



Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération

FLEUVE SENEGAL

PLAN DIRECTEUR DE LA HAUTE VALLEE

RAPPORT N° 3

EXPERTISE HYDROLOGIQUE SUR LES SITES D'AMENAGEMENT PROJETES

J.P. LAMAGAT, B. MARIEU, J. ALBERGEL

DAKAR, Octobre 1990





## 1. METHODES DE CALCUL UTILISEES

### 1.1. Méthodes d'évaluation de la crue d'étude et de la crue de projet

#### 1.1.1. Définitions

La crue d'étude est la crue provoquée par une lame précipitée sur le bassin, de récurrence décennale, les autres conditions étant moyennes (humidité des sols, végétation). Par souci de simplification nous assimilerons dans la suite du texte la crue d'étude à la crue décennale.

La crue de projet est une indication du risque naturel utilisée pour le dimensionnement des ouvrages. Par exemple, si on choisit de se prémunir contre une crue dont la période de retour est de 50 ans, le débit maximum de la crue de projet sera obtenu en multipliant le débit maximum de la crue d'étude par le rapport de la pluie ponctuelle de période de retour 50 ans sur la pluie décennale.

#### 1.1.2. Méthode de prédétermination de Rodier et Auvray (ORSTOM, 1965)

Il s'agit d'une méthode analytique applicable à des bassins versants de superficie inférieure à 200 km<sup>2</sup> et dans des zones de pluviométrie annuelle n'excédant pas 1700 mm. On considère qu'au delà de 200 km<sup>2</sup>, il n'est plus possible d'évaluer la lame précipitée décennale à partir de l'averse ponctuelle de même fréquence.

A partir des résultats de 60 bassins observés, Rodier et Auvray ont proposé une estimation du débit de pointe de la crue décennale par la relation suivante:

$$Q_{10} = K \cdot P_{10} \cdot Kr_{10} \cdot S \cdot a \cdot Tb^{-1}$$

avec  $Q_{10}$  le débit de pointe de la crue d'étude,  
 K le rapport de la pluie ponctuelle à la pluie moyenne sur le bassin,  
 $P_{10}$  la pluie journalière décennale,  
 $Kr_{10}$  le coefficient de ruissellement correspondant à la pluie décennale,  
 S la superficie du bassin versant,  
 a le rapport du débit maximum sur le débit moyen pendant le temps de base,  
 Tb le temps de base.

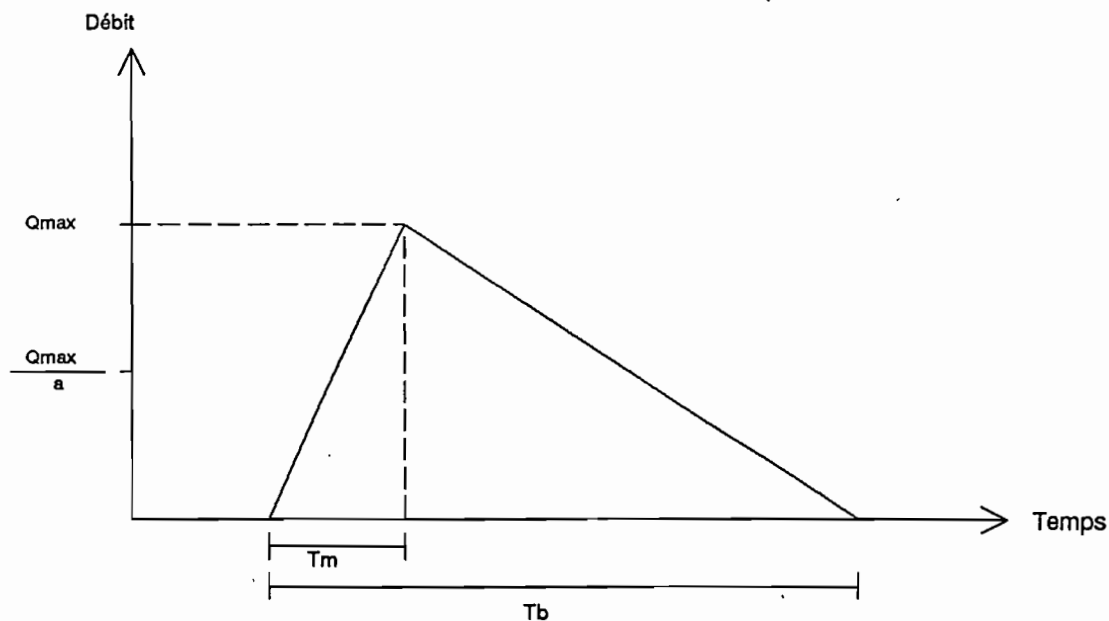
La détermination des caractéristiques hydrologiques ( $Kr_{10}$ , Tb et Tm le temps de montée) se fait par l'intermédiaire d'abaques en fonction de la superficie S et de classes de perméabilité (P) et de relief (R).

La variable P intègre l'absorption d'eau par le sol et la végétation. Elle est divisée en 5 classes, P1 représentant un bassin rigoureusement imperméable, et P5 un bassin très perméable avec un couvert végétal important.

Le paramètre R est divisé en 6 classes, en fonction des pentes longitudinale et transversale. Enfin, l'étude de Rodier et Auvray donne une estimation de K et de a en fonction de S.

Le schéma de la figure 2 illustre les différents concepts cités plus haut.

Figure 2



### 1.1.3. Méthode de prédétermination de Puech et Chabi-Gonni (CIEH, 1984)

Cette méthode repose sur l'étude statistique de 160 bassins de superficie inférieure à 2500 km<sup>2</sup>, pour des pluies annuelles comprises entre 100 et 2500 mm.

La relation énoncée ci-dessous est la meilleure au sens de la régression multiple ne comportant pas le coefficient de ruissellement  $Kr_{10}$  toujours très délicat à estimer pour des bassins non jaugés.

$$Q_{10} = 131.S^{0,68}.Ig^{0,58}.Pan^{-0,68}$$

avec  $Q_{10}$  le débit de pointe décennal,  
 S la superficie du bassin,  
 Ig l'indice global de pente,  
 Pan la pluviométrie moyenne interannuelle.

$Ig = dH/L$ , dH étant la différence d'altitude entre l'amont et l'aval du bassin, et L la longueur du rectangle équivalent, ayant la même superficie et le même périmètre que le bassin.

On remarque dans la relation obtenue par régression multiple que  $Q_{10}$  est inversement proportionnel à la pluie annuelle. Ceci s'explique par le fait que plus les précipitations sont faibles plus la végétation est clairsemée et les sols imperméables, autant de facteurs qui augmentent le ruissellement alors que les averses ponctuelles décennales varient peu avec la latitude.

## 1.2. Méthode d'estimation des apports annuels

Nous avons utilisé la méthode proposée par J. Rodier dans une étude datant de 1975.

