

Line KONG A SIOU  
Mémoire de Master 2 BGAE recherche parcours *Eau et environnement (R2E)*

---

# Méthodologie de caractérisation et d'évaluation des débits d'étiages. Application au bassin du Bani (Mali)



Le Baoulé à Bougouni, mars 2008

Tuteurs : Luc FERRY et Gil MAHE

## **Remerciements**

*Je tiens tout d'abord à remercier vivement Eric Servat, directeur du Laboratoire Hydrosociences Montpellier et du Master R2E pour ses conseils avisés tout au long de ce master et pour son aide au cours de ce stage.*

*Merci à Gil Mahé, directeur de recherche à l'IRD Montpellier pour m'avoir encadré pendant ce stage, ses conseils ont été d'une aide précieuse.*

*Merci à Luc Ferry, directeur de recherche à l'IRD Bamako, d'une part pour m'avoir encadré avec attention, en particulier lors de mon séjour à l'IRD Bamako et d'autre part pour son accueil chaleureux.*

*Je remercie également Jean-Emmanuel Paturel, Nadine Muther, Alain Dezetter et toute l'équipe de l'IRD Bamako pour leur aide et leur accueil bienveillant lors cette première expérience en Afrique.*

*Pour leur bonne humeur et une extraordinaire ambiance de travail, merci à tous mes colocataires et amis rencontrés à Bamako : Roberta, Ousmane, Etienne, Cécile, Rémy, Bassa, Kévin, Agnès et Myriam.*

*Je voudrais aussi remercier Mathieu, Amélie, Victor, Christine, Yoann, Julien et Alexandre, stagiaires en M1 et M2 à la maison des sciences de l'eau pour les moments de franches rigolades à la pause de 17h et le « serrage de coude » en fin de stage.*

*Enfin, je ne sais plus comment dire merci à ceux qui m'apportent tant dans la vie en général : mes parents, Ludo et Marie.*

# SOMMAIRE

---

<b>I - INTRODUCTION.....</b>	<b>5</b>
<b>II - LE BASSIN DU BANI.....</b>	<b>6</b>
<i>II.1. Présentation générale du bassin versant .....</i>	<i>6</i>
II.1.1. Hydrographie et morphologie .....	6
II.1.2. Géologie et hydrogéologie .....	7
<i>II.2. Contexte climatique.....</i>	<i>9</i>
II.2.1. Généralités.....	9
II.2.2. Changement climatique en Afrique de l'Ouest .....	10
<i>II.3. Hydrologie.....</i>	<i>11</i>
<i>II.4. Relation pluie, débit, piézométrie.....</i>	<i>13</i>
<b>III - L'ETUDE DES ETIAGES : METHODES ET DONNEES .....</b>	<b>15</b>
<i>III.1. Généralités sur les étiages .....</i>	<i>15</i>
III.1.1. Etiage et sécheresse .....	15
III.1.2. Déroulement général des étiages.....	15
<i>III.2. Méthodologie de caractérisation des étiages.....</i>	<i>17</i>
III.2.1. Analyse des hydrogrammes .....	17
III.2.2. Débits spécifiques .....	17
III.2.3. Débits classés .....	18
III.2.4. Coefficients de tarissement .....	20
<i>III.3. Les données disponibles .....</i>	<i>22</i>
III.3.1. Stations hydrométriques et sous bassins versants .....	22
III.3.2. Qualité des données utilisées.....	27

<b>IV -RESULTATS .....</b>	<b>28</b>
<i>IV.1. Sous bassins de la Bagoé à Pankourou.....</i>	28
IV.1.1. Hydrogrammes et débits spécifiques.....	28
IV.1.2. Débits classés .....	31
IV.1.3. Coefficients de tarissement .....	34
<i>IV.2. Sous-bassins du Baoulé à Dioila.....</i>	35
IV.2.1. Hydrogrammes et débits spécifiques.....	35
IV.2.2. Débits classés .....	38
IV.2.3. Coefficient de tarissement.....	40
<i>IV.3. Les sous-bassins du Bani à Douna.....</i>	41
IV.3.1. Hydrogrammes et débits spécifiques.....	41
IV.3.2. Débits classés .....	43
IV.3.3. Coefficients de tarissement .....	45
<i>IV.4. Conclusion sur les résultats obtenus.....</i>	46
<i>IV.5. Relation débits – géologie.....</i>	47
IV.5.1. Hydrogrammes et débits spécifiques.....	49
IV.5.2. Débits classés .....	51
IV.5.3. Coefficients de tarissement .....	52
<b>V - CONCLUSION.....</b>	<b>54</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>56</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>59</b>

# LISTE DES FIGURES

---

Figure 1 : localisation (Picouet, 1999).....	7
Figure 2 : Carte géologique du bassin du Bani (Brunet-Moret et al, 1986) .....	8
Figure 3 : Pluviométrie moyenne annuelle sur la période 1971 – 1989, (Picouet 1999).....	9
Figure 4 : Variation des débits et des pluies entre 1951 et 1989 (Bamba et al. 1996) .....	10
Figure 5 : Evolution du coefficient de tarissement pour le Niger à Koulikoro et le Bani à Douna depuis 1950 (d’après Bamba et al. 1995).....	10
Figure 6 : Hydrogramme du Bani pour la période 1955 – 2001. ....	11
Figure 7 : hydrogramme du Bani à l’été sur la période 1955 – 2001 .....	12
Figure 8 : Ecarts centrés réduits des débits de janvier du Bani à Douna (barres claires), cumul .....	14
Figure 9 : Exemple de courbe des débits classés du Bani à Douna. Données journalières de 1966 à 1976.....	19
Figure 10 : Détermination du coefficient de tarissement à Douna pour l’été 1960 - 1961. Coefficients de tarissement journalier en fonction du temps calculés avec un pas de temps de 30j et avec un pas de temps de 10j. Détermination du « plateau ».....	21
Figure 11 : Sous-bassins versant du Bani à Douna .....	23
Figure 12 : Débits moyens mensuels pour les sous bassins de la Bagoé. Données mensuelles de Janvier à Juin sur 13 ans (1985 – 1993 ; 1996 – 1999). ....	29
Figure 13 : Débits spécifiques moyens mensuels pour les sous-bassins de la Bagoé. Données mensuelles de Janvier à Juin sur 13 ans (1985 - 1993 et 1996 – 1999) .....	30
Figure 14 : Courbes des débits classés pour les sous-bassins de la Bagoé à Pankourou. Données journalières de Janvier à Juin sur 13 ans (1985 – 1993 et 1996 – 1999).....	31
Figure 15 : Coefficients de tarissement pour les sous-bassins de la Bagoé de 1986 à 1998. ....	34
Figure 16 : Débits moyens mensuels pour les sous-bassins du Baoulé. Moyennes sur 14 ans (1984 – 1997) de Décembre à Mai. ....	35
Figure 17 : Débits spécifiques moyens mensuels sur 14 ans (1984 - 1997) de Décembre à Mai.....	36
Figure 18 : Pluies moyennes interannuelles de 1963 à 2000 (Auteur : P. Roudier, 2008).....	37
Figure 19 : Courbes des débits classés des sous-bassins de le Baoulé. Données journalières de Décembre à Mai sur 14 ans (1984 – 1997). ....	38
Figure 20 : Evolution des coefficients de tarissement pour les sous-bassins de le Baoulé de 1958 à 2007. ....	40
Figure 21 : Débits moyens mensuels de Janvier à Juin sur 16 ans (1976, 1977, 1985, 1987 à 1997, 2001 et 2003) pour les principaux sous bassins du Bani à Douna. ....	41
Figure 22 : Débits spécifiques moyens mensuels de Janvier à Juin et sur 15 ans (1976, 1977, 1985, 1987 à 1997, 2001 et 2003) pour les sous-bassins du Bani à Douna.....	42
Figure 23 : Débits classés pour les sous-bassins du Bani à Douna. Données journalières de Janvier à Juin sur 15 ans (1976, 1977, 1985, 1987 à 1997, 2001 et 2003).....	43
Figure 24 : Evolution des quantiles de la courbe des débits classés de Douna de 1962 à 2004. Indice = $(Q - Q_{moyen})/Q_{moyen}$ .....	45
Figure 25 : Evolution des coefficients de tarissement pour le Bani à Douna et ses principaux affluents de 1957 à 2006.....	46
Figure 26 : Carte géologique et sous-bassins versants du Bani (croquis géologique : Brunet-Moret et al. 1986). Les dolérites, granito-gneiss, micaschistes, roches vertes et schistes et quartzites peuvent, dans une première approche, être regroupés sous l’appellation « socle ». ....	48
Figure 27 : Débits moyens mensuels de Décembre à Mai sur 36 ans pour les sous-bassins géologiques (1958 – 1967 ; 1971 – 1973 ; 1975 - 1997). ....	49
Figure 28 : Débits spécifiques moyens mensuels sur 36 ans pour les sous-bassins géologiques. ....	50
Figure 29 : Courbes des débits classés pour les sous-bassins géologiques du Bani de Décembre à Mars sur 38 ans (1957 – 1967 et 1971 – 1997) .....	51
Figure 30 : Courbes des débits spécifiques classés pour les sous-bassins géologiques du Bani. De Décembre à Mars sur 38 ans (1957 – 1967 et 1971 – 1997) .....	51
Figure 31 : Coefficients de tarissement pour les sous-bassins géologiques du Bani.....	52
Figure 32 : Moyenne mobile sur 3 ans des coefficients de tarissement pour les sous-bassins géologiques. Coefficients de tarissement de Korodougou Marka et moyenne des coefficients de Korodougou Marka et de Douna intermédiaire. ....	53

# LISTE DES TABLEAUX

---

Tableau 1 : Variation interannuelle des débits d'étiage du Bani à Douna sur la période 1955-2001 hors années 1993, 1995 et 1998 à 2000.....	12
Tableau 2 : Présentation des indices issus de la courbe des débits classés.....	19
Tableau 3 : Stations utilisées, disponibilité des données (6 mois les plus secs pour chaque année) et pourcentage des données reconstituées. Les disponibilités des données en gras correspondent aux périodes communes pour le groupe de station considéré et les autres correspondent à chaque station. Les signes – signifient soustraction. ....	26
Tableau 4 : pourcentage du débit de Pankourou issu des sous-bassins de la Bagoé. Débits de Janvier à Juin sur 13 ans (1985 – 1993 et 1996 – 1999) : pourcentage du débit des sous-bassins de la Bagoé par rapport à Pankourou. ....	29
Tableau 5 : Indices (quantiles) issus de la courbe des débits classés et de la courbe des débits spécifiques classés pour les sous bassins de la Bagoé. Unités : m <sup>3</sup> /s pour les débits et l/s/km <sup>2</sup> pour les débits spécifiques. Données journalières de Janvier à Juin sur 13 ans (1985 – 1993 et 1996 – 1999).....	33
Tableau 6 : Nombre de jours secs et de jours déficitaires pour la Bagoé et ses sous-bassins versants. Données journalières de Janvier à Juin sur 13 ans (1985 – 1993 et 1996 – 1999).....	33
Tableau 7 : Pourcentage du débit des sous-bassins du Baoulé par rapport à Dioila .....	35
Tableau 8 : Indices (quantiles) issus de la courbe des débits classés et de la courbe des débits spécifiques classés pour les sous bassins de le Baoulé. Unités : m <sup>3</sup> /s pour les débits et l/s/km <sup>2</sup> pour les débits spécifiques. Données journalières de Décembre à Mai sur 14 ans (1984 – 1997). ....	39
Tableau 9 : Nombre de jours secs et de jours déficitaires pour le Baoulé et ses sous-bassins versants (14 années d'observation, données journalières de Décembre à Mai et de 1984 à 1997).....	39
Tableau 10 : Pourcentage du débit de chaque sous-bassin par rapport à Douna.....	41
Tableau 11 : Jours secs et jours déficitaires pour les sous-bassins du Bani à Douna. Sommes et moyenne sur 16 ans (1976, 1977, 1985, 1987 à 1997, 2001 et 2003). ....	42
Tableau 12 : Indices issus de la courbe des débits classés et de la courbe des débits spécifiques classés pour les principaux sous bassins du Bani à Douna. Unités : Q en m <sup>3</sup> /s et Q spécifique en l/s/km <sup>2</sup> . Données journalières de Janvier à Juin sur 15 ans (1976, 1977, 1985, 1987 à 1997, 2001 et 2003).....	44
Tableau 13 : Présentation des sous-bassins grès et socle : superficie et géologie et période d'observation. ....	47
Tableau 14 : Pourcentage du débit des sous-bassins grès et socle par rapport à Douna. Moyenne sur 36 ans (1958 – 1967 ; 1971 – 1973 ; 1975 - 1997).....	49
Tableau 15 : Jours secs et jours négatifs pour les sous-bassins géologiques. Moyenne sur 36 ans (1958 - 1967; 1971 - 1973; 1975 - 1997).....	49

## I - INTRODUCTION

Ce travail de Master 2 s'intègre dans le projet ANR RESSAC (vulnérabilité des Ressources en Eau Superficielle au Sahel aux évolutions Anthropiques et Climatiques) qui vise à étudier les conséquences des changements climatiques et des activités humaines sur la vulnérabilité des ressources en eau dans la zone sahélienne. Le projet se concentre sur le Bani, principal affluent du fleuve Niger au Mali.

85% du bassin du Bani à Douna est situé au Mali. La confluence entre le Niger et le Bani se trouve au centre du delta intérieur du Niger, une vaste plaine inondable qui constitue un centre d'activité (agricole en particulier) vital pour le Mali. A l'entrée du delta, les deux cours d'eau drainent des bassins versants de superficies comparables (environ 102 000 km<sup>2</sup> pour le Bani à Douna, 141 000 km<sup>2</sup> pour le Niger à Ké Macina). Par conséquent, toute perturbation observée au niveau du bassin du Bani pourra avoir des répercussions sur le delta intérieur, l'aval du delta et les activités rattachées à ces zones. Dans le cadre de cette étude, on pense particulièrement au changement climatique survenu en 1970 en Afrique de l'Ouest. De plus, le Mali est actuellement en phase de croissance à la fois économique et démographique avec une augmentation de l'urbanisation. Ceci engendre une augmentation de la pression sur les ressources en eau (avec la construction d'ouvrages tels que les seuils de Talo et de Djenné).

Dans ce contexte, l'étude de l'hydrologie passe nécessairement par une étude approfondie des étiages. En effet, la gestion des ouvrages, le développement des activités économiques (pêche, agriculture) et l'alimentation en eau potable doivent être faits en fonction des débits les plus faibles de l'année.

L'objectif de ce stage est double. D'une part il s'agit d'établir une méthodologie de traitement des données hydrologiques d'étiage. D'autre part on tentera, à l'aide de cette méthodologie, de caractériser les débits d'étiages du Bani et ainsi comprendre le fonctionnement de ces étiages : d'où provient l'eau des étiages ? Quels sont les facteurs influençant ces étiages ? Parallèlement on tentera de mettre en évidence les conséquences de la sécheresse de 1970 sur le bassin versant.

La démarche suivie est organisée en deux phases. Tout d'abord une phase de test de plusieurs méthodes de traitement des données, qui permettra de choisir les méthodes les plus adéquates et éventuellement de les adapter pour qu'elles s'appliquent au mieux au bassin du Bani. Durant cette phase, seules les données hydrologiques des stations les plus fiables et les plus importantes ont été utilisées. Ce choix des données permet d'une part de travailler avec des données correctes et d'autre part d'avoir une première idée des résultats que l'on peut attendre sur le bassin en général. Dans un deuxième temps, on pourra appliquer les méthodes retenues aux autres stations et analyser les résultats obtenus afin de répondre aux problématiques posées, à savoir la compréhension du fonctionnement des étiages et la caractérisation des conséquences de la sécheresse de 1970.

Ce mémoire est organisé en 3 parties. Suite à cette introduction, une première partie sera consacrée au bassin du Bani. La seconde partie traitera des différentes méthodes que nous avons pu utiliser, leur description et les résultats des tests effectués. Enfin la troisième partie présentera les différents résultats obtenus avec ces méthodes ainsi que leur analyse.

## II - LE BASSIN DU BANI

### *II.1. Présentation générale du bassin versant*

#### II.1.1. Hydrographie et morphologie

Le Bani est formé par les rivières Baoulé et Bagoé qui prennent naissance en Côte d'Ivoire. Il reçoit ensuite son principal affluent, le Banifing de Kouoro en rive droite avant d'arriver à la station de Douna et d'entrer dans le delta intérieur. Dans le delta, le Bani reçoit le Banifing de San puis le Yamé de Bandiagara et arrive à Mopti où il se jette dans le fleuve Niger. (Voir carte Figure 1)

Il s'agit d'un bassin peu accidenté : Le Baoulé et la Bagoé prennent leur source dans une série de collines qui séparent le Mali et la Côte d'Ivoire (Brunet-Moret et al., 1986). La Bagoé prend sa source à 600m d'altitude et descend très rapidement à 350m. Le Baoulé prend sa source à 450m d'altitude. Ensuite, les deux cours d'eau s'écoulent sur les plateaux à faible pente du sud du Mali dont l'altitude varie entre 280 et 400m. Le Bani arrive ensuite dans la cuvette qui constitue le delta intérieur de Niger. Le seul relief important de cette zone est le plateau de Bandiagara (790m) au Nord-Est du bassin.

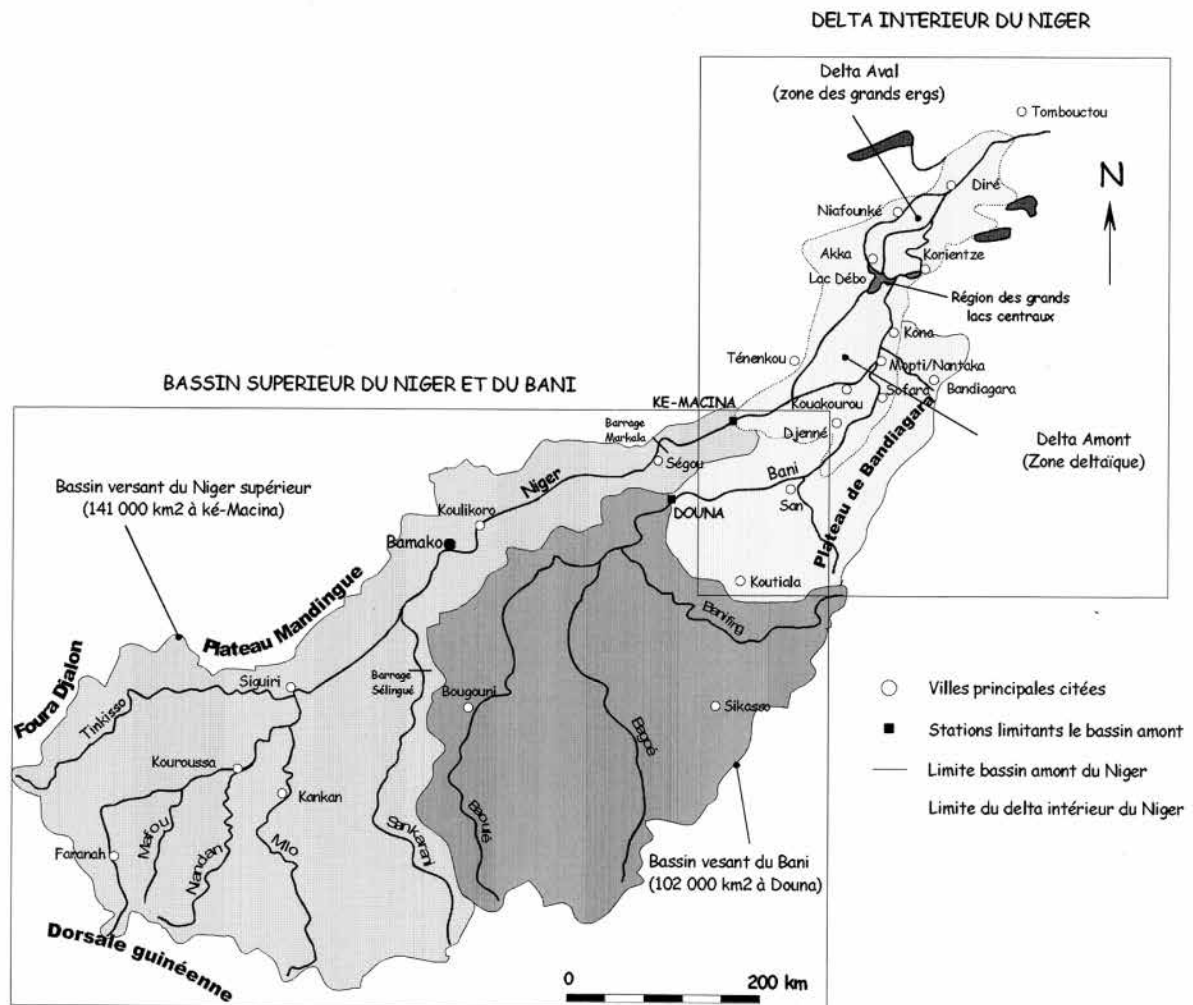


Figure 1 : localisation (Picouet, 1999)

## II.1.2. Géologie et hydrogéologie

Du Sud au Nord, on rencontre les formations suivantes (carte Figure 2):

- **Le socle birimien.** Il s'agit de formations cristallines plus ou moins métamorphisées et plissées. Elles sont recouvertes par une couche latéritique de 40 à 50 m d'épaisseur.
- **Les grès cambrien et ordoviciens.** Horizontaux et tabulaires, ils sont également recouverts d'une couche latéritique dont l'épaisseur diminue vers l'aval du bassin versant.
- **Les formations continentales récentes :** sables, argiles, limons...

Les contraintes tectoniques qui ont affecté ces formations ont permis le développement d'un réseau de fractures, principalement orientées ouest-nord-ouest et Est-nord-est. De cette géologie résulte le contexte hydrogéologique de la région :

- **2 aquifères fissurés :** l'un correspond au socle granitique et métamorphique sur lequel reposent les bassins des rivières Baoulé et Bagoé. Le second correspond aux grès présents dans la région de San, au niveau du moyen Bani et des plateaux Dogons (plateau de Bandiagara).
- **1 aquifère de type généralisé** localisé plus à l'aval, à l'entrée et au niveau du delta intérieur.

Globalement, les aquifères ont une perméabilité assez faible.

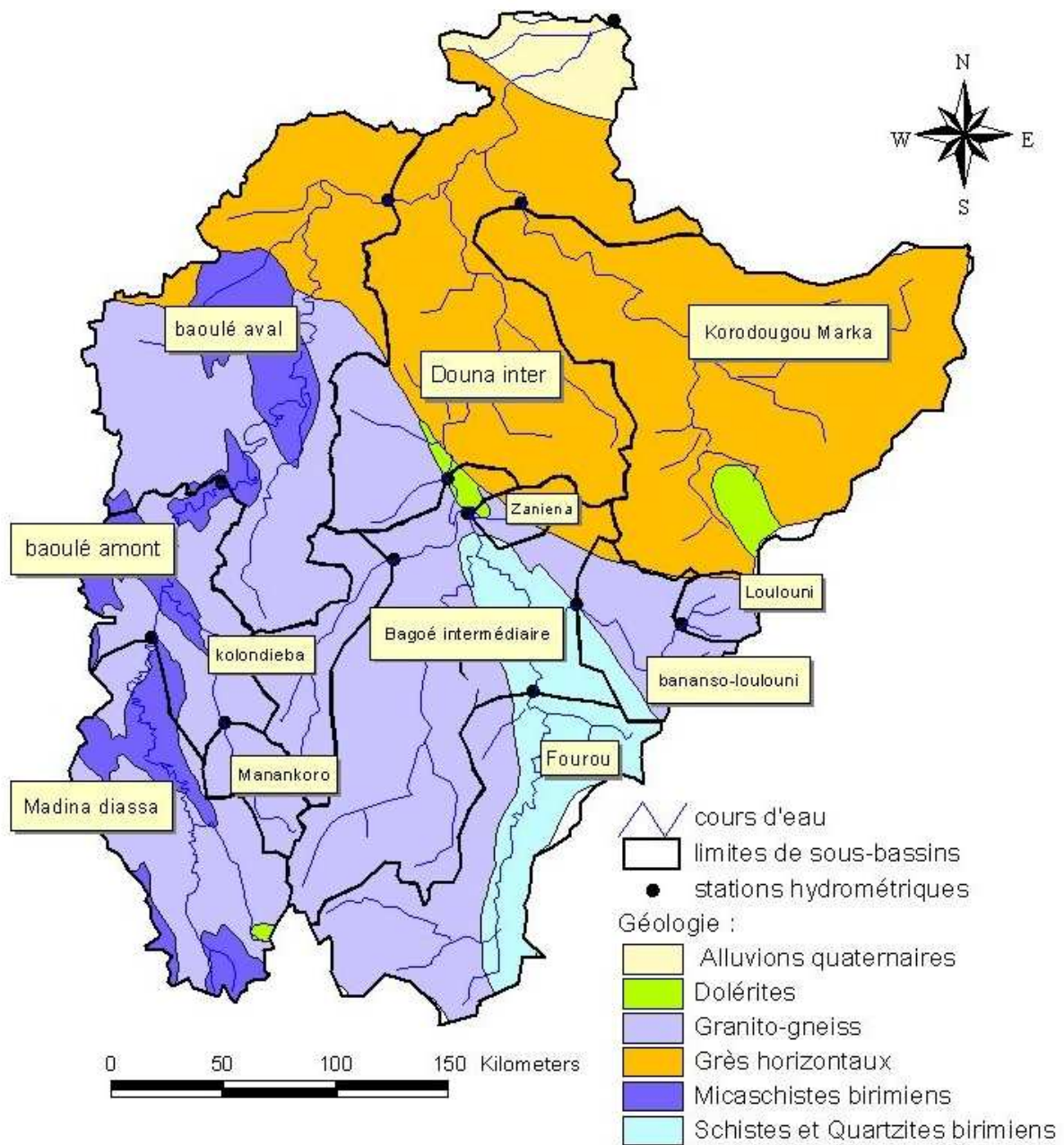


Figure 2 : Carte géologique du bassin du Bani (Brunet-Moret et al, 1986)

## II.2. Contexte climatique

### II.2.1. Généralités

Le climat est tropical, avec une saison sèche dominée par l'Harmattan (vent chaud et sec provenant du Sahara) et une saison humide dominée par la Mousson qui amène de l'air humide et instable, engendrant des précipitations.

La pluviométrie diminue du Sud au Nord du Mali, si bien que le bassin du Bani se trouve partagé entre 3 zones climatiques :

- la zone soudanienne, caractérisée par une saison sèche plus courte (5 à 6 mois entre Novembre et Avril) et surtout des précipitations annuelles dépassant les 1200 mm et parfois même les 1500 mm. Cette zone s'étend depuis l'amont du bassin jusqu'à l'isohyète moyen 1200 mm.
- La zone soudano sahélienne, qui correspond à la zone située entre les isohyètes 1200 mm et 750 mm. C'est une zone de transition entre deux climats qui est susceptible d'être très sensible aux aménagements du territoire qui peuvent devenir des facteurs favorisant une dégradation durable des sols dans cette zone.
- La zone sahélienne, correspondant aux régions recevant moins de 750 mm/an

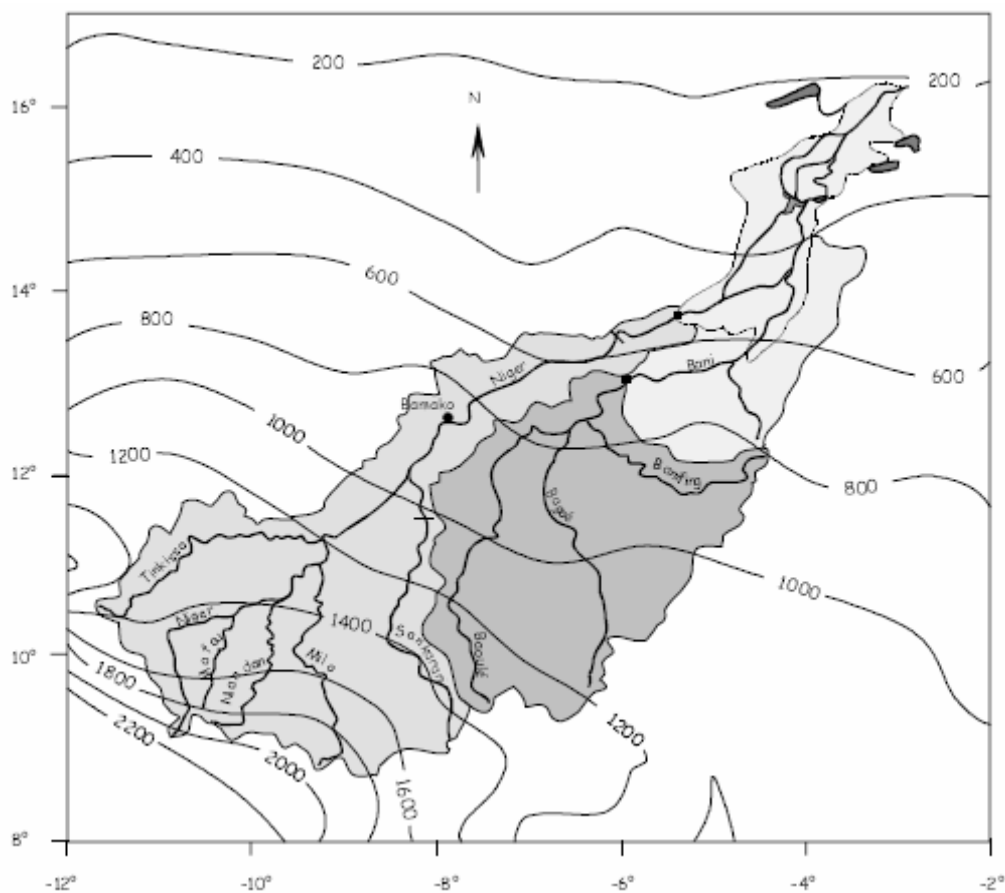


Figure 3 : Pluviométrie moyenne annuelle sur la période 1971 – 1989, (Picouet 1999)

## II.2.2. Changement climatique en Afrique de l'Ouest

De nombreuses études (Paturel et al. 1996 ; Servat et al. 1997 ; Mahé et Olivry 1995 ; Mahé et L'Hôte 1995 ; Roche et al. 1975 ; Servat et al. 1998) montrent qu'à partir de 1970, l'Afrique de l'Ouest a été soumise à un déficit pluviométrique exceptionnel. Bamba et al. (1996), ont mis en évidence ces variations climatiques pour le Bani et 4 autres affluents du fleuve Niger à savoir le Sankarani, le Tinkisso, le Milo et le Niandan. De 1951 à 1970, les pluies et les débits sont toujours supérieurs à la moyenne interannuelle (1113 mm) et à partir de 1971 les pluies et les débits deviennent tous inférieurs à cette moyenne (voir Figure 4). Le Bani est l'affluent du Niger au Mali pour lequel cette variation est la plus marquée. De plus, on observe une variation plus importante pour les débits que pour les pluies.

