG(I)-40,460
6405 PRINT#10,"P"G#(I):RETURN
6500 RETURN
7110 PRINT#10,"M"2150,990:PRINT#10,"PFREQUENCE AU DEPASSEMENT EN %
10000 REM*****CHOIX D'EDITION
10005 PRINT"☐"
10010 INPUT"IMPRESSION IMPRIMANTE,TRACE OU FIN D'EDITION I/T/F";ED#
10040 IFED#="I"THENGOSUB4000:CLOSE4:CLOSE8:POKE59468,12:GOTO10010
10050 IFED#="T"THENGOSUB5000:GOTO10010
10060 INPUT"VOULEZ-VOUS AJUSTER UNE AUTRE LOI O/N";AL#
10070 IFAL#="O"THEN142
10080 GOTO20
10090 RETURN
10100 END
11000 O=1500
11005 ND=16:NA=ND*2:FORI=1TONA:OU=INT(O/NA):O=O+(O/NA-INT(O/NA)):PRINTOU
11010 NEXT
```

Programme RENOUELEMENT (Modèle de renouvellement)

```
'n : nombre de valeurs supérieures ou égales au seuil 50
'na : nombre d'années d'observation
'nx : nombre maximal d'observations supérieures à "50 "sur une année
'mu : paramètre de la loi de poisson
'S0 : seuil
'nx : nombre maximum d'observations sur une année
'ro:paramètres de la loi exponentielle
'p : exposant de la loi de Weibull
'ENTREES : Valeurs x(i)
'ptc : durée de cumul en heures
DIM T(3000),X(3000),Y(4000),Z(4000),FE(2000),N(85),NB(50),NT(50),f(200)
DIM FA(85),NS(85)
CLS
print "saisie de données .....1"
print "cumul et sélection de données .....2"
print "lecture d'un fichier extrait .....3"
input rep
on rep gosub 1,2,3
END
1:
GOSUB SAISIE
GOSUB ECRITURE
RETURN
2 :
GOSUB ENTREES
GOSUB SELECTION
GOSUB PARAMETRES
GOSUB TRI
GOSUB EXPONENTIELLE
GOSUB RESULTATS
GOSUB TRACE
RETURN
3 :
GOSUB LECTURE
GOSUB PARAMETRES
GOSUB TRI
GOSUB EXPONENTIELLE
GOSUB RESULTATS
GOSUB TRACE
RETURN
-----
SAISIE :
-----
input"saisie de données I/O";sd
if sd<>1 then return
i=0
while x(i)<> 10000
  incr i
  print"valeur : "i "(10000 pour terminer)
  t(i)=i:input x(i)
wend
```

```
n=i-1
gosub ECRITURE
return
```

ECRITURE :

```
-----
input"nom du fichier sans sous-répertoire";fc$
fc$="pgcol\"+fc$
open"O",#1,fc$
for i=1 to n
  write#1,t(i),x(i)
next i
close#1
RETURN
```

ENTREES :

```
-----
i=1
fic$="pgcol\col30" 'input"nom du fichier complet avec sous-répertoire";fic$
input"seuil ";s0
print "changement de variable : log nep, carré ou rien"
cv$="ras" 'input"log,^2,ras";cv$
input"cumul en heures";ptc
input"édition des valeurs supérieures au seuil choisi 1/0";edit
for a=76 to 85
  fc$=fic$+right$(str$(a),2)
  k=0
  if cv$="log" then s0=log(s0)
  if cv$="^2" then s0=s0^2
  print"lecture du fichier "fc$
  open"I",#1,fc$
  lprint "année "a:lprint
  while not eof(1)
    incr k
    input#1,t(k),x(k)
  wend
  n=k
  close #1
  GOSUB CUMUL
  lprint n(a)" valeurs supérieures à "s0
next a
n=i-1
RETURN
```

cumul :

```
-----
print"ANNEE : "a
l=ptc*2 'nombre de pas de temps de 30'
kb=((1-1)/48)+.01
max=0
for k= 1 to n+1
  15
  x=0
  if x(k)= 10000 then exit for

  for j=k to k+1-1
    if t(j)<=t(k)+kb and t(j) >=t(k) then x=x(j)+x
  next j
  y=t(k)
  if fix(t(k))=fix(t(k+1)) then
    if x>max then swap x,max:maxt=t(k)
    rm=1
    incr k
    goto 15
  else
```

```
        if rm=1 then
            x=max
            y=maxt
            rm=0
        end if
    end if
    if x>=0 then
        z(i)=x
        max=0
        y(i)=y
        maxt=0
        rm=0
        if cv$="log" then z(i)=log(z(i))
        if cv$="^2" then z(i)=z(i)^2
        n(a)=n(a)+1
        if edit=1 then
            lprint using "####";i;
            lprint using "#####.###";y(i);
            lprint using "#####";z(i)
        end if
        incr i
    end if
next k
y(i)=0;z(i)=1000000 'indicateur de fin de période
incr i
return
```

SELECTION :

```
print " Pour respecter l'indépendance des valeurs, celles qui appartiennent"
input" à la même averse doivent être éliminées ok ";sl$
if sl$<>"ok" then goto 20
for i=1 to n
    print"éliminer la valeur ?" using "###";i
    if i>2 then
        print" i-2 :" using "#####.###";y(i-2),z(i-2)
        print" i-1 :" using "#####.###";y(i-1),z(i-1)
    end if
    print"          "using "#####.###";y(i),z(i)
    print" i+1 :"using "#####.###";y(i+1),z(i+1)
    print" i+2 :"using "#####.###";y(i+2),z(i+2)
    print "-----"
    input "tapez son numéro sinon 0";ni
    if ni<>0 then z(ni)=0
next i
20
i=0;tv=0;a=76
for k=1 to n
    if z(k)<>0 then
        incr i
        x(i)=z(k);t(i)=y(k)
    end if
next k
n=i
for i=1 to n
    print "valeurs retenues "i,t(i),x(i)
    if x(i) <> 1000000 then tv=tv+1
    if x(i)=1000000 then n(a)=tv;print n(a);a=a+1;tv=0
next i
sd=0
input"les saisir sur disque 1/0";sd
if sd=1 then gosub ecriture
i=0
for k=1 to n
    if z(k)<>0 and z(k)<1000000 then
        incr i
        x(i)=z(k);t(i)=y(k)
```

```
        end if
next k
n=i
return
'-----
LECTURE :
'-----
i=1
input"nom du fichier sans sous-répertoire";fic$
fic$="pgcol\"+fic$
input"ne conserver que les valeurs supérieures à";SO
open "I",#1,fic$
while not eof(1)
    input #1,y(i),z(i)
    if z(i)>SO then
        print using "#####.###";i,y(i),z(i)
        incr i
    end if
wend
close #1
n=i-1
GOSUB SELECTION
return
'-----
```

```
PARAMETRES :
'-----
a=0:b=0:maxv=0
for i=1 to n
    a=x(i)+a
    b=x(i)^2+b
    x=x(i)
    if x>maxv then swap x,maxv
next i
mo=a/n
t3=(b-(n*(mo^2)))/(n-1)
t3=sqr(t3)
cv=t3/mo
write"moyenne,écart-type,cv",mo,t3,cv
for i=1 to n
    fe(i)=i/n
next i
RETURN
'-----
```

```
TRI :
'-----
for j=1 to n
    x(j)=-x(j)
next j
for i=1 to n-1
    for j=i+1 to n
        if x(j)<x(i) then swap x(j),x(i)
    next j
next i
print"liste des variables triées"
for i=1 to n
    x(i)=-x(i)
    write i,x(i)
next i
RETURN
'-----
```

```
EXPONENTIELLE :
'-----
input"loi simple ou Weibull s/w";cle$
for i=1 to 7
    read r(i)
next i
data 2,3,5,10,20,50,100
```

```

if cle$="s" then      'loi exponentielle simple
  print"loi exponentielle simple"
  p=1
  gosub poisson
  ro=1/(mo-s0)
  for i= 1 to 7
    q(i)=s0+(log(mu*r(i)))/ro
    vq(i)=(((q(i)-s0)^2)/n)+1/((ro^2)*n)
  next i
else                  'loi de Weibull
  print"loi de Weibull"
  input"connaissiez vous la valeur de p";cp$
  if cp$="n" then
    1352
    input"entrez des valeurs de p";p
    sq=0:sp=0:sl=0
    for i=1 to n
      sq=log(x(i)-s0)+sq
      sp=((x(i)-s0)^p)+sp
      sl=((x(i)-s0)^p)*(log(x(i)-s0))+sl
    next i
    zr=(n/p)+sq-((n/sp)*sl)
    print"le résultat affiché doit être le plus près possible de zéro"
    print"résultat : "zr
    input"pour un nouvel essai, tapez s sinon ok";es$
    if es$="s" then goto 1352
  end if
  dn=0
  input "p choisi";p
  for i=1 to n
    dn=((x(i)-s0)^p)+dn
  next i
  ro=n/dn
  gosub poisson
  for i=1 to 7
    q(i)=s0+((log(mu*r(i)))/ro)^(1/p)
  next i
  a1=n/(ro^2)
  a2=n/(mu^2)
  a3=0
  print "ro p "ro,p
  for i=1 to n
    a3=ro*((x(i)-s0)^p)*((log(x(i)-s0))^2)+a3
  next i
  a3=a3+(n/p)
  for i=1 to n
    a4=((x(i)-s0)^p)*(log(x(i)-s0))+a4
  next i
  dt=a2*((a1*a3)-(a4^2))
  vr=(a2*a3)/dt
  vp=(a1*a2)/dt
  cr=-(a2*a4)/dt
  vm=(a1*a3)/dt
  for i=1 to 7
    j=(((q(i)-s0)^2)/((ro*p)^2))*vr
    k=(((q(i)-s0)^(2*(1-p)))/((ro*mu*p)^2))*vm
    l=(((q(i)-s0)^2)*((log(q(i)-s0))^2))/(p^2))*vp
    m=(((q(i)-s0)^2)*log(q(i)-s0))/(ro*(p^2))*(2*cr)
    vq(i)=j+k+l+m
  next i
END IF
RETURN

```

POISSON :

DEF FNFactorielle(fact)

```
if fact<2 then FNFactorielle=1:exit def
totfac=1
for fac=fact to 2 step -1
totfac=totfac*fac
next fac
FNFactorielle=totfac
END DEF
na=10 'input "nombre d'années d'observation de la variable";na
mu=n/na
'(ADEQUATION DE LA LOI DE POISSON)
'nombre max de valeurs ayant dépassé le seuil :
for la=1 to 20
  read f(la)
next la
data 3.84,5.99,7.81,9.48,11.07,12.59,14.06,15.51,16.91,18.3,19.67
data 21.02,22.36,23.68,25,26.3,27.59,28.87,30.14,31.41
max=0
for a=76 to 85
  fa(a)=fnfactorielle(n(a))
  nfa=n(a)
  if nfa>max then swap nfa,max
next a
nx=max
max=0
'nombre d'années où chaque réalisation se réalise de 0 à nx fois
k2=0
  print "nombre observé  nombre théorique"
for i=0 to nx
  for a=76 to 85
    if n(a)=i then nb(i)=nb(i)+1
  next a
  fa=fnfactorielle(i)
  nt(i)=(na*(exp(-mu))*(mu^i))/fa
  print using "####.#";nb(i) nt(i)
  k2=((nb(i)-nt(i))^2)/nt(i)+k2
next i
print "nx "nx
nl=nx-2
q2=f(nl)
print"k2 théorique à "nx-2 "degrés de liberté : "
if nx-2>20 then input q2
write "chi2 cal obs",k2,q2
RETURN
-----
RESULTATS :
-----
input"édition des résultats 1/0";result
if result<>1 then return
lprint"METHODE DU RENOUVELLEMENT"
lprint"-----"
lprint "fichier "fic$
lprint"seuil "s0
if cv$="log" then lprint "variable en log nep"
if cv$="^2" then lprint "carré de la variable"
input"édition des valeurs 1/0";ev
if ev=1 then
  for i=1 to n
    lprint x(i),fe(i),-log(fe(i))
  next i
end if
lprint"nombre de valeurs : "n
if cv$="log" then
  for i=1 to 7
    q(i)=exp(q(i))
    vq(i)=exp(vq(i))
  next i
end if
```