On trouve dans cette étude, pour différentes catégories de bassins définies par leur substratum rocheux, des diagrammes de distribution permettant de déterminer le coefficient d'écoulement annuel pour une fréquence donnée, moyennant la connaissance préalable de la pluviométrie correspondant à la fréquence choisie (obtenue par ajustement statistique).

Dès lors qu'on a réussi à rattacher le bassin étudié à un bassin type, la valeur de l'écoulement annuel s'obtient par l'équation suivante:

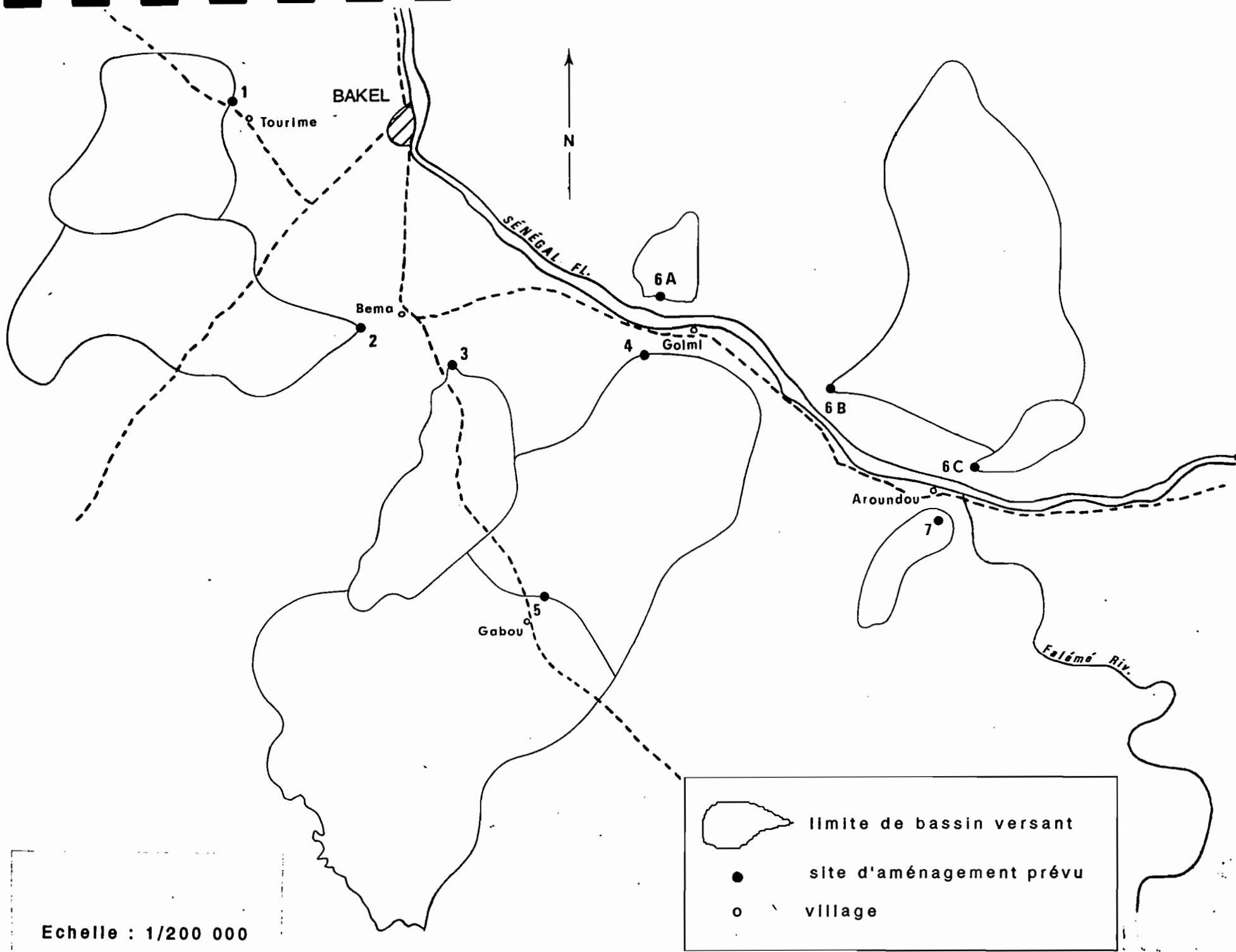
$$V_{ef} = P_f \cdot K_{ef} \cdot S$$

avec  $V_{ef}$  le volume écoulé pour la fréquence  $f$ ,  
 $P_f$  la pluie annuelle de fréquence  $f$ ,  
 $K_{ef}$  le coefficient d'écoulement de fréquence  $f$ ,  
 $S$  la superficie du bassin.

Sur chacun des bassins versants étudiés nous avons effectué les calculs en année médiane ( $f=0,5$ ), en année décennale sèche ( $f=0,9$ ) et en année décennale humide ( $f=0,1$ ).