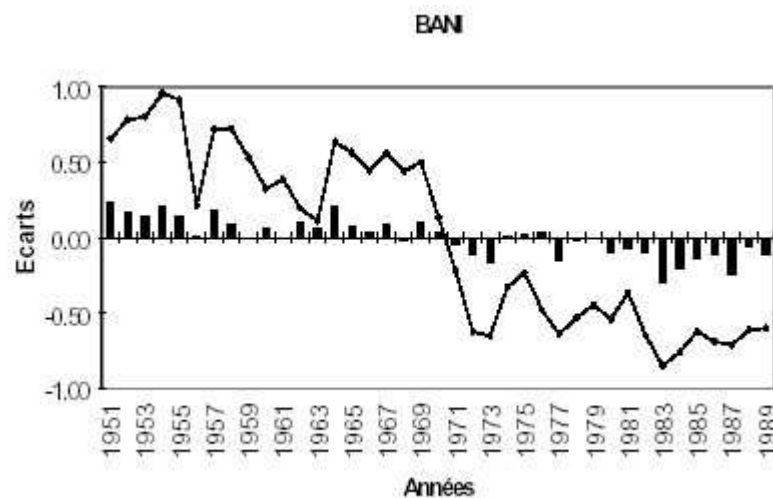


Figure 4 : Variation des débits et des pluies entre 1951 et 1989 (Bamba et al. 1996)

La Figure 5 montre la variation du coefficient de tarissement pour le Bani et pour le Niger. Le coefficient de tarissement indique la vitesse de vidange de la nappe. Plus il est fort, plus la vitesse de vidange est élevée. Selon Olivry (1996), l'augmentation de ce coefficient à partir des années 1970 traduit un appauvrissement significatif et durable des nappes d'eau souterraines. Cet appauvrissement serait à l'origine du décalage entre le déficit de pluie et la diminution bien plus importante des débits.



Figure 5 : Evolution du coefficient de tarissement pour le Niger à Koulikoro et le Bani à Douna depuis 1950 (d'après Bamba et al. 1995)

### II.3. Hydrologie

Le Bani connaît une crue annuelle qui débute fin juillet et dure jusqu'en mi-décembre. Sur la figure suivante, on remarque une très forte variabilité interannuelle des débits : pour l'année la plus sèche, le débit au maximum de crue n'atteint pas les 500 m<sup>3</sup>/s et pour l'année la plus humide il atteint quasiment 3 000 m<sup>3</sup>/s.

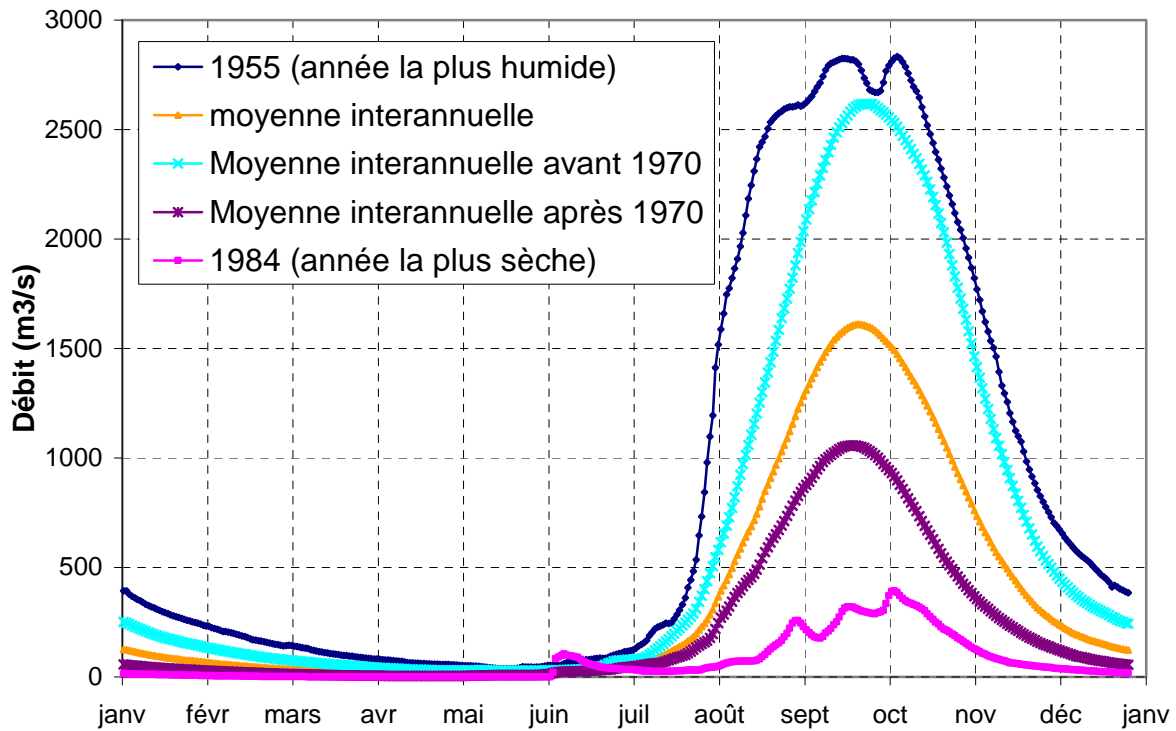


Figure 6 : Hydrogramme du Bani pour la période 1955 – 2001<sup>1</sup>.

La **Figure 7** permet de mieux visualiser les débits d'étiage pour les mêmes séries temporelles. On s'aperçoit que les débits d'étiage ont également une variabilité interannuelle importante.

<sup>1</sup> Par manque de données, les années 1993, 1995, 1998 à 2000 n'ont pas été prises en compte dans les moyennes interannuelles

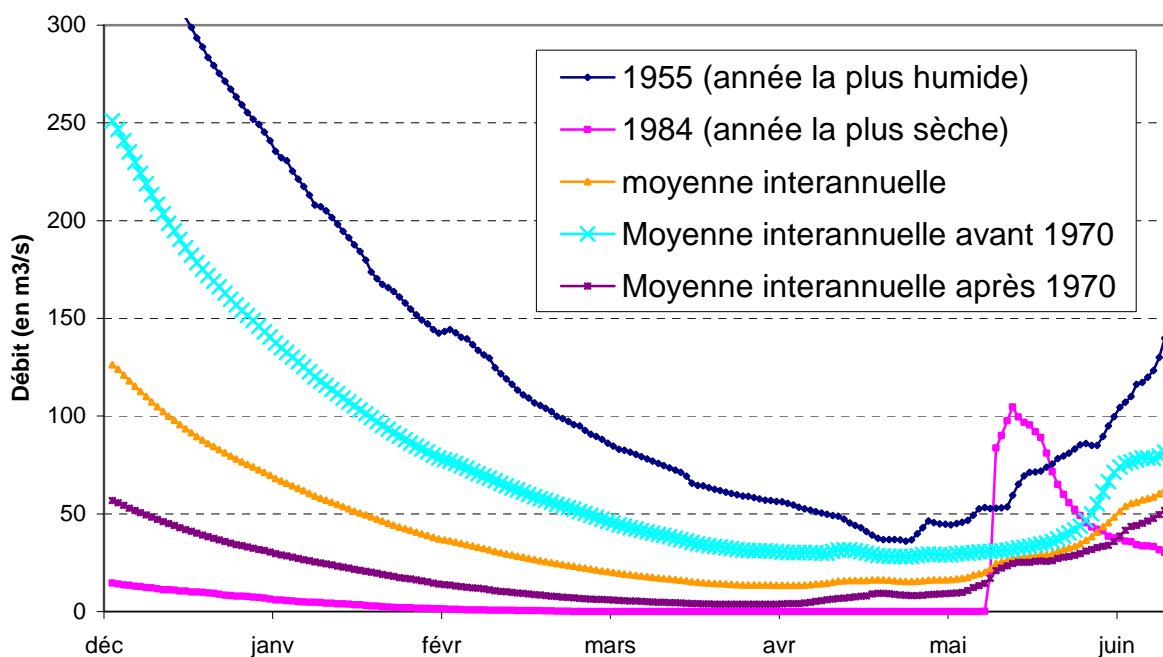


Figure 7 : hydrogramme du Bani à l'étiage sur la période 1955 – 2001<sup>2</sup>

Dans le tableau ci-dessous, on a reporté les valeurs de débits moyens à la date du maximum de crue et à celle du débit minimum d'étiage. On a ensuite calculé la différence entre les débits avant et après 1970 et exprimé cette différence en pourcentage de la moyenne interannuelle sur l'ensemble de la série. Il apparaît que les débits d'étiage après 1970 ont diminué de 196% par rapport à la moyenne interannuelle. Les débits d'étiage ont donc été bien plus affectés par le changement climatique que les débits de crue.

	25 septembre (crue)	30 avril (étiage)
Moyenne 1955/2001	1 610 m <sup>3</sup> /s	13 m <sup>3</sup> /s
Avant 1970	2 620 m <sup>3</sup> /s	30 m <sup>3</sup> /s
Après 1970	1 050 m <sup>3</sup> /s	4 m <sup>3</sup> /s
Variation avant/après 1970 en % de la moyenne 1924/2001	97 %	196 %

Tableau 1 : Variation interannuelle des débits d'étiage du Bani à Douna sur la période 1955-2001 hors années 1993, 1995 et 1998 à 2000.

Le bilan hydrologique dans un bassin versant est de type :

$$P = E + Q + \Delta S$$

Avec

P la précipitation, Q le débit, E l'évapotranspiration et  $\Delta S$  la variation du stock.

<sup>2</sup> Par manque de données, les années 1993, 1995, 1998 à 2000 n'ont pas été prises en compte dans les moyennes interannuelles

Les différents composants du bilan hydrologique reflètent les processus hydrologiques qui opèrent dans le bassin versant. Les variations de ces composants indiquent donc des changements dans les processus et ceux-ci nous donnent des informations concernant le développement de la sécheresse. Concrètement, la diminution des précipitations et l'augmentation de l'évapotranspiration potentielle sont le plus souvent à l'origine des sécheresses hydrologiques. Pour autant il n'existe pas de lien direct entre ces deux variables climatiques et la sécheresse hydrologique. Le cycle hydrologique met en relation les écoulements souterrains et de surface, les sols, l'évapotranspiration et la pluie. On comprend donc que le lien direct entre la modification de l'un de ces paramètres et le développement de la sécheresse ne peut être établi puisque tous les paramètres sont liés entre eux. (Tallaksen et al., 2003)

Le paragraphe suivant illustre les mécanismes généraux auxquels on peut s'attendre en cas de modification d'une des variables du bilan hydrologique.

#### Effet d'un déficit de précipitation sur le bilan hydrologique :

Le déficit de précipitation implique une diminution de l'humidité du sol. L'impact sur le bilan hydrologique est différent en saison sèche et en saison humide :

- en saison sèche :

Habituellement, l'évapotranspiration potentielle n'est pas satisfaite pendant cette saison. La diminution de l'eau stockée dans le sol va réduire encore la valeur de l'évapotranspiration. Mais surtout cela va avoir un effet négatif sur la biomasse qui pourra moins bien se développer. C'est alors le début d'une sécheresse agricole. Le stress hydrique créé pour les plantes va les mettre en compétition ce qui pourra, à terme, aboutir à la disparition d'espèces rares. On atteint alors une sécheresse écologique.

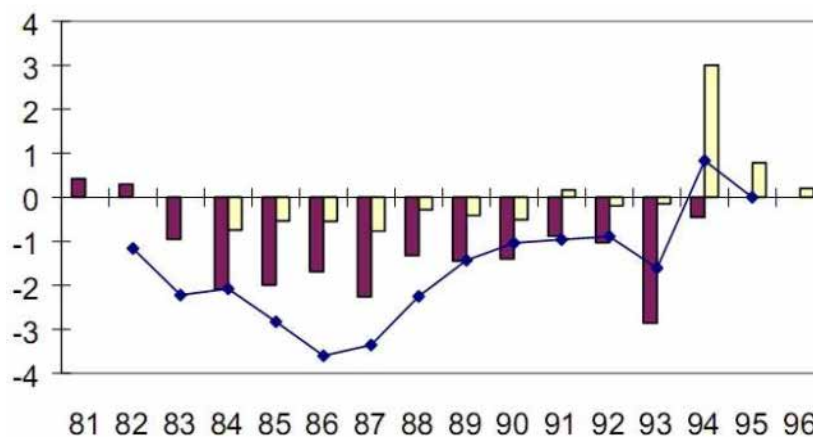
Cependant, le manque d'eau étant récurrent pendant cette période, cela conduit rarement à une sécheresse hydrologique.

- en saison humide

A cette saison l'évapotranspiration potentielle est en général satisfaite. Par conséquent, si l'on conserve une évapotranspiration potentielle satisfaite, c'est donc l'humidité des sols qui va diminuer. Cela implique une diminution de la recharge des eaux souterraines. Comme l'eau des étiages provient généralement des eaux souterraines, une sécheresse hydrologique est à craindre.

## ***II.4. Relation pluie, débit, piézométrie***

Le calcul des lames précipitées sur le bassin depuis 1924 montre que si la diminution des pluies depuis 1970 est de 30% par rapport à la moyenne interannuelle, au même moment, les débits diminuent de 84%. (Mahé et al. 1998, voir Figure 8) Il est donc nécessaire, pour mieux comprendre le fonctionnement du bassin, de s'intéresser aux relations qui peuvent exister entre le niveau des nappes et les eaux de surface.



**Figure 8 : Ecartés centrés réduits des débits de janvier du Bani à Douna (barres claires), cumul interannuel des écartés centrés réduits des précipitations annuelles sur le bassin (barres sombres), et cumul interannuel des écartés centrés réduits des amplitudes annuelles de fluctuation de niveau moyen de la nappe (courbe), de 1981 à 1996 – Mahé et al. 1998**

Mahé et al. (2000) ont analysé les niveaux piézométriques mesurés dans 27 puits (dont 20 dans le bassin du Bani et 7 autres plus éloignés mais dans les mêmes formations aquifères et soumis à des conditions climatiques similaires au bassin du Bani). Ils ont constaté que tous les puits avaient un niveau piézométrique minimal supérieur à la cote 0 de l'échelle limnimétrique du Bani à Douna, ce qui signifie que, à un moment donné de l'année (voire la majorité du temps), tous les puits sont potentiellement en charge par rapport au Bani. De plus, les variations du niveau des nappes et les variations du débit du Bani sont bien corrélées. A l'issue de cette étude, les auteurs ont pu conclure qu'il y a une relation entre la diminution généralisée du niveau des nappes sur le bassin et la sévérité exceptionnelle des étiages entre 1981 et 1995. De plus, il semble que des échanges rapides se produisent entre la nappe et les eaux superficielles puisqu'en 1994, le déstockage des nappes dans la même année hydrologique a été très important. Un déstockage plus lent apparaît également dans les 2 années suivantes mais il est nettement moins marqué. Au bout de deux ans l'effet de la recharge a complètement disparu.

La relation eau de surface - eau souterraine apparaît donc relativement complexe avec des échanges rapides. Cependant les processus régissant ces échanges restent mal connus.

## III - L'ETUDE DES ETIAGES : METHODES ET DONNEES

### III.1. Généralités sur les étiages

#### III.1.1. Etiage et sécheresse

##### **Notion d'étiage :**

Contrairement aux sécheresses, les étiages sont des phénomènes saisonniers et qui font partie du régime d'écoulement de tous les cours d'eau. Un étiage est constitué des débits les plus faibles d'une année hydrologique. Il est donc à relier avec la saisonnalité : en temps normal, ils apparaissent au(x) même(s) moment(s) de l'année. L'eau des étiages provient essentiellement des eaux souterraines ou de l'eau stockée dans les lacs.

En hydrologie des étiages, plusieurs caractéristiques sont utilisées telles que : la variabilité des débits en l'absence de pluies, la durée, la contribution relative des étiages dans les hydrogrammes par rapport au débit total (Smakhtin, 2001). Ces caractéristiques traitent de l'aspect « temporel » des étiages. La composante « spatiale » est étudiée par l'intermédiaire de la distribution régionale des caractéristiques de l'étiage. Il s'agit d'estimer ces paramètres sur l'ensemble du bassin, en particulier dans les endroits où l'on dispose de peu ou pas de données. Les deux composantes (spatiale et temporelle) sont étroitement corrélées et leur étude nécessite de comprendre et de prendre en compte d'une part des facteurs physiques tels que le climat, la topographie, la géologie, les sols...et d'autre part les effets issus de l'activité humaine.

##### **Notion de sécheresse :**

La sécheresse est intimement liée à un ou des phénomènes naturels « exceptionnels », par exemple une diminution anormale des précipitations ou encore un étiage particulièrement long ou sévère. Il existe plusieurs types de sécheresses : hydrologique, météorologique, agricole...

De manière générale, la sécheresse hydrologique se caractérise par la diminution du niveau piézométrique, du débit des cours d'eau et du stockage. Elle peut durer une ou plusieurs années successives et son extension géographique est souvent importante ce qui en fait un phénomène d'échelle régionale (Smakhtin, 2001). Chaque événement sec peut être caractérisé par sa durée, sa sévérité (déficit du volume écoulé/durée), sa période de retour et son extension spatiale. (Tallaksen et al., 2003). La sévérité de la sécheresse est influencée par les facteurs climatiques essentiellement mais les activités humaines peuvent également jouer un rôle. La première cause de sécheresse hydrologique est le déficit de précipitation (sécheresse météorologique). Le déficit d'eau se propage ensuite dans le cycle hydrologique et fait apparaître différents types de sécheresse.

#### III.1.2. Déroulement général des étiages

Lors des décrues, la diminution du débit peut être expliquée par deux types de phénomènes (Billon, 1985) :

- la décroissance naturelle du débit

- les influences externes, qui comprennent en particulier : les variations de précipitations et les causes anthropiques (gestion d'ouvrages de retenue, de pompes...).

### ➤ **Processus naturels**

#### **Apports aux débits d'étiage**

La plupart du temps, les débits d'étiage sont soutenus par la résurgence de l'eau souterraine. Pour cela, il faut que le cours d'eau recoupe la surface piézométrique de la nappe. Il faut donc que celle-ci ait été suffisamment rechargée pendant la saison humide. Une autre possibilité de résurgence est que si de l'eau circule dans les fissures de la zone non saturée avec une composante latérale forte, elle pourra à un moment donné recouper le cours d'eau avant même d'avoir rejoint la nappe (Smakhtin, 2001). Ce type de phénomène se produit plus facilement sur des bassins versants à forte pente (ce qui n'est pas le cas du Bani). Certains auteurs (Anderson et Burt, 1980) mentionnent également le drainage du sol c'est-à-dire les écoulements hypodermiques comme soutien aux étiages. Comme nous allons le voir, dans le cas du Bani, les processus qui régissent le soutien des étiages sont très mal connus.

#### **Pertes pour les débits d'étiages**

Les pertes en eau pour l'écoulement de surface en saison sèche peuvent provenir de :

- l'évaporation directe des eaux de surface
- évapotranspiration
- l'infiltration : recharge des aquifères et infiltration vers des nappes alluviales lorsque le lit de la rivière est formé de matériel non consolidé (alluvions)

### ➤ **Facteurs anthropiques**

#### **Action de l'homme sur les étiages**

- Pompage dans les nappes : induit la diminution de la piézométrie et donc une diminution des chances pour l'eau souterraine de ré-émerger.
- Prélèvements directement dans la rivière
- Drainage artificiel par des sols cultivés ou des sols imperméabilisés (urbanisation) qui conduisent plus rapidement l'eau à l'exutoire.
- Modifications de la végétation, ce qui modifie l'évapotranspiration
- Reforestation, en particulier à visée commerciale. Cela a plusieurs conséquences : augmentation de l'interception par la canopée, augmentation de la transpiration par les arbres, perturbation de la structure du sol pouvant affecter l'infiltration (Smakhtin, 2001). Cependant le bassin du Bani ne semble pas être touché par ce type de pratiques.
- La mise en place de petits ouvrages destinés à la protection des sols (cordons pierreux, diguettes, haies végétalisées). Placés perpendiculairement à la pente, ils permettent de conserver le sol. Ils favorisent également l'infiltration (en particulier dans le cas des haies d'Andropogons)
- La reconquête des sols dégradés (encroûtés) qui consiste à creuser des trous dans la croûte qui rend le sol imperméable pour y déposer des graines ou des arbustes.

## **Impact des aménagements hydrauliques (barrages, digues...) :**

Selon leurs caractéristiques, ces aménagements peuvent avoir des effets très différents sur les débits d'étiage. Quoi qu'il en soit, leur influence est loin d'être négligeable. Dans le cas de digues et de barrages ne comportant pas de vanne, l'écoulement à l'étiage peut être stoppé. A l'inverse pour des aménagements comportant des vannes et en particulier les barrages équipés de centrales hydroélectriques, le débit d'étiage peut être soutenu par les lâchers d'eau en saison sèche.

Hassane et al. (2002) ont étudié l'impact du barrage de Sélingué (situé sur le Sankarani, affluent important du Niger) sur la crue du Niger, en particulier dans le delta intérieur. Ils en ont conclu que l'impact du barrage sur les débits d'étiage était très important. En effet, pendant l'étiage, le pourcentage des eaux du Niger à Koulikoro provenant du barrage de Sélingué approche les 100%. Il s'agit d'un barrage de .taille considérable, il n'existe pour le moment pas d'aménagement de cette ampleur sur le Bani.

### ***III.2. Méthodologie de caractérisation des étiages***

Il existe un grand nombre de méthodes permettant l'étude des débits d'étiages. Il s'agit pour la plupart de traitements statistiques des séries de données. Nous présentons ici les différentes méthodes que nous avons pu utiliser sur le Bani, en partant de la méthode de traitement la plus simple jusqu'à la méthode la plus élaborée.

#### **III.2.1. Analyse des hydrogrammes**

La simple observation de l'hydrogramme permet de définir pour chaque station la période d'étiage à considérer pour les autres méthodes. On effectue également un travail de comparaison entre les stations. Enfin, on calculera le nombre de jours secs (nombre moyen annuel en particulier)

Il est possible de générer des séries chronologiques de débits en effectuant des opérations entre les séries existantes : Elles correspondront à des sous bassins versants intermédiaires entre les stations. Ainsi, on pourra connaître le débit provenant de chaque « bassin intermédiaire ». Par exemple la série intermédiaire calculée comme suit permet de déduire le débit provenant de la portion de bassin versant située entre Dioila et Bougouni.

$$Q_{\text{intermédiaire}} = Q_{\text{dioila}} - Q_{\text{bougouni}}$$

Ces séries générées seront traitées de la même façon que les autres séries. En plus des jours secs, des jours « négatifs » peuvent apparaître. Ils représentent les pertes (infiltration, évaporation, prélèvements) qui se produisent entre les stations. Ces jours négatifs seront donc comptabilisés à part.

#### **III.2.2. Débits spécifiques**

Le débit spécifique est un débit par unité de surface. Il représente le débit « produit » par unité de surface du bassin considéré. On le calcule en divisant le débit par la superficie du bassin drainé à la station considérée. Les valeurs obtenues sont en l/s/km<sup>2</sup>.

Cette variable s'affranchit de la surface du bassin versant ce qui permet la comparaison entre bassins versants de tailles différentes.

### III.2.3. Débits classés

Pour construire les courbes des débits classés, le principe est le suivant : on classe les débits par ordre croissant, et pour chaque débit on calcule la fréquence de dépassement  $1 - q_i$  :

$$1 - q_i = 1 - \frac{i}{N + 1}$$

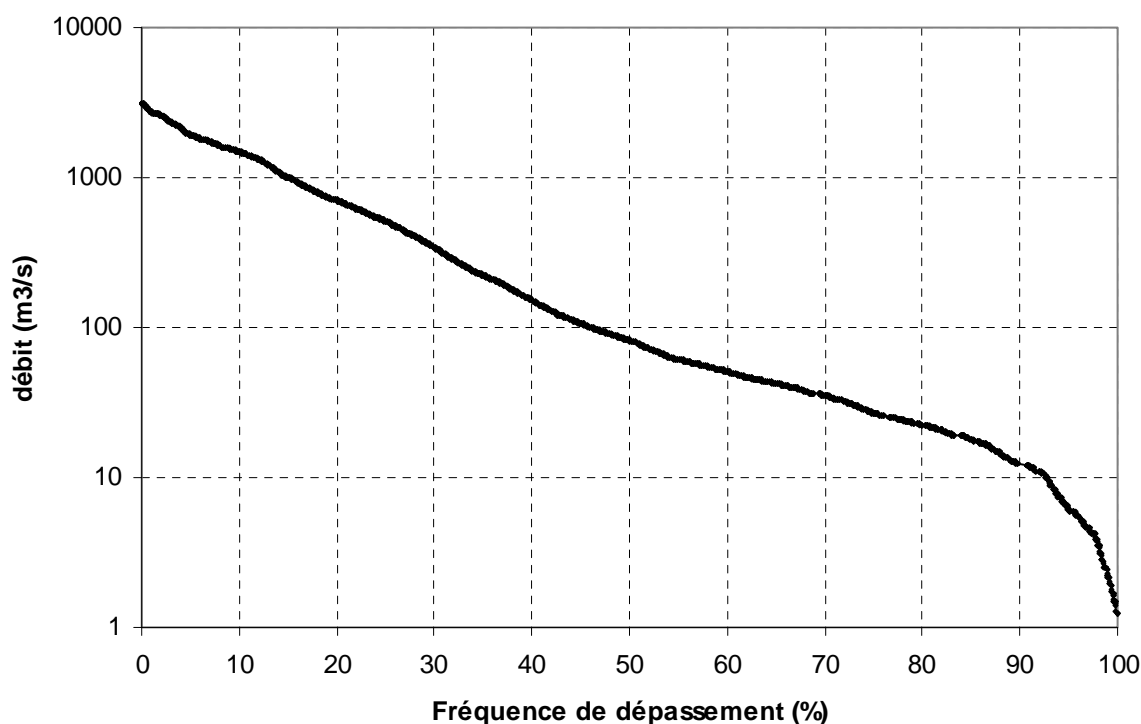
Avec  $i$  le rang et  $N$  le nombre de valeurs considéré.

La courbe représente le débit en fonction de la fréquence de dépassement. Traditionnellement, l'ensemble de la série est utilisé (hautes et basses-eaux) et le pas de temps peut-être journalier, mensuel, décadaire... Il est impératif d'avoir des séries complètes. En effet, dans le cas contraire, les lacunes seront considérées comme des 0 et donc confondues avec les jours secs.