```
if cv$="^2" then
  for i=1 to 7
    q(i)=sqr(q(i))
    vq(i)=sqr(vq(i))
  next i
end if
lprint"moyenne : "mo
lprint"écart-type" t3
lprint"coeff.var" t3/mo
lprint "mu : "mu
lprint" ro : "ro
lprint" P : "p
lprint "quantiles : "
for i=1 to 7
  lprint using "#####";r(i);
  lprint " ans : ";
  lprint using "#####.#";q(i);
  lprint using "#####.#";q(i)-sqr(vq(i));
  lprint using "#####.#";q(i)+sqr(vq(i))
next i
lprint "seuil dépassé au maximum "nx" fois
for i=0 to nx
  lprint i" fois : "nb(i)" années
next i
lprint "k2 calculé : "k2
lprint "k2 théorique : "q2
if k2 >= q2 then lprint "loi refusée" else lprint "loi acceptée"
lprint "Equation de la droite : "
if cle$="w" then
  lprint "q(T) = (Log("mu"T)/"ro")^"1/p"+"s0"(WEIBULL)
  return
else
  lprint "q(T) ="1/ro"Log T + "s0+(log(mu)/ro)
end if
return
```

TRACE : (table Graphtec MP 3100)

```
input"tracé 1/0";trac
if trac<>1 then return
dim a(n),b(n)
open"D",#1,"AUX"
print#1,"M"100,500
vo=200
la=15 'longueur abscisse en cm
print"valeur max : "maxv" soit, en abscisse transformée : "(maxv-s0)^p
input"nbre de divisions en abscisse";nd
input"abscisse max";mx
aa=mx/nd
mx=mx*100
la=la*100
ua=la/nd
print#1,"X0",vo,9
print#1,"M"100,2350
print#1,"P-LOG(FREQ.EXP)"
print#1,"M"30,500
for i=-9 to 0
  print#1,"P"i
  ao=vo+ao
  print#1,"M"30,ao+500
next i
for i= 1 to n
  a(i)=100+(((x(i)-s0)^p)*(ua/aa))
  b(i)=2300+(log(fe(i))*vo)
next i
print#1,"M"100,500
```



```
print#1,"X3",la,nd
print#1,"M"la-300,350
print#1,"P( Q - "50")"
print#1,"R"0,30
p%=str$(p)
p%=mid$(p$,2,4)
print#1,"P"p$
print#1,"M"60,450
al=60
for i=0 to nd
  print#1,"P"ab
  al=al+ua
  print#1,"M"al,450
  ab=aa+ab
next i
for i=1 to n
  print#1,"M"a(i),b(i)
  print#1,"N"8
next i
' tracé de l'ajustement
'-----
al=100
o1=2300
a2=100+((log(mu*100))/ro)*(ua/aa)
o2=(-log(mu*100))*vo)+2300
print#1,"M"al,o1
print#1,"D"a1,o1,a2,o2
print#1,"M"2000,2000
return
```



```
40027 IFM=5THENID=120:F=151
40029 IFM=6THENID=151:F=181
40031 IFM=7THENID=181:F=212
40032 IFM=8THENID=212:F=243
40033 IFM=9THENID=243:F=273
40034 IFM=10THENID=273:F=304
40035 IFM=11THENID=304:F=334
40036 IFM=12THENID=334:F=365
40037 IFAB=1ANDM=2THENF=F+1
40038 IFAB=1ANDM>2THENID=ID+1:F=F+1
40039 NJ=(F-ID)
40040 IFA<730RA>86THENPRINT"ERREUR":GOTO40000
40045 IFM<10RM>12THENPRINT"ERREUR":GOTO40000
40047 GOSUB4000
40050 DJ=0:DH=0:DM=0:PRINT"☞":I=ID
40060 J=1:H=0:MN=0
40065 I=I+DJ+(DH/24)+DM
40070 PRINT"*****"
40085 K=K+1:T(K)=I
40087 PRINT"INDICE";I;" LIGNE";K
40088 PRINT"ANNEE "A" MOIS "M"
40090 PRINT"JOUR "J" "H" HEURE "MN" MN:PRINT"PLUIE?"
40091 INPUT"+. . yyyyy";Y$:Y(K)=VAL(Y$)
40097 IFH=24ANDJ=NJTHEN40190
40098 IFY(K)>200ANDY(K)<1000THENINPUT"ERREUR,REENTREZ LA PLUIE ";Y(K)
40099 JF=J:HF=H:MF=MN
40100 IFMN=0ANDH<=23THENMN=30:GOTO40130
40110 IFMN=30ANDH<=23THENMN=0:H=H+1
40115 IFH=24ANDJ=NJTHENI=F:GOTO40070
40120 IFH=24THENJ=J+1:H=0
40130 IFY(K)=0ANDLEN(Y$)=3THENPRINT"JOUR REPRISE":INPUT"+. . yyyyy";J:PRINT"HEURE"
40132 IFY(K)=0ANDLEN(Y$)=3THENINPUT"+. . yyyyy";H:PRINT"MIN":INPUT"+. . yyyyy";MN
40133 IFY(K)=1000THENINPUT"RETOUR A LA LIGNE";RL
40134 IFY(K)=1000THENINPUT"JOUR REPRISE";J:INPUT"HEURE";H:INPUT"MIN";MN:K=RL-1
40135 IFJ>NJ+49/48THENFORB=1TO10:PRINT"ERREUR*****REENTREZ":NEXTB:GOTO40130
40140 DJ=J-JF:DH=H-HF:DM=0
40150 IFM>MFTHENDM=1/48
40160 IFM<MFTHENDM=-1/48
40180 GOTO40065
40185 OPEN4,4:CMD4:FORI=1TO12:PRINT#4,"PLUIE EN "R$": "PM(I):NEXTI:CLOSE4
40190 K=K+1:T(K)=10000:Y(K)=10000:N=K:GOSUB55000:RETURN
45000 REM*****LECTURE SUCCESSIVE DES FICHIERS
45002 INPUT"FICHER ANNUEL (O/N) ";FA$
45003 IFFA$="0"THENINPUT"ANNEE DEBUT ET FIN";A1,A2:FORC=A1TOA2:R$=STR$(C)
45004 IFFA$="0"THENR$=RIGHT$(R$,2):GOSUB50000:NEXTC:RETURN
45010 INPUT"FICHER DE DEPART ET DE FIN";R1$,R2$
45020 A1$=LEFT$(R1$,2):M1$=RIGHT$(R1$,2):A1=VAL(A1$):M1=VAL(M1$)
45030 A2$=LEFT$(R2$,2):M2$=RIGHT$(R2$,2):A2=VAL(A2$):M2=VAL(M2$)
45040 FORA=A1TOA2
45045 IFM1<>1ANDA=A1THENM0=M1:GOTO45050
45047 M0=1
45050 FORM=M0TO12
45055 IFA=A2ANDM=M2+1THENRETURN
45060 A$=STR$(A):M$=STR$(M)
45070 IFM<10THENM$="0"+M$:M$=LEFT$(M$,1)+RIGHT$(M$,1)
45080 A$=RIGHT$(A$,2):M$=RIGHT$(M$,2):R$=A$+M$:R$=RIGHT$(R$,4)
45100 GOSUB46003
45110 NEXTM:NEXTA
45500 REM*****LECTURE SUCCESSIVE DES FICHIERS SUR L'ANNEE(OPTION TA)
45510 INPUT"ANNEE DE DEPART ET DE FIN";A1,A2
45540 FORQ=A1TOA2:A=Q:K=0:YY=0
45550 FORI=1TO13:M=I
45551 IFM=13THENTT=T(K)
45552 IFM=13THENM=1:A=A+1:YY=1:REMLECTURE DU FICHER JANVIER DE L'ANNEE SUIVTE
45560 A$=STR$(A):M$=STR$(M)
45570 IFM<10THENM$="0"+M$:M$=LEFT$(M$,1)+RIGHT$(M$,1)
45580 A$=RIGHT$(A$,2):M$=RIGHT$(M$,2):R$=A$+M$:R$=RIGHT$(R$,4)
```

```
45600 GOSUB46003
45610 NEXTI:NEXTQ:RETURN
46000 PRINT"☐":INPUT"NOM DU FICHER";R$
46003 S=0
46005 IFY=3THEN47005
46007 IFZ$="TA"THENGOSUB51000:RETURN:REM LECTURE DES FICHERS D'UNE ANNEE
46010 GOSUB 50000
46011 IFZ$="CO"THENRETURN
46012 IFZ$="T"THENRETURN
46013 PRINT"LE FICHER "R$" COMPREND "N" COUPLES DE POINTS"
46014 FORU=1TO200:NEXTU
46015 PL=1:OL=N
46020 GOSUB47500
46030 PRINT"████":GOTO2560
47000 Y=3:GOTO46000
47005 GOSUB50000
47010 INPUT"PREMIERE LIGNE: ";PL
47020 INPUT"DERNIERE LIGNE: ";OL
47030 GOSUB47500
47031 FORI=0TO20000
47032 IFI=1000 THEN PRINT CHR$(135)
47039 NEXTI
47040 RETURN
47500 PA=1
47520 GOSUB49000
47530 FOR R=1TO DL
47535 T(R)=T(R)*1000:T(R)=INT(T(R)):T(R)=T(R)/1000
47540 IF LN=16 THEN PA=PA+1:GOSUB49000
47550 LN=LN+1
47560 PRINTR,T(R)"          ",Y(R)
47570 NEXTR
47575 IF(PL-DL)=2THENPRINT"██████████████"
47576 IF(PL-DL)=4THENPRINT"██████████████"
47577 IF(PL-DL)=3THENPRINT"██████████████"
47580 RETURN
48000 PRINT:INPUT"NUMERO DE LIGNE A MODIFIER";K
48020 PRINT"ANCIENNES VALEURS: ";T(K), Y(K)
48030 INPUT"NOUVELLES VALEURS";T(K),Y(K)
48060 PRINT"☐"
48065 PRINT:INPUT"AUTRES MODIFICATIONS (O/N)";AM$
48070 IFAM$="O"THEN48000
48110 N=N+1:GOSUB4000
48120 GOSUB55000
48200 PRINT"☐"
48890 RETURN
49000 IFS=1THENGOSUB15000: PRINT"████"
49001 IFPA=1THEN49010
49004 INPUT"POUR CONTINUER,TAPEZ >PUIS RETURN          ";Z$
49010 S=1
49020 PRINT"☐":LN=3
49022 PRINT"█"
49030 PRINT"  ☐FICHER ";R$:PRINT
49040 PRINT"LIGNE JOUR.1/1000EME DE JOUR      PLUIE"
49050 RETURN
50000 PRINT"LECTURE DU FICHER☐" R$
50050 OPEN15,8,15,"I0"
50100 OPEN2,8,2,"0:"+R$+",S,R"
50200 GOSUB 30000
50250 PM=0:FOR K=1TO2500
50300 INPUT#2,T(K),Y(K)
50310 T(K)=(INT(T(K)*1000))/1000
50350 IFY(K)=10000THENN=K-1:CLOSE2:CLOSE15:GOSUB55400:RETURN
50400 PM=Y(K)+PM:NEXTK
50700 CLOSE2 :CLOSE15
50750 RETURN
```