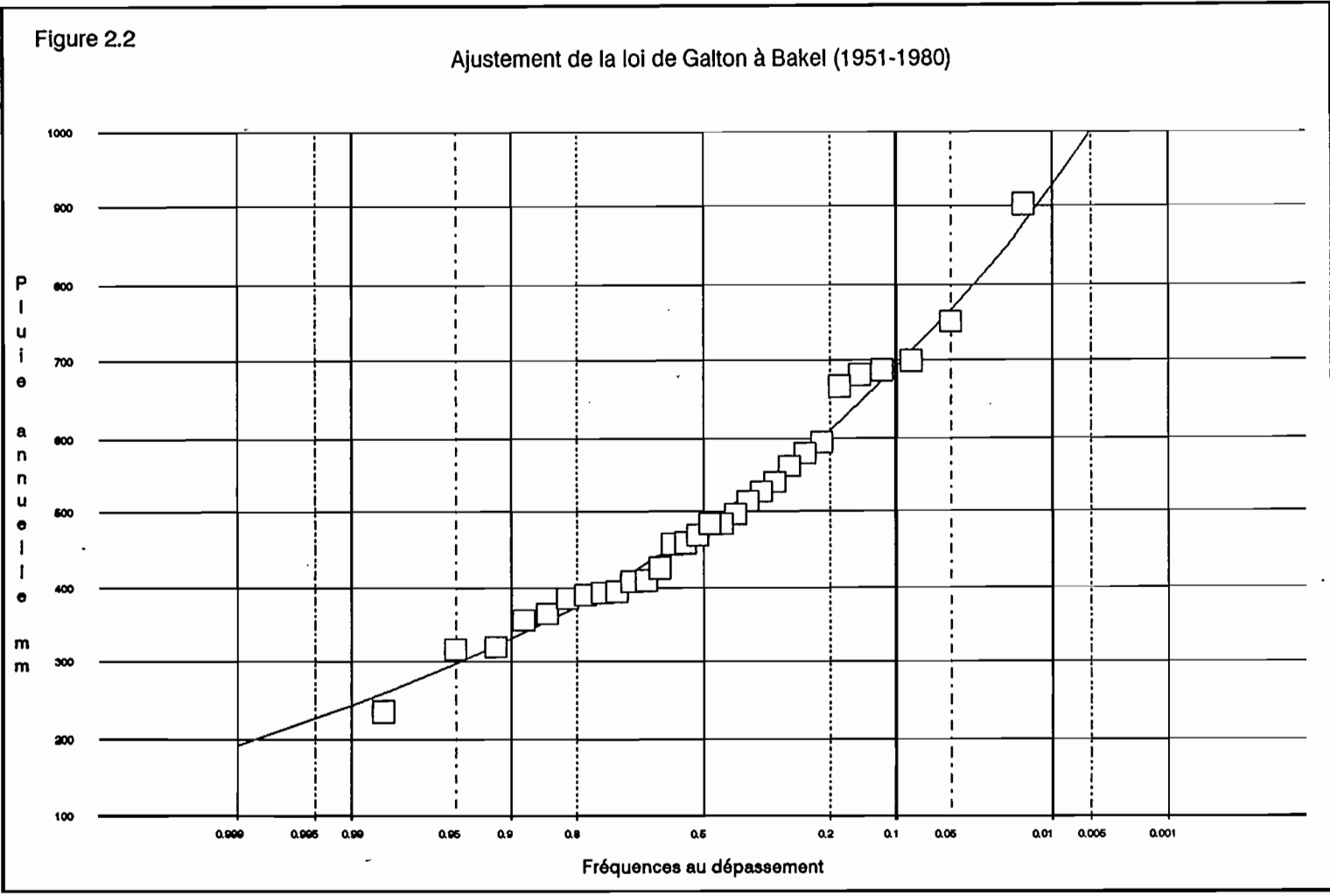


Etude sites d'aménagement



Echelle : 1/200 000





### 2.1.2. Facteurs conditionnant l'écoulement

#### - La géologie:

l'essentiel du substratum rocheux sur le secteur de Bakel est constitué par des schistes et quartzites métamorphiques (roches vertes) de la série de Bakel-Akjoujt. Les bassins versants 1, 2, 3, 6A, 6B et 6C sont entièrement localisés sur ce type de formations.

Vers le Sud, à partir de la confluence du Sénégal et de la Falémé, le sous-sol est formé par des roches sédimentaires du Cambrien. Le bassin n°7 se situe sur ces formations.

Enfin, un massif granitique de 10 km de long occupe environ 10% de la surface des bassins 4 et 5, par ailleurs situés sur les roches vertes de la série de Bakel-Akjoujt.

Du point de vue hydrogéologique, l'ensemble de ces roches sont considérées comme imperméables, les seuls systèmes aquifères se limitant à de petites nappes alluviales ou d'arènes, très localisées et très peu productives.

#### - Les sols:

la pédogénèse sur les schistes, quartzites et sur le granite a donné lieu à des sols peu évolués d'érosion et à des sols minéraux bruts. Sur les roches sédimentaires, on rencontre essentiellement des sols vertiques et des sols bruns tropicaux, et dans la plaine alluviale des sols hydromorphes.

Globalement, l'ensemble de ces sols semblent favoriser le ruissellement au détriment de l'infiltration.

#### - Végétation et activité humaine:

le couvert végétal discontinu (steppe arbustive) et le faible développement de l'activité agricole en dehors de la plaine alluviale favorisent le ruissellement en limitant la rétention d'eau par les plantes.

### 2.1.3. Caractéristiques physiques des bassins versants

Le tableau 2.1 énumère les principaux caractères physiques des bassins versants dont les exutoires sont situés à proximité des sites d'aménagements projetés. A noter que le bassin n°5 est inclus dans le bassin n°4 (voir figure 2.1).

Tableau 2.1

N°de B.V.	S en km <sup>2</sup>	P en km	L en km	Ig en m/km	Catégorie RP
1	46	27	7	7.1	R3P2
2	67	40	16	4.4	R3P2
3	39	27	9	6.7	R3P2
4	220	72	28	2.9	R3P2
5	128	50	18	4.2	R3P2
6A	7.4	11	3	3	R2P2
6B	98	44	16	2.2	R2P2
6C	8.5	14	5.5	3.6	R2P2
7	9	15	6	10	R3P2

P: périmètre du bassin

L: longueur du rectangle équivalent (voir chap.1.1.3.)

Ig: indice global de pente

R: classe de relief selon Rodier et Auvray

P: classe de perméabilité selon Rodier et Auvray

## 2.2. Le secteur de Kayes

La figure 2.3 donne l'emplacement des 5 sites d'aménagement, tous situés à proximité du fleuve Sénégal.

Lorsque ces sites n'étaient pas implantés près d'un talweg, nous avons délimité des bassins versants dont les exutoires situés à proximité permettent la réalisation de retenues collinaires.

- Site 9: Tanbounkane sur le Sinbikolé
- Site 10: au Sud de Diakandape
- Site 11: Dar Salam
- Site 12: Diyalla
- Site 13: Papara

### 2.2.1. Pluviométrie

La pluviométrie moyenne annuelle à Kayes s'élève à 695 mm sur la période de référence 1951-1980.