La Figure 9 est donnée à titre d'exemple. On voit que pour  $1 - q_i = 90\%$ ,  $Q = 15 \text{ m}^3/\text{s}$ . Cela signifie que pendant 90% du temps (durée d'observation, ici 11 ans) le débit dépasse les  $15 \text{ m}^3/\text{s}$  à Douna. Comme on s'intéresse aux étiages, donc aux débits les plus faibles, on préférera par la suite raisonner en sens inverse : le débit de  $15 \text{ m}^3/\text{s}$  n'est pas dépassé 10% du temps. Par ailleurs la pente de la courbe est représentative de la variabilité des débits : une pente forte indique une forte variabilité des débits (et donc par exemple une décrue rapide) et inversement.

Plusieurs indices sont issus des courbes de débits classés (Smakhtin, 2001) :

- Les différents quantiles peuvent être utilisés. Ils sont notés  $Q_{20}$ ,  $Q_{50}$ ,  $Q_{70}$ ...  $Q_x$  et représentent donc le débit dépassé 20%, 50%, 70%... x% du temps. De ce fait, on pourra considérer que  $Q_{50}$  est représentatif du début de l'étiage,  $Q_{70}$  du début du tarissement et que la fin de la courbe, à partir de  $Q_{90}$  représentera les événements extrêmes (10% les plus secs de la période d'observation)
- Les rapports entre quantiles constituent la pente de la courbe et peuvent donc être utilisés pour la caractérisation de la variabilité des débits. (exemples :  $Q_{50}/Q_{90}$  ;  $Q_{20}/Q_{90}$ ...)



**Figure 9 : Exemple de courbe des débits classés du Bani à Douna. Données journalières de 1966 à 1976.**

Par la suite nous avons choisi de construire les courbes des débits classés uniquement à partir des mois les plus secs de l'année. Les raisons sont les suivantes :

- Cela permet de conserver plus d'années d'observation, puisqu'on s'affranchit des lacunes qui pourraient exister pendant la crue.
- Les séries générées présentent des valeurs négatives. Sur les courbes des débits classés, ces valeurs n'apparaissent pas mais on peut estimer leur nombre en fonction de la fréquence de dépassement à laquelle s'arrête la courbe (voir par exemple la Figure 14 dans la partie Résultats). Plus cette fréquence de dépassement est faible, plus il y a de valeurs nulles et éventuellement négatives. Or les valeurs négatives peuvent arriver aussi bien pendant la crue que pendant l'étiage. En ne conservant que les quelques mois d'étiage, on est certain que les valeurs négatives enregistrées font partie de la période qui nous intéresse.

Pour chaque station, on conservera 6 mois d'observation par an, bien que la période d'étiage ne dure pas toujours 6 mois. Cela permettra de faire le parallèle entre les quantiles issus de la courbe « complète » et les quantiles issus de cette courbe « étiage » :

Quantile courbe « complète »	Quantile courbe « étiage »	signification
Q50	Q0	Début de l'étiage
Q70	Q40	Début du tarissement
Q90	Q80	Evènements extrêmes

**Tableau 2 : Présentation des indices issus de la courbe des débits classés.**

### III.2.4. Coefficients de tarissement

Le coefficient de tarissement indique la vitesse de vidange de la nappe en saison sèche, lorsqu'il n'y a plus de précipitations et donc plus d'apport par le ruissellement de surface. Il est exprimé en jours<sup>-1</sup>. Bamba (1994) a comparé 3 méthodes différentes de calcul du coefficient de tarissement sur plusieurs cours d'eau et en particulier sur le Bani. Ces méthodes sont décrites succinctement ci-après :

- **méthode graphique** : le coefficient de tarissement  $\alpha$  est égal à la pente de la droite formée par l'hydrogramme (phase de tarissement) sur papier logarithmique. Le problème est de savoir quand commence réellement le tarissement et également quelle droite choisir parmi les droites qui peuvent s'ajuster aux points.
- **Méthode « automatique » de calcul** :  
La loi de tarissement pour le Bani est : (Roche, 1963)

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha(t-t_0)}$$

où  $Q_0$  est le débit à la date  $t_0$  du début du tarissement

$Q_t$  est le débit à la date  $t$

Et  $\alpha$  le coefficient de tarissement.

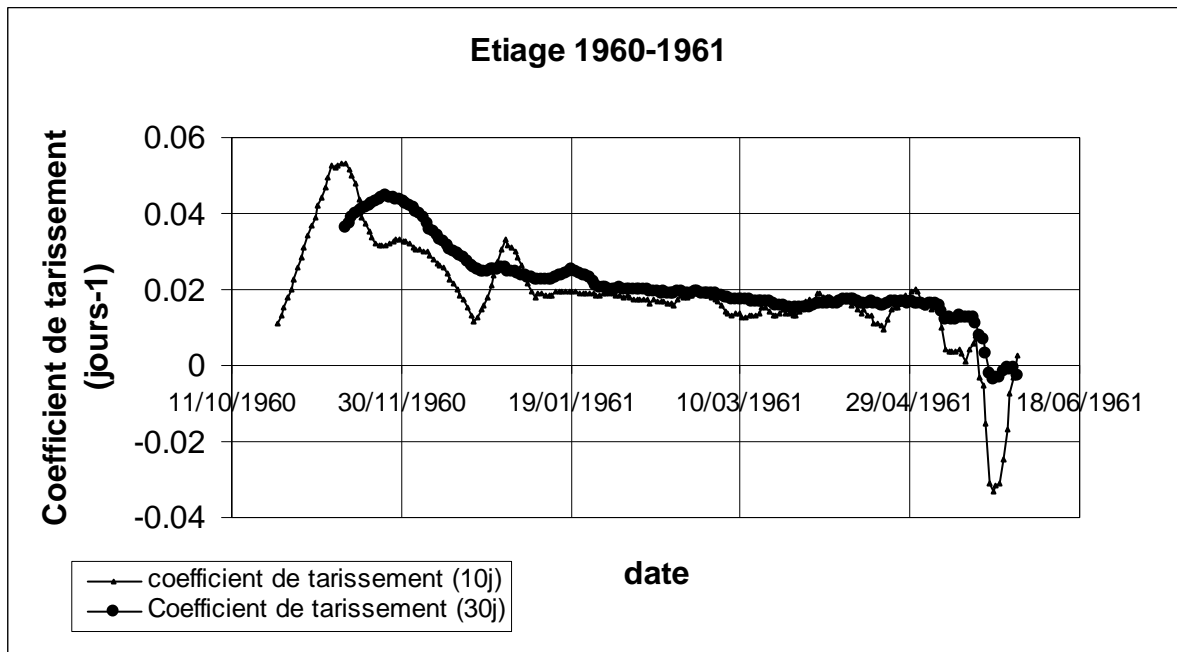
Si on prend  $t_0 = 0$ , il ressort que

$$\ln(Q_t) = \ln(Q_0) - \alpha t$$

D'où :

$$\alpha = \frac{\ln(Q_0 / Q_t)}{t}$$

Cette dernière équation permet de calculer le coefficient de tarissement. Bamba a calculé les coefficients de tarissement à pas de temps régulier de 10 jours et 30 jours. Comme on ne connaît pas la date de début du tarissement, on effectue ce calcul sur une période allant de la fin de la décrue jusqu'au plus bas débit de l'étiage. Il faut ensuite construire les courbes  $\alpha = f(t)$ . La Figure 10 donne un exemple de ces courbes.



**Figure 10 : Détermination du coefficient de tarissement à Douna pour l'été 1960 - 1961. Coefficients de tarissement journalier en fonction du temps calculés avec un pas de temps de 30j et avec un pas de temps de 10j. Détermination du « plateau ».**

On peut voir sur ces graphiques des « plateaux » qui correspondent aux phases de tarissement. Lorsqu'il y a plusieurs plateaux pour une année, on considère que le premier plateau correspond au tarissement de la nappe principale (Olivry, 1986).

Après avoir délimité le plateau, on calcule la moyenne des coefficients de tarissement compris dans l'intervalle de temps du plateau et le résultat correspond au coefficient de tarissement pour l'année étudiée.

- **méthode de détermination à partir des débits moyens mensuels décalés dans le temps et à partir des débits moyens décennaux.**

Elle consiste à calculer des débits moyens mensuels mobiles (sur la période d'étiage), chaque bloc de 1 mois est décalé de 5 jours par rapport au bloc suivant. Donc on aura pour le mois 1, la moyenne du 1/01 au 31/01 ; pour le mois 2, moyenne du 5/02 au 4/03; pour le mois 3, du 10/03 au 9/04 et ainsi de suite. On fait passer une droite par les 3 ou 4 points obtenus pour chaque mois. La pente de la droite est le coefficient de tarissement. Le problème pour cette méthode est la détermination de la date du début du tarissement ; à laquelle doit commencer le premier bloc.

D'après Bamba, la méthode la plus fiable est la méthode « automatique » avec un pas de temps de 10 jours. La méthode avec un pas de temps de 30 jours ne permet pas de caractériser certaines anomalies dans les étiages, par exemple une pluie pendant l'étiage. Dans notre cas, après plusieurs tests, nous avons préféré utiliser la méthode de détermination par le calcul automatique mais avec un pas de temps de 30 jours, qui nous permet d'avoir des plateaux un peu plus nets et donc de déterminer le coefficient de tarissement avec plus de précision. Pour certaines séries, la détermination des plateaux reste relativement difficile car ils ne sont pas du tout bien marqués. La précision de cette méthode est donc très limitée. De plus cette détermination reste subjective et chaque opérateur pourra donc trouver un résultat différent.

### ***III.3. Les données disponibles***

#### **III.3.1. Stations hydrométriques et sous bassins versants**

En fonction de la position des stations hydrométriques, on découpe le bassin du Bani en plusieurs sous-bassins, représentés sur la carte en Figure 11. Certaines de ces stations ne seront pas utilisées pour des raisons de disponibilité des données. Comme on l'a indiqué précédemment, on générera des séries de débit pour les sous-bassins intermédiaires entre les stations en effectuant de simples soustractions. Cette méthode permet certes d'avoir une idée du comportement des sous-bassins intermédiaires mais les erreurs dues aux courbes d'étalonnage (voir Annexe 2) se cumulent (puisque l'on utilise plusieurs stations pour générer une série). De plus, la saison des pluies arrivant plus tôt dans le Sud du bassin du Bani, un temps de transfert est à prévoir.

Dans le but de mieux comprendre le fonctionnement des étiages du Bani à Douna, en particulier la provenance de l'eau du soutien des étiages, On établit 3 groupes :

- Les principaux sous-bassins du Bani à Douna
- Les sous-bassins de la Bagoé à Pankourou
- Les sous-bassins du Baoulé à Dioila

Le Tableau 3 donne quelques informations sur les séries de données, et en particulier sur leur qualité. Pour chaque groupe, on a déterminé la période d'observation commune de façon à avoir des données complètes sur toutes les stations du groupe et ainsi effectuer des comparaisons. Les périodes d'observations ne concernent que les 6 mois les plus secs de l'année (janvier à juin ou décembre à Mai selon les stations). Un certain nombre de données ont été reconstituées. Les reconstitutions sont faites uniquement sur les périodes d'étiage et par interpolation linéaire. Le pourcentage de lacunes ainsi comblées est noté dans le tableau avec quelques observations concernant ces lacunes.



**Section de Jaugeage de Kouro, Mars 2008**

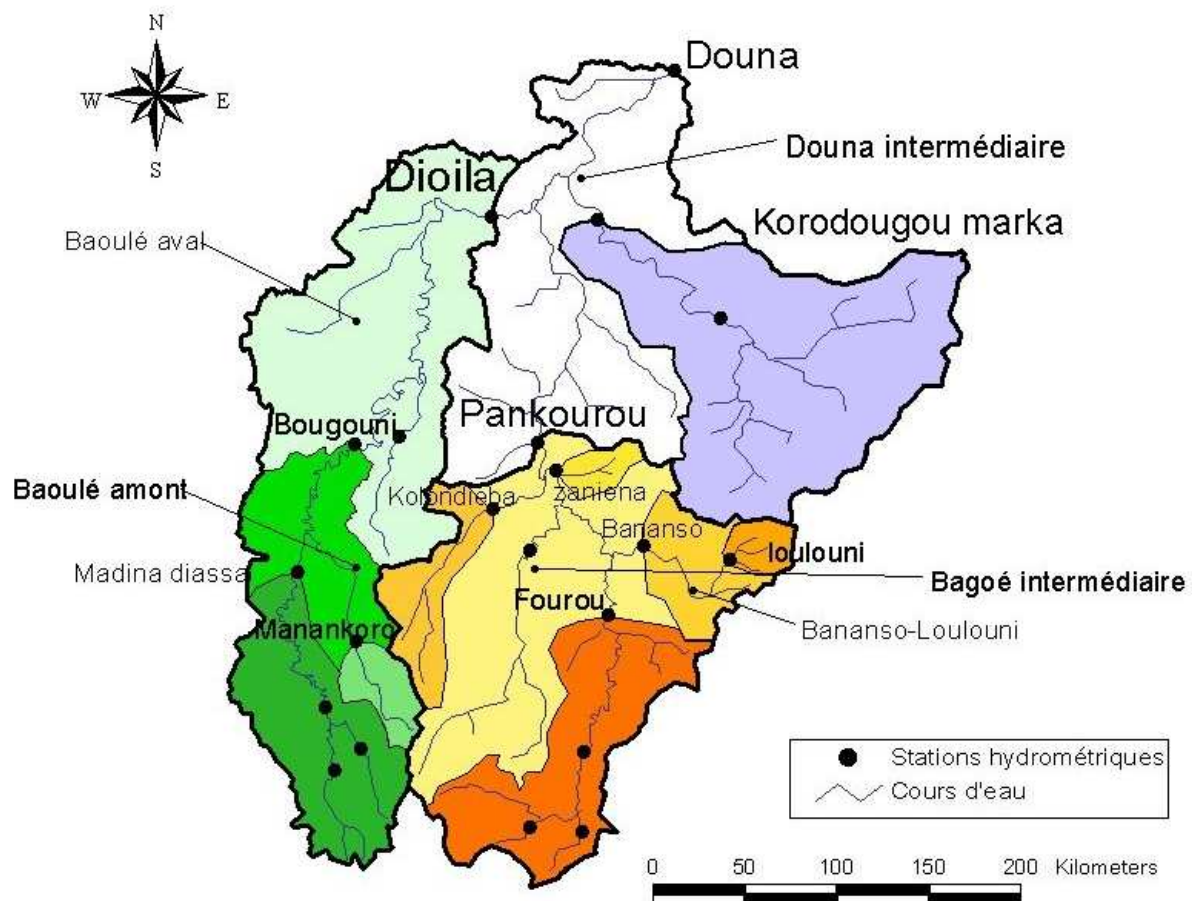


Figure 11 : Sous-bassins versant du Bani à Douna

*Quelques stations hydrométriques :*



Pankourou sur la Bagoé



Bougouni sur le Baoulé



Loulouni sur le Kobafini

Nom Sous-bassin	Stations	Surface (km <sup>2</sup> )	Module moyen interannuel (m <sup>3</sup> /s)	Disponibilité des données	% reconstitué	Remarques sur la partie reconstituée
<b>Sous-bassins du Bani à Douna</b>				<b>1976 - 1977, 1985, 1987 - 1997, 2001, 2003 Janvier à Juin</b>		
Douna	Douna	101 300	353	1957 - 2006	5 %	Mois secs ou avec débits très faibles
Pankourou	Pankourou	32 150	108	1956 - 2007	8 %	Mois secs et débits très faibles (< 1m <sup>3</sup> /s)
Dioila	Dioila	32 500	117	1957 - 2007	23%	Presque tous les ans avril et mai : secs ou inférieur à 1 m <sup>3</sup> /s
Korodougou Marka	Korodougou Marka	18 325	26	1975 - 2006	5% / 22%*	
Douna intermédiaire	Douna – Dioila – Pankourou – Korodougou Marka	18 325		1976 - 2003		
<b>Sous-bassins de la Bagoé à Pankourou</b>				<b>1985 - 1993 et 1996 – 1999 Janvier à Juin</b>		
Pankourou	Pankourou	32 150	108	1956 - 2007	7 %	
Fourou	Fourou	7 294	53,9	1978 - 2006	16 %	Lacunes déjà comblées auparavant
Bagoé intermédiaire	Pankourou – Fourou - Zaniena – Kolondieba – Bananso	17 220		1984 - 1998		
Bananso - Loulouni	Bananso - Loulouni	3 051		1984 - 1998	20 %	(= Bananso)

Nom Sous-bassin	Stations	Surface (km <sup>2</sup> )	Module moyen interannuel (m <sup>3</sup> /s)	Disponibilité des données	% reconstitué	Remarques sur la partie reconstituée
Zaniena	Zaniena	736	53,9	1978 - 2006	39 %	Presque tous les étiages. Mais la grande majorité a été effectuée avant le début de cette étude.
Kolondieba	Kolondieba	3 050	7,3	1972 - 2003	34 %	Presque tous les étiages secs. Un certain nombre de périodes déjà comblées.
Loulouni	Loulouni	799	2,24	1977 - 2007	0.07 %	2 jours fin juin
<b>Sous-bassins de le Baoulé à Dioila</b>				<b>1984 – 1997 Décembre à Mai</b>		
Dioila	Dioila	32 500	117	1957 - 2007	22 %	
Madina Diassa	Madina Diassa	7 875	40,7	1971 - 2006	8,7 %	
Manankoro	Manankoro	1 550	5,56	1982 - 2007	25 %	Entre Mars et Juin.
Baoulé amont	Bougouni – Madina Diassa - Manankoro	6 275		1984 - 1997		
Baoulé aval	Dioila - Bougouni	16 800		1984 - 1997		

**Tableau 3 : Stations utilisées, disponibilité des données (6 mois les plus secs pour chaque année) et pourcentage des données reconstituées. Les disponibilités des données en gras correspondent aux périodes communes pour le groupe de station considéré et les autres correspondent à chaque station. Les signes – signifient soustraction.**

\* Les années 1976, 1977, 1987 et 1988 étaient déjà reconstituées. 5% est le pourcentage de lacunes que j'ai reconstitué, 22% correspond au total de lacunes comblées.

Par la suite, on appliquera pour chaque série les différentes méthodes de traitement des données puis on effectuera des comparaisons pour les séries appartenant à un même groupe.

### III.3.2. Qualité des données utilisées

12 stations hydrométriques sont donc utilisées. Parmi ces 12 stations, 6 stations fournissent des données de bonne qualité (hauteurs d'eau cohérentes et courbe d'étalonnage bien calée). Il s'agit de : Douna, Bougouni, Dioila, Fourou, Madina Diassa et Pankourou. Pour Douna, la courbe d'étalonnage étant erronée entre 1922 et 1954, nous ne prendrons pas en compte cette période.

2 stations fournissent des données un peu moins bonnes :

- Pour Korodougou Marka les hauteurs d'eau brutes semblent de bonne qualité. Cependant cette station n'a été jaugée que 5 fois en 1975-1976. La courbe d'étalonnage passe bien par les 5 jaugeages. Mais des jaugeages supplémentaires et plus récents seraient utiles pour plus de précision et afin de vérifier que la station n'ai pas subi un détamage.

- Loulouni présente souvent des pics de fortes valeurs qui paraissent anormaux. On dispose de 50 jaugeages entre 1975 et 2008. Tous les points ne sont pas exactement sur la courbe.

Les 4 stations restantes (Zaniena, Kolondieba, Bananso et Manankoro) n'ont pas été vérifiées et les données n'ont pas été critiquées, il faut donc les prendre avec précaution.

11 jaugeages ont été effectués à Kolondieba, ils se situent tous sur la courbe d'étalonnage et sont assez bien répartis jusqu' à  $60 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Pour Zaniena on dispose de 17 jaugeages, tous sur la courbe d'étalonnage. La répartition de ces jaugeages sur le courbe est bonne jusqu'à  $12 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Concernant la station de Bananso, un grand nombre de jaugeages ont été effectués en période d'étiage. Pour des débits très faibles, les jaugeages sont bien sur la courbe d'étalonnage mais au-delà de quelques  $\text{m}^3/\text{s}$ , les mesures sont plus dispersées.

Enfin pour la station de Manankoro les jaugeages effectués ne sont pas tous sur la courbe

(voir courbes d'étalonnages en Annexe 2)

## IV - RESULTATS

L'application des différentes méthodes vues précédemment à chaque groupe de sous-bassins versants apporte plusieurs informations sur le fonctionnement et surtout sur la provenance des étiages du Bani à Douna. Dans cette partie on présentera successivement les résultats obtenus pour chacun des groupes établis dans la partie III.3.1.

En premier lieu on va s'intéresser aux sous-bassins de la Bagoé et du Baoulé. Ce travail nous permettra de mettre en évidence un certain nombre d'informations sur l'hydrologie des deux affluents. Concernant le Banifing, nous disposons de 3 stations : Kléla, Kouro, et Korodougou Marka. Kléla étant défaillante et Kouro comportant trop de lacunes, nous avons préféré travailler uniquement avec Korodougou Marka. Par conséquent, contrairement au Baoulé et à la Bagoé, le Banifing ne fera pas l'objet d'une partie et sera traité dans la troisième partie qui prend en compte les stations les plus en aval pour chacun des principaux affluents du Bani (Baoulé, Banifing, Bagoé) En effet seules 4 stations interviendront pour cette partie : Douna, Pankourou, Dioila et Korodougou Marka. L'objectif sera de mettre en relation toutes les observations faites précédemment et ainsi en tirer des conclusions concernant les différents sous-bassins et les liens qui peuvent exister entre eux. Une dernière partie sera consacrée à l'influence de la géologie sur les étiages du Bani et sur les caractéristiques de ses sous-bassins.

### *IV.1. Sous bassins de la Bagoé à Pankourou*

La Bagoé à Pankourou a été divisée en 6 sous-bassins : 4 correspondent à 4 stations existantes : Fourou, Kolondieba, Zaniena et Loulouni, 2 correspondent à des séries générées à partir de stations existantes, il s'agit de « Bananso-Loulouni » et de « Bagoé intermédiaire ». Ce dernier correspond à la partie du bassin comprise entre Pankourou et les stations Bananso, Zaniena, Kolondieba, Fourou (Figure 11).

Nous avons préféré ignorer :

- les données de la station de Kankela (qui draine un bassin de 7 175 km<sup>2</sup>). Il semble que les valeurs de débits pour cette station soient sur-estimées.
- Les données de la station de Kouto, située en amont de Fourou sur la Bagoé car le nombre de lacunes dans cette série était trop important.

Nous ne traiterons pas du bassin de Bananso puisqu'il correspond à l'addition de Loulouni et de Bananso- Loulouni.

#### IV.1.1. Hydrogrammes et débits spécifiques

On a représenté sur la Figure 12 les 6 mois les plus secs de l'année. La période d'observation (période commune de disponibilité des données pour toutes les stations (Fourou, Pankourou, Kolondieba, Bananso, Loulouni, Zaniena) est de 13 ans : de 1985 à 1993 et de 1996 à 1999. Puis on a calculé pour chaque mois le pourcentage du débit de Pankourou provenant de chaque station. Une moyenne est effectuée sur les 6 mois pris en compte (Voir Tableau 4). Pour se rendre compte de l'effet de la surface, on a également représenté les débits spécifiques en Figure 13.

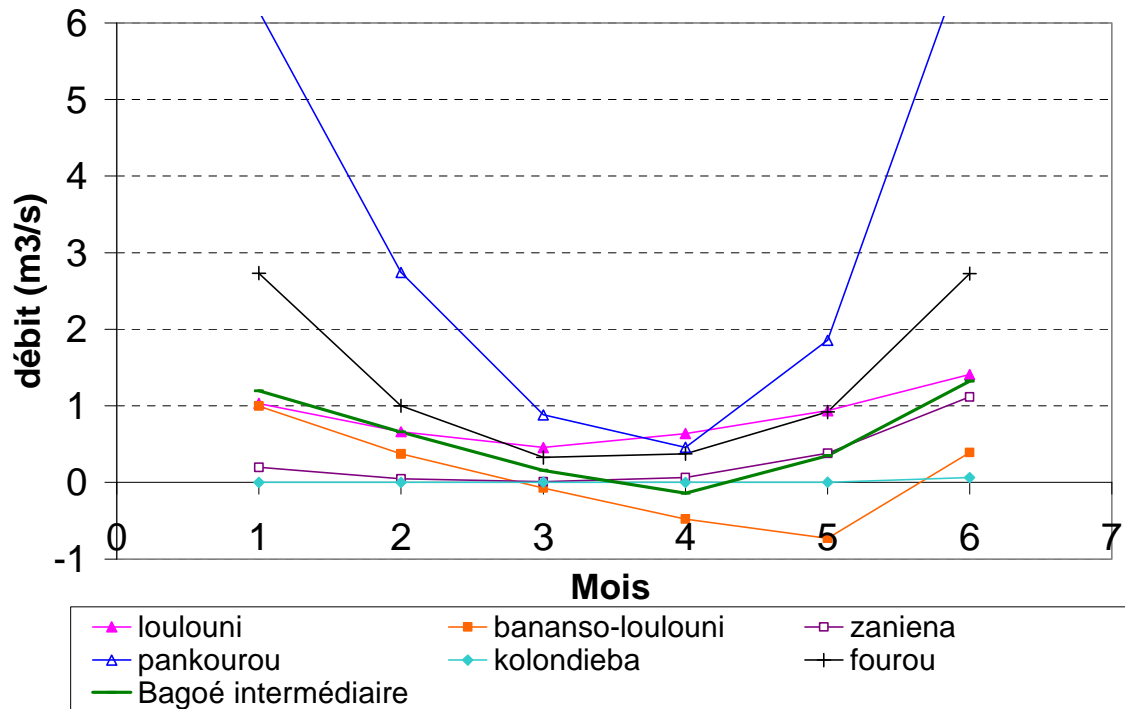


Figure 12 : Débits moyens mensuels pour les sous bassins de la Bagoé. Données mensuelles de Janvier à Juin sur 13 ans (1985 – 1993 ; 1996 – 1999).

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	moyenne
Loulouni	16.7	24.1	51.6	140	50.3	20.1	<b>26,8</b>
Fourrou	44.4	36.5	36.9	81.8	49.6	38.8	<b>42,3</b>
Bananso - loulouni	16.2	13.6	- 8.1	-105	- 39.3	5.6	<b>2,5</b>
Zaniena	3.2	1.7	1.2	14.1	20.5	15.9	<b>9,5</b>
Kolondieba	0	0	0.4	0	0.1	0.9	<b>0,3</b>
Bagoé intermédiaire	19.5	24	18	-31	18.8	18.8	<b>18,5</b>

Tableau 4 : pourcentage du débit de Pankourou issu des sous-bassins de la Bagoé. Débits de Janvier à Juin sur 13 ans (1985 – 1993 et 1996 – 1999) : pourcentage du débit des sous-bassins de la Bagoé par rapport à Pankourou.

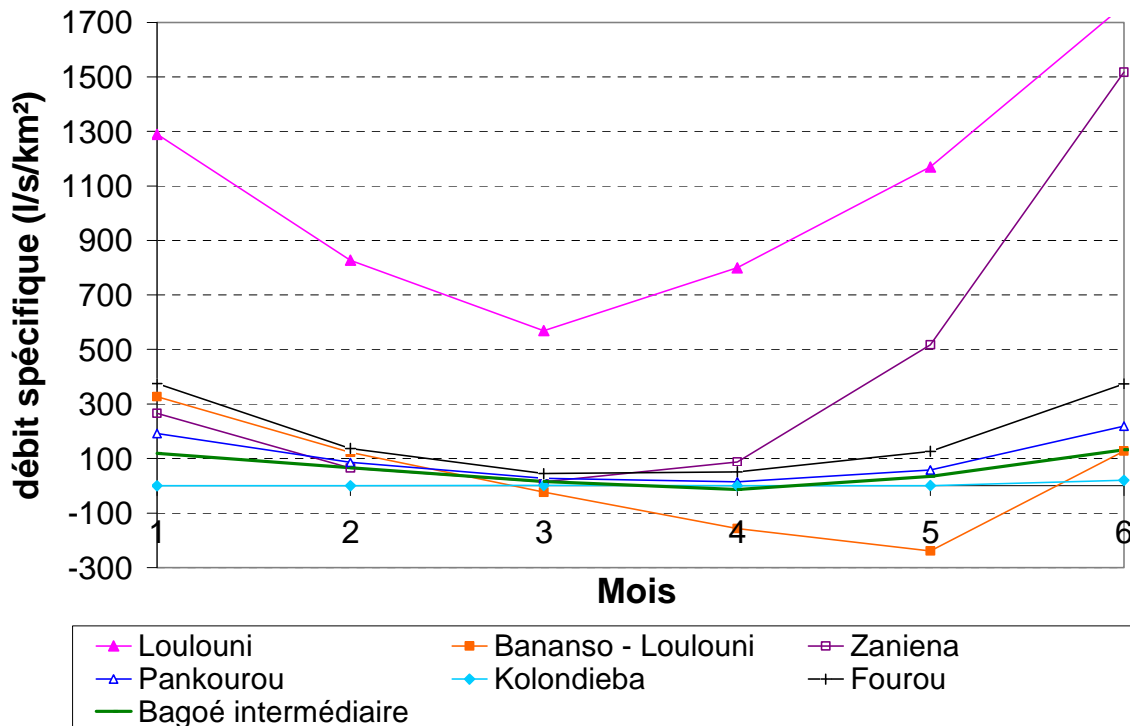


Figure 13 : Débits spécifiques moyens mensuels pour les sous-bassins de la Bagoé. Données mensuelles de Janvier à Juin sur 13 ans (1985 - 1993 et 1996 - 1999)

Le bassin de Fourou fournit plus de 40% de l'écoulement à Pankourou (en moyenne de Janvier à Juin). Il est particulièrement productif durant les mois les plus secs. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'il est le sous-bassin le plus au Sud du bassin du Bani et reçoit donc des précipitations plus importantes et plus tôt dans la saison (Voir carte Figure 18). Loulouni fournit également la moitié du débit à Pankourou (en moyenne), ce qui est très étonnant vu sa petite superficie (799 km<sup>2</sup>). Les débits spécifiques indiquent que ce bassin a une productivité jusqu'à 5 fois supérieure aux autres sous-bassins. La carte géologique montre qu'il se situe en bordure des affleurements de grès (voir Figure 26), Il est donc possible que le bassin hydrogéologique de Loulouni s'étende aux nappes contenues dans les grès, probablement plus poreux que le socle métamorphique. Nous reviendrons sur cette hypothèse par la suite. Tout comme Loulouni, le bassin de Zaniena est en bordure des grès et est très productif, en particulier en fin d'été. Vu la carte des isohyètes (Figure 18), cela n'est probablement pas dû à une arrivée précoce des premières pluies sur ce bassin.