```
51000 PRINT"LECTURE DU FICHER" R#
51050 PM=0:OPEN15,8,15,"I0"
51100 OPEN2,8,2,"0:"+R#+",S,R"
51200 GOSUB 30000
51250 K=K+1
51300 INPUT#2,T(K),Y(K)
51310 T(K)=(INT(T(K)*1000))/1000
51330 IF Y=1 THEN T(K)=T(K)+TT
51350 IF T(K)>369 AND T(K)<>10000 THEN CLOSE2:CLOSE15:N=K-1:GOSUB55400:RETURN
51360 IF Y(K)=10000 THEN K=K-2:CLOSE2:CLOSE15:RETURN
51400 PM=Y(K)+PM:GOTO51250
55000 OPEN15,8,15,"I0"
55001 PRINT"0"
55010 IF Z$="TA" THEN INPUT"NOM DU FICHER ANNUEL";R#
55100 GOSUB 30000
55110 CR#=CHR$(13)
55120 PRINT"ECRITURE DU FICHER"
55200 OPEN2,8,2,"00:"+R#+",S,W"
55250 GOSUB 30000
55290 FOR K=1 TO N
55340 PRINT#2,T(K),"",Y(K)CR#
55380 NEXT K
55385 GOSUB 30000
55390 CLOSE 2:CLOSE15
55395 RETURN
55400 REM *****TRI DES PLUIES MAX
55410 IF Z$<>"T" AND Z$<>"TA" THEN RETURN
55415 OPEN4,4:PRINT#4,CHR$(1)"ANNEE "0
55418 LL=0:RESTORE
55420 MX=0:TX=0:READ LM:L=LM/30
55500 U=0:FOR K=1 TO N:Y=0
55505 FOR I=K TO K+L-1
55510 IF T(I)<=T(K)+((L-I)/48)+.01 THEN Y=Y+Y
55520 PRINT"0":PRINT"DUREE "LM"MIN":PRINT"INDICE ";K:PRINT"CUMUL ";I:NEXT I
55810 IF Y>MX(1) THEN MX(3)=MX(2):TX(3)=TX(2)
55811 IF Y>MX(1) THEN MX(2)=MX(1):TX(2)=TX(1):MX(1)=Y:TX(1)=T(K):GOTO55816
55813 IF Y<MX(1) AND Y>MX(2) THEN MX(3)=MX(2):TX(3)=TX(2)
55814 IF Y<MX(1) AND Y>MX(2) THEN MX(2)=Y:TX(2)=T(K):GOTO55816
55815 IF Y<MX(2) AND Y>MX(3) THEN MX(3)=Y:TX(3)=T(K)
55816 NEXT K:GOSUB56000:LL=LL+1
55820 IF LL>8 THEN RETURN
55830 GOTO55420
56000 FOR J=1 TO 3:MX(J)=(1/(1-(1/(8*L))))*MX(J):REM*****CORRECTION DE WEISS
56010 MX(J)=(INT(MX(J)*10))/10
56020 IF U=0 THEN PRINT#4,"PLUIES MAX DE "L/2"H":U=1
56030 PRINT#4,MX(J)" A "TX(J):MX(J)=0:NEXT J:PRINT#4:RETURN
57000 DATA30,60,120,180,360,720,1440,2880,4320
```

Programme IDF (Sélection des données pluviographiques)

```
10 GOTO501
18 REM*****SELECTION DES SEUILS EN FONCTION DU PAS DE TEMPS DE CUMUL
20 IFY>30THENGOSUB56000:RETURN
22 RETURN
25 IFY>40THENGOSUB56000:RETURN
27 RETURN
30 IFY>70THENGOSUB56000:RETURN
32 RETURN
35 IFY>80THENGOSUB56000:RETURN
37 RETURN
40 IFY>110THENGOSUB56000:RETURN
42 RETURN
45 IFY>130THENGOSUB56000:RETURN
47 RETURN
50 IFY>180THENGOSUB56000:RETURN
52 RETURN
55 IFY>200THENGOSUB56000:RETURN
57 RETURN
60 IFY>270THENGOSUB56000:RETURN
62 RETURN
501 REM*****DEBUT PROGRAMME
530 PRINT"☐":DIMT(2700),Y(2700)
540 CR#=CHR$(13)
603 PRINT:PRINT
2000 PRINT"☐"
2051 PRINT
2061 PRINT
2070 PRINT"☐ I ☐ POUR AFFICHER TOUT LE FICHER"
2071 PRINT
2082 PRINT"☐ TA POUR REECRIRE DES FICHERS ANNEE "
2560 PRINT"☐☐☐☐":INPUT" COMMANDE";Z#:PRINT"☐"
2565 IF Z#="I"THEN GOSUB 46000:PRINT:PRINT:PRINT:GOTO2000
2575 IFZ#="?"THEN GOSUB 2000:GOTO2560
2617 IFZ#="TA"THEN GOSUB45500:GOTO2000
2630 PRINT:PRINT:PRINT:PRINT
2631 PRINT
4000 OPEN15,8,15,"I0":APPEND#3,"LISTE":PRINT#3,R#CHR$(13);:GOSUB12000:R=R+1
4001 GOSUB12500: CLOSE3:CLOSE15:RETURN
5000 PRINT"☐LISTE☐":OPEN15,8,15,"I0":OPEN3,8,3,"0:LISTE":GOSUB12000
12000 OPEN4,8,4,"0:REPERE":INPUT#4,R:CLOSE4:RETURN
12060 PRINT"☐"
12500 OPEN4,8,4,"00:REPERE,S,W":PRINT#4,STR$(R);:CLOSE4
12501 RETURN
15000 RETURN: FORJ=1TO40:POKE32767+J,255:POKE33567+J,65:NEXT
15010 FORI=1TO21:POKE32768+40*(I-1),65:POKE32807+40*(I-1),65:NEXT
15031 RETURN
30000 INPUT#15,EN#,EM#,ET#,ES#
30100 IF EN#="00" THEN RETURN
30200 PRINT"ERREUR DISQUE"
30300 PRINTEM#,EN#,ET#,ES#
30400 CLOSE2:RETURN
45500 REM*****LECTURE SUCCESSIVE DES FICHERS SUR L'ANNEE(OPTION TA)
45510 INPUT"ANNEE DE DEPART ET DE FIN";A1,A2
45540 FORQ=A1TOA2:A=Q:K=0:YY=0
```

```
45550 FORI=1TO13:M=I
45552 IFM=13THENM=1:A=A+1:YY=1:REMLECTURE DU FICHER JANVIER DE L'ANNEE SUIVTE
45560 A#=STR$(A):M#=STR$(M)
45570 IFM<10THENM#="0"+M#:M#=LEFT$(M#,1)+RIGHT$(M#,1)
45580 A#=RIGHT$(A#,2):M#=RIGHT$(M#,2):R#=A#+M#:R#=RIGHT$(R#,4)
45600 GOSUB46003
45610 NEXTI:NEXTQ:RETURN
46000 PRINT"Q":INPUT"NOM DU FICHER";R#
46003 S=0
46005 IFY=3THEN47005
46007 IFZ#="TA"THENGOSUB51000:RETURN:REM LECTURE DES FICHERS D'UNE ANNEE
46010 GOSUB 50000
46013 PRINT"LE FICHER "R#" COMPREND "N" COUPLES DE POINTS"
46014 FORU=1TO200:NEXTU
46015 PL=1:DL=N
46020 GOSUB47500
46030 PRINT"||||":GOTO2560
47000 Y=3:GOTO46000
47005 GOSUB50000
47010 INPUT"PREMIERE LIGNE: ";PL
47020 INPUT"DERNIERE LIGNE: ";DL
47030 GOSUB47500
47031 FORI=0TO2000
47032 IFI=1800 THEN PRINT CHR$(135)
47039 NEXTI
47040 RETURN
47500 PA=1
47520 GOSUB49000
47530 FOR R=1TO DL
47535 T(R)=T(R)*1000:T(R)=INT(T(R)):T(R)=T(R)/1000
47540 IF LN=16 THEN PA=PA+1:GOSUB49000
47550 LN=LN+1
47560 PRINTR,T(R)"          ",Y(R)
47570 NEXTR
47575 IF(PL-DL)=2THENPRINT"|||||
47576 IF(PL-DL)=4THENPRINT"|||||
47577 IF(PL-DL)=3THENPRINT"|||||
47580 RETURN
48110 N=N+1:GOSUB4000
49000 IFS=1THENGOSUB15000: PRINT"||||"
49001 IFPA=1THEN49010
49004 INPUT"POUR CONTINUER,TAPEZ >PUIS RETURN          ";Z#
49010 S=1
49020 PRINT"Q":LN=3
49022 PRINT"|"
49030 PRINT" QFICHER ";R#:PRINT
49040 PRINT"LIGNE JOUR.1/1000EME DE JOUR     PLUIE"
49050 RETURN
50000 PRINT"QLECTURE DU FICHERQ" R#
50050 OPEN15,8,15,"I0"
50100 OPEN2,8,2,"0:"+R#+".Q,R"
50200 GOSUB 30000
50250 PM=0:FOR K=1TO2500
50300 INPUT#2,T(K),Y(K)
50310 T(K)=(INT(T(K)*1000))/1000
50350 IFY(K)=10000THENH=K-1:CLOSE2:CLOSE15:GOSUB55400:RETURN
50400 PM=Y(K)+PM:NEXTK
50700 CLOSE2 :CLOSE15
50750 RETURN
51000 PRINT"QLECTURE DU FICHERQ" R#
51050 PM=0:OPEN15,8,15,"I0"
51100 OPEN2,8,2,"0:"+R#+".S,R"
51200 GOSUB 30000
51250 K=K+1:PRINT"Q";K
51300 INPUT#2,T(K),Y(K)
51310 T(K)=(INT(T(K)*1000))/1000
```

```
51330 IFYY=1THENT(K)=T(K)+365
51350 IFT(K)>369ANDT(K)<>10000THENCLOSE2:CLOSE15:N=K-1:GOSUB55400:RETURN
51360 IFY(K)=10000THENK=K-2:CLOSE2:CLOSE15:RETURN
51400 PM=Y(K)+PM:GOTO51250
55000 OPEN15,8,15,"I0"
55001 PRINT"§"
55010 IFZ#="TA"THENINPUT"NOM DU FICHIER ANNUEL";R#
55100 GOSUB 30000
55110 CR#=CHR$(13)
55120 PRINT"ÉCRITURE DU FICHIER§"
55200 OPEN2,8,2,"00:"+R#+",S,W"
55250 GOSUB 30000
55290 FORK=1TON
55340 PRINT#2,T(K),"Y(K)CR#"
55380 NEXTK
55385 GOSUB 30000
55390 CLOSE 2:CLOSE15
55395 RETURN
55400 REM *****TRI ET CUMUL DES PLUIES MAX
55415 OPEN4,4:PRINT#4,CHR$(1)"ANNEE "Q
55418 LL=1:RESTORE
55420 MX=0:TX=0:READLM:L=LM/30
55450 PRINT#4:PRINT#4,"PAS DE TEMPS : "L/2 "H
55500 U=0:FORK=1TON:Y=0
55501 KB=((L-1)/48)+.01
55505 FORI=KTOK+L-1
55510 IFT(I)<=T(K)+KBANDT(I)>=T(K)THENY=Y(I)+Y
55520 PRINT"§":PRINT"SUR "L/2" H":PRINT"INDICE ";K:PRINT"TEMPS ";T(K)+KB:NEXTI
55810 ONLLGOSUB20,25,30,35,40,45,50,55,60
55823 NEXTK
55825 LL=LL+1
55828 IFLL>7THENCLOSE4:RETURN
55830 GOTO55420
56000 Y1=(1/(1-(1/(8*L))))*Y:REM*****CORRECTION DE WEISS
56010 Y1=INT(Y1)
56030 PRINT#4,Y1;Y " A "T(K)+KB-.01:RETURN
57000 DATA30,60,120,180,360,720,1440
```


Programme BIL (Bilan à l'échelle mensuelle et annuelle)