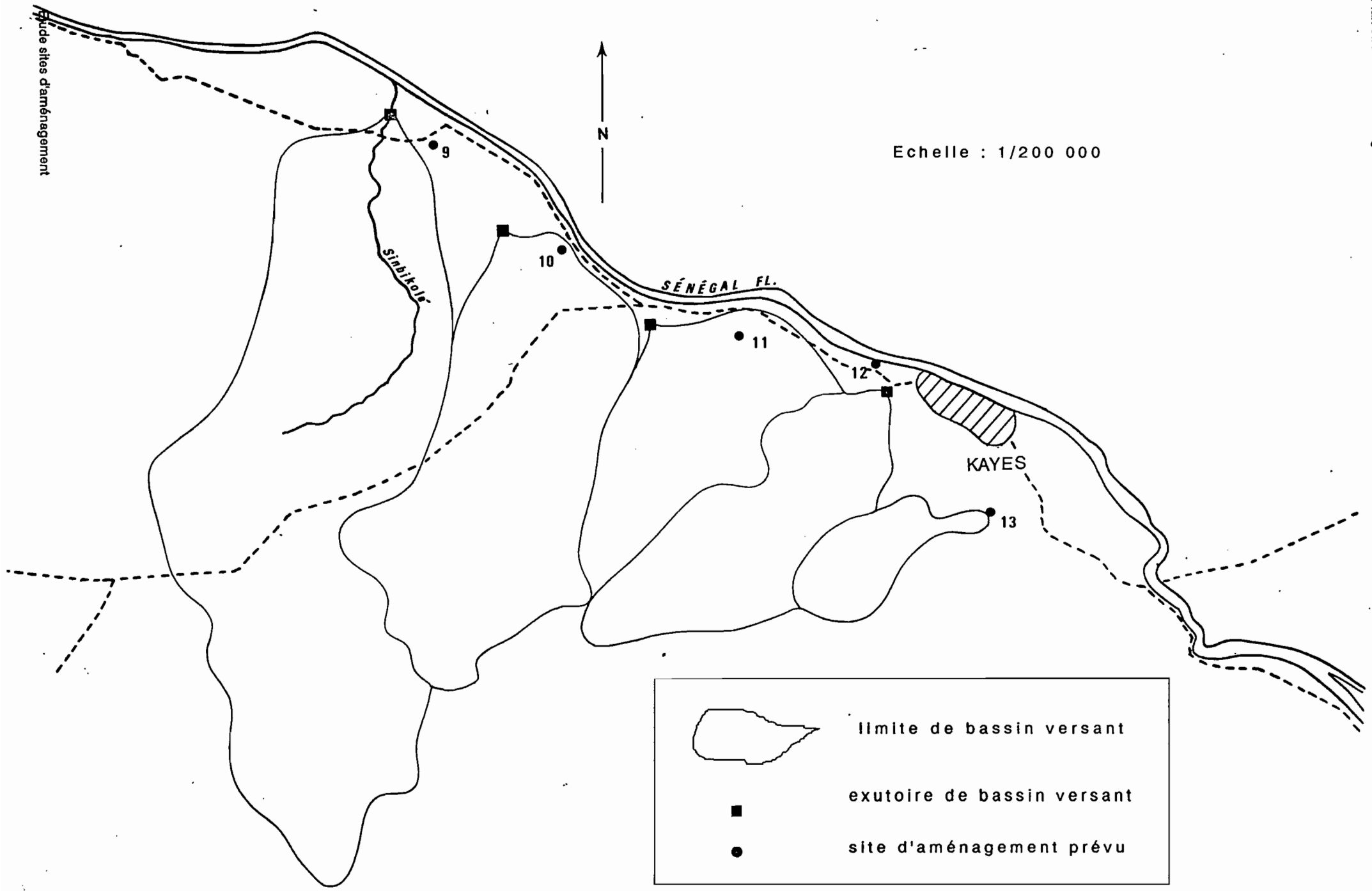
Le meilleur ajustement statistique de la pluie annuelle est obtenu avec la loi de Goodrich (voir figure 2.4). Les valeurs de pluviométrie annuelle en fonction de la fréquence au dépassement sont les suivantes:

F=0.01	P=969 MM
F=0.05	P=893 MM
F=0.1	P=851 MM
F=0.2	P=799 MM
F=0.5	P=683 MM
F=0.8	P=592 MM
F=0.9	P=540 MM
F=0.95	P=501 MM
F=0.99	P=436 MM

Pour les maxima journaliers, l'ajustement par la loi de Pearson III tronquée donne les valeurs suivantes en fonction de la fréquence au dépassement:

F=0.5	P=67.2 MM
F=0.2	P=81.0 MM
F=0.1	P=91.5 MM
F=0.05	P=102.0 MM
F=0.02	P=115.9 MM
F=0.01	P=126.4 MM

Il pleut en moyenne 46 jours par an à Kayes, les pluies journalières inférieures à 1 mm n'étant pas prises en compte.



étude sites d'aménagement




Sinhaleh

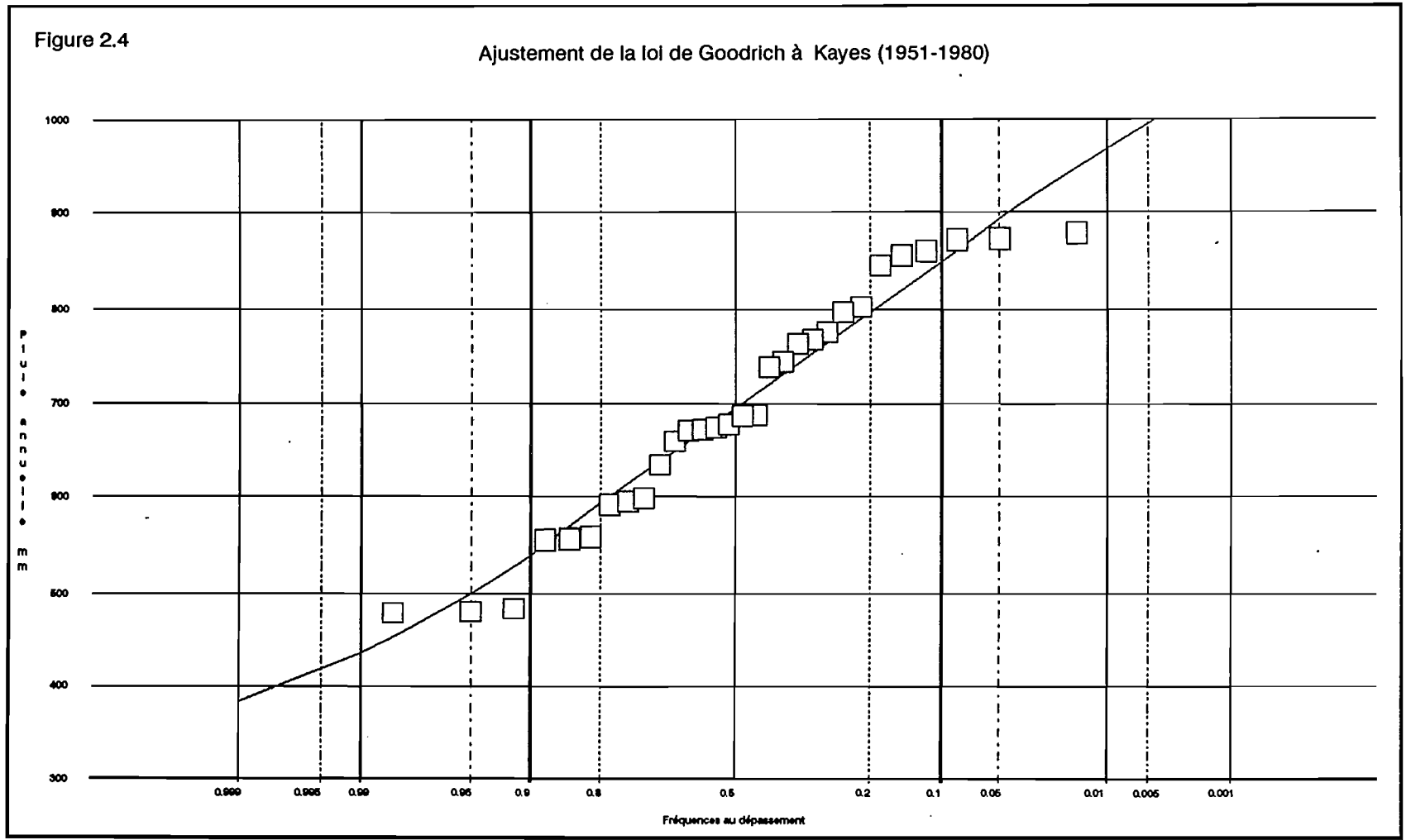
N

Echelle : 1/200 000

SÉNÉGAL FL.