Pankourou, Fourou et le bassin intermédiaire connaissent des variations similaires en termes de débit. On peut donc dire que ces 3 bassins caractérisent la Bagoé car les 3 autres sous-bassins correspondent à des affluents et n'ont pas du tout le même comportement. Pour la Bagoé, entre Janvier et Juin, on a une diminution rapide des débits jusqu'en Avril puis une remontée tout aussi rapide. Les variations ont une amplitude de 2 à 6 m<sup>3</sup>/s. Pour les affluents les variations sont moins prononcées (1 à 2 m<sup>3</sup>/s au maximum). Le bassin de Zaniena est croissant sauf en tout début d'été où il est très légèrement décroissant. A l'inverse, le bassin Bananso-Loulouni est décroissant sauf en fin d'été : le débit redevient positif au mois de juin. Kolondieba est presque toujours à sec pendant l'été, l'étude de ce bassin ne présente donc pas un intérêt majeur.

#### IV.1.2. Débits classés

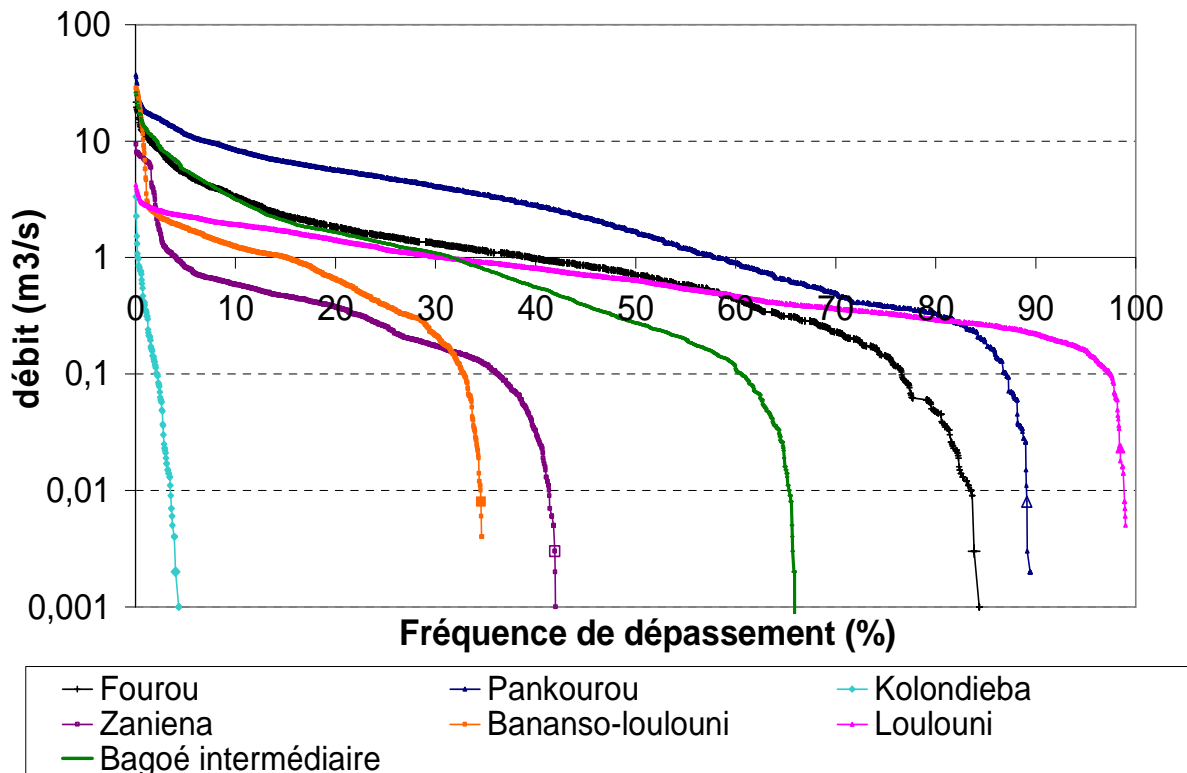


Figure 14 : Courbes des débits classés pour les sous-bassins de la Bagoé à Pankourou. Données journalières de Janvier à Juin sur 13 ans (1985 – 1993 et 1996 – 1999).

En ce qui concerne les débits nuls et les débits négatifs, ils n'apparaissent pas en tant que tel sur ces courbes mais on peut avoir une idée de leur nombre en regardant la position des derniers points de la courbe : Plus la courbe se poursuit loin vers les fréquences de dépassement élevées, moins la série correspondante a de jours secs ou négatifs. Ainsi Loulouni n'a presque pas de jours secs, tandis que Bananso-Loulouni a un grand nombre de jours secs ou négatifs dans sa série

Le bassin de Loulouni connaît une variabilité plus faible que les autres sous-bassins de la Bagoé, la pente de la droite formée par la partie centrale de la courbe est en effet la plus faible. Si l'on suppose que cela est dû à l'apport des nappes contenues dans les grès, le bassin de Zaniena devrait avoir un comportement similaire ce qui n'est pas le cas. Donc soit Zaniena n'est pas sous l'influence des nappes de grès comme Loulouni, soit le soutien des étiages à Loulouni n'est pas dû à la présence des grès à proximité.

Fourou et « Bagoé intermédiaire » sont confondus pour des fréquences de dépassement faibles puis se séparent rapidement. « Bagoé intermédiaire » évolue de la même façon que Fourou en tout début d'étiage puis varie beaucoup plus rapidement à partir de la phase de tarissement et atteint ainsi des débits plus faibles que ceux de Fourou.

La courbe des débits classés de Zaniena peut difficilement être interprétée comme précédemment (c'est-à-dire en considérant le début de l'étiage entre Q0 et Q40, la phase de tarissement de Q40 à Q80 etc...). En effet nous avons vu sur l'hydrogramme que les débits de Zaniena, faibles au départ, augmentaient fortement en fin d'étiage c'est-à-dire l'inverse par rapport aux autres bassins. Par contre la partie centrale de la courbe représente bien les mois les plus secs de l'étiage et on voit grâce à la pente de cette partie de la courbe que la variabilité des débits à ce moment là est proche de celle de « Bagoé intermédiaire ». On a donc

un régime plus proche de celui de «Bagoé intermédiaire» que de celui de Loulouni. Le bassin de Zaniena n'est donc probablement pas influencé par les grès, contrairement à Loulouni. L'hydrogramme de Kolondieba présente énormément de valeurs nulles, ce qui rend la lecture de la courbe des débits classés difficile pour cette station. On a ici un exemple des limites d'utilisation de cette méthode, très sensible à la présence de valeurs nulles.

Le Tableau 6 présente le nombre jours secs et les déficits calculés pour les différents sous-bassins.

Loulouni n'est pratiquement jamais à sec alors que Bananso est à sec plus d'un mois par an en moyenne, on vérifie donc la présence de pertes dans le bassin intermédiaire. Fourrou, malgré sa productivité élevée, est à sec un mois par an en moyenne. Zaniena est à sec plus de 3 mois par an, on vérifie encore une fois que les bassins de Zaniena et de Loulouni sont très différents, ce qui confirme que Zaniena n'est pas sous l'influence des grès comme Loulouni. Finalement, la Bagoé à Pankourou est à sec en moyenne 20 jours par an. Comme seul Loulouni est à sec moins de 20 jours par an et que l'écoulement à Pankourou ne peut venir exclusivement de ce petit bassin, on conclut que tous les sous-bassins ne sont pas à sec en même temps. Il y a donc un « relais » pour le soutien de l'étiage à Pankourou.

Les déficits moyens calculés pour les stations intermédiaires sont assez faibles : moins de 1 m<sup>3</sup>/s. Pour Bananso - Loulouni le déficit maximum n'est que de quelques m<sup>3</sup>/s, les déficits pour ce sous-bassin peuvent donc aisément être expliqués par de l'infiltration et de l'évaporation. Par contre pour le bassin intermédiaire, le déficit maximum est de 27 m<sup>3</sup>/s. Vu la moyenne des déficits c'est une valeur exceptionnelle mais elle ne peut être expliquée par de l'évaporation ou de l'infiltration, il doit donc y avoir des prélèvements ponctuels à ce niveau.

Indice (courbe totale)	Equivalence courbe étiage	Loulouni		Fourou		Pankourou		Kolondieba		Zaniena		Bagoé intermédiaire		Bananso - Loulouni	
		Q	Qspé	Q	Qspé	Q	Qspé	Q	Qspé	Q	Qspé	Q	Qspé	Q	Qspé
<b>Q50</b>	<b>Q0</b>	4,2	5 240	21,6	2 970	37.1	1 150	3.33	1 090	9.4	12 800	26.1	1 517	28.5	9357
<b>Q70</b>	<b>Q40</b>	0,8	1 020	0,98	135	2.83	88	0	0	0.03	45	0.56	32.46	-0.12	- 40
<b>Q90</b>	<b>Q80</b>	0,3	365	0,05	7	0.33	10	0	0	0.03	1	-0.19	- 11.3	-0.70	-230

Tableau 5 : Indices (quantiles) issus de la courbe des débits classés et de la courbe des débits spécifiques classés pour les sous bassins de la Bagoé. Unités : m<sup>3</sup>/s pour les débits et l/s/km<sup>2</sup> pour les débits spécifiques. Données journalières de Janvier à Juin sur 13 ans (1985 – 1993 et 1996 – 1999).

	Fourou	Pankourou	Kolondieba	Zaniena	Bananso	loulouni	Bananso-loulouni	Bagoé intermédiaire
<b>Nombre de jours secs (sur 13 ans)</b>	401	270	2457	1489	644	25	16	144
<b>Nombre moyen de jours secs par an</b>	31	20	138	110	52	2	1	11
<b>Nombre de jours négatifs (sur 13 ans)</b>							1662	730
<b>Nombre moyen de jours négatifs par an</b>							128	56
<b>Perte moyenne par jour (m<sup>3</sup>/s)</b>							-0.4	-0.511
<b>Déficit maximum journalier (m<sup>3</sup>/s)</b>							-3.8	-26.7

Tableau 6 : Nombre de jours secs et de jours déficitaires pour la Bagoé et ses sous-bassins versants. Données journalières de Janvier à Juin sur 13 ans (1985 – 1993 et 1996 – 1999)

### IV.1.3. Coefficients de tarissement

Le graphique suivant montre l'évolution des coefficients de tarissement pour les sous-bassins de la Bagoé entre 1986 et 1998. Les séries chronologiques de débits de Zaniena et de Kolondieba présentent un trop grand nombre de jours secs pour que l'on puisse calculer le coefficient de tarissement avec la méthode que nous utilisons (Bamba, 1994).

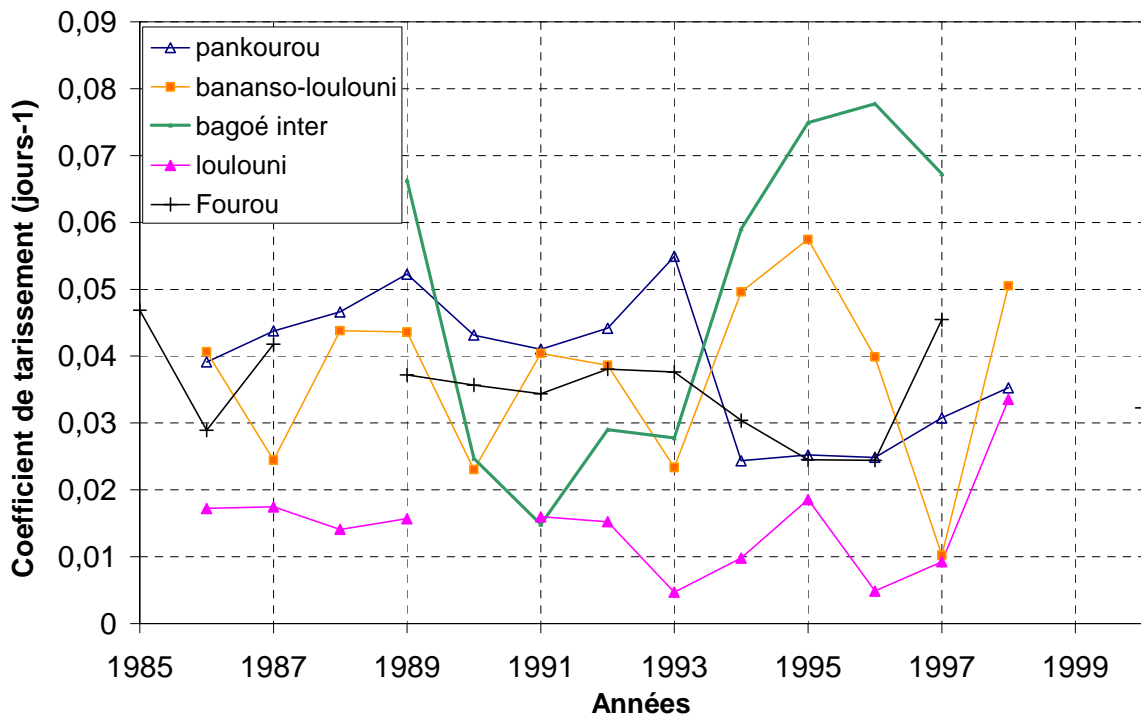


Figure 15 : Coefficients de tarissement pour les sous-bassins de la Bagoé de 1986 à 1998.

On remarque que pour le bassin intermédiaire et le bassin Bananso-Loulouni les coefficients de tarissement ont une variabilité interannuelle élevée. Il est difficile d'interpréter cette variabilité car les aquifères présents ici doivent avoir une certaine inertie étant donné qu'ils sont vastes et de type fissuré. Si la méthode de détermination de ces coefficients est à prendre avec du recul, il faut aussi remarquer que seules les séries générées posent problème.

Concernant les autres séries, on observe que le bassin de Loulouni a le coefficient de tarissement le plus faible des sous-bassins de la Bagoé. Il est deux fois moins important que celui de Pankourou. Pour Loulouni, Bananso-Loulouni et Bagoé intermédiaire, on a un maximum en 1995 (1996 pour le bassin intermédiaire), puis un minimum. Le coefficient de tarissement du bassin à Pankourou est divisé par 2 pour l'été 1994 par rapport à 1993. La saison des pluies précédant cet été ayant été particulièrement bonne. Le coefficient reste stable, et donc sous l'influence de ces pluies jusqu'en 1996. En 1997, le coefficient recommence à augmenter. Le coefficient de tarissement de Fourou connaît lui aussi une diminution en 1993 mais beaucoup plus progressive. Comme pour Pankourou, l'augmentation reprend en 1996.

## IV.2. Sous-bassins du Baoulé à Dioila

On suit la même démarche que pour la Bagoé. A chaque étape, les résultats seront comparés avec les résultats obtenus pour la Bagoé.

### IV.2.1. Hydrogrammes et débits spécifiques

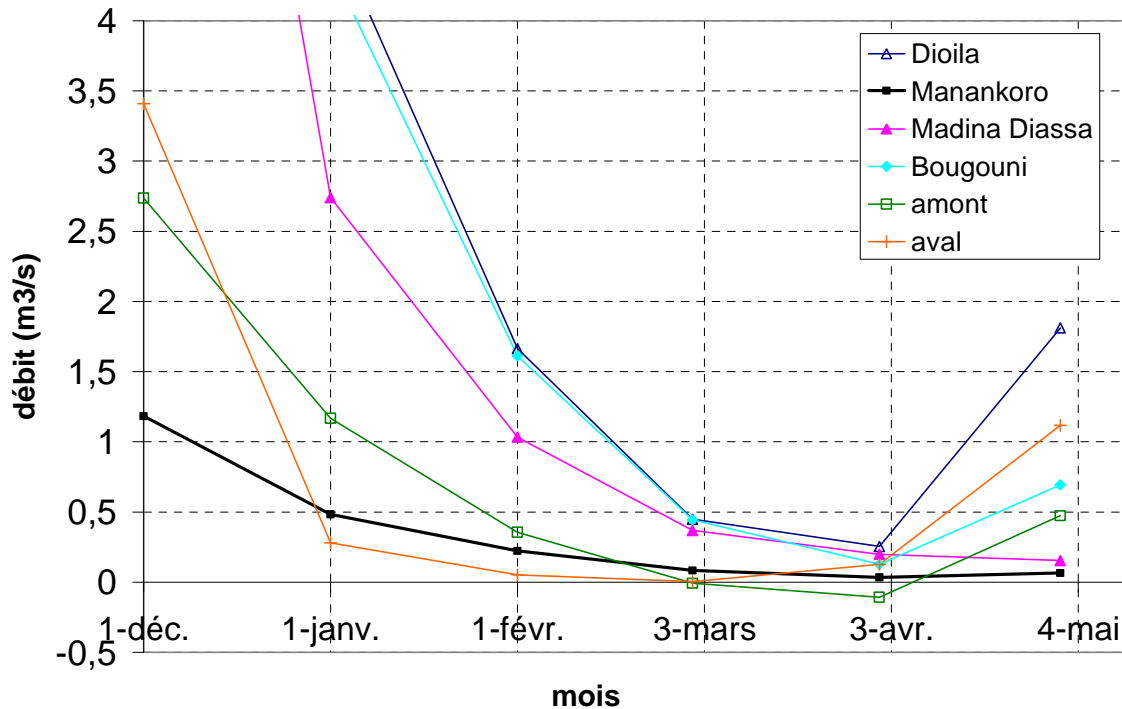


Figure 16 : Débits moyens mensuels pour les sous-bassins du Baoulé. Moyennes sur 14 ans (1984 – 1997) de Décembre à Mai.

	décembre	janvier	février	mars	avril	mai	moyenne
Manankoro	6.7	10.4	13.4	18.68	13.4	3.6	<b>7,8</b>
Madina Diassa	58.7	58.6	62.2	82	78.3	8.5	<b>56</b>
Bougouni	80.8	94	96.9	99	49.8	38.3	<b>81,2</b>
Amont	15.4	25	21.4	- 1.6	- 42	26.2	<b>17,4</b>
Aval	19.2	6	3.1	1.1	50.2	61.7	<b>18,8</b>

Tableau 7 : Pourcentage du débit des sous-bassins du Baoulé par rapport à Dioila

Bougouni et Dioila ont des débits voisins, malgré la présence de plusieurs affluents en aval de Bougouni. Ces affluents, représentés par la série « aval » apportent peu d'eau de Janvier à Mars, c'est-à-dire pendant les mois les plus secs.

Comme pour la Bagoé, on voit une distinction entre les bassins situés directement sur le Baoulé (Amont, Bougouni et Dioila) et les bassins correspondants aux affluents du Baoulé (Madina Diassa et Manankoro. Pour les bassins situés directement sur le Baoulé, on a une diminution jusqu'en Avril, puis les débits augmentent de nouveau. Pour les deux affluents les débits sont toujours en baisse. La situation est donc très proche de celle observée pour la Bagoé. Les variations enregistrées pour Madina Diassa, Bougouni et Dioila sont d'une ampleur comparable (plus de  $4 \text{ m}^3/\text{s}$ ) tandis que Manankoro et le bassin amont varient moins

(1 à 3 m<sup>3</sup>/s). Ceci diffère de la Bagoé pour laquelle les affluents avaient une variation moindre que les bassins directement situés sur la rivière principale.

Le bassin Aval a un comportement à part : la baisse des débits est très rapide et suivie d'une stabilisation autour 0 m<sup>3</sup>/s. L'augmentation commence dès le mois de Mars. Les affluents à l'aval de Bougouni ont donc un comportement très différent des affluents du haut-bassin. Malheureusement, nous n'avons pas d'élément de comparaison pour la Bagoé, car il n'y a pas de station en aval de Pankourou. Le bassin « Aval » de la Bagoé se trouve donc inclut dans le bassin « Bani intermédiaire » (voir carte Figure 26).

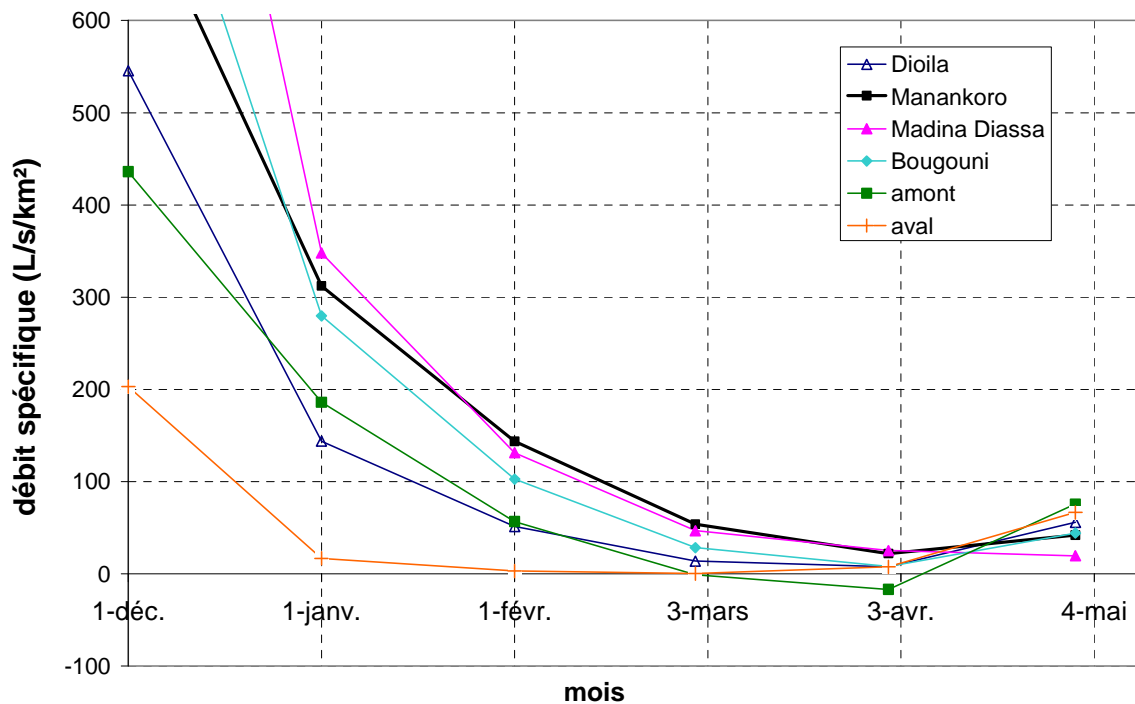


Figure 17 : Débits spécifiques moyens mensuels sur 14 ans (1984 - 1997) de Décembre à Mai.

Les débits spécifiques montrent que la partie amont du bassin (Manankoro, Madina Diassa et bassin intermédiaire amont) est beaucoup plus productive que la partie aval. Il apparaît que plus on va vers l'aval, moins la productivité est importante. Ceci est vrai jusqu'en Avril, ensuite il y a une inversion : le bassin « Aval » est un peu plus productif que Madina Diassa et Manankoro. Cette fois les différences de productivité ne peuvent pas du tout s'expliquer par la présence des grès. En effet ceux-ci ne sont présents que dans la partie aval du bassin « Aval » et ne semblent donc pas contribuer au soutien de l'étiage à Dioila. Par contre la forte productivité de Madina Diassa et Manankoro peut s'expliquer par les pluies plus importantes que reçoivent ces deux bassins (voir carte Figure 18).

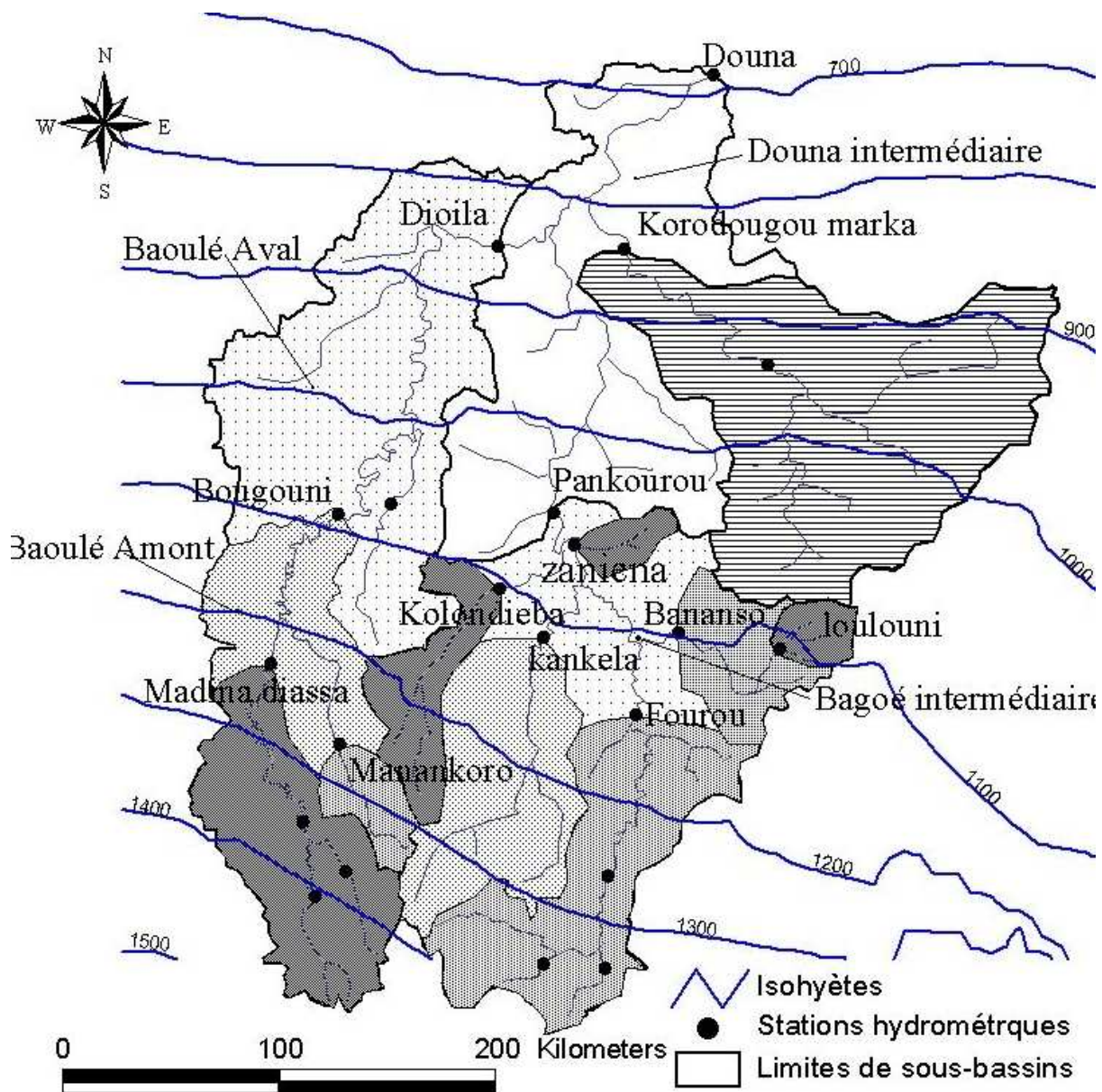


Figure 18 : Pluies moyennes interannuelles de 1963 à 2000 (Auteur : P. Roudier, 2008).