```
30 PRINT"☐"
100 PRINT"BILAN D'UN BASIN VERSANT AU PAS DE TEMPS MENSUEL":PRINT:PRINT:PRINT
200 REM I=MOIS CONSIDERE
205 REM T(I)=TEMPERATURE MOYENNE MENSUELLE
210 REM P(I)=PLUIE MENSUELLE
220 REM ST(I)=STOCK D'EAU EN FIN DE MOIS
230 REM ER(I)=ETR DU MOIS
240 REM EX(I)=EXCEDENT DU MOIS
250 REM DE(I)=DEFICIT D'ECOULEMENT
255 REM L(I)=LAME MOYENNE MENSUELLE
260 REM SI NON INDICEES VALEURS ANNUELLES
265 REM IT=INDICE THERMIQUE ANNUEL
530 CLR:DIMX(130),T(130),P(20),ET(20),ER(20),EX(20),LA(20),ST(20),N$(13),L(20)
535 DIMDE(20),IT(13),AT(13)
536 DIMTT(10,13),E1(10,13),P1(10,13),E2(10,13),L1(10,13)
540 CR$=CHR$(13)
603 PRINT:PRINT
2000 PRINT"☐"
2020 PRINT"☐ C☐ POUR CREER UN FICHER"
2021 PRINT
2050 PRINT"☐ M☐ POUR MODIFIER UNE DONNEE":PRINT
2051 PRINT"☐ IT☐ POUR ITERER LA RFU"
2061 PRINT
2070 PRINT"☐ I☐ POUR AFFICHER TOUT LE FICHER"
2071 PRINT
2080 PRINT"☐ B☐ POUR CALCULER LE BILAN   ":PRINT
2081 PRINT"☐ BM☐ POUR CALCULER LE BILAN SUR PLUSIEURS ANNEES":PRINT:PRINT:PRINT
2481 PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT
2560 PRINT"☐☐☐☐☐":INPUT"   COMMANDE";Z$:PRINT"☐"
2565 IF Z$="I"THEN GOSUB 46000:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:GOTO2000
2595 IFZ$="C"THENGOSUB3000:CLR:GOTO2000
2600 IF Z$="M" THEN GOSUB46000:GOSUB48000:GOTO2000
2610 IF Z$="B" THEN GOSUB5000:GOTO2000
2620 IF Z$="BM"ORZ$="IT"THEN GOSUB4300:GOTO2000
3000 REM****CREATION DES FICHERS
3100 INPUT"NOM DU FICHER";R$
4000 OPEN15,8,15,"I0":APPEND#3,"LISTE":PRINT#3,R$CHR$(13);
4010 OPEN4,8,4,"0:REPERE":INPUT#4,R:CLOSE4:R=R+1
4020 OPEN4,8,4,"00:REPERE,S,W":PRINT#4,STR$(R);CLOSE3:CLOSE4:CLOSE15
4030 IFZ$="M"THEN4150
4100 X=0:FORI=1TO12
4110 PRINT"LIGNE";I
4120 INPUTX(I)
4129 X=X(I)+X
4130 NEXTI:X(I)=10000:N=I
4150 OPEN15,8,15,"I0"
4160 PRINT"☐"
4170 GOSUB 30000
4180 CR$=CHR$(13)
4190 PRINT"☐ECRITURE DU FICHER☐"
4200 PRINT"TOTAL";X:OPEN2,8,2,"00:"+R$+",S,W"
4210 GOSUB 30000
```

```
4220 FORI=1TON
4230 PRINT#2,X(I)CR#
4240 NEXTI
4250 GOSUB 30000
4260 CLOSE 2:CLOSE15
4270 RETURN
4300 REM*****BILAN SUR PLUSIEURS ANNEES
4310 INPUT"ANNEE DEBUT ET FIN (EN 2 CARACTERES)";AD,AF
4330 GOSUB5010
4335 INPUT"NOM DE CODE POUR LA PLUIE";V#
4337 INPUT"NOM DE CODE POUR LA LAME ECOULEE";W#
4339 U=0:FORJ=ADTOAF:A=J
4343 R$(1)=V#+RIGHT$(STR$(J),2):R#=R$(1):GOSUB50000:FORI=1TO12
4345 P(I)=X(I):P1(J-75,I)=X(I):NEXTI
4350 R$(2)=W#+RIGHT$(STR$(J),2):R#=R$(2):GOSUB50000:FORI=1TO12:L(I)=X(I)
4352 L1(J-75,I)=X(I)
4358 NEXTI
4360 IFZ#="IT"THENNEXTJ:GOSUB5055:GOTO4425
4390 IFW=1THENGOSUB5100:GOTO4410
4400 GOSUB5055
4410 NEXTJ
4415 OPEN4,4:PRINT#4,"P1:"P1;"R1:"R1;"X1:"X1;"L1:"L1;"D1:"D1
4417 PRINT#4,"DIFFERENCE:"P1-R1-L1-(38*(AF-AD+1)):CLOSE4
4420 RETURN
4425 PRINT"§":FORRF=100TO10STEP-10:V=0:T1=0:P1=0:R1=0:X1=0:L1=0:D1=0
4430 FORJ=1TO9:A=J+75:FORI=1TO12:P(I)=P1(J,I):L(I)=L1(J,I):NEXTI
4440 GOSUB5100
4450 NEXTJ
4460 OPEN4,4:PRINT#4,"P1:"P1;"R1:"R1;"X1:"X1;"L1:"L1;"D1:"D1
4470 PRINT#4,"DIFFERENCE:"P1-R1-L1-(38*(AF-AD+1)):CLOSE4
4480 NEXTRF
4490 RETURN
5000 REM*****CALCUL DU BILAN ANNUEL
5001 REM*****LECTURE DES TEMPERATURES
5006 INPUT"ANNEE TRAITEE EN DEUX CHIFFRES";A
5010 R#="TEMPERATURE":GOSUB50000
5020 FORI=1TO120:T(I)=X(I):NEXTI
5022 IFZ#<>"B"THENRETURN
5025 REM*****LECTURE DES FLUIES MENSUELLES
5030 INPUT"NOM DU FICHIER PLUIE";R#
5035 GOSUB50000
5040 FORI=1TON:P(I)=X(I):NEXTI
5045 REM*****LECTURE DES LAMES ECOULEES MENSUELLES
5047 INPUT"NOM DU FICHIER DEBIT";R#
5050 GOSUB50000
5052 FORI=1TON:L(I)=X(I):NEXTI
5055 REM*****LECTURE DES COEFFICIENTS DE CORRECTION (LATITUDE 50):LA(I)
5060 R#="LAMBDA":W=1
5070 GOSUB50000
5080 FORI=1TON:LA(I)=X(I):NEXTI
5090 IFZ#="IT"THENRETURN
5095 INPUT"RFU CHOISIE";RF:PRINT"§"
5100 REM*****CALCUL DE L'INDICE THERMIQUE ANNUEL(IT)
5101 PRINT"ANNEE";A
5103 IFZ#="IT"THENOPEN4,4:PRINT#4,V# ET W#
5104 IFZ#="IT"THENOPEN4,4:PRINT#4,"RFU :";RF;"ANNEE :";A:CLOSE4
5105 FORI=1TO12:PRINT"MOIS";I;"RFU";RF
5107 IT=0:G=((A-75)*12)+I:FORII=1TO12
5110 L=G+II-13
5112 IFT(L)<=0THEN5117
5115 IT=((T(L)/5)+1.514)+IT
5117 NEXTII:IT(I)=IT
5120 REM*****CALCUL DU COEFFICIENT DE THORNSWAITE(AT)
5130 AT(I)=((6.75E-7)*(IT(I)+3))-((7.71E-5)*(IT(I)+2))+((1.79E-2)*IT(I))+.49239
5140 REM*****CALCUL DE L'ETP MENSUELLE (ET(I))
5155 IFT(G)<0THENET(I)=0:GOTO5170
5160 ET(I)=16*(((10*T(G))/IT(I))+AT(I))*LA(I):ET(I)=INT(ET(I)*10)/10
```

```
5165 IFZ$="IT" THEN E1(J,I)=ET(I)
5170 NEXT I
5180 REM*****CALCUL DE L'ETR ;ER(I)
5181 IFV=1 THEN ST(0)=SS:GOTO5188:REM SI V=1 STOCK D'EAU INITIAL=STOCK PRECEDENT
5182 IFV=0 AND Z$="IT" THEN 5187
5187 ST(0)=RF:V=1
5188 ET=0:P=0:ER=0:EX=0:DE=0:L=0
5190 FOR I=1 TO N
5200 IF P(I)>=ET(I) AND ST(I-1)<RF THEN GOSUB 5500
5210 IF P(I)>=ET(I) AND ST(I-1)=RF THEN ER(I)=ET(I):ST(I)=ST(I-1):EX(I)=P(I)-ER(I)
5220 IF P(I)<ET(I) AND P(I)+ST(I-1)>=ET(I) THEN GOSUB 5600
5230 IF P(I)<ET(I) AND P(I)+ST(I-1)<ET(I) THEN ER(I)=P(I)+ST(I-1):ST(I)=0:EX(I)=0
5235 DE(I)=P(I)-L(I)
5240 ET=ET(I)+ET:P=P(I)+P:ER=ER(I)+ER:EX=EX(I)+EX:DE=DE(I)+DE:L=L(I)+L
5242 IFZ$="IT" THEN E2(J,I)=ER(I)
5250 IF I=12 THEN SS=ST(12)
5260 NEXT I
5270 T1=ET+T1:P1=P+P1:R1=ER+R1:X1=EX+X1:L1=L+L1:D1=DE+D1
5370 IFZ$="IT" THEN 5385
5380 GOSUB 6000:REM (VERS LA ROUTINE D'EDITION)
5385 PRINT "S":RS=0:GOTO5400
5390 INPUT "AUTRE CHOIX POUR RFU (TAPEZ 0 SI CALCUL SUR NOUV DONNEES)":RS
5400 IF RS<>0 THEN RF=RS:GOTO5187
5402 IFZ$<>"IT" THEN 5480
5405 OPEN 4,4:PRINT#4,"ET";ET;"P";P;"ER";ER;"EX";EX;"L";L;"DE";DE:CLOSE 4
5480 OPEN 4,4:PRINT#4,"DIFFERENCE:";P-ER-L-38:CLOSE 4
5490 RETURN
5500 REM*****P>ETP ET STOCK<RFU
5510 ER(I)=ET(I):ES=P(I)-ER(I)
5520 IF ES<=(RF-ST(I-1)) THEN ST(I)=ST(I-1)+ES:EX(I)=0
5530 IF ES>(RF-ST(I-1)) THEN ST(I)=RF:EX(I)=ES-(RF-ST(I-1))
5540 RETURN
5600 REM*****P<ETP MAIS P+STOCK>=ETP
5610 ER(I)=ET(I):ST(I)=ST(I-1)-(ER(I)-P(I)):EX(I)=0:RETURN
6000 REM*****EDITION DES RESULTATS SUR IMPRIMANTE
6005 OPEN 8,4,8:PRINT#8:CLOSE 8:POKE 59468,14:U=U+1
6010 OPEN 1,4
6020 OPEN 2,4,1
6030 OPEN 3,4,2
6040 OPEN 4,4,4
6050 PRINT#4
6070 PRINT#1,CHR$(1)"BILAN DE L'ANNEE";1900+A;V$;"ET" W$
6080 PRINT#1,CHR$(1)"RFU";RF;"MM":PRINT#1
6090 PRINT#1,"MOIS          TEMP  ETP(MM)  PL (MM)  STOCK  ETR    EXC    L.EC    D.E"
6095 PRINT#1
6100 N$(1)="JANVIER":N$(2)="FEVRIER":N$(3)="MARS":N$(4)="AVRIL":N$(5)="MAI"
6110 N$(6)="JUIN":N$(7)="JUILLET":N$(8)="AOUT":N$(9)="SEPTEMBRE":N$(10)="OCTOBRE"
6115 N$(11)="NOVEMBRE":N$(12)="DECEMBRE":N$(13)="TOTAL:"
6120 FOR I=1 TO N
6130 A$="AAAAAAAAA S999.9  999.9  999.9  999.9  999.9  999.9  999.9  999.9"
6135 PRINT#3,A$:G=((A-75)*12)+I
6140 PRINT#2,N$(I),CHR$(29),T(0),ET(I),P(I),ST(I),ER(I),EX(I),L(I),DE(I)
6150 NEXT I:PRINT#1
6160 B$="AAAAAAAAA          999.9  999.9          999.9  999.9  999.9  999.9"
6170 PRINT#3,B$
6180 PRINT#2,N$(13),CHR$(29),ET,P,ER,EX,L,DE
6190 PRINT#1
6195 IF U=30 RU=6 THEN FOR O=1 TO 7:PRINT#1:NEXT O
6200 CLOSE 1:CLOSE 2:CLOSE 3:CLOSE 4:POKE 59468,12:RETURN
15000 RETURN:FOR J=1 TO 40:POKE 32767+J,255:POKE 33567+J,65:NEXT
15010 FOR I=1 TO 21:POKE 32768+40*(I-1),65:POKE 32807+40*(I-1),65:NEXT
15031 RETURN
30000 INPUT#15,EN$,EM$,ET$,ES$
30100 IF EN$="00" THEN RETURN
30200 PRINT "ERREUR DISQUE"
30300 PRINT EM$,EN$,ET$,ES$
```