KAYES

	limite de bassin versant
	exutoire de bassin versant
	site d'aménagement prévu



## 2.2.2. Facteurs conditionnant l'écoulement

### La géologie:

le substratum rocheux est constitué de formations datant du Cambrien et réparties en deux groupes:  
 - le groupe de Nioro, série occupant une surface limitée au sud-ouest de Kayes et formée pour l'essentiel de grés feldspathiques,  
 - le groupe de Bakoye qui occupe la plus grande partie du périmètre avec deux formations distinctes: des grés constituant le plateau qui s'étend au sud de Kayes, et une série dominée par des tillites (roches argileuses d'origine glaciaire) entre ce plateau et le fleuve Sénégal. Le plateau gréseux est entaillé par de nombreuses fractures tectoniques.

Le long du fleuve le substratum est recouvert par des alluvions anciennes formant des terrasses.

Le tableau 2.2 donne les proportions des différentes roches sur les cinq bassins.

Tableau 2.2

B.V.n°	Tillites	Grés de Bakoye	Grés de Nioro	Alluvions anc.
9	55%	40%	0%	5%
10	45%	30%	10%	15%
11	30%	5%	40%	25%
12	10%	40%	30%	20%
13	0%	70%	10%	20%

Bien que toutes ces roches soient imperméables, on peut penser que l'importante fracturation du plateau gréseux est susceptible d'occasionner une infiltration notable en tête des bassins versants.

### Les sols:

comme sur l'ensemble du haut-bassin, la pédogénèse dépend surtout de la roche mère. On trouve sur les grés des sols ferrugineux pouvant former une carapace latéritique. Les roches argileuses (tillites) donnent des sols bruns tropicaux ou des sols vertiques. Enfin, sur les alluvions on rencontre des sols hydromorphes.

Seuls les sols ferrugineux de plateaux peuvent être relativement perméables lorsque la carapace de surface est désagrégée.

Végétation et activité humaine: mêmes remarques que pour le secteur de Bakel.

## 2.2.3. Caractéristiques physiques des bassins versants

Le tableau ci-dessous donne les principales caractéristiques des bassins étudiés.

Tableau 2.3

N° de B.V.	S en km <sup>2</sup>	P en km	L en km	Ig en m/km	Catégorie RP
9	235	76	30	6.8	R3P2
10	130	50	18	9.2	R3P2
11	82	36	9	18.3	R3P2
12	66	38	14	14.6	R4P3
13	21	20	7	27.9	R4P3

P: périmètre du bassin  
 L: longueur du rectangle équivalent  
 Ig: indice global de pente

R: classe de relief selon Rodier et Auvray  
 P: classe de perméabilité selon Rodier et Auvray

### 2.3. Site de Nahé sur la Falémé

Ce point d'aménagement se situe près du village de Nahé à environ 1 km de la rivière Falémé et 5 km de Kidira (voir figure 2.5).

#### 2.3.1. Pluviométrie

La station pluviométrique la plus proche se trouve à Kidira. C'est elle qui a été prise en compte pour les calculs.

La pluviométrie annuelle moyenne sur la période 1951-1980 est de 662 mm. Le meilleur ajustement statistique des valeurs de pluie annuelle est obtenu avec la loi de Galton (voir figure 2.6). Les précipitations pour différentes fréquences sont les suivantes:

F=0.01	P=1130 MM
F=0.05	P=962 MM
F=0.1	P=882 MM
F=0.2	P=793 MM
F=0.5	P=647 MM
F=0.8	P=520 MM
F=0.9	P=462 MM
F=0.95	P=419 MM
F=0.99	P=346 MM

L'ajustement de loi de Pearson III tronquée à la pluie journalière donne les valeurs de maxima annuels suivantes:

F=0.5	P=63.5 MM
F=0.2	P=78.7 MM
F=0.1	P=90.1 MM
F=0.05	P=101.7 MM
F=0.02	P=116.9 MM
F=0.01	P=128.5 MM

#### 2.3.2. Caractéristiques du bassin

Le bassin contrôlé par le site de Nahé occupe une superficie de 4 km<sup>2</sup>. Il est situé sur des sols hydromorphes d'alluvions, le sous-sol rocheux étant constitué de formations sédimentaires du Cambrien.

L'indice global de pente (I<sub>g</sub>) est faible (2,5 m/km) ainsi que la perméabilité, ce qui nous a amené à ranger ce bassin dans la catégorie R2P2 selon la méthodologie de Rodier-Auvray.