#### IV.2.2. Débits classés

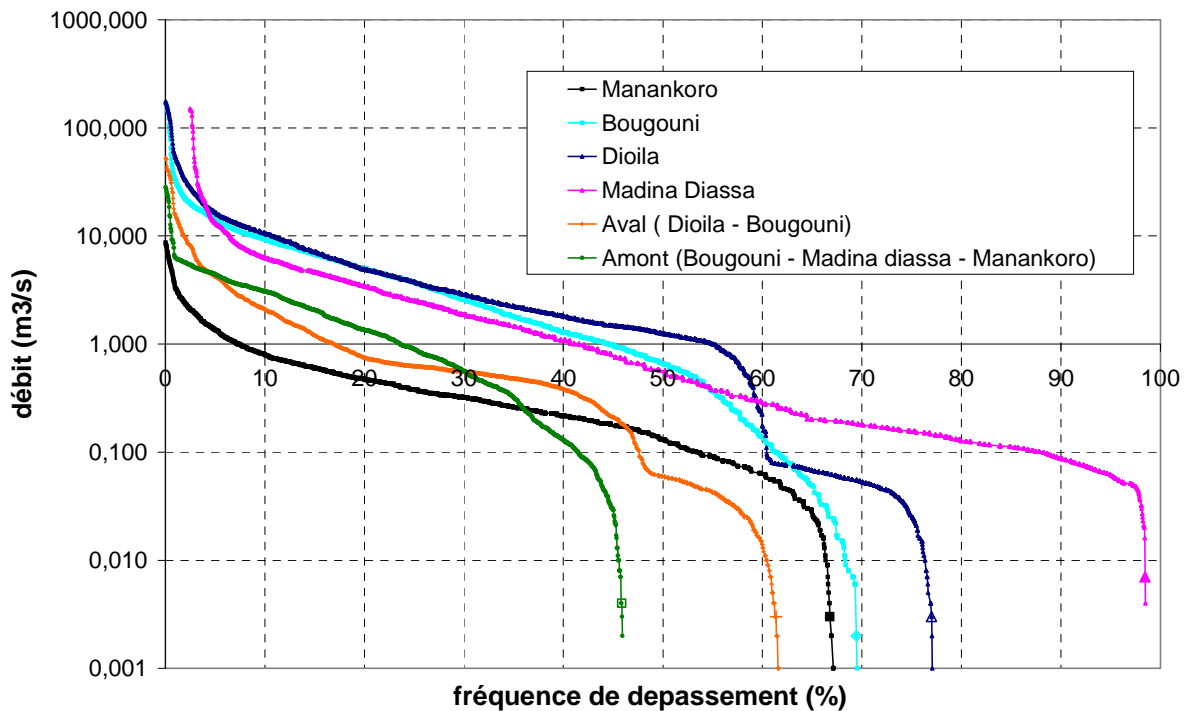


Figure 19 : Courbes des débits classés des sous-bassins de le Baoulé. Données journalières de Décembre à Mai sur 14 ans (1984 – 1997).

Contrairement au cas de la Bagoé, tous les bassins contribuent à l'écoulement en phase de tarissement (au-delà de Q40), bien que le bassin amont tarisse très rapidement.

Pour le début de l'étiage, Dioila et Bougouni sont proches de Madina Diassa. Pendant la phase de tarissement la variabilité de ces deux stations augmente et les débits diminuent donc rapidement tandis que la variabilité pour Madina Diassa reste constante voire en légère baisse à partir de 65% environ. Le bassin de Manankoro étant très peu étendu les valeurs sont nettement plus faibles, cependant il évolue de la même façon que Madina Diassa jusqu'à 50%, c'est-à-dire jusqu'au début du tarissement. Ce bassin tarit donc plus vite que Madina Diassa. Enfin, le bassin « Aval » a un comportement composite : Au début de l'étiage il semble être plutôt sous l'influence de Manankoro et du bassin amont, avec une diminution rapide des débits jusqu'à Q20. Ensuite une phase de stabilisation montre qu'il est sous l'influence de Manankoro. La dernière phase, qui présente une variabilité importante paraît influencée par l'ensemble du bassin à Bougouni.

Indice (courbe totale)	Equivalence courbe étiage	Dioila		Bougouni		Madina Diassa		Manankoro		Aval		Aval	
		Q	Qspé	Q	Qspé	Q	Qspé	Q	Qspé	Q	Qspé	Q	Qspé
<b>Q50</b>	<b>Q0</b>	176	5420	170	10 860	150	19 070	8.67	5 590	28.3	4 510	52.6	3 130
<b>Q70</b>	<b>Q40</b>	1.80	55.5	1.29	82	1	118	0.2	140	0.1	21	0.4	22.7
<b>Q90</b>	<b>Q80</b>	0	0	0	0	0.1	15	0	0.6	-0.1	- 25	0	0

Tableau 8 : Indices (quantiles) issus de la courbe des débits classés et de la courbe des débits spécifiques classés pour les sous bassins de le Baoulé. Unités : m<sup>3</sup>/s pour les débits et l/s/km<sup>2</sup> pour les débits spécifiques. Données journalières de Décembre à Mai sur 14 ans (1984 – 1997).

	Dioila	Bougouni	Madina Diassa	Manankoro	Aval (Dioila- Bougouni)	Aval (Bougouni - Madina Diassa- Manankoro)
<b>nombre total de jours secs</b>	584	777	37	838	468	70
<b>Nombre moyen de jours secs par an</b>	42	55	3	60	33	5
<b>Nombre total de jours déficitaires</b>					510	1309
<b>Nombre moyen de jours déficitaires par an</b>					36	93
<b>Perte moyenne journalière (m<sup>3</sup>/s)</b>					- 0.21	- 0.09
<b>Déficit maximum</b>					-28,4	-3,92

Tableau 9 : Nombre de jours secs et de jours déficitaires pour le Baoulé et ses sous-bassins versants (14 années d'observation, données journalières de Décembre à Mai et de 1984 à 1997).

Le tableau des jours secs et déficitaires en page précédente montre un résultat similaire à celui obtenu pour la Bagoé : Le bassin très productif de Madina Diassa n'est presque jamais à sec et c'est le seul à avoir un nombre de jours secs inférieur ou égal à celui de Dioila. Mais cette fois, le bassin fournit un débit suffisant pour que la plus grande partie de l'écoulement des mois les plus secs à Dioila provienne de Madina Diassa. Le tableau vu précédemment (Tableau 7) indique qu'en Mars et Avril, 80% de l'écoulement à Dioila provient de Madina Diassa. Les bassins intermédiaires comportent tout deux des jours déficitaires. Le bassin amont comporte 2,5 fois plus de jours déficitaires que le bassin aval mais son déficit est 2,5 fois moins élevé. De la même façon que pour la Bagoé, on peut expliquer la plupart des jours secs par de l'évaporation et de l'infiltration mais pour le bassin aval, il semble y avoir des prélèvements ponctuels.

#### IV.2.3. Coefficient de tarissement

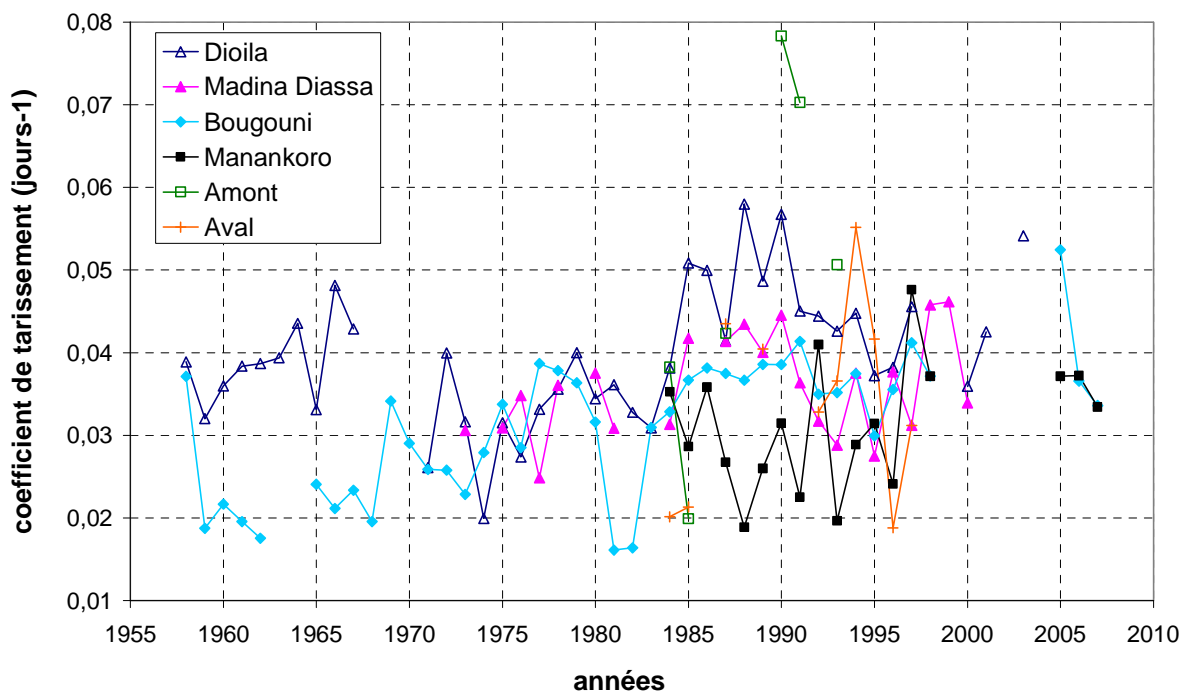


Figure 20 : Evolution des coefficients de tarissement pour les sous-bassins de le Baoulé de 1958 à 2007.

Les coefficients de tarissement sont encore une fois très variables, et il ne s'agit pas cette fois uniquement des séries générées. Cette forte variabilité interannuelle rend l'interprétation difficile et il n'est pas évident de ressortir une tendance dans l'évolution de ces coefficients. On peut cependant noter qu'il y a une augmentation du coefficient de tarissement, jusqu'en 1990. Ensuite les valeurs semblent se stabiliser. Pour Dioila, Madina Diassa et Bougouni, les valeurs les plus élevées apparaissent dans les années 1980.

Madina Diassa n'a pas un coefficient de tarissement très différent des autres sous-bassins versants, bien que ce bassin soit particulièrement productif. Cela conforte notre hypothèse de pluies plus importantes sur ce bassin, la nature de l'aquifère restant identique aux autres bassins du Baoulé (socle).

### IV.3. Les sous-bassins du Bani à Douna

Il s'agit cette fois d'avoir une vision globale du bassin du Bani en ne retenant qu'une station par affluent, le plus en aval possible. On pourra ainsi comparer les contributions des différents affluents et les commenter en fonction des informations précédemment acquises pour le Baoulé et la Bagoé.

#### IV.3.1. Hydrogrammes et débits spécifiques

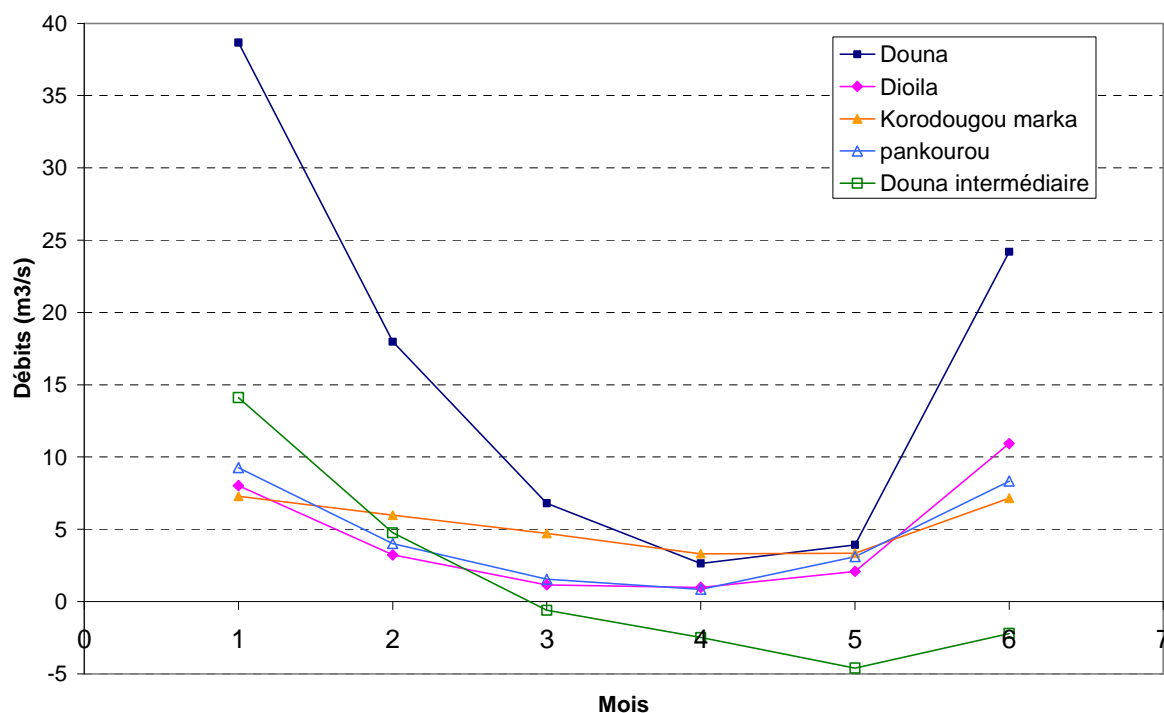


Figure 21 : Débits moyens mensuels de Janvier à Juin sur 16 ans (1976, 1977, 1985, 1987 à 1997, 2001 et 2003) pour les principaux sous bassins du Bani à Douna.

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	moyenne
Dioila (Baoulé)	21,5	18,4	15,9	30,7	57,4	44,5	<b>18,04</b>
Korodougou Marka (Banifing)	19,4	33,8	67,6	117	87	29,3	<b>33,7</b>
Pankourou (Bagoé)	24,6	22,9	22,9	31,6	89,8	32	<b>28,8</b>
Douna intermédiaire	34,5	24,9	- 6,3	-79	-134	- 5,9	<b>9,5</b>

Tableau 10 : Pourcentage du débit de chaque sous-bassin par rapport à Douna

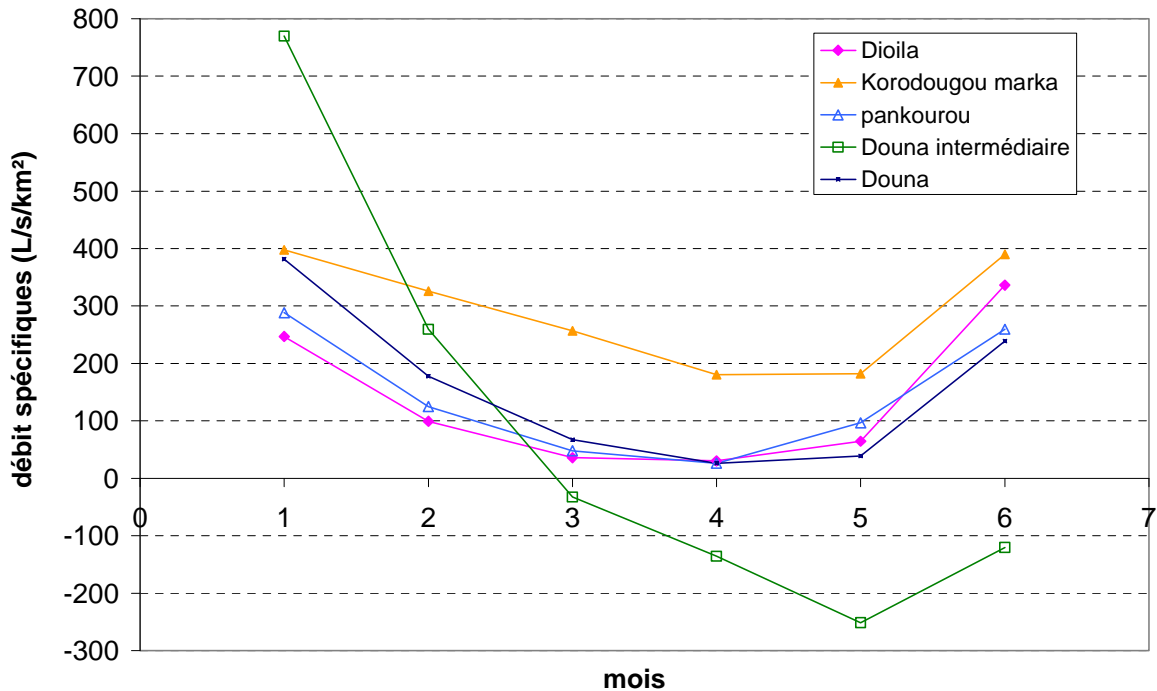


Figure 22 : Débits spécifiques moyens mensuels de Janvier à Juin et sur 15 ans (1976, 1977, 1985, 1987 à 1997, 2001 et 2003) pour les sous-bassins du Bani à Douna

On retrouve les variations similaires du Baoulé et de la Bagoé (diminution puis augmentation avec un minimum au moins d'Avril). Les deux affluents présentent également des valeurs de débits et de débits spécifiques proches. Korodougou Marka se démarque avec des variations beaucoup moins importantes (2 ou 3 m<sup>3</sup>/s contre près de 10 m<sup>3</sup>/s pour les deux autres affluents). De plus les débits spécifiques montrent que le bassin du Banifing est jusqu'à 4 fois plus productif que les autres sous-bassins. Il fournit en moyenne 60% de l'écoulement à Douna. Or ce bassin est entièrement situé dans des grès, ce qui confirme la présence d'une influence du sous-sol géologique sur les débits d'été.

	Douna	Pankourou	Korodougou Marka	Dioila	Douna intermédiaire
<b>Nombre de jours secs (Sur 16 ans)</b>	567	265	131	593	76
<b>Nombre moyen de jours secs par an</b>	38	18	9	40	5
<b>Nombre de jours négatifs</b>					1687
<b>Nombre moyen de jours négatifs par an</b>					105
<b>Perte moyenne (m<sup>3</sup>/s/jour)</b>					-3.46
<b>Déficit maximum journalier (m<sup>3</sup>/s)</b>					-89.9

Tableau 11 : Jours secs et jours déficitaires pour les sous-bassins du Bani à Douna. Sommes et moyenne sur 16 ans (1976, 1977, 1985, 1987 à 1997, 2001 et 2003).

Le nombre de jours secs confirme qu'on a un soutien beaucoup plus important des étiages à Korodougou Marka. Par contre on voit cette fois une nette différence entre le Baoulé et la Bagoé : il y a deux fois plus de jours secs à Dioila (Baoulé) qu'à Pankourou (Bagoé). Les étiages semblent donc mieux soutenus pour la Bagoé que pour le Baoulé. Si l'on s'en tient au nombre de jours secs, le débit à Douna serait soutenu par la Bagoé et le Banifing, le Baoulé présentant un nombre de jours sec à peu près identique au Bani à Douna. Le nombre de jours déficitaires pour le bassin intermédiaire est important : 105 par an en moyenne.

Le déficit enregistré pour le bassin intermédiaire est de  $3 \text{ m}^3/\text{s}$  en moyenne et de  $90 \text{ m}^3/\text{s}$  au maximum. Un tel déficit ne peut être expliqué uniquement par de l'évaporation et de l'infiltration. Il y a donc des prélèvements effectués sur cette partie du bassin. Cependant on ne connaît pas du tout la quantité d'eau qui peut s'infiltrer dans le lit de la rivière, il nous est donc impossible de donner une estimation de ces prélèvements.

Le déficit (ou au moins une partie du déficit) peut également provenir d'un détarage à la station de Douna. En effet il est possible que par accumulation des sédiments ou au contraire par érosion, le fond du cours d'eau ne soit plus à la même cote ce qui engendre un détarage de la station par rapport à la courbe d'étalonnage établie. Dans notre cas, l'étude effectuée en 1998 par Marieu et al. en 1998 évoque une sous-estimation des débits. Au cours de cette étude, une nouvelle courbe d'étalonnage a été mise en place mais elle ne corrige pas les débits très faibles. Si les débits à Douna sont sous-estimés, il est compréhensible que l'addition des débits de Dioila et de Pankourou soit supérieure au débit de Douna, et donc que le bassin intermédiaire ait des valeurs négatives. On aurait donc un déficit moins important que celui annoncé précédemment.

#### IV.3.2. Débits classés

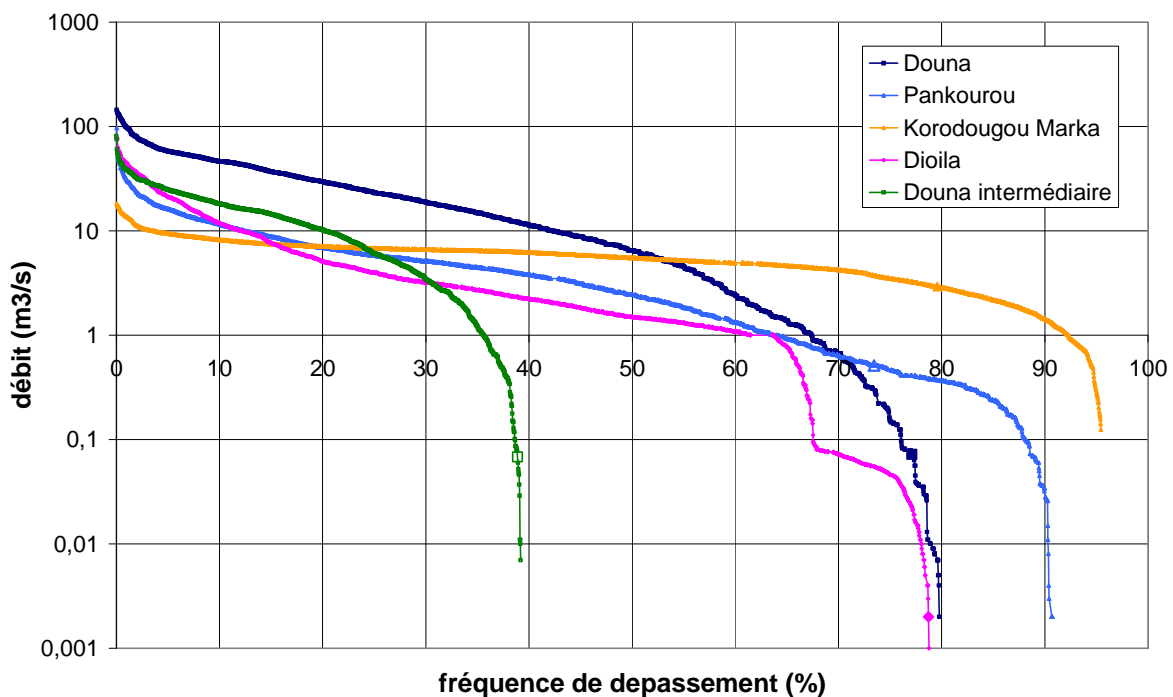


Figure 23 : Débits classés pour les sous-bassins du Bani à Douna. Données journalières de Janvier à Juin sur 15 ans (1976, 1977, 1985, 1987 à 1997, 2001 et 2003).

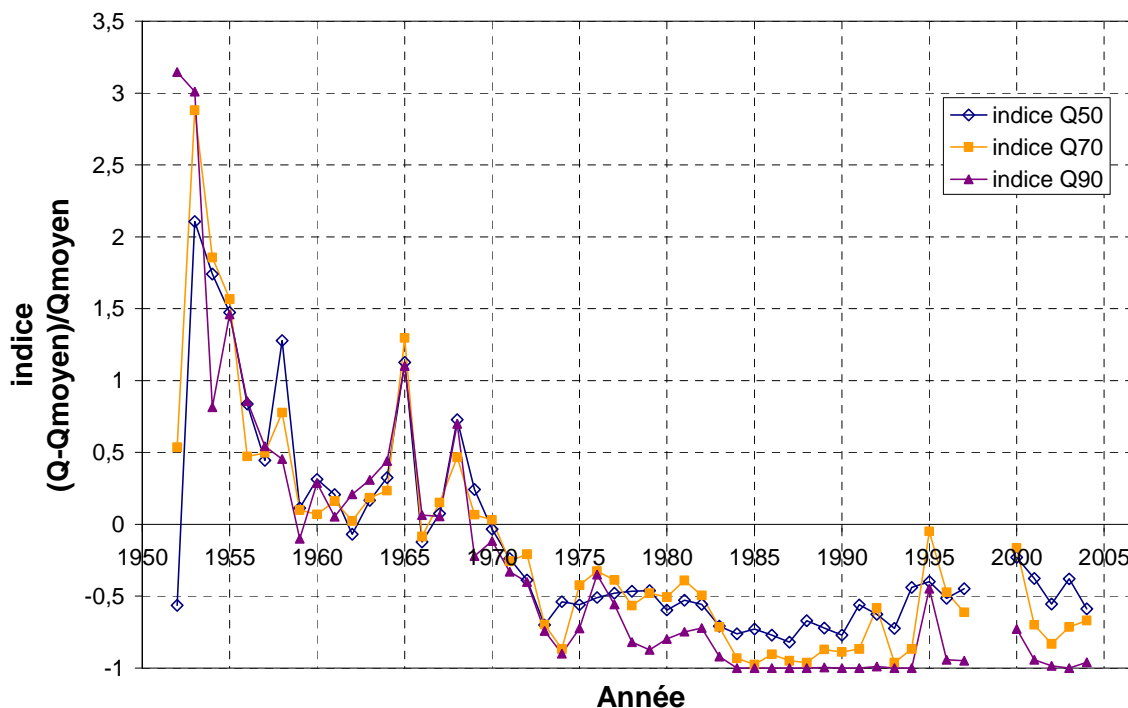
Indice (courbe totale)	Equivalence courbe étiage	Douna		Pankourou		Korodougou Marka		Dioila		Douna intermédiaire	
		Q	Qspé	Q	Qspé	Q	Qspé	Q	Qspé	Q	Qspé
Q50	Q0	144	1420	96	2990	18.2	996	78	2400	80.6	4400
Q70	Q40	11.5	114	3.8	117	6.21	336	2.23	69.1	0	0.39
Q90	Q80	0	0.08	0.37	11.4	2.86	155	0	0.03	-4.4	-241

**Tableau 12 : Indices issus de la courbe des débits classés et de la courbe des débits spécifiques classés pour les principaux sous bassins du Bani à Douna. Unités : Q en m<sup>3</sup>/s et Q spécifique en l/s/km<sup>2</sup>. Données journalières de Janvier à Juin sur 15 ans (1976, 1977, 1985, 1987 à 1997, 2001 et 2003).**

La courbe des débits classés confirme le soutien important de l'étiage apporté par Korodougou Marka et souligne la faible variabilité des débits observés à cette station. Les autres bassins connaissent une très forte variabilité, en particulier lors des événements extrêmement secs. La Bagoé a un comportement similaire à celui du Banifing, avec toutefois des valeurs beaucoup moins élevées. Le bassin de la Bagoé serait donc au moins en partie sous l'influence des grès situés à l'Est.

Les débits spécifiques classés (voir indices Tableau 12) montrent que la Bagoé est bien moins productive que le Banifing pendant l'étiage et surtout pendant la période de tarissement. En effet, Q40 (Korodougou Marka) est 3 fois plus élevé que Q40 (Pankourou) et presque 5 fois plus élevé que Q40 (Dioila). Les valeurs observées à Pankourou sont plus proche de Dioila que de Korodougou Marka. Par contre, l'étiage est soutenu plus longtemps à Pankourou qu'à Dioila puisque Q80 (Pankourou) = 11m<sup>3</sup>/s alors qu'il est pratiquement nul pour Dioila. Le bassin intermédiaire est particulièrement productif au début de l'étiage avant la phase de tarissement. Ensuite les débits spécifiques décroissent très rapidement et atteignent des valeurs très faibles par rapport à tous les autres bassins.

Afin d'étudier la variabilité interannuelle, on a construit les courbes de débits classés pour Douna pour chaque année (années complètes). On obtient ainsi les quantiles Q50, Q70 et Q90 pour chaque année. Le graphique Figure 24 présente l'indice de variation de variation  $i$  de ces quantiles :  $i = (Q - Q_{\text{moyen}}) / Q_{\text{moyen}}$ .  $Q_{\text{moyen}}$  est le quantile moyen calculé sur toute la période d'observation.



**Figure 24 : Evolution des quantiles de la courbe des débits classés de Douna de 1962 à 2004.**  
**Indice =  $(Q - Q_{moyen})/Q_{moyen}$ .**

Il y a une rapide diminution depuis 1953. L'indice passe en négatif en 1970 et reste toujours inférieur à 0. Les débits d'étiages sont donc en nette diminution et restent en dessous de la moyenne interannuelle depuis 1970. Seul Q70 atteint de nouveau la valeur moyenne en 1995, sous l'effet de l'année 1994, particulièrement pluvieuse.