```
55120 PRINT"ÉCRITURE DU FICHER"  
55200 OPEN2,8,2,"0:"+R$+",S,W"  
55250 GOSUB 30000  
55290 FORI=0TON-1  
55300 PRINT#2,X(I),"Y(I)CR$  
55400 NEXT I  
55500 GOSUB 30000  
55600 CLOSE 2:CLOSE15  
55700 RETURN
```

Programme FICRUE (Saisie des hydrogrammes de crue)

```
502 PRINT
503 PRINT"SAISIE ET LECT DES HYDROGRAMMES DE CRUE AU PAS DE TEMPS DE 2 HEURES"
530 PRINT"§":Z=3:DIMX(500):DIMY(500):DIMH(400)
610 PRINT:PRINT
2000 PRINT"§"
2011 PRINT"§":PRINT"      ","      §      MENU      §":PRINT:PRINT
2020 PRINT"§ C § POUR CREER UN FICHER"
2021 PRINT
2050 PRINT"§ M § POUR MODIFIER UNE DONNEE"
2051 PRINT
2060 PRINT"§ P § POUR ENREGISTRER UN FICHER"
2061 PRINT
2070 PRINT"§ I § POUR AFFICHER TOUT LE FICHER"
2071 PRINT
2080 PRINT"§ E § POUR AFFICHER UNE PARTIE DU FICHER"
2481 PRINT:PRINT:PRINT:PRINT
2560 PRINT"§§§§§":INPUT"      COMMANDE";Z$
2570 IF Z$="I" THEN GOSUB 6000:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:GOTO2000
2575 IF Z$="?" THEN GOSUB 2000:GOTO2560
2590 IF Z$="P" THEN GOSUB 10000:GOTO2000
2600 IF Z$="C" THEN GOSUB 3000:GOTO2000
2601 IF Z$="M" THEN GOSUB 8000:GOTO2000
2610 IF Z$="E" THEN GOSUB 7000:GOTO2000
2631 PRINT
3000 PRINT"§":LT=1:Y=4
3020 INPUT"INTRODUISEZ LE NOM DU FICHER ";R$:GOSUB4000
3030 PRINT"COURBE DE TARAGE A UTILISER"
3035 PRINT"1:AVANT LE 9/7/80"
3040 PRINT"2:APRES LE 9/7/80"
3045 INPUTCT
3055 N=1:INPUT"PAS DE TEMPS EN HEURES";DX
3056 PRINT"SI TERMINE TAPAZ 0":I=0
3060 PRINT"INDICE";I,"TEMPS";X(I)
3065 INPUT"HAUTEUR D'EAU";H(I)
3066 IFH(I)=0THENGOSUB10000:RETURN
3068 IFH(I)<.25THENGOSUB3200
3070 IFH(I)<.450ANDH(I)>=.25THENGOSUB3500
3080 IFH(I)>=.450ANDH(I)<.60ANDCT=1THENGOSUB3510
3090 IFH(I)>=.60ANDH(I)<.70ANDCT=1THENGOSUB3520
3100 IFH(I)>=.70ANDH(I)<.80ANDCT=1THENGOSUB3530
3110 IFH(I)>=.80ANDH(I)<1.16ANDCT=1THENGOSUB3540
3120 IFH(I)>1.16ANDCT=1THENGOSUB3550
3130 IFH(I)>=.45ANDH(I)<1ANDCT=2THENGOSUB3560
3140 IFH(I)>=1ANDCT=2THENGOSUB3570
3145 Y(I)=Y(I)*1000:Y(I)=INT(Y(I)):Y(I)=Y(I)/1000
3150 PRINT"*****"
3155 PRINT"INDICE","TEMPS","HAUTEUR","DEBIT"
3160 PRINTI,X(I),H(I),Y(I):PRINT
3162 PRINT"*****"
3165 N=N+1:I=I+1:X(I)=X(I-1)+DX:GOTO3060
3200 IFH(I)=.07THENY(I)=.0115
3205 IFH(I)=.075THENY(I)=.01725
3210 IFH(I)=.08THENY(I)=.0230
3215 IFH(I)=.085THENY(I)=.02875
```



```
3220 IFH(I)=.09THENY(I)=.0345
3225 IFH(I)=.095THENY(I)=.04025
3230 IFH(I)=.10THENY(I)=.0460
3235 IFH(I)=.105THENY(I)=.0690
3240 IFH(I)=.11THENY(I)=.0920
3245 IFH(I)=.115THENY(I)=.115
3250 IFH(I)=.12THENY(I)=.138
3255 IFH(I)=.125THENY(I)=.1605
3260 IFH(I)=.13THENY(I)=.183
3265 IFH(I)=.135THENY(I)=.214
3270 IFH(I)=.14THENY(I)=.245
3275 IFH(I)=.145THENY(I)=.276
3280 IFH(I)=.15THENY(I)=.307
3285 IFH(I)=.155THENY(I)=.3375
3290 IFH(I)=.16THENY(I)=.368
3295 IFH(I)=.165THENY(I)=.407
3300 IFH(I)=.17THENY(I)=.446
3305 IFH(I)=.175THENY(I)=.485
3310 IFH(I)=.18THENY(I)=.524
3315 IFH(I)=.185THENY(I)=.563
3320 IFH(I)=.19THENY(I)=.602
3325 IFH(I)=.195THENY(I)=.64
3330 IFH(I)=.20THENY(I)=.678
3335 IFH(I)=.205THENY(I)=.739
3340 IFH(I)=.21THENY(I)=0.800
3345 IFH(I)=.215THENY(I)=0.861
3350 IFH(I)=.22THENY(I)=.922
3355 IFH(I)=.225THENY(I)=.983
3360 IFH(I)=.23THENY(I)=1.044
3365 IFH(I)=.235THENY(I)=1.105
3370 IFH(I)=.24THENY(I)=1.166
3375 IFH(I)=.245THENY(I)=1.1355
3380 RETURN
3500 Y(I)=14.1830827*H(I)-2.33041354:RETURN
3510 Y(I)=18.356044*H(I)-4.15835165:RETURN
3520 Y(I)=16.7757576*H(I)-3.18436363:RETURN
3530 Y(I)=21.4242424*H(I)-6.4380606:RETURN
3540 Y(I)=25.2138315*H(I)-9.61655486:RETURN
3550 Y(I)=29.1506871*H(I)-14.1486194:RETURN
3560 Y(I)=19.326025*H(I)-4.71008776:RETURN
3570 Y(I)=20.364805*H(I)-5.70774059:RETURN
4000 OPEN15,8,15,"I0":APPEND#3,"LISTE":PRINT#3,R#CHR$(13)::GOSUB12000:R=R+1
4001 GOSUB12500:CLOSE3:CLOSE15:RETURN
5000 PRINT"LISTE":OPEN15,8,15,"I0":OPEN3,8,3,"0:LISTE":GOSUB12000
6000 PRINT"3":INPUT"NOM DU FICHER":R#
6003 S=0
6005 IFY=3THEN7005
6010 GOSUB 20000
6013 PRINT"LE FICHER "R#" COMPREND "N" COUPLES DE POINTS"
6014 FORU=1TO200:NEXTU
6015 PL=1:DL=N
6020 GOSUB 7500
6030 GOSUB15000:PRINT"||||":END
7000 Y=3:GOTO6000
7005 GOSUB20000
7010 INPUT"PREMIERE LIGNE:":PL
7020 INPUT"DERNIERE LIGNE:":DL
7030 GOSUB 7500
7031 FORI=0TO2000
7032 IFI=1000 THEN PRINT CHR$(135)
7039 NEXTI
7040 RETURN
7500 PA=1
7520 GOSUB 9000
7530 FOR R=0TO DL-1
7540 IF LN=16 THEN PA=PA+1:GOSUB 9000
```

```
7550 LN=LN+1
7560 PRINTR,X(R),H(R),Y(R)
7570 NEXTR
7575 IF(PL-DL)=2THENPRINT"#####"
7576 IF(PL-DL)=4THENPRINT"#####"
7577 IF(PL-DL)=3THENPRINT"#####"
7580 RETURN
8000 PRINT:INPUT"NUMERO DE LIGNE A MODIFIER";I
8020 PRINT"ANCIENNES VALEURS:";X(I); Y(I)
8030 INPUT"NOUVELLES VALEURS";X(I),Y(I)
8060 PRINT"§"
8065 PRINT:INPUT"AUTRES MODIFICATIONS (O/N)";AM$
8070 IFAM$="O"THEN8000
8080 INPUT"NOUVEAU NOM DE FICHER";R$
8085 PRINT"SCRATCHEZ L'ANCIEN"
8110 GOSUB4000
8120 GOSUB10000
8200 PRINT"§"
8890 RETURN
9000 IFS=1THENGOSUB15000: PRINT"####"
9001 IFPA=1THEN9010
9004 INPUT"POUR CONTINUER,TAPEZ >          POUR TRACER,TAPEZ T";Z$
9005 IFZ$="T"THEN33020
9010 S=1
9020 PRINT"§";LN=3
9022 PRINT"¶"
9030 PRINT"  FICHER :";R$,"#####PAGE"PA
9035 PRINT"#####"
9040 PRINT" NO "; "      TEMPS"; "      HAUTEUR      "; "DEBIT"
9045 GOSUB15000
9050 RETURN
10000 OPEN15,8,15,"I0"
10001 PRINT"§"
10100 GOSUB 30000
10110 CR#=CHR$(13)
10120 PRINT" ECRITURE DU FICHER"
10200 OPEN2,8,2,"0:"+R$+",S,W"
10250 GOSUB 30000
10290 FORI=0TON-1
10300 PRINT#2,X(I),"H(I)","Y(I)CR#"
10400 NEXT I
10500 GOSUB 30000
10600 CLOSE 2:CLOSE15
10700 RETURN
12000 OPEN4,8,4,"0:REPERE":INPUT#4,R:CLOSE4:RETURN
12060 PRINT"§"
12500 OPEN4,8,4,"00:REPERE,S,W":PRINT#4,STR$(R);:CLOSE4
12501 RETURN
15000 RETURN: FORJ=1T040:POKE32767+J,255:POKE33567+J,65:NEXT
15010 FORI=1T021:POKE32768+40*(I-1),65:POKE32807+40*(I-1),65:NEXT
15031 RETURN
20000 PRINT" ECTURE DU FICHER"
20050 OPEN15,8,15,"I0"
20100 OPEN2,8,2,"0:"+R$+",S,R"
20200 GOSUB 30000
20250 FOR I=0TO 300
20300 INPUT#2,X(I),H(I),Y(I)
20350 IFY(I)=0THENN=I:RETURN
20400 NEXT I
20700 CLOSE2 :CLOSE15
20750 RETURN
30000 INPUT#15,EN$,EM$,ET$,ES$
30100 IF EN$="00" THEN RETURN
30200 PRINT"ERREUR DISQUE"
30300 PRINTEM$,EN$,ET$,ES$
30400 CLOSE2:FND
```

Programme GR2 (Simulation des débits moyens journaliers par modèle à deux réservoirs)