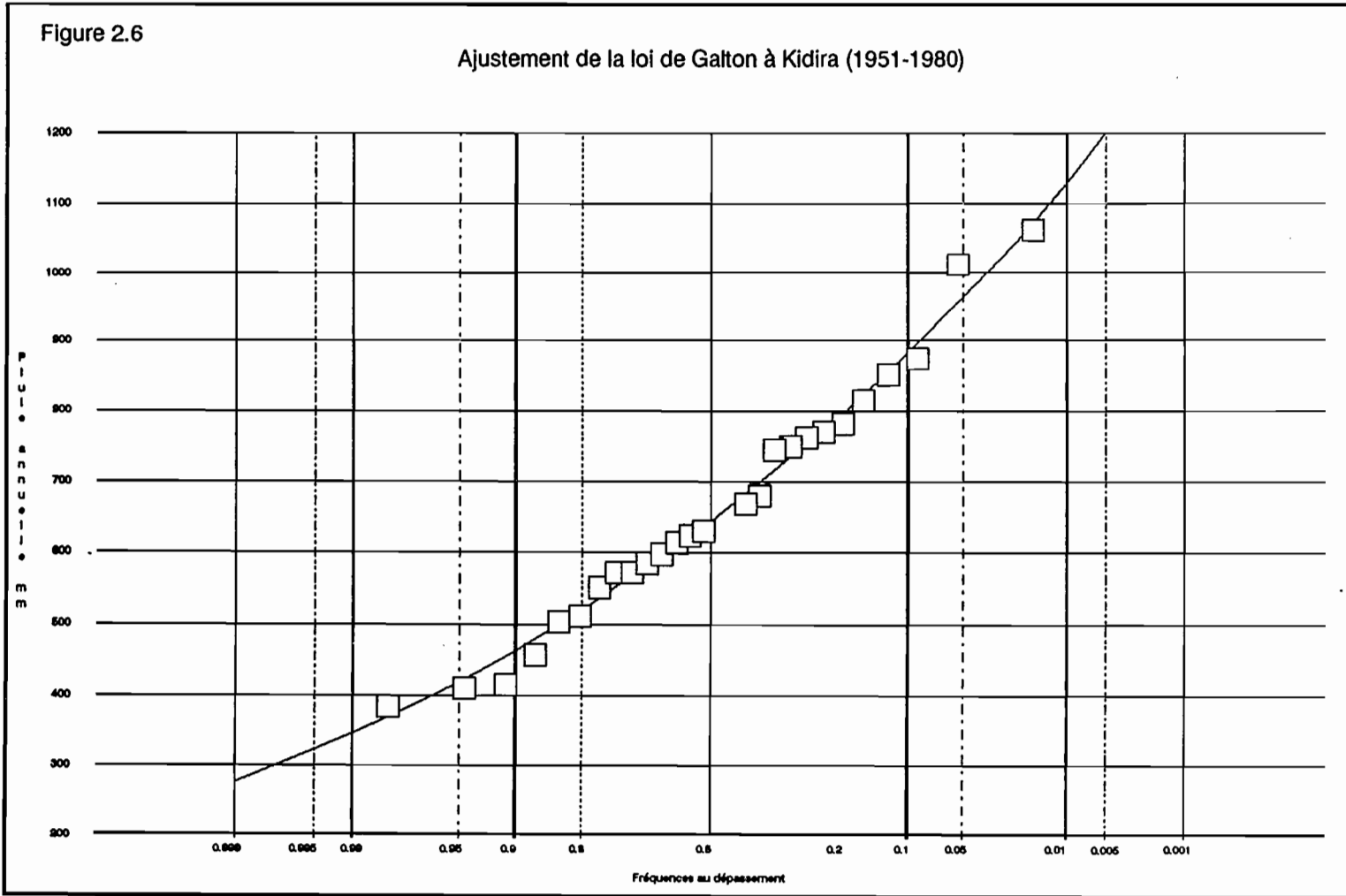
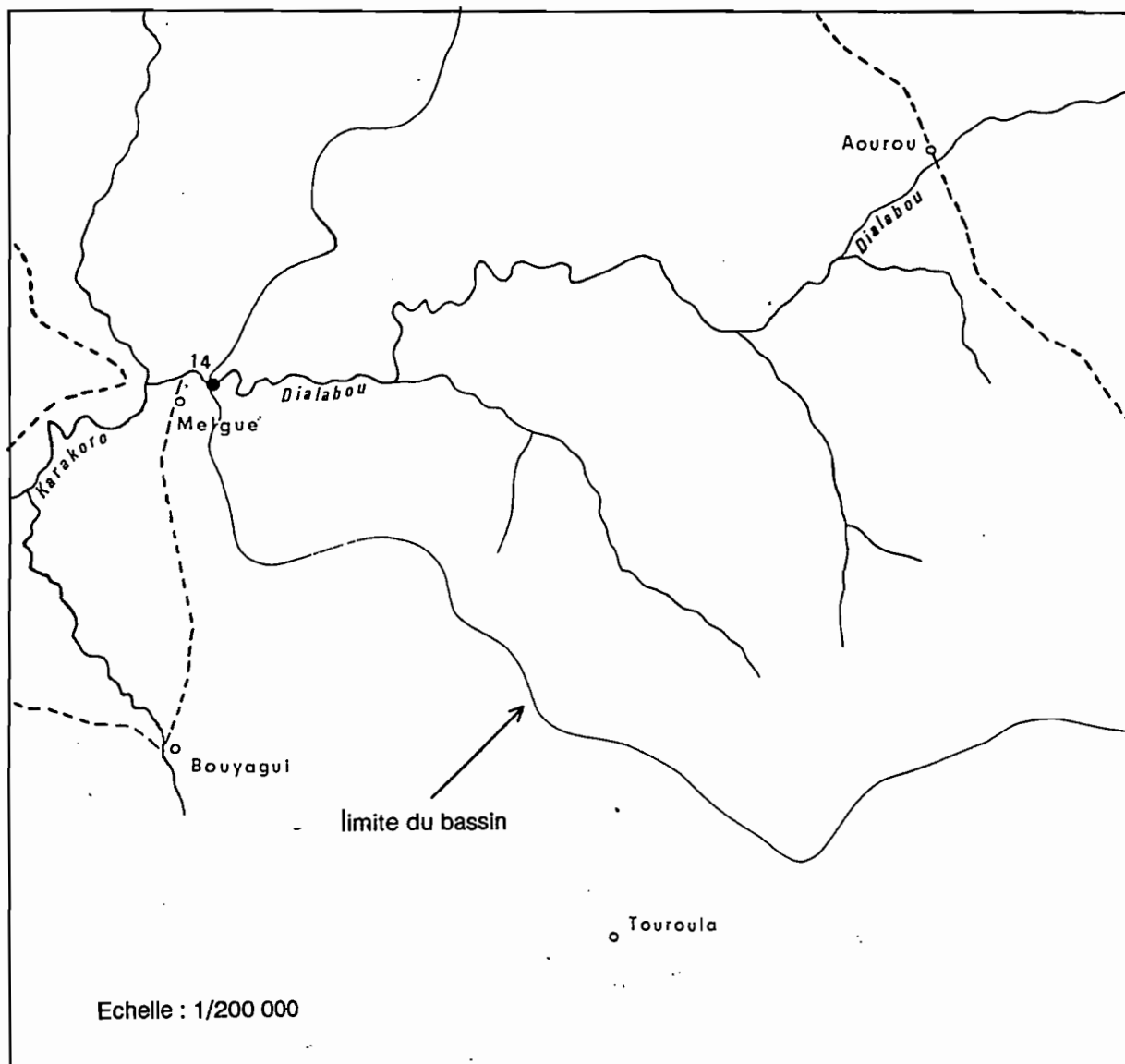
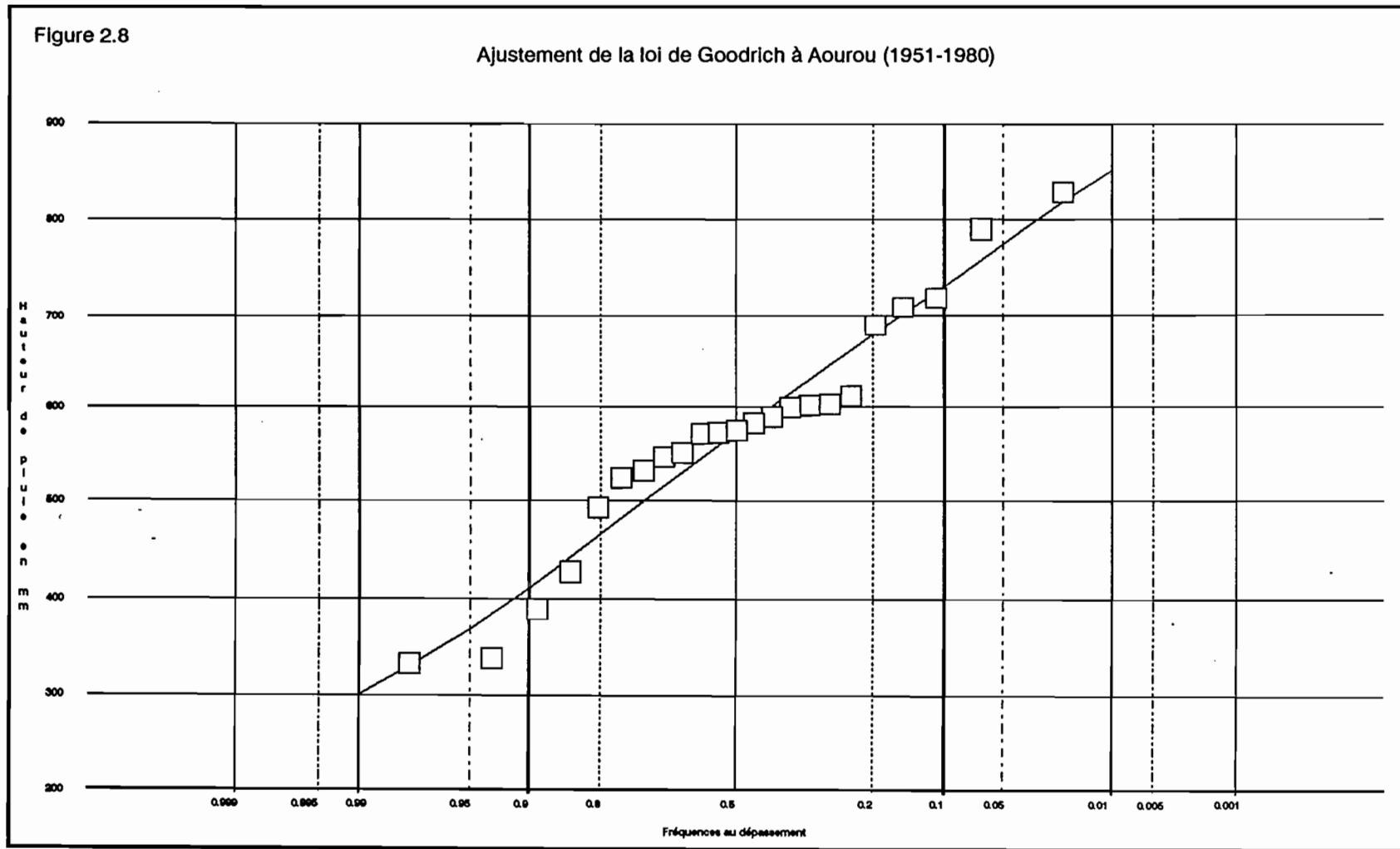