#### IV.3.3. Coefficients de tarissement

Globalement on observe une augmentation du coefficient de tarissement entre 1970 et 1990 (Figure 25). Ensuite il diminue pendant quelques années et ré-augmente à partir de 2000. Pankourou et Dioila ont des valeurs et des évolutions voisines. Encore une fois Korodougou Marka se démarque nettement avec un coefficient de tarissement bas, 3 à 4 fois inférieur à Pankourou et Dioila. On a donc une vidange des nappes beaucoup plus rapide au Sud et à l'Ouest du bassin du Bani (Baoulé et Bagoé) qu'à l'Est (Banifing). Le coefficient de tarissement global pour le Bani à Douna suit les valeurs et l'évolution de la Bagoé et du Baoulé jusqu'en 1985. Ensuite les coefficients du Baoulé et de la Bagoé augmentent tandis que le coefficient du Bani à Douna reste stable. Il semblerait donc que pendant cette phase, l'influence du bassin du Banifing soit plus importante, en tout cas suffisamment pour que le coefficient de tarissement global soit affecté et cesse d'augmenter.

Comme nous l'avons vu précédemment, le bassin de la Bagoé a été très affecté par la bonne saison des pluies de 1994, à l'inverse des autres bassins.

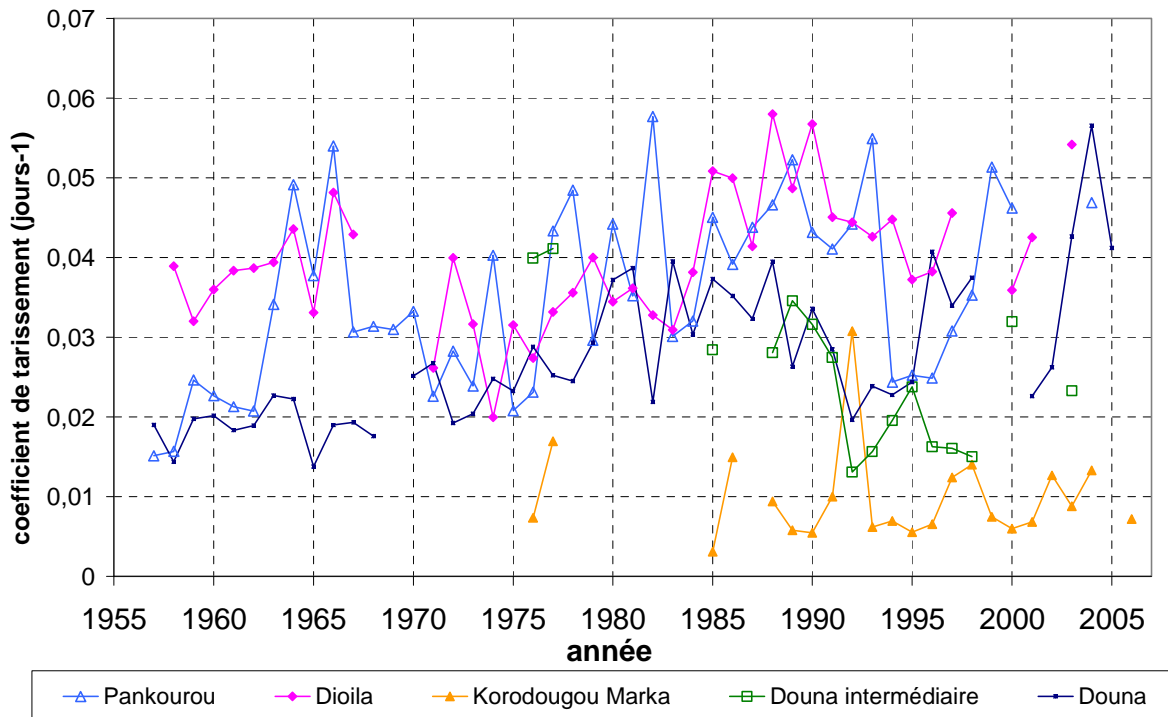


Figure 25 : Evolution des coefficients de tarissement pour le Bani à Douna et ses principaux affluents de 1957 à 2006.

#### IV.4. Conclusion sur les résultats obtenus

L'étude des hydrogrammes nous a permis de mettre en évidence une certaine synchronisation entre le Baoulé, la Bagoé et le Banifing : d'abord une diminution jusqu'à un débit minimum au mois d'Avril puis une augmentation des débits. Le Banifing connaît des variations beaucoup moins importantes que le Baoulé et la Bagoé. De manière générale, les sous-bassins versant qui ne sont pas directement situés sur l'une des rivières principales (Baoulé, Bagoé ou Banifing) produisent un débit toujours décroissant pendant les 6 mois les plus secs. Le calcul des débits spécifiques met en relief 3 sous-bassins plus productifs que les autres : Loulouni, Korodougou Marka et Madina Diassa.

Les débits classés montrent que pour ces 3 stations et pour Pankourou, la variabilité des débits est moins importante que pour les autres stations. De plus le débit est soutenu pendant plus longtemps. On a donc une diminution moins rapide des débits qui peut être dû à une géologie différente, offrant une capacité de stockage plus importante ou bien des pluies plus abondantes qui, couplées à une capacité de stockage appropriée peuvent permettre le soutien des étiages. Par ailleurs on a pu mettre en évidence une limite de l'utilisation des débits classés, très sensibles aux valeurs nulles. Cette méthode n'est donc pas applicable pour des cours d'eau non pérennes.

Enfin les coefficients de tarissement confirment que Loulouni et Korodougou Marka sont sous l'influence de nappes qui se vidangent plus lentement par rapports aux autres sous-bassins. L'évolution générale des coefficients de tarissement est à la hausse sauf pour Korodougou Marka qui reste relativement stable et pour Loulouni qui n'augmente qu'à partir de 1998. L'effet de la bonne année 1994 n'est réellement sensible que pour le bassin de la Bagoé et dure pendant les 2 années suivantes. Mahé et al. (2000) ont trouvé la même durée en se servant de données piézométriques (voir partie II.4. Relation pluie, débit, piézométrie).

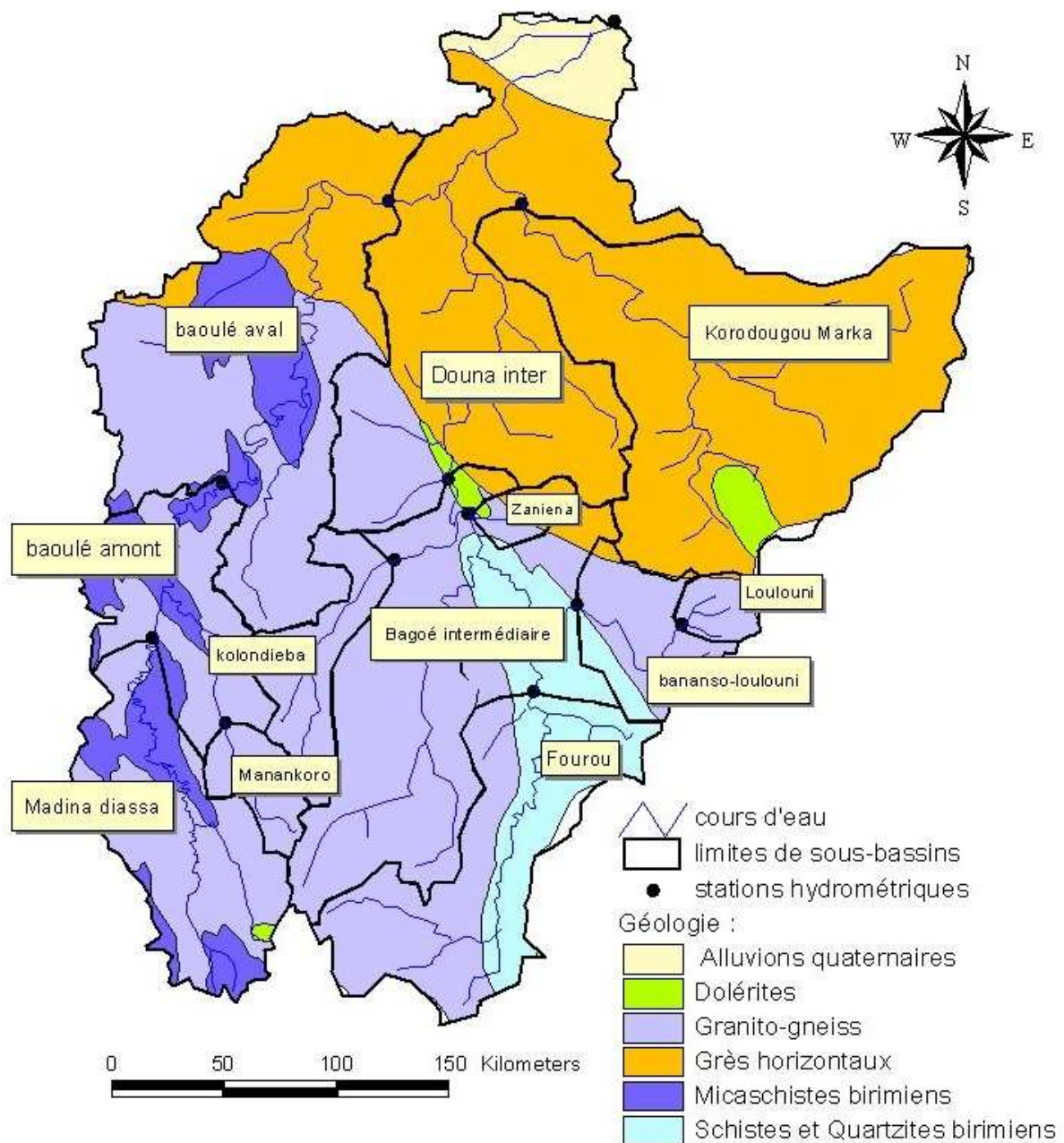
p13). Du fait des valeurs négatives, les coefficients de tarissement pour les bassins intermédiaires sont très difficiles à calculer et à interpréter. Une autre méthode de calcul pourrait peut-être mieux s'adapter sur ce type de séries.

#### ***IV.5. Relation débits – géologie***

A plusieurs reprises, nous avons vu que la géologie pouvait être l'un des facteurs influençant les débits d'étiage. Dans cette dernière partie, on se propose de vérifier cette hypothèse, en séparant le bassin en 2 zones de géologies différentes. La partie gréseuse sera représentée par une série « grès » = Douna – Dioila – Pankourou. (qui correspond finalement à Douna intermédiaire + Korodougou Marka). La partie socle métamorphique (granito-gneiss, schistes, micaschistes, quartzites, roches vertes) sera représentée par une série « socle » = Dioila + Pankourou. On a donc deux bassins complémentaires. (Voir carte Figure 26). Le Tableau 13 donne quelques informations concernant ces deux « sous bassins », en particulier le pourcentage de la surface de chaque « sous bassin » effectivement comprise dans les grès ou le socle.

	Stations	Surface (km <sup>2</sup> )	% surface dans le grès/socle	Période observée
Grès	Douna – Dioila – Pankourou	36 650	84,38 % dans le grès	1958 – 1997
Socle	Dioila + Pankourou	64 650	89,5 % dans le socle	(37 ans)

**Tableau 13 : Présentation des sous-bassins grès et socle : superficie et géologie et période d'observation.**



**Figure 26 : Carte géologique et sous-bassins versants du Bani (croquis géologique : Brunet-Moret et al. 1986). Les dolérites, granito-gneiss, micaschistes, roches vertes et schistes et quartzites peuvent, dans une première approche, être regroupés sous l'appellation « socle ».**

#### IV.5.1. Hydrogrammes et débits spécifiques

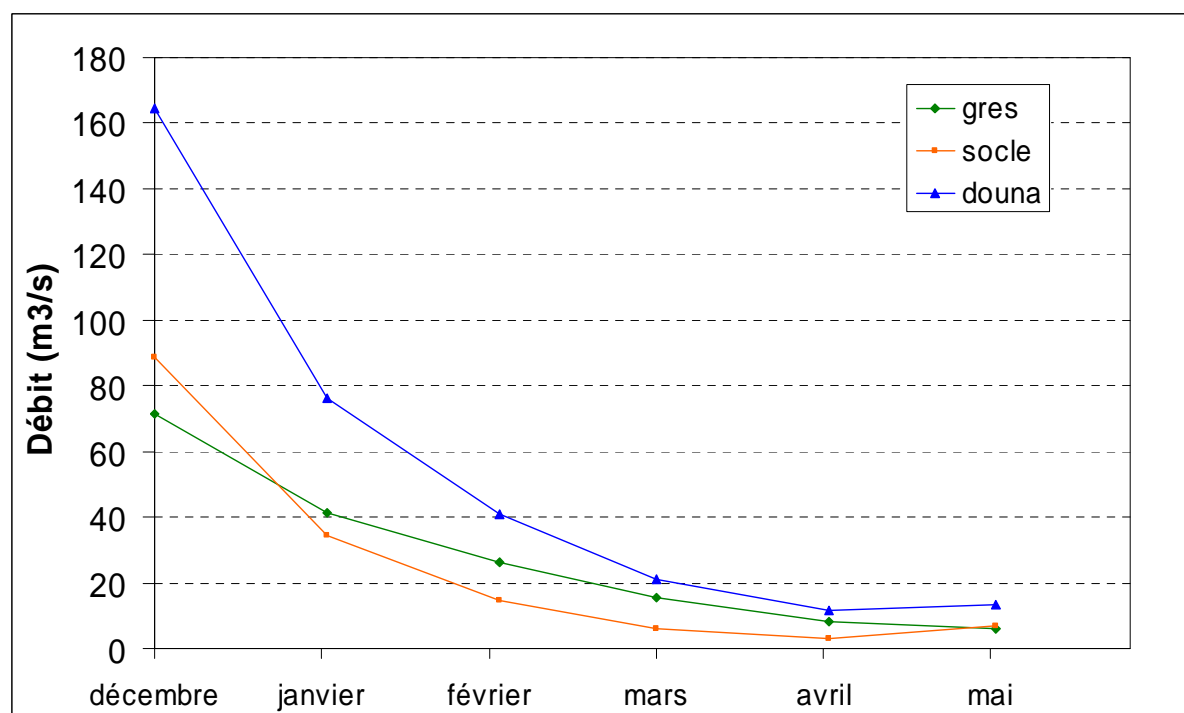


Figure 27 : Débits moyens mensuels de Décembre à Mai sur 36 ans pour les sous-bassins géologiques (1958 – 1967 ; 1971 – 1973 ; 1975 - 1997).

	décembre	janvier	février	mars	avril	mai	moyenne
grès	43 %	55 %	64 %	73 %	72 %	47 %	<b>52 %</b>
socle	54 %	45 %	36 %	27 %	28 %	53 %	<b>48 %</b>

Tableau 14 : Pourcentage du débit des sous-bassins grès et socle par rapport à Douna. Moyenne sur 36 ans (1958 – 1967 ; 1971 – 1973 ; 1975 - 1997).

	Grès	Socle
<b>Nombre de jours secs</b>	196	197
<b>Nombre de jours secs /an</b>	5.4	5.4
<b>Nombre de jours négatifs</b>	804	
<b>Nombre de jours négatifs /an</b>	22	
<b>Perte cumulée (m<sup>3</sup>/s)</b>	- 2 930	
<b>Perte moyenne par jour (m<sup>3</sup>/s)</b>	- 0.43	
<b>Perte maximale par jour (m<sup>3</sup>/s)</b>	- 70.8	

Tableau 15 : Jours secs et jours négatifs pour les sous-bassins géologiques. Moyenne sur 36 ans (1958 - 1967; 1971 - 1973; 1975 - 1997).

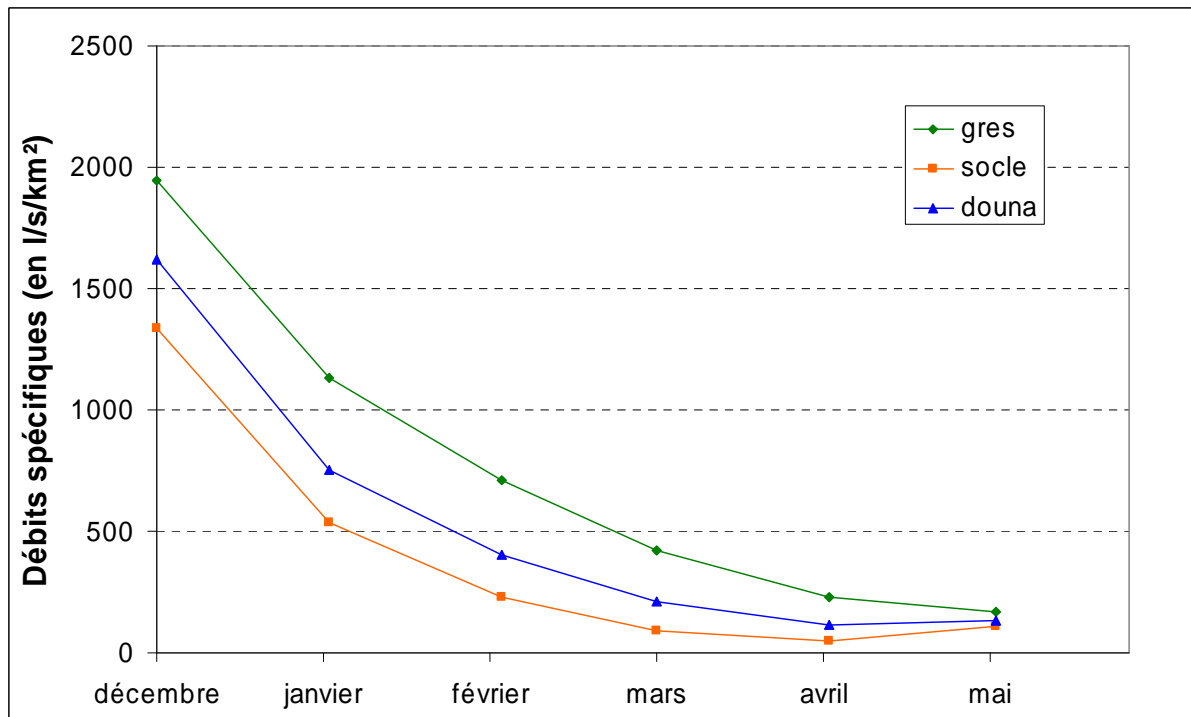


Figure 28 : Débits spécifiques moyens mensuels sur 36 ans pour les sous-bassins géologiques.

La géologie a une nette influence sur la productivité des bassins versants. Les débits d'étiage de la partie grès diminuent moins vite que ceux de la partie socle, ce qui laisse présumer un soutien plus important des nappes dans les grès. De Décembre à Mai, 60% de l'écoulement du Bani à Douna provient de la partie gréseuse du bassin versant, qui est presque 2 fois moins étendue et reçoit moins de pluies que la partie socle. Au mois d'Avril la tendance s'inverse, le socle apporte un débit plus important que le grès. Les premières pluies arrivent sur la partie Sud du bassin du Bani (située dans le socle) alors que la partie Est (grès) ne reçoit pas encore de pluies, ce qui expliquerait cette inversion. La différence entre les débits spécifiques du grès et du socle est de plus de 500 l/s/km<sup>2</sup>. Cette différence diminue lorsqu'on va vers les mois les plus secs.

Le nombre de jours secs pour la partie grès et la partie socle est similaire : environ 5 jours par an. Par contre la partie grès est déficitaire 22 jours par an contre 0 pour la partie socle. Ces jours négatifs ne sont pas visibles sur l'hydrogramme moyen présenté plus haut, masqués par les moyennes interannuelles. La partie grès comprend le bassin Douna intermédiaire qui, malgré le fait qu'il soit majoritairement dans les grès, est très déficitaire (voir partie IV.3. ). Le déficit est en moyenne de 0.43 m<sup>3</sup>/s/jour avec un maximum de 70 m<sup>3</sup>/s/jour. Encore une fois on peut mentionner le détarage de la station de Douna qui induirait une sous-estimation des débits à Douna et donc un déficit fictif entre Douna et Pankourou + Dioila.

#### IV.5.2. Débits classés

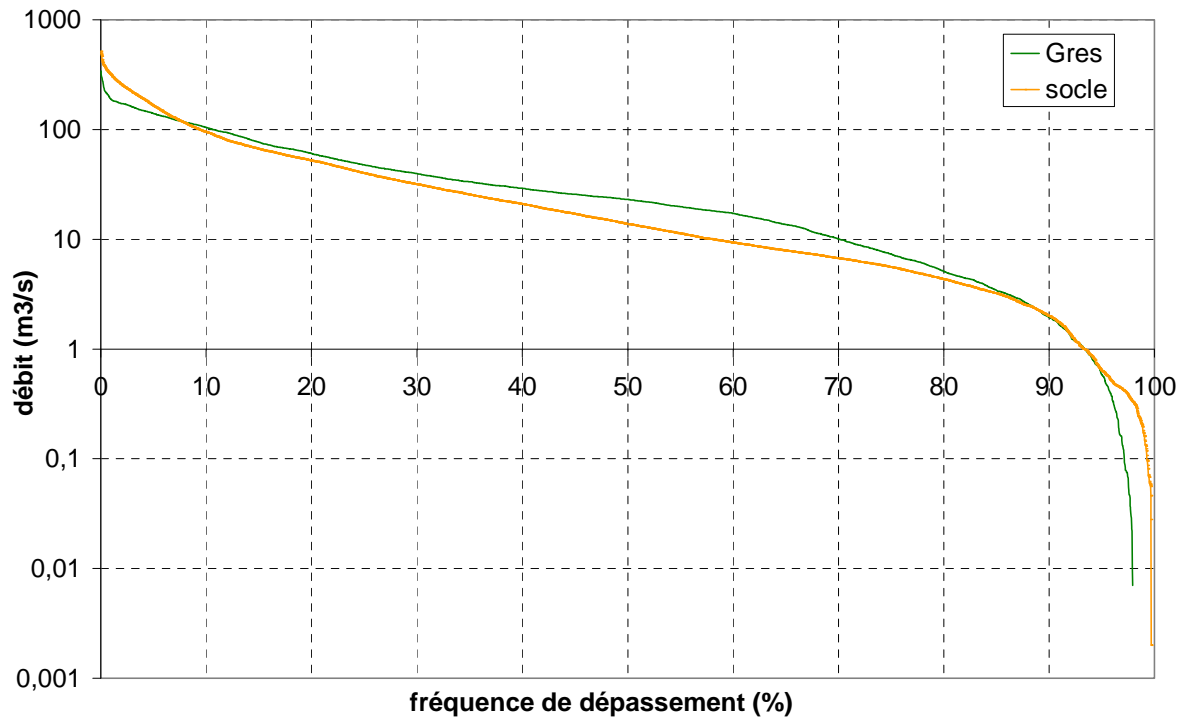


Figure 29 : Courbes des débits classés pour les sous-bassins géologiques du Bani de Décembre à Mars sur 38 ans (1957 – 1967 et 1971 – 1997)

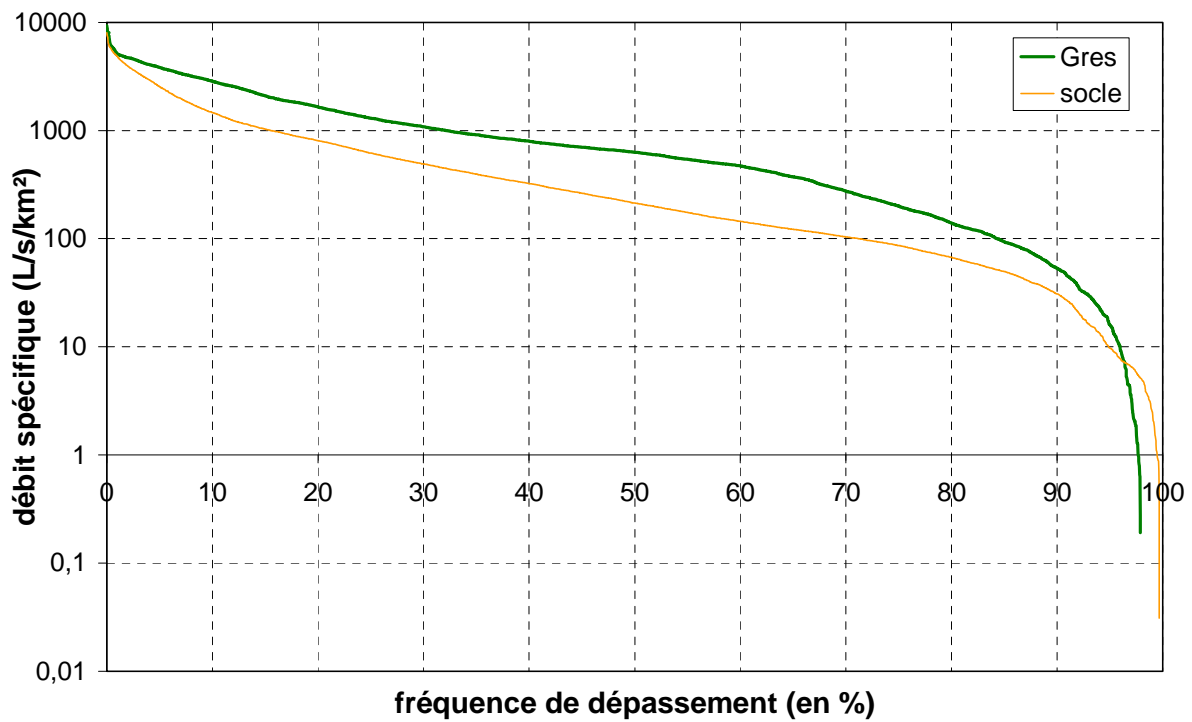


Figure 30 : Courbes des débits spécifiques classés pour les sous-bassins géologiques du Bani. De Décembre à Mars sur 38 ans (1957 – 1967 et 1971 – 1997)

Les débits spécifiques classés montrent que la productivité pour les grès est supérieure ou égale à celle dans le socle jusqu'à une fréquence de dépassement de 80%, ce qui correspond à une fréquence de dépassement de 90% sur la courbe complète. L'étiage est donc mieux soutenu dans les grès, à l'exception des événements extrêmement secs.

#### IV.5.3. Coefficients de tarissement

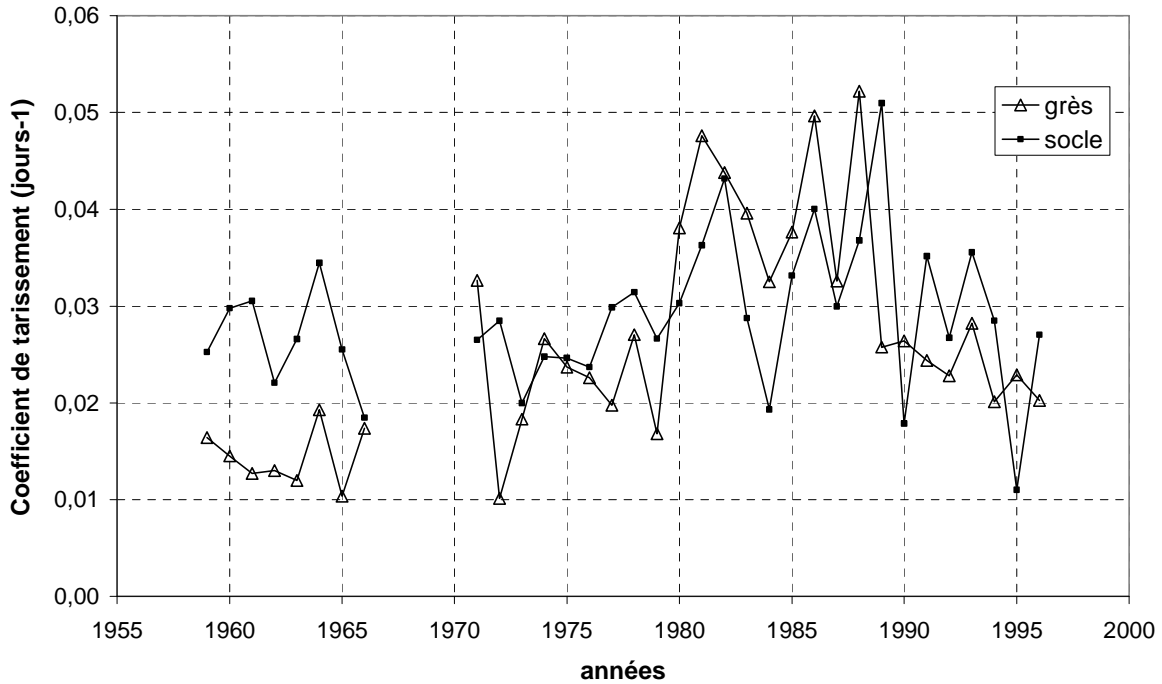
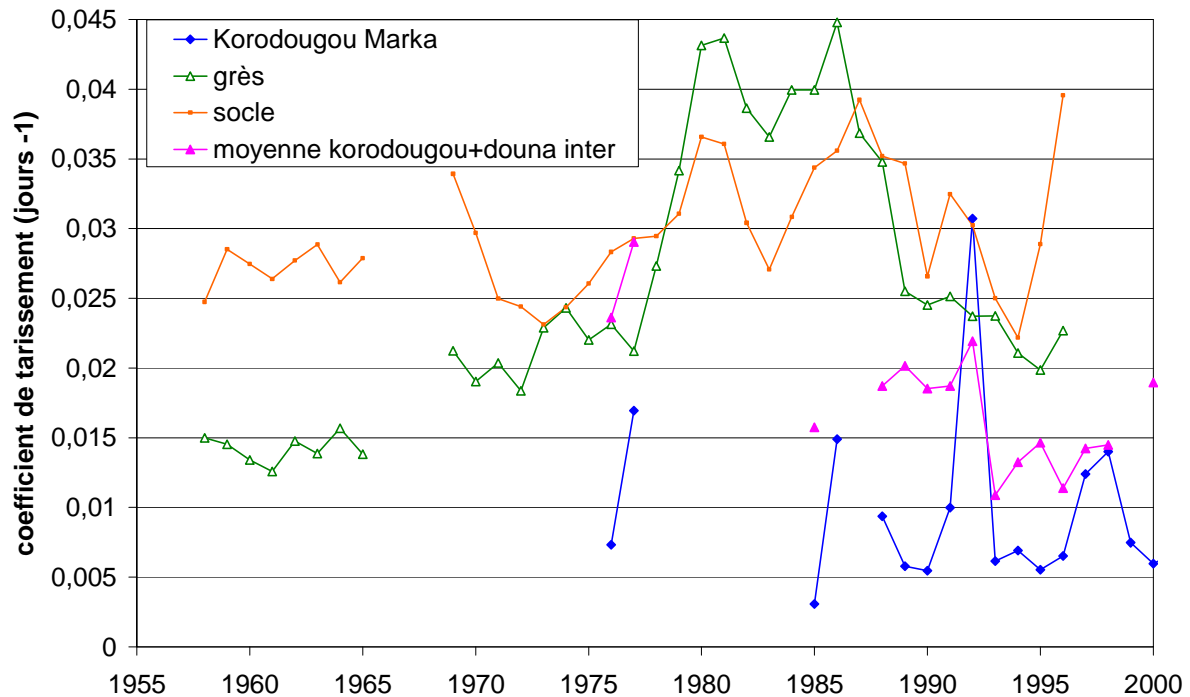


Figure 31 : Coefficients de tarissement pour les sous-bassins géologiques du Bani.