```
CLS
PRINT"GENERATION DE DEBITS PAR MODELE A RESERVOIRS"
PRINT "-----"
CLS:DIM PBRUT(2196),FICPLUIE$(3,20),FICDEBIT$(20),FICTEMPE$(20)
DIM TOTPBRUT(20),TOTDEBIT(20),jdc(12),fic$(12),rd(12),qd(12)
DIM FICP$(16),FICQ$(16),i(16),PC(100),QC(100),JP$(16),JQ$(16),J(40)
GOSUB LECTURE 'lecture des données par année
GOSUB INIT 'choix de la zone d'initiation et de la zone
'de calcul de la fonction critère
3
INPUT"***** PARAMETRES DEJA CONNUS (1/0) ";IMM
IF IMM=1 THEN GOSUB CHOIXPARAM:GOTO 5
GOSUB CHOIXGRILLE ' choix de la grille des paramètres
5
GOSUB AFFICHAGE 'choix du modèle
GOSUB EXECUTION 'exécution du modèle
INPUT "pour sortir, tapez 1 sinon 0";SOR
IF SOR=1 THEN end
7
GOSUB CONS 'autre traitement éventuel avec mêmes données
8
GOSUB SORTIETT 'SORTIE TABLE TRACANTE
CLS:GOTO 7
'-----
LECTURE ':lecture des données : construction des noms de fichier
'-----
PRINT date$,time$:PRINT
surface=115 '**INPUT"surface du bassin versant en km²";SURFACE
input "année début et fin (exemple :7680)";per$
input"débit au premier pas de temps (en mm)";q0
ad=val(left$(per$,2)):af=val(right$(per$,2))
na=0
for an=ad to af:aa=aa+1
na=365+na
if an=76 or an=80 or an=84 then na=na+1
n(aa)=na
PRINT an,n(aa)
next an
INPUT"EDITER LES DONNEES A L'ECRAN (1/0) ";Ecrire
cls
'-----
20 ' lecturelamemoy
'-----
i=0:aa=1:PRINT "lecture des pluies"
open"I",#1,"pluie\lms"+per$
while not eof(1)
i=i+1
input#1,pbrut(i)
totpbrut(aa) = pbrut(i) + totpbrut(aa)
if i = n(aa) then aa=aa+1
wend
```

```
close#1
np=i
-----
'lecture des fichiers temperature et debit
-----
DIM TEM(2196),DEB(2196)
i=0:aa=1
PRINT "lecture des températures et des débits"
OPEN"I",#1,"temp\tms"+per$
OPEN"I",#2,"debit\qms"+per$
for i = 1 to np
  INPUT #1,TEM(I)
  INPUT #2,DEB(I)
  if deb(i)<> 10000 then
    totdebit(aa)=deb(i)+totdebit(aa)
  else
    omd=omd+1
  end if
  if i=n(aa) then aa=aa+1
  IF ECRIRE = 1 THEN PRINT using "\ \";"indice" "pluie" "tempér" "débit"
  IF ECRIRE = 1 THEN PRINT USING "###.##";I,PBRUT(I),TEM(I),DEB(I)
next i
close#1:close#2
ndj=np
NBREANNEE=AF-AD+1
FOR AA = 1 TO NBREANNEE
  PRINT "total de la pluie brute en "AA+AD-1"
  PRINT using "###.##";TOTPBRUT(AA);PRINT " mm"
  PRINT "total de la lame écoulée"
  PRINT using "###.##" ; TOTDEBIT(AA) ;
  PRINT" mm"
  PRINT
NEXT AA
PRINT omd" observations manquantes en débit"
RETURN
-----
INIT : 'choix de la zone d'initiation
-----
fininit=366 '**INPUT"indice de fin de zone d'initiation";FININIT
DEBCRITER=FININIT+1
RETURN
-----
CHOIXGRILLE : 'choix de la grille des paramètres
-----
PRINT" choisissez la valeur mini et maxi du paramètre a (en mm) ": INPUT AMIN : INPUT A
MAX
PRINT" pas d'avance du paramètre a": INPUT PASA
PRINT" choisissez la valeur mini et maxi du paramètre b (en mm) ": INPUT BMIN : INPUT B
MAX
PRINT" pas d'avance du paramètre b": INPUT PASB
PRINT" choisissez la valeur mini et maxi du paramètre d (en mm) ": INPUT DMIN : INPUT D
MAX
PRINT" pas d'avance du paramètre d": INPUT PASD
input "emin emax pase";emin:input emax:input pase
RETURN
-----
AFFICHAGE :
-----
L=0:MIN=10000:op=0
pc=.2
INPUT"pour afficher à l'écran l'évolution du modèle , tapez 1 sinon 0";AFFICHE
RETURN
-----
CONS :
-----
INPUT"conserver les données pour un nouvel essai (1/0)":CONS
```

```
IF CONS = 1 THEN GOTO 3
IF CONS = 0 THEN GOTO 8
RETURN
```

CHOIXPARAM :paramètres retenus pour le modèle à visualiser

```
VISU=1
PRINT" choisissez la valeur optima du paramètre a (en mm) ": INPUT OPTA
PRINT" choisissez la valeur optima du paramètre b (en mm) ": INPUT OPTB
PRINT" choisissez la valeur optima du paramètre d ": INPUT OPTD
PRINT" choisissez la valeur optima du paramètre e ": INPUT OPTE
RETURN
```

EXECUTION :exécution modèle

```
if cons <> 1 then DIM R(NDJ+1),QCAL(NDJ+1),qcalt(ndj+1),qbase(ndj+1+10)
DIM FC(5,5),FCPOS(5,5),FCNEG(5,5),NFC(5,5),NPOS(5,5),NNEG(5,5)
dim par(11)
IF VISU=1 THEN A=OPTA: B=OPTB:D=OPTD:E=OPTE:GOTO 30
FOR A = AMIN TO AMAX STEP PASA
FOR B = BMIN TO BMAX STEP PASB
FOR D = DMIN to DMAX STEP PASD
FOR E = EMIN to EMAX STEP PASE
30
S=.7*A:S0=S:QCAL(1)=Q0:R=.5*(Q0+SQR((Q0^2)+4*Q0*B)):R(0)=R
WRITE "A B Sinit Rinit ",A,B,S,R(0)
AA=1:K=0
FOR I = 1 TO NDJ
  IF TEM(I) <=0 THEN ETP=0
  IF TEM(I) > 0 THEN ETP= (TEM(I)/7)^1.4
  GOSUB GR
  gosub CALCULCRITER
  TOTETP= ETP + TOTETP
  TOTETR= ETR + TOTETR
  IF I=N(AA) THEN ETP(AA)=TOTETP :ETR(AA)=TOTETR :AA=AA+1:TOTETP=0:TOTETR=0
NEXT I
GOSUB EDITCRITER
IF VISU = 1 THEN goto 90
NEXT E
NEXT D
NEXT B
NEXT A
LPRINT "FCP MINI : "MIN" A : "XA" B : "XB" D : "XD" E : "XE
90
IPRINT:IPRINT "
IPRINT
RETURN
```

CALCULCRITER :routine de calcul de la fonction critère

```
if i<debcriter then return
IF DEB(I+1)=10000 then om=om+1: RETURN
IF I>NDJ-1 THEN RETURN
ECQUAD = (QCAL - DEB(I+1))^2 + ECQUAD :NFC=NFC+1
SOMPLUCAR = (P)^2 + SOMPLUCAR
IF (QCAL - DEB(I+1)) > 0 THEN
  FCPOS = FCPOS + (QCAL - DEB(I+1)):NPOS=NPOS+1
  if qcal<1.5024 then npos2=npo2+1:FCPOS2=FCPOS2 + (QCAL - DEB(I+1))
  if qcal >= 1.5024 and qcal <2.2536 then npos3=npo3+1:FCPOS3=FCPOS3 + (QCAL - DEB(I+1))
  if qcal>=2.2536 and qcal <3.0048 then npos4=npo4+1:FCPOS4=FCPOS4 + (QCAL - DEB(I+1))
  if qcal >= 3.0048 and qcal <3.756 then npos5=npo5+1:FCPOS5=FCPOS5 + (QCAL - DEB(I+1))
  if qcal >= 3.756 and qcal <4.5072 then npos6=npo6+1:FCPOS6=FCPOS6 + (QCAL - DEB(I+1))
```

```
    if qcal >=4.5072 and qcal < 5.2584 then npos7=npos7+1:FCPOS7=FCPOS7 + (QCAL - DEB
(I+1))
    if qcal >=5.2584 and qcal < 6.0096 then npos8=npos8+1:FCPOS8=FCPOS8 + (QCAL - DEB
(I+1))
    if qcal >=6.0096 then npos9=npos9+1:FCPOS9=FCPOS9 + (QCAL - DEB(I+1))
END IF
IF (QCAL - DEB(I+1)) < 0 THEN
    FCNEG = FCNEG + (QCAL - DEB(I+1)):NNEG=NNEG+1
    if qcal<1.5024 then nneg2=nneg2+1:FCNEG2=FCNEG2 + (QCAL - DEB(I+1))
    if qcal >= 1.5024 and qcal <2.2536 then nneg3=nneg3+1:FCNEG3=FCNEG3 + (QCAL - DEB(
I+1))
    if qcal>=2.2536 and qcal <3.0048 then nneg4=nneg4+1:FCNEG4=FCNEG4 + (QCAL - DEB(I+
1))
    if qcal >= 3.0048 and qcal <3.756 then nneg5=nneg5+1:FCNEG5=FCNEG5 + (QCAL - DEB(I
+1))
    if qcal >= 3.756 and qcal <4.5072 then nneg6=nneg6+1:FCNEG6=FCNEG6 + (QCAL - DEB(I
+1))
    if qcal >4.5072 and qcal < 5.2584 then nneg7=nneg7+1:FCNEG7=FCNEG7 + (QCAL - DEB(I
+1))
    if qcal >=5.2584 and qcal < 6.0096 then nneg8=nneg8+1:FCNEG8=FCNEG8 + (QCAL - DEB
(I+1))
    if qcal >=6.0096 then nneg9=nneg9+1:FCNEG9=FCNEG9 + (QCAL - DEB(I+1))
END IF
RETURN
```

EDITCRITER 'edition de la fonction critere