Figure 2.7 : site de Melgue





### 3. RESULTATS

#### 3.1. Débit de pointe de la crue d'étude

Le tableau 3.1 donne pour chaque bassin versant, identifié par le numéro du site d'aménagement correspondant, le débit de pointe ainsi que les autres paramètres ( $T_m$  et  $T_b$  en particulier) de la crue décennale.

La figure 3.1 offre une comparaison entre les débits obtenus par les deux méthodes (ORSTOM et CIEH). On peut constater que les écarts ne sont pas excessifs.

Le graphique de la figure 3.2 met en évidence la décroissance du débit spécifique avec l'accroissement de la surface du bassin.

A noter que cette décroissance serait parfaitement linéaire (en coordonnées bilogarithmiques) si la superficie du bassin était le seul facteur explicatif du débit de pointe des crues sahéliennes. On aurait alors une relation de la forme  $Q_{max} = a.S^b$ , avec  $b < 1$ .

Sur ces deux figures, on remarque en outre les faits suivants:

- pour les bassins versants de superficie inférieure à  $10 \text{ km}^2$ , les débits de la crue d'étude sont nettement plus faibles avec l'estimation du CIEH qu'avec la méthode Rodier-Auvray. En se référant à l'étude de Ribstein sur la révision de ces méthodes pour cette catégorie de bassins, on peut dire que la méthode CIEH sous-estime la valeur du débit de pointe.
- pour les bassins versants dont la surface est comprise entre 20 et  $200 \text{ km}^2$ , les deux méthodes donnent des résultats assez voisins.
- au delà de  $200 \text{ km}^2$ , seule la méthode du CIEH permet une estimation, mais celle-ci devrait être confirmée par des mesures de terrain.

#### 3.2. Ecoulement annuel

Le tableau 3.2 donne pour chaque bassin les volumes annuels écoulés (en millions de  $\text{m}^3$ ), en année médiane ( $F=0,5$ ), en année décennale sèche ( $F=0,9$ ), et en année décennale humide ( $F=0,1$ ), calculés à partir des coefficients d'écoulement annuel les plus probables (voir chapitre 1.2 concernant la méthodologie appliquée).

Ces valeurs ne doivent être considérées que comme des ordres de grandeur, compte tenu de l'incertitude inhérente au choix des coefficients d'écoulement, sur des bassins où on ne dispose d'aucune donnée expérimentale.

Tableau 3.1

BV n°	Surface km2	P10 mm	K	Pmoy. 10 mm	Kr10 %	Tb h	Tm mn	a	Qm10(R.A.) m3/s	Qm10(CIEH) m3/s
1	46	100	0.95	95	47	19	260	2.9	87	78
2	67	100	0.9	90	45	23	330	3	98	77
3	39	100	0.95	95	49	17.5	250	2.8	81	67
4	220	100	0.8	80	35	35	540	3	147	136
5	128	100	0.85	85	40	30	440	3	121	116
6A	7.4	100	1	100	57	13	170	2.6	23	14
6B	98	100	0.9	90	31	40	900	3	57	67
6C	8.5	100	1	100	56	15	200	2.6	23	17
7	9	100	1	100	65	8	110	2.6	53	31
8	4	90	1	90	59	9	120	2.6	17	7
9	235	92	0.8	74	35	35	540	3	145	183
10	130	92	0.85	78	40	30	440	3	113	145
11	82	92	0.9	83	40	25	360	3	91	156
12	66	92	0.9	83	30	10	135	3	137	119
13	21	92	1	92	35	7	90	2.5	67	78
14	930	87	-	-	-	-	-	-	-	396