Vu la grande variabilité des coefficients de tarissement, et pour plus de clarté, on fait une moyenne mobile sur 3 ans de ces coefficients. (voir Figure 32)



**Figure 32 : Moyenne mobile sur 3 ans des coefficients de tarissement pour les sous-bassins géologiques. Coefficients de tarissement de Korodougou Marka et moyenne des coefficients de Korodougou Marka et de Douna intermédiaire.**

D'après les résultats précédents, on pourrait penser que les coefficients de tarissement pour la partie « Grès » soient nettement moins élevés que pour la partie « socle ». C'est effectivement le cas jusqu'en 1965 au moins (ensuite les données ne nous permettent pas de faire le calcul du coefficient de tarissement jusqu'en 1972). Le tarissement des nappes dans le socle est donc plus rapide que dans les grès pour cette période. Entre 1980 et 1990, le coefficient de tarissement augmente en moyenne plus pour les grès que pour le socle. L'augmentation est très brutale et la réalité physique de cette augmentation n'est pas avérée. Cependant, dans le cas où les grès continueraient d'être plus productifs que le socle pendant cette période, cela signifierait que la capacité d'emmagasinement est plus importante dans les grès qui, même avec un coefficient de tarissement plus fort, sont toujours en mesure de fournir de l'eau pour le soutien des étiages. Mais dans ce cas, comment expliquer que le coefficient des grès soit plus élevé seulement pendant la période 1980 – 1990.

La comparaison de la série « Grès » avec la moyenne Korodougou Marka - Douna intermédiaire montre une nouvelle fois les faiblesses de la méthode de calcul du coefficient de tarissement. En effet ces deux courbes devraient être très similaires voire identiques ce qui n'est pas du tout le cas.

## V - CONCLUSION

Le bassin du Bani est un bassin pour lequel on dispose de plusieurs séries de données hydrométriques, permettant son étude. Cependant la qualité et la disponibilité des données restent difficiles à assurer pour plusieurs stations. Par ailleurs c'est l'un des cours d'eau d'Afrique de l'Ouest les plus touchés par le changement climatique de 1970.

Au cours de cette étude, nous avons testé différentes méthodes de caractérisation des étiages sur le Bani. L'observation des hydrogrammes et le calcul des débits spécifiques a été riche en enseignements : avec la création des séries intermédiaires entre les bassins, cela a permis de connaître la contribution de chaque sous-bassin à l'écoulement du Bani à Douna durant l'étiage. On a ainsi une idée plus précise de la provenance de ces débits d'étiages, même si cela reste à vérifier, en utilisant par exemple la géochimie et les traçages naturels. Parmi les 3 principaux affluents du Bani, c'est le Banifing qui apporte la plus grande contribution, avec en moyenne 60% du débit d'étiage à Douna. L'observation des séries intermédiaires générées a mis en évidence la présence de pertes pour l'écoulement. Sur ce point, des vérifications doivent être effectuées concernant la courbe d'étalonnage de la station de Douna pour s'assurer qu'elle ne sous-estime pas les débits suite à un détarage de la station. Si ces pertes sont avérées, il sera intéressant d'évaluer quelle quantité d'eau peut être perdue par évaporation et infiltration dans le lit. On pourra ainsi avoir une idée de la quantité d'eau prélevée dans le cours d'eau.

Les débits classés ont été utiles pour étudier la variabilité des débits. Celle-ci est intimement liée au soutien des étiages puisque, à cette période, les variations correspondent à des diminutions. Une forte variation correspondant à une forte diminution. On a ainsi mis en évidence une diminution des débits beaucoup moins rapide pour les bassins du Banifing et de la Bagoé, probablement due à la présence d'un aquifère situé dans des niveaux gréseux. Ces courbes donnent donc une première idée de la vitesse de tarissement.

Enfin nous avons déterminé les coefficients de tarissement pour chaque sous-bassin. Il est apparu que la méthode de calcul des coefficients de tarissement posait quelques problèmes. Les résultats sont en effet remis en cause du fait d'une forte variabilité d'une année sur l'autre, qui reste difficile à expliquer. Ces résultats sont donc à prendre avec précaution mais nous pouvons tout de même dire que les nappes alimentant Loulouni et Korodougou Marka ont une vidange bien plus lente que les autres sous-bassins. En effet, Ces deux bassins ont des coefficients presque toujours inférieurs à  $0,2 \text{ jours}^{-1}$  tandis que pour les autres sous-bassins, cela varie entre  $0,2$  et  $0,5 \text{ jours}^{-1}$ . Au niveau de l'évolution interannuelle, on a globalement une augmentation du coefficient de tarissement entre 1970 et 1990. L'année 1994 particulièrement pluvieuse a eu des répercussions, en particulier sur la Bagoé qui voit son coefficient de tarissement (à Pankourou) chuter (de  $0,55 \text{ jours}^{-1}$  à  $0,25 \text{ jours}^{-1}$  entre 1993 et 1994) et rester bas pendant 2 années avant d'augmenter à nouveau. La partie socle comporte plusieurs types de lithologies et en particulier, on peut penser que les micaschistes ont probablement des propriétés hydrodynamiques différentes des granito-gneiss, cela dépend de l'altération de ces roches. Il y a donc un nouvel aspect à prendre en compte concernant

l'influence de la géologie sur l'écoulement, d'autant plus que les micaschistes ne se retrouvent que sur le bassin du Baoulé.

Il est important de préciser que ces résultats dépendent grandement de la validité des courbes d'étalonnage au niveau des très faibles débits. Or il reste encore beaucoup de travail à réaliser concernant la critique des données. Par ailleurs, un travail d'inventaire des aménagements existants sur le bassin paraît indispensable : lors d'une mission de quelques jours sur le terrain nous avons pu voir 4 aménagements, tous situés entre Pankourou et Bougouni. Il s'agit principalement de lieux d'abreuvement pour les troupeaux. Ces aménagements ne sont certainement pas sans conséquences sur l'écoulement puisque certains stoppent complètement l'écoulement en période d'étiage. D'autres aménagements similaires doivent probablement exister sur le bassin.

Cette étude a permis de mettre en évidence les points faibles de l'étude des étiages sur le bassin du Bani et plus généralement en Afrique de l'Ouest. Au vu des résultats, il apparaît en effet nécessaire d'être très vigilant sur les données que l'on utilise et de tester d'autres méthodes de calcul du coefficient de tarissement. Si la qualité des données le permet, on pourra tester d'autres méthodes de traitement qui permettront d'aller plus loin dans la caractérisation des étiages : l'analyse fréquentielle qui permet le calcul des périodes de retour des étiages les plus secs, ou encore la décomposition des hydrogrammes. Parallèlement, l'étude de l'occupation des sols, de l'évolution de l'urbanisation et du développement du Mali au niveau agricole et démographique sont autant d'éléments qui aideront à la compréhension de l'évolution des débits d'étiage.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANONYME, (1959) Aménagement de la plaine de San-Est, étude hydrologique du Banifing de San ; T1 Texte. ORSTOM service hydrologique- Ministère de l'agriculture (Mali), 102 p.

ANONYME, (1975) Etude de seuils sur le fleuve Bani. SCET international – DNGR (Mali), 71 p.

ABI-ZEID, I., (1997) *La modélisation stochastique des étiages et de leurs durées en vue de l'analyse du risque*. Thèse de doctorat. ENGREF - Université du Québec, 300 p.

BAMBA, F., (1997) *Evaluation du volume de l'écoulement de base sur le bassin du Bani à Douna*. Rapport de stage de formation-insertion, ORSTOM, Bamako, Mali, 10p.

BAMBA, F., (1998) *Bilan de cinq années de recherche période 1993-1997*. ORSTOM, Bamako, Mali, 16p.

BAMBA, F., DIABATE, M., MAHE, G., DIARRA, M., (1996a) Rainfall and runoff decrease of five river basins of the tropical upstream part of the Niger river over the period 1951-1989. In : Roald L.A. (Ed.), *Global hydrological change XXI General Assembly of EGS*, La Haye, Pays-Bas, 16p.

BAMBA, F., MAHE, G., BRICQUET, J.P., OLIVRY, J.C., (1996b) Changements climatiques et variabilité des ressources en eau des bassins du haut Niger et de la cuvette lacustre. *XIIèmes journées hydrologiques de l'ORSTOM : Réseaux hydrométriques, réseaux télématiques, réseaux scientifiques : nouveaux visages de l'hydrologie régionale en Afrique*, ORSTOM, Montpellier, France, 21p.

BAMBA, F., MAHE, G., SOUMAGUEL, A., DIABATE M. (1996c) Bilans hydrologiques pour 5 affluents majeurs du fleuve Niger en amont du delta. IRD, Bamako, Mali, 16p.

BILLON, B., (1985) Le Niger à Niamey, décrue et étiage 1985. *Cahiers de l'ORSTOM, série hydrologie*, 21(4), p. 3-22.

BRUNET-MORET. Y., CHAPERON, P., LAMAGAT, J.P., MOLINIER, M., (1986) Monographie hydrologique du fleuve Niger Tome 1 Niger Supérieur. Editions de L'ORSTOM, Collection monographies hydrologiques n°8, Paris, France, 410p.

DESSOUASSI, R., (1997) *Variabilité du niveau et de la qualité chimique des eaux souterraines dans le haut bassin du fleuve Niger au Mali. Comparaison avec la variabilité des écoulements de surface*. Mémoire de fin d'étude d'ingénieur de conception en génie civil. Université du Mali, Ecole Nationale d'Ingénieur du Mali, Bamako, Mali, 119p.

HASSANE, A., KUPER, M., ORANGE, D. (2002) Influence des aménagements hydrauliques et hydro-agricoles du Niger Supérieur sur l'onde de la crue du delta intérieur du Niger au Mali. LECOM – IRD, Bamako, Mali, 16p.

KUPER, M., HASSANE, A., ORANGE, D., CHOHN-KUPER, A., SOW, M. (2002) Régulation et partage des eaux du fleuve Niger; Impact de la gestion des aménagements hydrauliques. p.411-430.

LUBES, H., MASSON, J.M., RAOUS, P., TAPIAU, M. (2002) Logiciel de calculs statistiques et d'analyse fréquentielle adapté à l'évaluation du risque en hydrologie. Manuel d'utilisation du logiciel SAFARHY, IRD, Montpellier, France. 123p.

MAHE, G., OLIVRY, J.C., DESSOUASSI, R., ORANGE, D., BAMBA, F., SERVAT, E. (2000) Relation eau de surface – eau souterraine d'une rivière tropicale au Mali. CRAS, n°330, Paris, France, p. 689-692.

MAHE, G., OLIVRY, J.C. (1995) Variation des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et centrale de 1951 à 1989. *Sécheresse*, 6(1), p109-117.

MAHE, G., DESSOUASSI, R., CISSOKO, B., OLIVRY, J.C., (1998) Comparaison des fluctuations interannuelles de piézométrie, précipitation et débit sur le bassin versant du Bani à Douna au Mali. In : Servat E., Hugues D., Fritsch J.M., Hulme M. (Eds.) : *Water Resources Variability in Africa during the XX<sup>th</sup> Century*. Proceedings de la conférence ABIDJAN'98, ORSTOM/AISH/UNESCO, Pub. AISH n°252, p.289-295

MAHE., G., L'HOTE, Y. (1992) Utilisation de la méthode du vecteur régional pour la description des variations pluviométriques interannuelle en Afrique de l'ouest et centrale de 1951 à 1989. In : Le Barbé L., Servat E. (Eds.) : *Régionalisation en hydrologie : application au développement*. XIIIèmes journées hydrologiques de L'ORSTOM, Editions de l'ORSTOM, p.175-192.

MARIEU, B., BAMBA, F., BRICQUET, J.-P., CISSE, N., GREARD, M., HENRY DES TUREAUX, T., MAHE, G., MAHIEUX, A., OLIVRY, J.-C., ORANGE, D., PICOUET, C., SIDIBE, M., TOURE., M. (1998) Rapport final Equanis, Volet hydrologie : Actualisation des données hydrométriques du fleuve Niger au Mali pour Equanis. LECOM/ORSTOM, Bamako, 84p.

MARIKO, A., (2003) *Caractérisation et suivi de la dynamique de l'inondation et du couvert végétal dans le delta intérieur du Niger (Mali) par télédétection*. Thèse de doctorat, Université Montpellier II, Montpellier, France, 317p.

MODARRES, R., (2007) Regional frequency distribution type of low flow in north of Iran by L-moments. *Water Resources Management*, 19p.

OLIVRY, J.C. BRICQUET, J.P., BAMBA, F., DIARRA, M., (1993) Le régime hydrologique du Niger supérieur et le déficit de ces deux dernières décennies. In : Olivry J.C., Boulegue J. (Eds), *Grands bassins fluviaux périatlantiques : Congo, Niger, Amazone*. Actes du colloque PEGI-INSU-CNRS-ORSTOM, Paris, France, p.251-266.

OLIVRY, J.C., (1996) Etudes régionales sur les basses eaux ; effets durables du déficit des précipitations sur les étiages et les tarissements en Afrique de l'Ouest et du Centre. In : XIIèmes journées hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, France, 14p.

PANDEY, R.P., MISHRA, R.K., RANVIR, S., RAMASASTRI, K.S. (2007) Streamflow drought severity analysis of Betwa river system (India). *Water Resources management*, 15p.

PICOUET, C., (1999) *Géodynamique d'un hydrosystème tropical peu anthropisé; le bassin supérieur du Niger et son delta intérieur*. Thèse de doctorat, Université Montpellier II, Montpellier, France, 469p.

ROCHE, M., RODIER, J., SIRCOULON, J. (1975) Aspects météorologiques et hydrologiques des sécheresses continentales. Symposium de Grenoble sur les aspects météorologiques des sécheresses continentales, collection de référence de l'ORSTOM n°B7876hydr., 14p.

ROCHE, M., (1963) *Hydrologie de surface*, Gauthier-Villars, ORSTOM, 430 p.

SERVAT, E., PATUREL, J.E., KOUAME, B., TRAVAGLIO, M., OUEDRAOGO, M., BOYER, J.F., LUBES NIEL, H., FRITSCH, J.M., MASSON, J.M., MARIEU, B. (1998) Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale, *CRAS*, série 2a, **325**(9), p. 679-682

SHAO, Q., CHEN., Y.D., ZHANG, L. (2007) An extension of the three-parameter Burr III distribution for low flow frequency analysis. *Computational statistics & data analysis*, 52, p. 1304-1314.

SMAKHTIN, V.U. (2001) Low Flow hydrology : a review. *Journal of Hydrology*, 240, p.147-186.

TALLAKSEN (Ed.) , J.M., VAN LANEN (Ed.) , H.A.J., BIGGS, B.J.F., BOLGOV, M.V., CLAUSEN, B., DEMUTH, S., FENDEKOCA, M., GOTTSCHALK, L., GUSTARD, A., HISDAL, H., JOWETT, I.G., KASPAREK, L., KAPRZYK, A., KUPCZYK, E., MADSEN, H., MOESLUND, B., NOVICKY, O., PETERS, E., POKOJSKI, W., QUERENR, E., REES, G., ROALD, L., STAHL, K., YOUNG, A. (2003) *Hydrological drought; processes and estimation methods for streamflow and groundwater*. Subdepartement of water resources, Wageningen University, Wageningen, Pays-Bas, 417p.

## **ANNEXES**

ANNEXE 1 : Pourcentage de la surface des sous-bassins appartenant aux différents types de géologie

ANNEXE 2 : Courbes d'étalonnage et jaugeages

**ANNEXE 1 : pourcentage de la surface des sous-bassins appartenant aux différents types de géologie**

	<b>grès</b>	<b>micaschistes birrimiens</b>	<b>granito- gneiss</b>	<b>Dolerites</b>	<b>schistes et quartzites</b>	<b>alluvions quaternaires</b>	<b>somme socle et assimilés</b>
Dioila	16,37	23,54	59,90	0,19			83,6
Pankourou	4,21		71,81	0,70	23,28		95,8
Kouro	95,20		0,16	4,64			4,8
Korodougou marka	100,00						
Bougouni		28,68	70,90	0,42			100,0
Manankoro			100,00				100,0
Madina diassa		30,32	68,86	0,82			100,0
Bananso	4,00	0,00	81,76		14,24		96,0
Douna total	38,50	7,58	43,60	1,08	6,96	2,27	59,2
Douna intermédiaire	82,34		8,46	2,41		6,79	10,9
Baoulé amont		34,25	65,76	-0,01			100,0
Baoulé aval	30,32	19,17	50,52				69,7
Fourou			55,75		44,25		100,0
Kankela			100,00				100,0
Loulouni	4,21		95,79				95,8
Bananso- Loulouni	3,94		77,52		18,54		96,1
Zaniena	54,57		38,61	3,92	2,90		45,4
Kolondieba			100,00				100,0
Bagoé intermédiaire	5,30		72,19	1,44	21,07		94,7
Grès	84,38		7,48	2,13		6,00	9,6
Socle	10,51	12,20	65,63	0,44	11,21		89,5

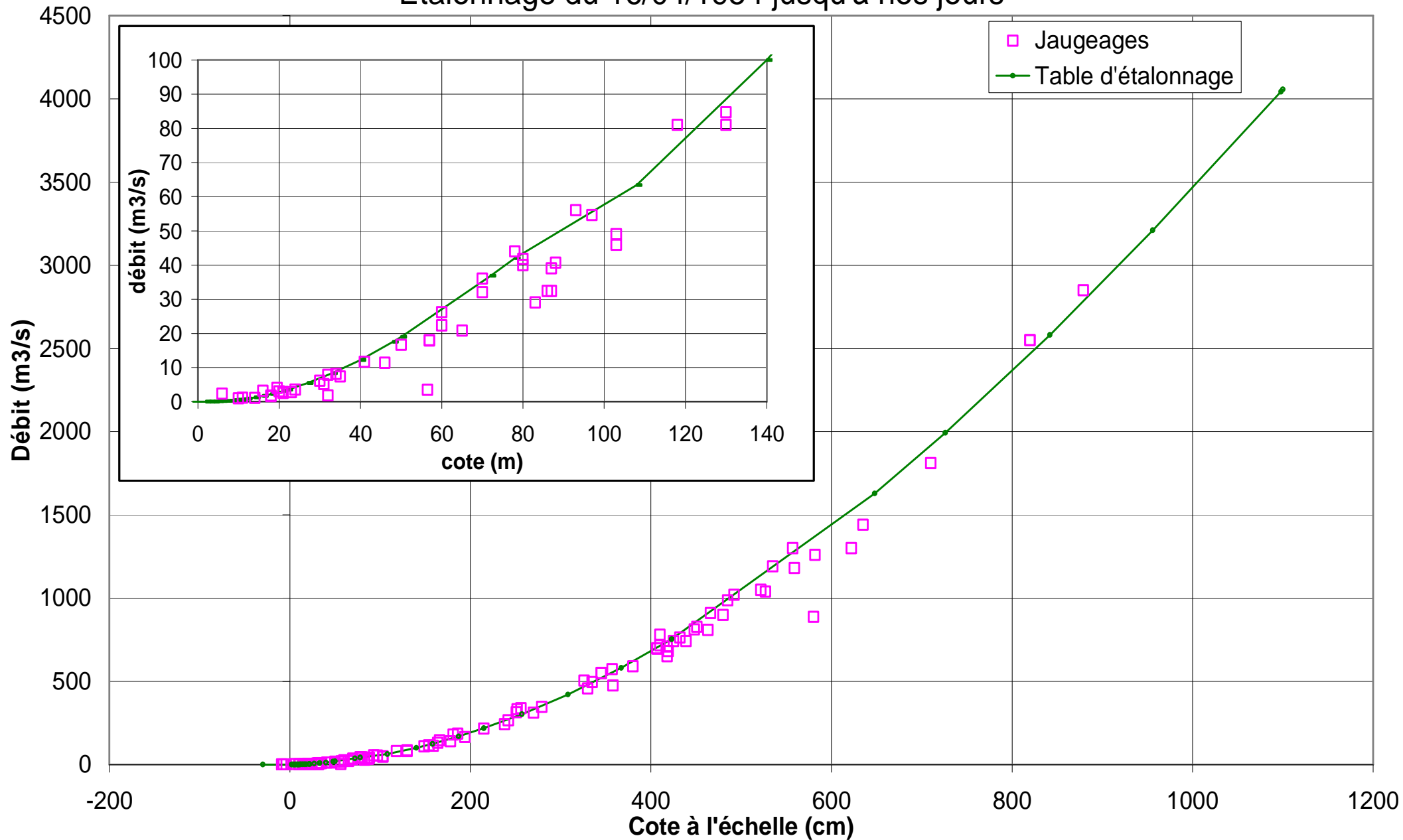
## ANNEXE 2 : Courbes d'étalonnages et jaugeages

Pour chaque station utilisée, courbe d'étalonnage complète et jaugeages disponibles ainsi qu'un agrandissement sur les faibles débits lorsque cela est nécessaire.

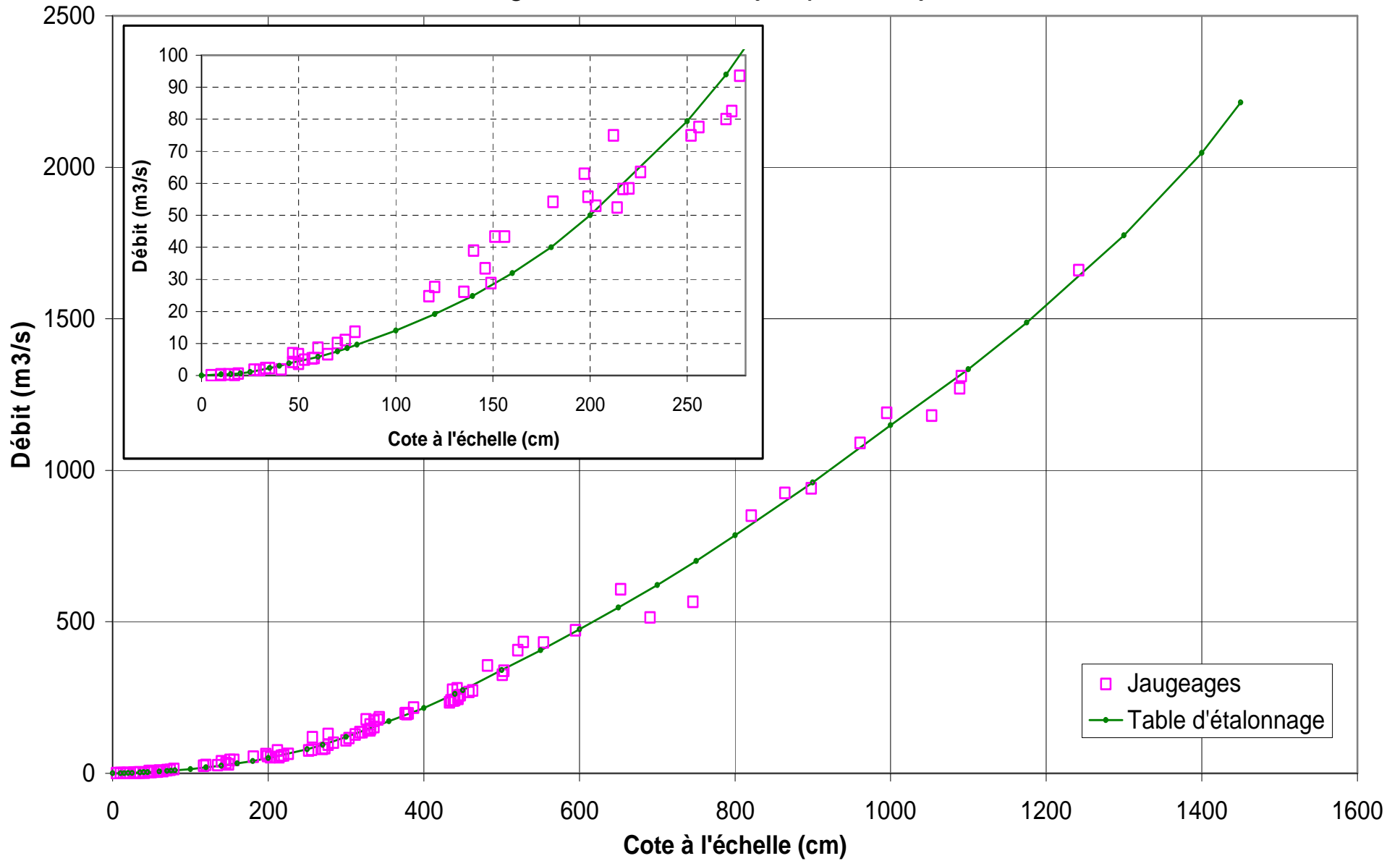
Stations :

- Douna
- Pankourou
- Dioila
- Fourou
- Loulouni
- Bananso
- Kolondieba
- Manankoro
- Zaniena
- Korodougou Marka
- Bougouni
- Madina Diassa

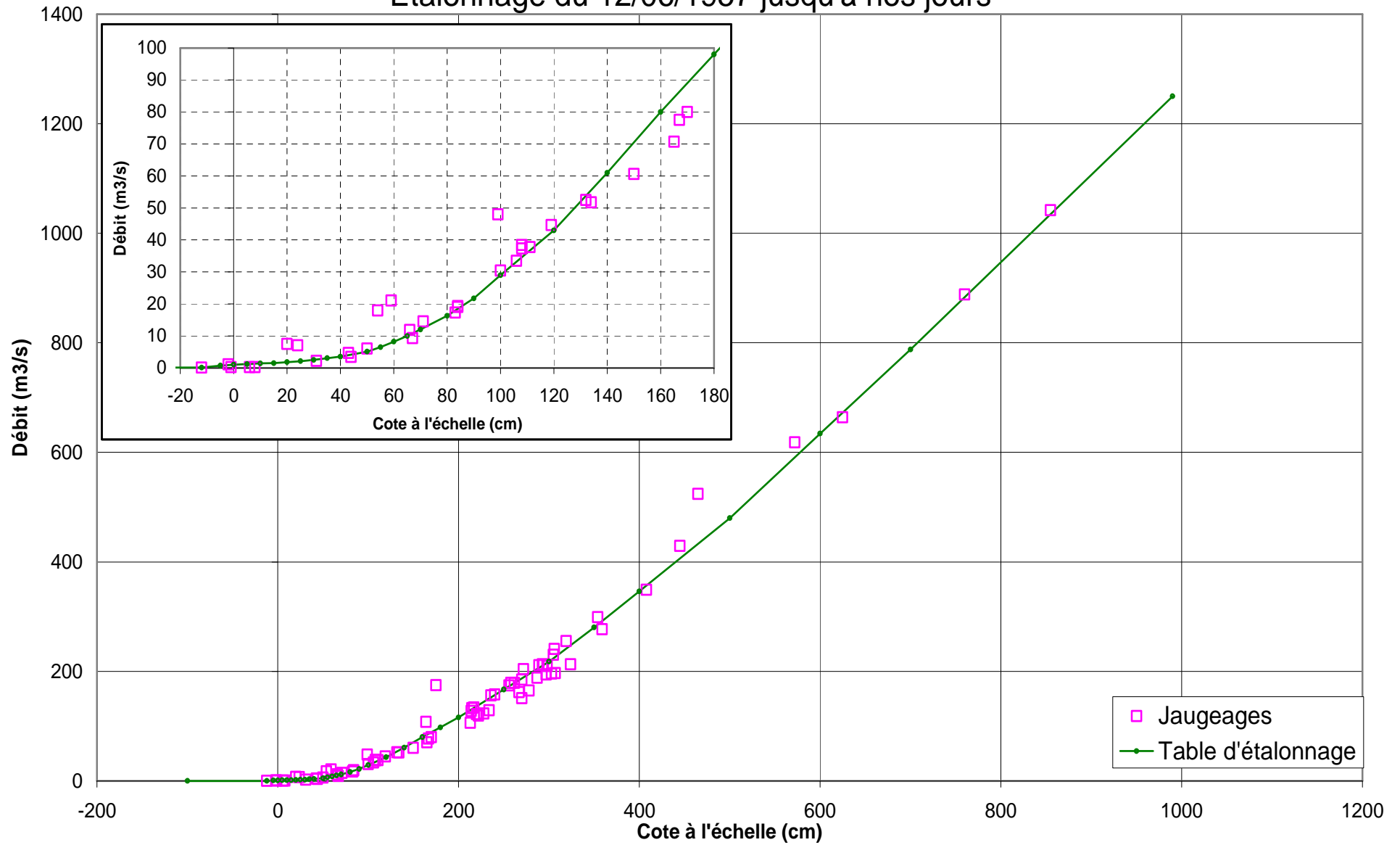
Station : 1271600108 = Douna  
Etalonnage du 16/04/1954 jusqu'à nos jours