```
FCP=SQR(ECQUAD/SOMPLUCAR)*100
IPRINT chr$(24): 'effacement tampon
if titre=0 then
    LPRINT "CALAGE D'UN MODELE A RESERVOIR"
    LPRINT "-----"
    LPRINT "date et heure d'edition : "date$,time$:LPRINT
    LPRINT "periode "ad "-"af
    if om>0 then IPRINT " observations manquantes en debit : "om:om=0
    FOR AN=AD TO AF :AA=AN-AD+1 : LPRINT "ETP "AN": "ETP(AA):NEXT AN
    TITRE=1
END IF
LPRINT " A : "A" B : "B" D : "D" E : "E"
LPRINT "erreur /pluie sur "NFC" couples" using "###.##";fcp
FCPOS=FCPOS/NPOS
if npos2+nneg2>0 then fcmoy(2)=(fcpos2+fcneg2)/(npos2 +nneg2)
if npos3+nneg3>0 then fcmoy(3)=(fcpos3+fcneg3)/(npos3 +nneg3)
if npos4+nneg4>0 then fcmoy(4)=(fcpos4+fcneg4)/(npos4 +nneg4)
if npos5+nneg5>0 then fcmoy(5)=(fcpos5+fcneg5)/(npos5 +nneg5)
if npos6+nneg6>0 then fcmoy(6)=(fcpos6+fcneg6)/(npos6 +nneg6)
if npos7+nneg7>0 then fcmoy(7)=(fcpos7+fcneg7)/(npos7 +nneg7)
if npos8+nneg8>0 then fcmoy(8)=(fcpos8+fcneg8)/(npos8 +nneg8)
if npos9+nneg9>0 then fcmoy(9)=(fcpos9+fcneg9)/(npos9 +nneg9)
LPRINT "erreur positive moyenne";FCPOS" sur "NPOS" couples"
IPRINT using "####";npos2 npos3 npos4 npos5 npos6 npos7 npos8 npos9
if npos2>0 then fcpos2=fcpos2/npos2
if npos3>0 then fcpos3=fcpos3/npos3
if npos4>0 then fcpos4=fcpos4/npos4
if npos5>0 then fcpos5=fcpos5/npos5
if npos6>0 then fcpos6=fcpos6/npos6
if npos7>0 then fcpos7=fcpos7/npos7
if npos8>0 then fcpos8=fcpos8/npos8
if npos9>0 then fcpos9=fcpos9/npos9
100
IPRINT using "###.#### ";fcpos2 fcpos3 fcpos4 fcpos5 fcpos6 fcpos7 fcpos8 fcpos9
IPRINT
FCNEG=FCNEG/NNEG
LPRINT "erreur negative moyenne : "FCNEG" sur "NNEG" couples"
IPRINT using "####";nneg2 nneg3 nneg4 nneg5 nneg6 nneg7 nneg8 nneg9
if nneg2>0 then fcneg2=fcneg2/nneg2
```

```
if nneg3>0 then fcneg3=fcneg3/nneg3
if nneg4>0 then fcneg4=fcneg4/nneg4
if nneg5>0 then fcneg5=fcneg5/nneg5
if nneg6>0 then fcneg6=fcneg6/nneg6
if nneg7>0 then fcneg7=fcneg7/nneg7
if nneg8>0 then fcneg8=fcneg8/nneg8
if nneg9>0 then fcneg9=fcneg9/nneg9
LPRINT using "##.#### ";fcneg2 fcneg3 fcneg4 fcneg5 fcneg6 fcneg7 fcneg8 fcneg9:IPRIN
T
IF MIN>FCP THEN SWAP MIN,FCP:XA=A:XB=B:XD=D:XE=E
FOR AN=AD TO AF :AA=AN-AD+1 : LPRINT "ETR "AN": "ETR(AA):NEXT AN
LPRINT"- - - - -"
ECQUAD = 0 :SOMPLUCAR=0:FCPOS=0 : FCNEG=0:NFC=0:NPOS=0:NNEG=0
npos2=0:npos3=0:npos4=0:npos5=0:npos6=0:npos7=0:npos8=0:npos9=0
nneg2=0:nneg3=0:nneg4=0:nneg5=0:nneg6=0:nneg7=0:nneg8=0:nneg9=0
fcpos2=0:fcpos3=0:fcpos4=0:fcpos5=0:fcpos6=0:fcpos7=0:fcpos8=0:fcpos9=0
fcneg2=0:fcneg3=0:fcneg4=0:fcneg5=0:fcneg6=0:fcneg7=0:fcneg8=0:fcneg9=0:ras=0
LPRINT " "
LPRINT using "\          \";"p" "pn" "ps" "pr" "etr" "qcall" "qbase" "qcal" "qobs" "qobsest" "s0
" "+r0" "s" "r" "sneg"
LPRINT using "#####.##";totp totpn totps totpr totet totqcall totqbase totqcal totdeb tot
debes s0 r(0) s r(np) ras
LPRINT " " *****
"
LPRINT
totp=0:totpn=0:totps=0:totpr=0:totqcal=0:totqcall=0:totdeb=0:totdebes=0:totet=0:totqbase=0
if imm=1 then input"enregistrer les erreurs (1/0)";enr
if enr=1 and imm=1 then
open"0",#1,"debit\erreur"
for er = 2 to 9
write#1,fc moy(er)
next er
close#1
end if
RETURN
'-----
GR:
'-----
P=PBRUT(I)
gosub GRp
gosub grb
qcal=qcall+qcal2
qcalt(i+1)=qcal
gosub affichage2
qcall=0;qcal2=0
return
'-----
GRP :
'-----
IF P<ETP THEN
PR=0:PS=0:PN=0
ETR=P+(ETP-P)*((S/A)^.33)
S=S-(ETP-P)*((S/A)^.33) 'prélèvement sur le réservoir sol
ELSE
ETR=ETP
PN = P-ETR '(pluie nette)
CR1 = (S/A)^2 '(coefficient de rendement)
SS=S+PN*(1-CR1)
CR2 = (SS/A)^2
CR=(CR1+CR2)/2
IF SS >= A THEN PR=PN ELSE PR=PN*CR
PS=PN-PR
END IF
S=S+PS
IF S < 0 THEN ras=s+ras:S=0
IF S>A THEN PR=PR+S-A:S=A
```

```
R(I) = R(I-1) - qcal(I) + PR
QCAL(I+1)= (R(I)^2)/(R(I) + B)
if qcal(i+1)>=r(i) then PRINT "erreur"
qcall=qcal(i+1)
tots=s+tots
if etr>etp then PRINT "erreur"
RETURN
```

grB :

```
qbase(i+1)=(s/d)*((s/a)^2)
s=s-qbase(i+1)
IF S <0 THEN PRINT S:S=0
qb2=e
if s<qb2 then qb2=s
s=s-qb2
ur=ur+1:totqb2=totqb2+qb2
qcal2=qbase(i)+qb2
return
```

affichage2 :

```
totp=p+totp
totpn=pn+totpn
totps=ps+totps
totpr=pr+totpr
totet=etr+totet
if i = np then goto 281
totqcall=qcall + totqcall
totqbase=qcal2+totqbase
totqcal=qcal+totqcal
if deb(i+1)<>10000 then
totdeb=deb(i+1)+totdeb
else
totdebes=qcal+totdebes
end if
281
if edc=1 then gosub edit
if ed=0 and affiche=0 then return
RETURN
```

EDIT :

```
IPRINT
IPRINT "PARAMETRES : ";
IPRINT using "#####";A B D;
IPRINT using "###.###"; E
IPRINT "-----"
IPRINT "          ";
IPRINT using "\ \";"P " "ETP" "ETR" " PS" " S" " PR" " R" "QC1" "QC2" "CAL" "O
BS"
IPRINT using "####";i;
IPRINT " : ";
IPRINT using "###.###";P ETP ETR PS S PR R(I) QCAL1 QCAL2 QCAL DEB(I+1)
return
```

SORTIETT: 'SORTIE SUR TABLE TRACANTE GRAPHTEC MP 3100:

```
INPUT"sortie sur table traçante (1/0)";TRAC
IF TRAC=0 THEN RETURN
310
AV=2 'avance d'abscisse en mm
av%=str$(av)
INPUT"sans les axes, tapez 1";SX
OPEN"O",#1,"AUX"
PRINT#1,"J"1
PRINT#1,"S 4,3"
```



```
IF SX=1 THEN GOTO 315
PRINT#1,"G"
PRINT#1,"!"5
PRINT#1,"M"100,100
PRINT#1,"X3",2500,25
PRINT#1,"M"1850,30
PRINT#1,"PTEMPS ("av$" mm par jour)"
PRINT#1,"M"100,100
PRINT#1,"X2",1450,29
PRINT#1,"X3",2500,25
PRINT#1,"X2",-1450,29
PRINT#1,"M"100,1580
PRINT#1,"PLAME ECOULEE, en mm"
PRINT#1,"M"1850,1580
PRINT#1,"PLAME PRECIPITEE, en mm"
'-----
' ECRITURE DES GRADUATIONS
'-----
PRINT#1,"S"3,3
PRINT#1,"M"0,100
dor=-10
il=-4
for i=0 to 14
  dor=100+dor
  il=il+4
  il$=str$(il)
  print#1,"M"0,dor
  if il<10 then IL$=" "+IL$
  print#1,"P"IL$
  if IL=16 then IL=-4
next i
dor=1590
il=-20
for i=0 to 14
  dor=-100+dor
  il=il+20
  il$=str$(il)
  if il>40 and il<100 then il$=" "
  if il=80 then il=-20
  print#1,"M"2610,dor
  print#1,"P"IL$
next i
PRINT"tapez F5 pour redémarrer après le tracé des axes"
315
INPUT"tracer à quelle hauteur au dessus de l'axe des x (en cm)";HO:HO=HO*100
317
PRINT"l'échantillon comprend "NDJ"jours
INPUT"tracer à partir de ";NDJDEB
INPUT"tracer jusque ";NDJFIN
av=av*10:LABS=AV*(NDJFIN-NDJDEB+1)
IF LABS>2650 THEN PRINT "c'est trop ":av=av/10:GOTO 317
FOR J = 1 TO 3
  X=1
  IF DCAL=1 THEN J=2
  IF J = 1 THEN print#1,"L"0:print "tracé des débits observés"
  IF J = 2 THEN PRINT#1,"L"1:print#1,"B"20:PRINT "----- calculés"
  IF J = 3 THEN PRINT#1,"L"0:PRINT "tracé des pluies"
  FOR II = NDJDEB TO (NDJFIN-1) step 2
    IF J = 1 THEN deb1=deb(ii):deb2=deb(ii+1):ORD1=DEB1*25 +100+HO: ORD2=DEB2*25 +10
O+HO
    IF J = 2 THEN deb1=qcalt(ii):deb2=qcalt(ii+1):ORD1=deb1*25 +100+HO:ORD2=deb2*25
+100+HO
    IF J = 3 THEN plu1=pbrut(ii):plu2=pbrut(ii+1):ORD1=500+HO-(plu1*5):ORD2=500+HO -(p
lu2*5)
318
    AB1=X*AV+100:X=X+1:AB2=X*AV+100:X=X+1
```