P10 : pluie journalière ponctuelle de fréquence décennale

K : coefficient d'abattement

Pm10 : lame précipitée sur le bassin de fréquence décennale

Kr10 : coefficient de ruissellement décennal

Tb : temps de base

Tm : temps de montée

a : rapport du débit maximum sur le débit moyen

Qm10 : débit maximum de la crue d'étude décennale

Figure 3.1

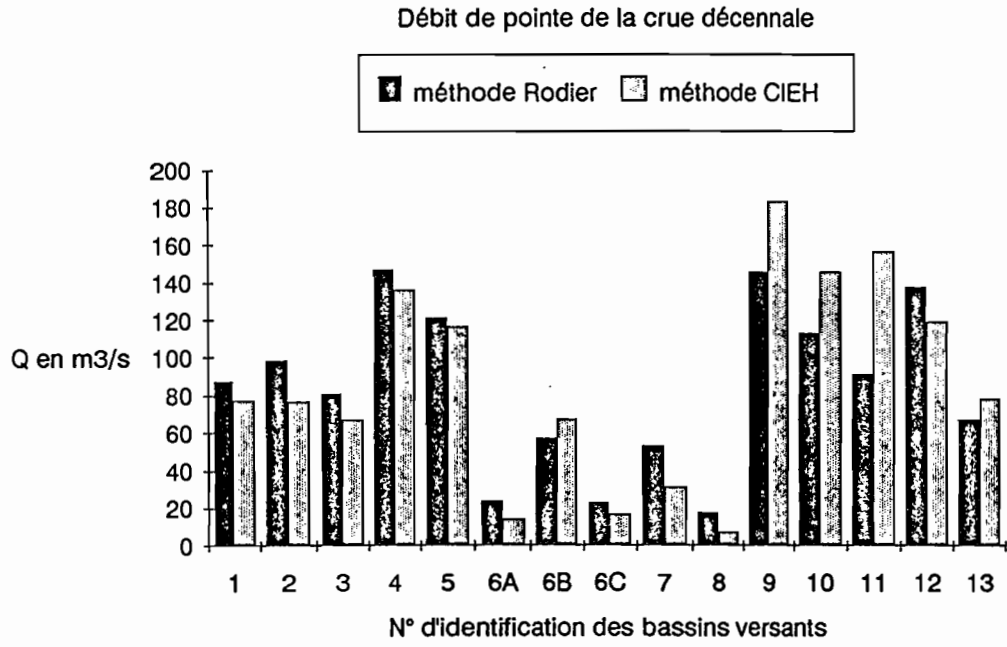


Figure 3.2

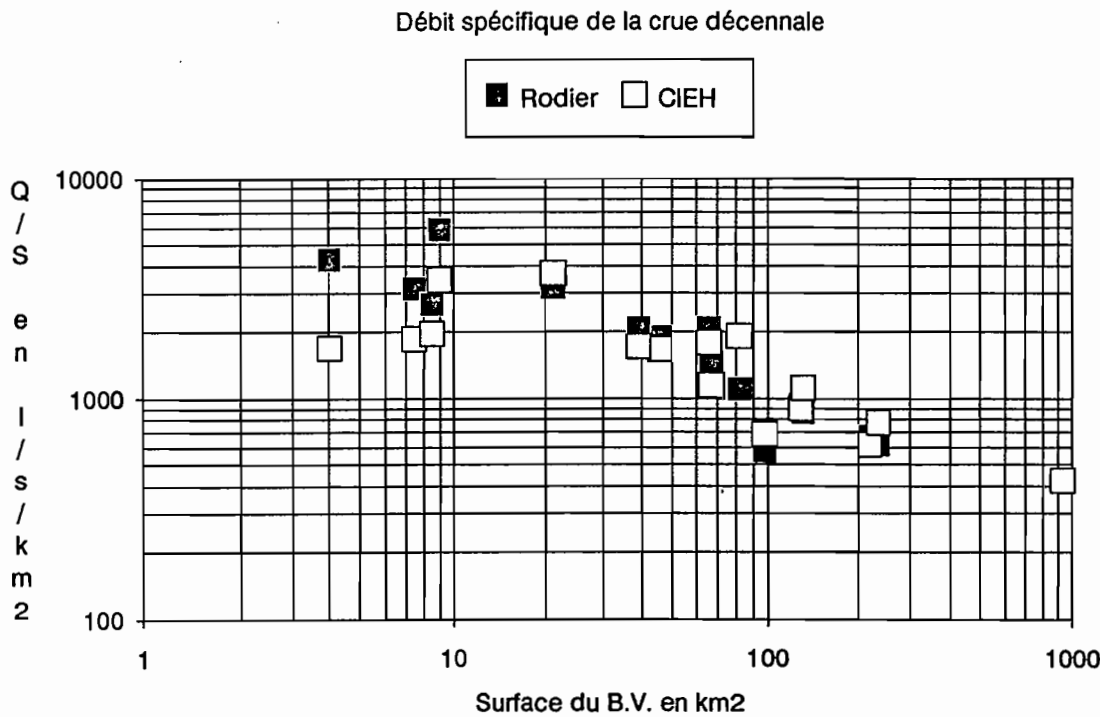


Tableau 3.2

BV n°	Surface km2	P(0.5) mm	P(0.1) mm	P(0.9) mm	Ke (0.5) %	Ke (0.1) %	Ke (0.9) %	Le (0.5) mm	Le (0.1) mm	Le (0.9) mm	Ve (0.5) Mm3	Ve (0.1) Mm3	Ve (0.9) Mm3
1	46	480	331	690	20	15	30	96	50	207	4.42	2.28	9.52
2	67	480	331	690	20	15	30	96	50	207	6.43	3.33	13.90
3	39	480	331	690	20	15	30	96	50	207	3.74	1.94	8.07
4	220	480	331	690	20	15	30	96	50	207	21.10	10.90	45.50
5	128	480	331	690	20	15	30	96	50	207	12.30	6.36	26.50
6A	7.4	480	331	690	27	20	38	130	66	262	0.96	0.49	1.94
6B	98	480	331	690	20	15	30	96	50	207	9.41	4.87	20.30
6C	8.5	480	331	690	27	20	38	130	66	262	1.10	0.56	2.23
7	9	480	331	690	27	20	38	130	66	262	1.17	0.60	2.36
8	4	647	462	882	28	21	40	181	97	353	0.72	0.39	1.41
9	235	683	540	850	20	14	30	137	76	255	32.20	17.90	60.00
10	130	683	540	850	20	14	30	137	76	255	17.80	9.83	33.20
11	82	683	540	850	12	7	20	82	38	170	6.72	3.10	13.90
12	66	683	540	850	12	7	20	82	38	170	5.41	2.49	11.20
13	21	683	540	850	20	12	30	137	65	255	2.87	1.36	5.36
14	930	573	412	733	2	1	5	11.5	4	37	10.70	3.72	34.10

P (F) : pluie annuelle (fréquence au dépassement)

Ke : coefficient d'écoulement moyen annuel

Le : lame écoulée annuelle

Ve : volume écoulé annuel