```
IF II = NDJDEB THEN PRINT#1,"M"AB1,ORD1
PRINT II;AB1;ORD1;AB2;ORD2
IF J=1 AND DEB(II+1) =10000 THEN
print#1,"H":print#1,"M"AB2,ORD2
ELSE
PRINT#1,"D"AB1,ORD1,AB2,ORD2
END IF
NEXT II
NEXT J
print#1,"M"2575,H0+120
print#1,"Q"900
PRINT#1,"S"3,3
INPUT"message";mois$
print#1,"P"MOIS$
PRINT#1,"Q"0
IF H0=1000 then
PRINT#1,"M"1150,1650
PRINT#1,"S"5,4
input"tapez ANNEE 19..";an$
PRINT#1,"P"AN$
end if
PRINT#1,"H"
print#1,"Q"0
print#1,"S"4,3
INPUT"autre tracé 1/0";TRACBIS
IF TRACBIS=0 THEN
CLOSE#1
EXIT IF
ELSE
PRINT#1,";"
CLOSE#1
GOTO 310
END IF
RETURN
```

LEXIQUE



Adéquation d'une loi : Aptitude d'une loi à représenter le comportement statistique d'un phénomène

Coefficient d'écoulement : Pour un intervalle de temps donné, ou pour un évènement pluie-débit donné, rapport du volume total écoulé à l'exutoire du bassin au volume précipité sur ce bassin.

Coefficient de ruissellement : rapport du volume de ruissellement direct au volume brut précipité, pour un épisode de crue.

Coefficient de variation : rapport de l'écart-type à la moyenne.

Débit de base : part de l'écoulement d'un cours d'eau due généralement à la vidange d'un ou plusieurs réservoirs naturels

Débit maximum instantané : valeur du débit au sommet de la pointe de crue (m^3/s)

Débit maximum journalier : plus fort débit moyen journalier sur la période de crue

Débit spécifique : débit fourni par une unité (km^2) de surface d'un bassin versant, en litre/seconde/ km^2

Décennal : qualifie la valeur d'une variable ayant une chance sur dix d'être dépassée au cours de l'année à venir

Densité de probabilité : dérivée de la fonction de répartition

Ecart-type : paramètre de dispersion égal à la racine carrée de la variance

Echantillon : fraction de population

Écoulement : Quantité d'eau qui s'écoule à l'exutoire d'un bassin versant sur une période de référence (mois, année). L'écoulement comprend le ruissellement superficiel, le ruissellement hypodermique (ou retardé) et l'écoulement de base dû à la vidange des nappes.

Erreur-standard ou erreur-type ou écart-type des résidus : erreur statistique d'estimation d'un paramètre

Évapotranspiration : quantité d'eau prélevée sur le sol et retournant à l'atmosphère sous les effets conjugués de la transpiration des végétaux et de facteurs physiques (rayonnement solaire, température, vent)

Fonction de répartition $F(x)$: Expression algébrique mesurant la probabilité qu'une variable aléatoire X soit inférieure ou égale à une valeur donnée x . Elle caractérise chaque loi d'ajustement choisie

Fréquence d'une variable discrète : rapport du nombre de réalisations d'une observation au nombre total d'observations

Fréquence expérimentale d'une variable continue : Si r est le rang de classement d'une valeur x d'un échantillon de taille n , la fréquence expérimentale se calcule par diverses équations :

$(r - 0,5)/n$ ou $r/(n+1)$ ou $(i-0,3)/(i+0,4)$ etc...

- Dans un classement décroissant, la fréquence expérimentale correspond à la fréquence au dépassement, laquelle tend vers la probabilité au dépassement $F_1(x)$ lorsque n croît.

- Dans un classement croissant, la fréquence expérimentale correspond à la fréquence au non dépassement, laquelle tend vers la probabilité au non dépassement $F(x)$ lorsque n croît. Cette probabilité correspond à la fonction de répartition de la loi de distribution

Gradex : Pente de la droite d'ajustement de Gumbel

Hyétoqramme : diagramme représentant l'intensité des pluies en fonction du temps.

Indice de compacité ou coefficient de forme : Pour un bassin de surface S et de périmètre P , l'indice de compacité s'obtient par la formule $0,28.P.(S)^{-1/2}$. Cet indice correspond au rapport du périmètre stylisé du bassin à celui d'un cercle de superficie S .

Intervalle de confiance : intervalle dans lequel une estimation a une probabilité $1 - \alpha$ de se trouver, α étant le risque de se tromper

Maximum de vraisemblance : méthode statistique permettant d'estimer les paramètres d'une loi de distribution. Elle consiste à calculer la valeur des paramètres lorsque la vraisemblance de l'échantillon est maximale, c'est à dire lorsque l'échantillon observé est "le plus probable possible", la vraisemblance n'étant autre que la probabilité d'observer effectivement cet échantillon (Miquel, 1983).

Soit une loi dépendant de k paramètres, $F(x, a_1, a_2, \dots, a_k)$, choisie pour ajuster un échantillon de n réalisations d'une variable aléatoire X . Si $f(x, a_1, a_2, \dots, a_k)$ est la densité de probabilité de la valeur x , la vraisemblance de l'échantillon est le produit des densités de probabilité relatives aux valeurs de l'échantillon :

$$L = f(x, a_1, a_2, \dots, a_k)$$

Caler les paramètres a_1, a_2, \dots, a_k par la méthode du maximum de vraisemblance consiste à maximiser L , ce qui conduit donc à annuler les dérivées partielles par rapport aux différents paramètres. En pratique, on annule les dérivées partielles du logarithme de la vraisemblance, ce qui fournit un système de k équations dont la solution fournit les k paramètres a_1, a_2, \dots, a_k recherchés.

Maximum mensuel ou annuel d'une variable : valeur la plus forte de la variable observée sur une période mensuelle ou annuelle donnée.

Médiane : valeur d'une variable qui a une probabilité égale d'être dépassée ou non dépassée. La position de la médiane par rapport au mode et à la moyenne rend compte du degré de symétrie de la distribution

- Méthode des moments** : méthode consistant à calculer les n paramètres de la loi qui égalisent r différents moments de la loi à leurs estimations calculées sur l'échantillon. Ainsi, l'estimation du moment du premier ordre est la moyenne de l'échantillon et celle du moment centré du second ordre est la variance de l'échantillon
- Moindres carrés** : méthode d'estimation des paramètres qui consiste à minimiser la somme des carrés des écarts entre la loi théorique et les observations munies de leur fréquence empirique
- Mode** : valeur la plus probable d'une variable ou valeur pour laquelle la densité de probabilité est maximale
- Modèle de renouvellement** : Méthode statistique d'ajustement combinant deux lois de distribution (en général, loi de Poisson et loi exponentielle ou de Weibull) et visant à ajuster un ensemble d'observations supérieures à un seuil
- Période de retour d'une valeur x** : intervalle de temps moyen séparant deux observations supérieures à x , le phénomène observé étant stationnaire
- Pluie brute** : Pluie mesurée par le pluviomètre ou par le pluviographe
- Pluie efficace** : Notion désignant, dans le cadre de la prévision de crue, la part de la pluie ayant entraîné un écoulement direct, en excluant l'écoulement de base.
- Pluie maximale journalière mensuelle** : pluie journalière maximale observée sur une période d'un mois
- Pluie maximale journalière annuelle** : pluie journalière maximale observée sur une période d'une année
- Rectangle équivalent au bassin versant** : Rectangle de même surface et de même périmètre que le bassin versant étudié, ce qui permet d'en déterminer les deux dimensions
- Ruissellement** : Part de la pluie gagnant rapidement l'exutoire et responsable des variations rapides du débit d'écoulement, notamment des crues. Le ruissellement direct ou superficiel correspond à la quantité d'eau qui rejoint l'exutoire pendant ou peu après l'averse. Le ruissellement direct est suivi immédiatement par le ruissellement hypodermique ou retardé qui résulte de la vidange rapide de nappes superficielles
- Stationnarité** : Indépendance des propriétés statistiques de la variable par rapport au temps
- Temps de base** : Durée qui sépare le début de la fin de crue. La crue correspond ici à l'hydrogramme de ruissellement direct
- Temps de montée** : Durée qui s'écoule entre le début de la montée en crue et la pointe de crue
- Temps de réaction** : Durée qui sépare la fin de la pluie du début de la décrue.
- Temps de réponse** : Durée qui sépare le centre de gravité de l'averse de celui de la crue. Le centre de gravité de l'averse est le temps qui divise le hyétogramme en deux parties de même surface. Le centre de gravité de la crue est le temps qui divise l'hydrogramme de ruissellement en deux parties de même surface.
- Thiessen (méthode de)** : lame moyenne précipitée sur un bassin versant (mm). Elle est calculée en pondérant chaque mesure pluviométrique par un coefficient égal au rapport de la surface d'influence du pluviomètre et de la surface totale du bassin. Cette surface d'influence est celle d'un polygone délimité par les médiatrices des segments joignant le pluviomètre aux pluviomètres adjacents.

Transmissivité : grandeur exprimant, en m^2/s , l'aptitude d'une couche de terrain à laisser l'eau s'écouler dans le sens de cette couche. Pour une nappe libre, c'est le produit de la perméabilité (ou conductivité hydraulique), en m/s, par la hauteur d'eau.

Variable aléatoire discrète : variable ne pouvant prendre qu'un nombre fini de valeurs

Variable aléatoire continue : variable pouvant prendre un nombre infini de valeurs sur un intervalle fini ou indéfini

Variance d'un échantillon : Somme des carrés des écarts des n observations de l'échantillon à la moyenne de l'échantillon rapportée à $n-1$ observations. Elle correspond à l'estimation sans biais de la variance de la population.

Variance de la population : moyenne arithmétique des carrés des écarts de toutes les valeurs possibles de la variable à la moyenne de la population (m)



RESUME

Après une phase de critique des données, on présente les lois de distribution et les quantiles obtenus pour les valeurs annuelles, mensuelles et maximales journalières des pluies de l'ensemble du bassin.

Sur le sous-bassin de la Solre, on ajuste deux lois saisonnières caractérisant les relations Intensité-Durée-Fréquence des pluies de trente minutes à 24 heures dans la région de Maubeuge (loi de Montana).

L'étude du bilan (Thorntwaite) à l'échelle mensuelle est l'occasion d'une comparaison critique entre les excédents calculés et les écoulements réellement mesurés.

On présente ensuite les lois de distribution des débits annuels, et mensuels ainsi que celles des débits d'étiage, des dates et durées d'étiage pour différents seuils de débit.

L'étude des crues est l'occasion d'un ajustement des débits de pointe et permet d'estimer la période de retour de la plus forte crue constatée sur le bassin.

La comparaison avec un sous-bassin montre qu'il faut attribuer les différences de coefficient d'écoulement en période de crue aux différences de perméabilité des terrains.

Un modèle à deux réservoirs permet de simuler de façon adéquate les débits moyens journaliers observés en aval du bassin de la Solre.

Des observations géologiques montrent enfin, qu'en période d'inondation, d'importantes infiltrations vers la nappe s'effectuent au niveau d'effondrements observés à proximité du lit de la Solre. Ces infiltrations se situent précisément au droit du synclinal carbonifère, gisement d'une nappe exploitée à proximité pour les captages en eau potable.

Mots-clefs : Hydrologie, Statistique, Modélisation, Infiltration, Nord de la France

ABSTRACT

Raw rainfall data are criticized and frequency distribution laws are obtained for annual rainfall, monthly rainfall and daily maxima rainfall data in the Sambre basin (North of France).

In the Solre sub-basin, two seasonal depth-duration-frequency laws are fitted from 30 minutes to 24 hours rainfall in Maubeuge area.

Monthly Thorntwaite balance gives the opportunity of a critical comparison between computed water surplus and effective measured floods.

Afterward, annual and monthly streamflow distribution laws are defined as well as those of moving average and monthly flows, occurrence dates and duration of low stream periods for selected flow sills.

Maxima streamflows fitted laws are based on flood analysis which allows to estimate return period of the maximum flood known in the Solre sub-basin.

Comparison with a neighbouring sub-basin shows flood streamflow rates are in connection with differences in the substratum permeabilities.

A two-reservoir model allows a simulation of daily streamflow measured downstream in the Solre basin.

Geological investigation shows that large infiltration in aquifer occurs in flood period. Infiltration are located in alluvial loam collapses in connection with calcareous carboniferous syncline used for drinking water catchments.

Key-words : Hydrology, statistics, model, infiltration, North of France