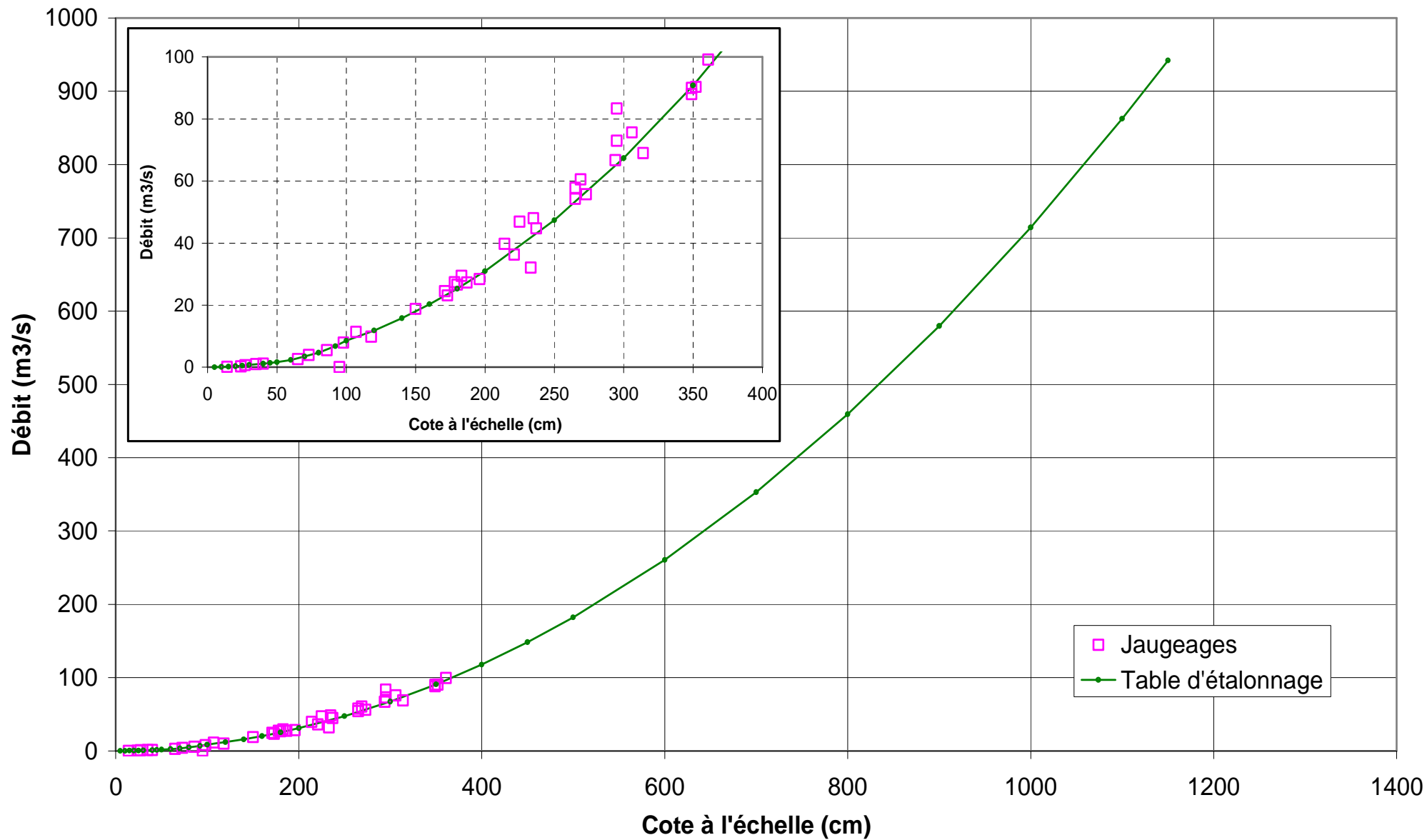
Station : 1271601205 = Pankourou  
Etalonnage du 01/01/1956 jusqu'à nos jours



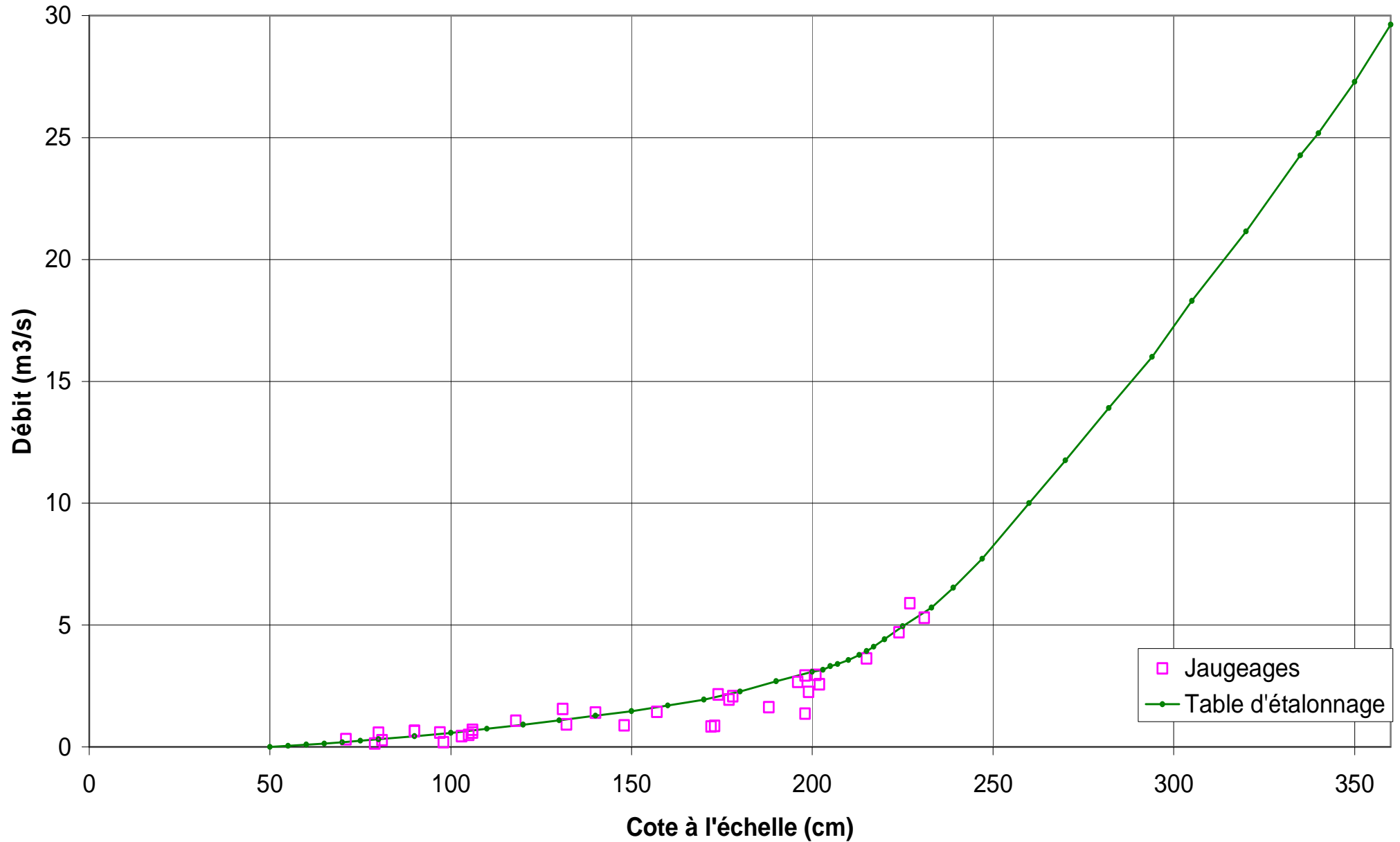
Station : 1271602010 = Dioila  
Etalonnage du 12/06/1957 jusqu'à nos jours



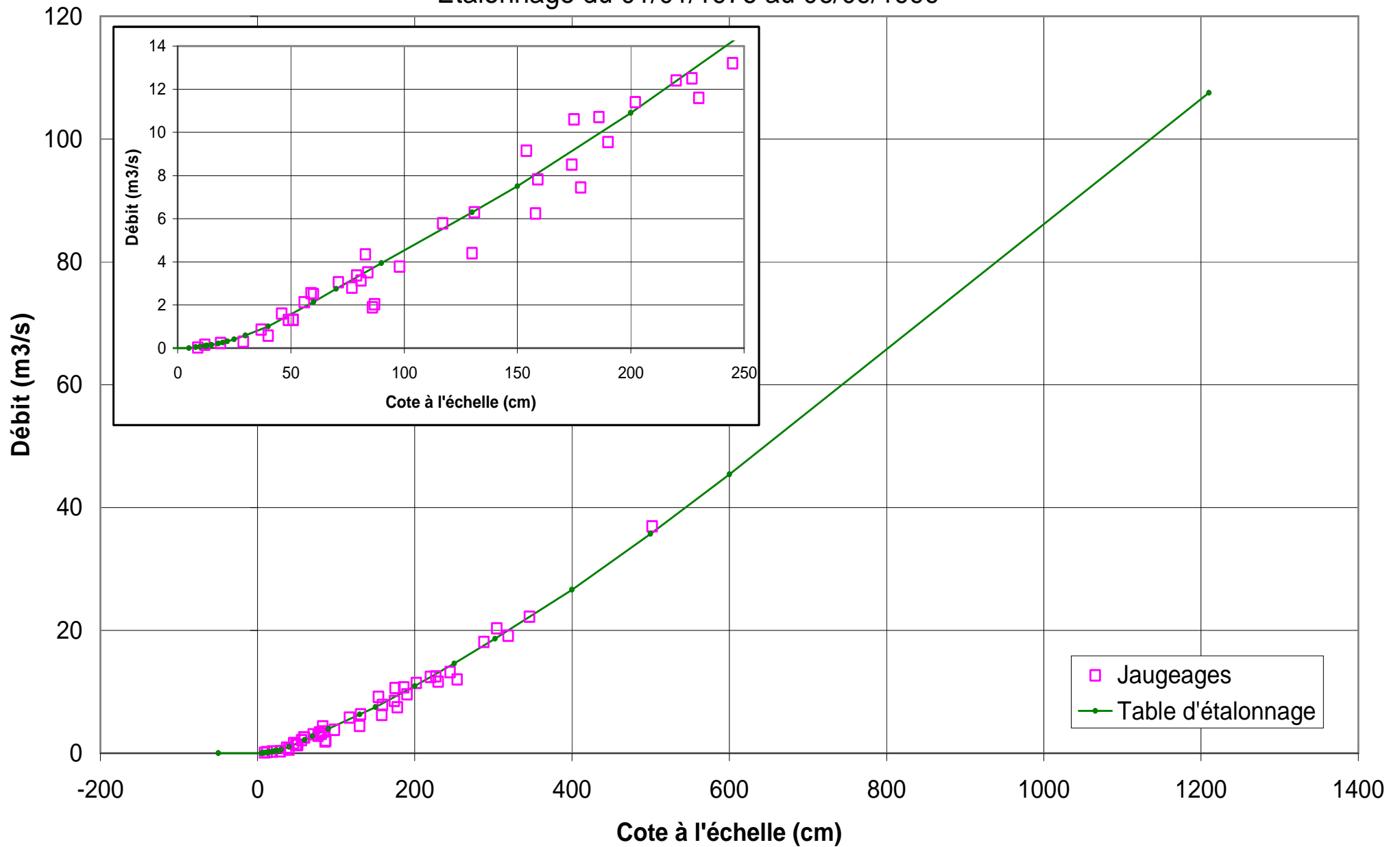
Station : 1271601202 = Fourou  
Etalonnage du 01/01/1978 jusqu'à nos jours



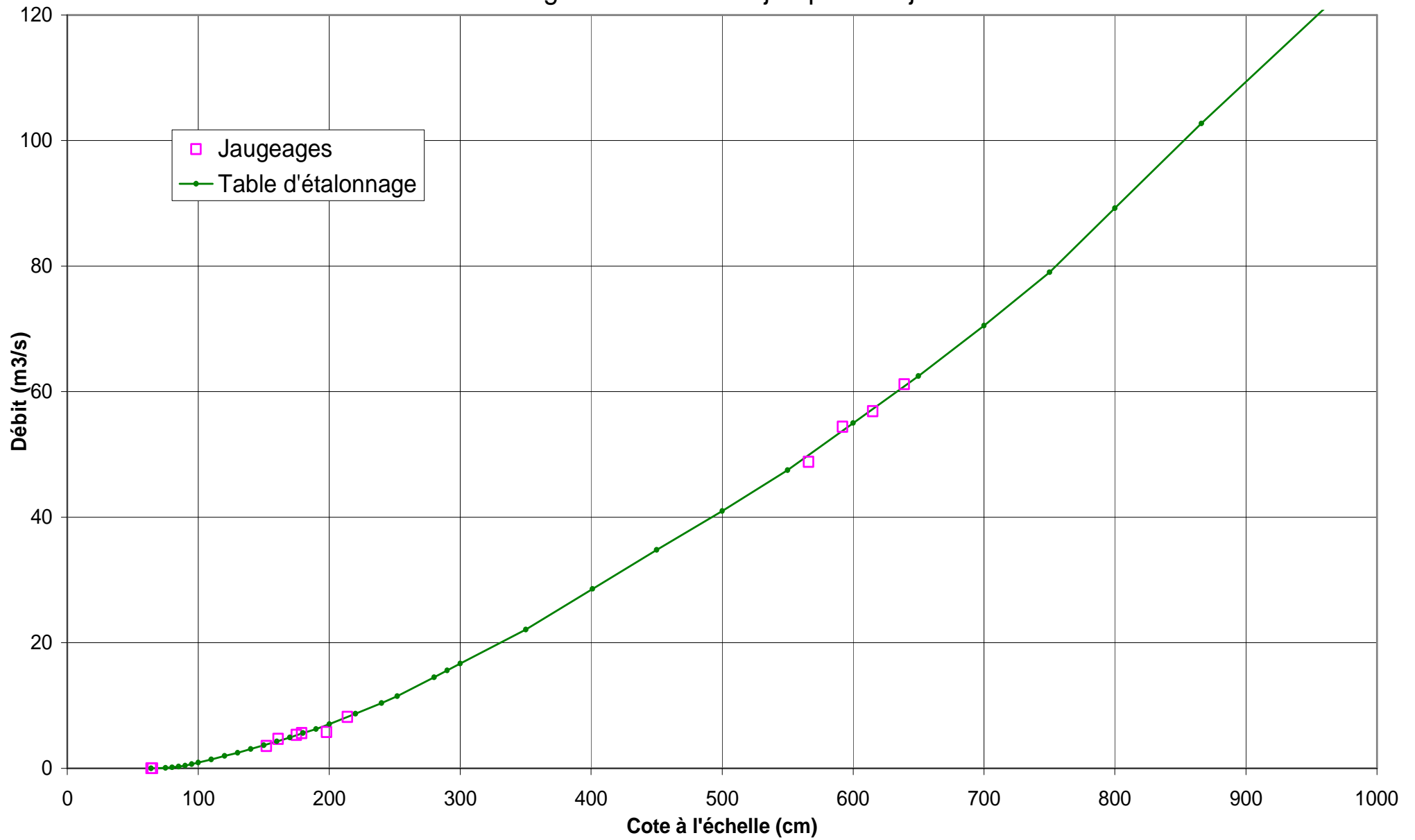
Station : 1271606005 = Loulouni  
Etalonnage du 01/01/1978 jusqu'à nos jours



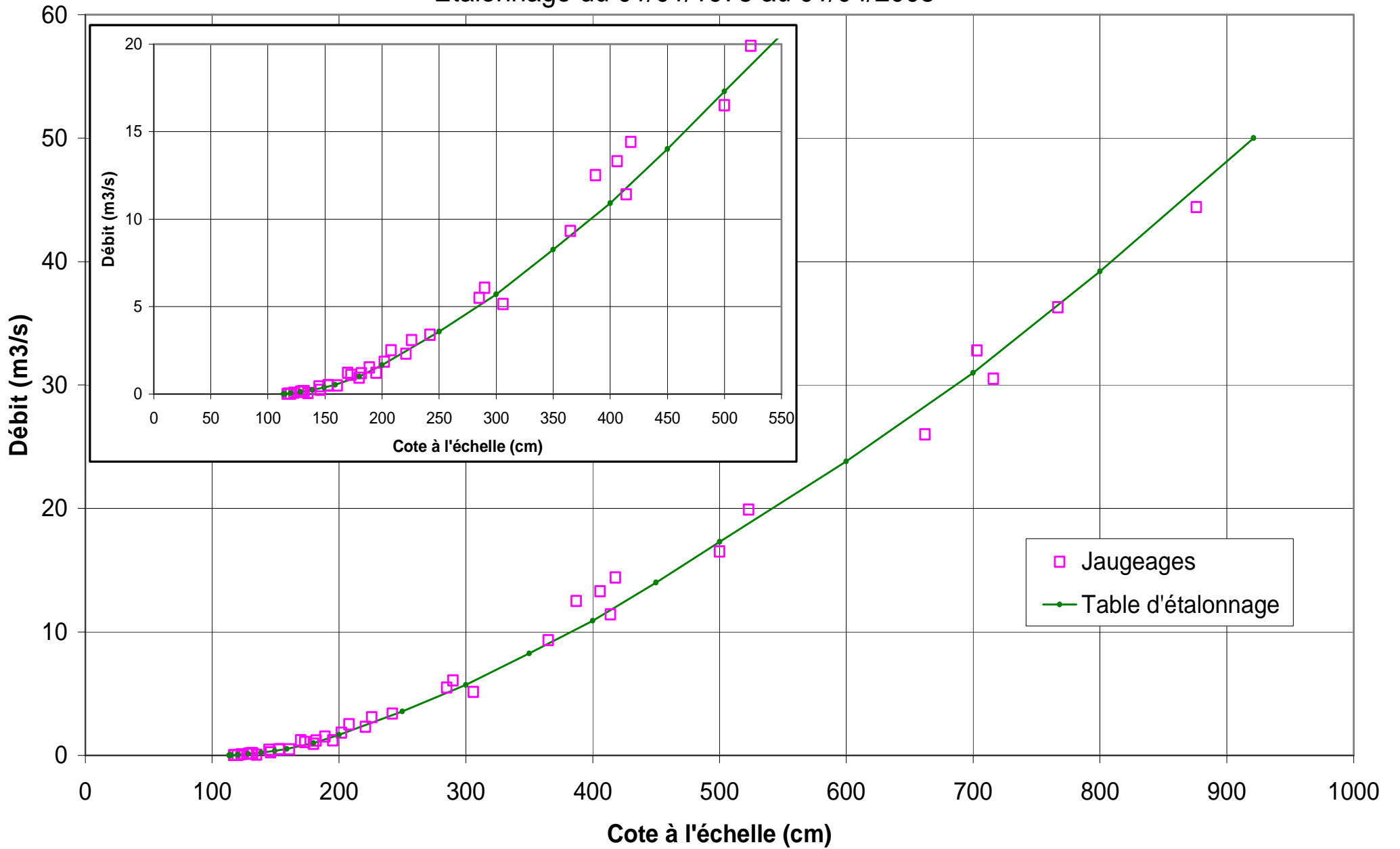
Station : 1271603505 = Bananso (Niger-Bani)  
Étalonnage du 01/01/1976 au 06/09/1999



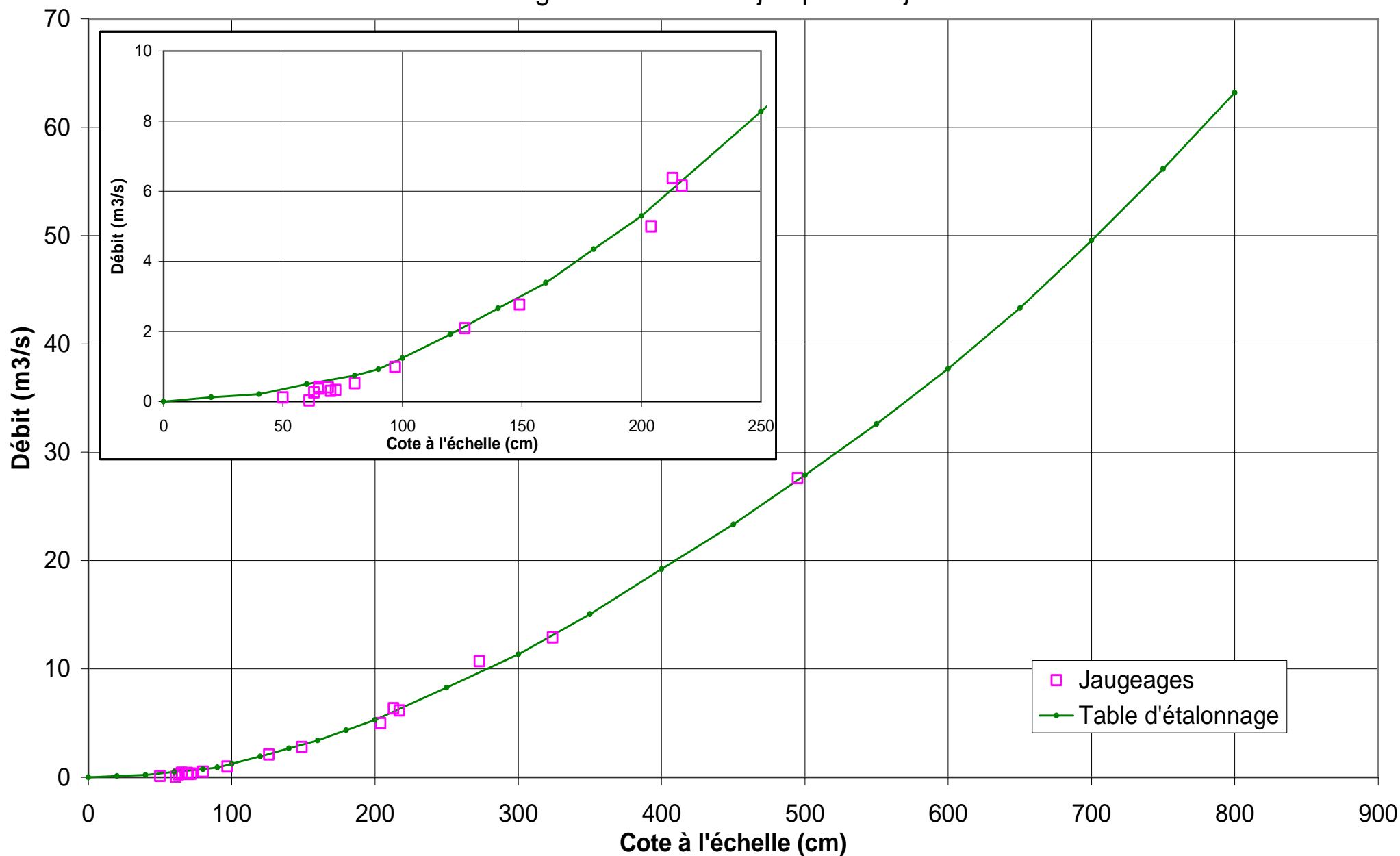
Station : 1271601510 = Kolondieba  
Etalonnage du 01/01/1986 jusqu'à nos jours



Station : 1271602002 = Manankoro (Niger-Bani)  
Étalonnage du 01/01/1975 au 01/04/2003

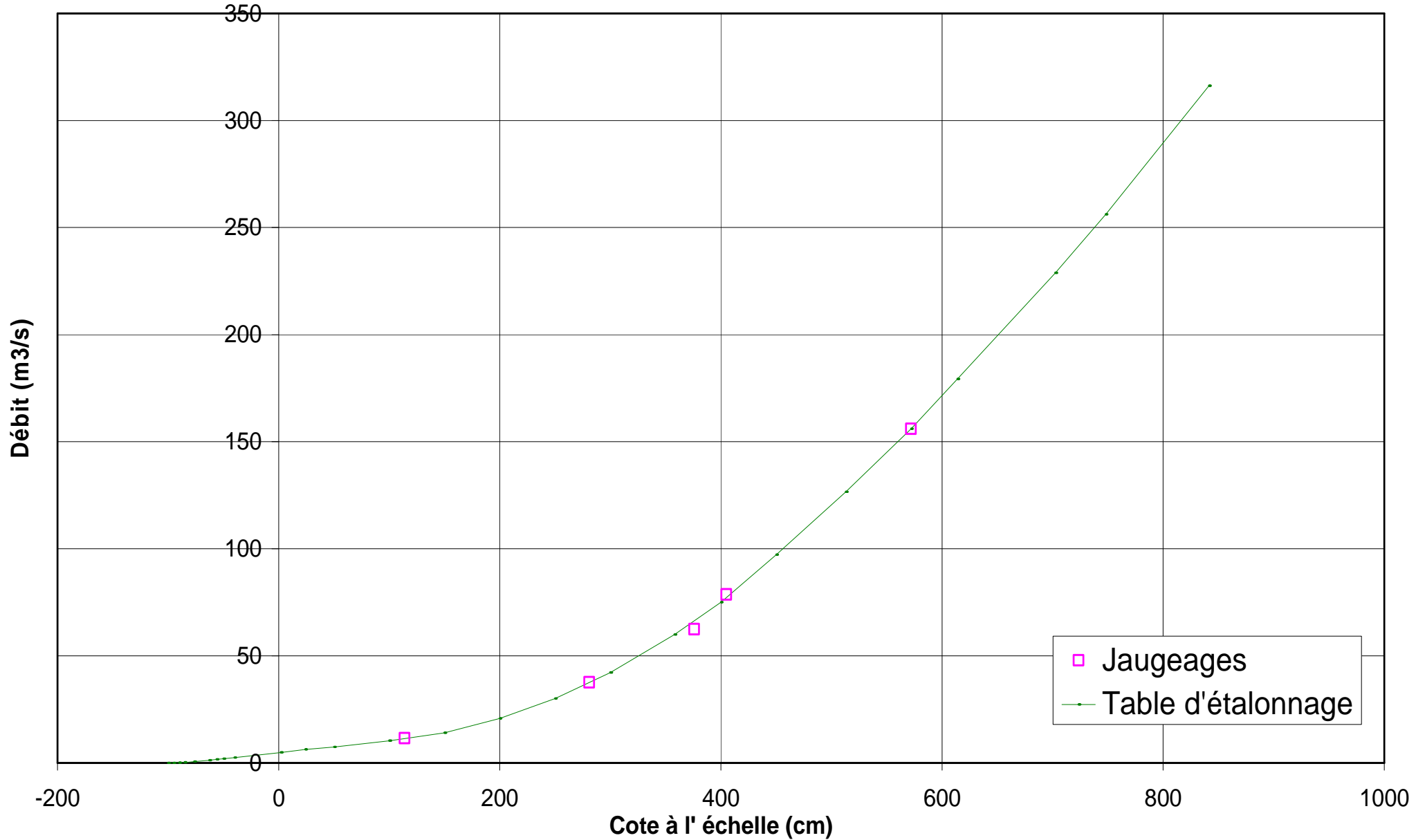


Station : 1271603205 = Zaniéna (Niger-Bani)  
Etalonnage du 01/01/1976 jusqu'à nos jours



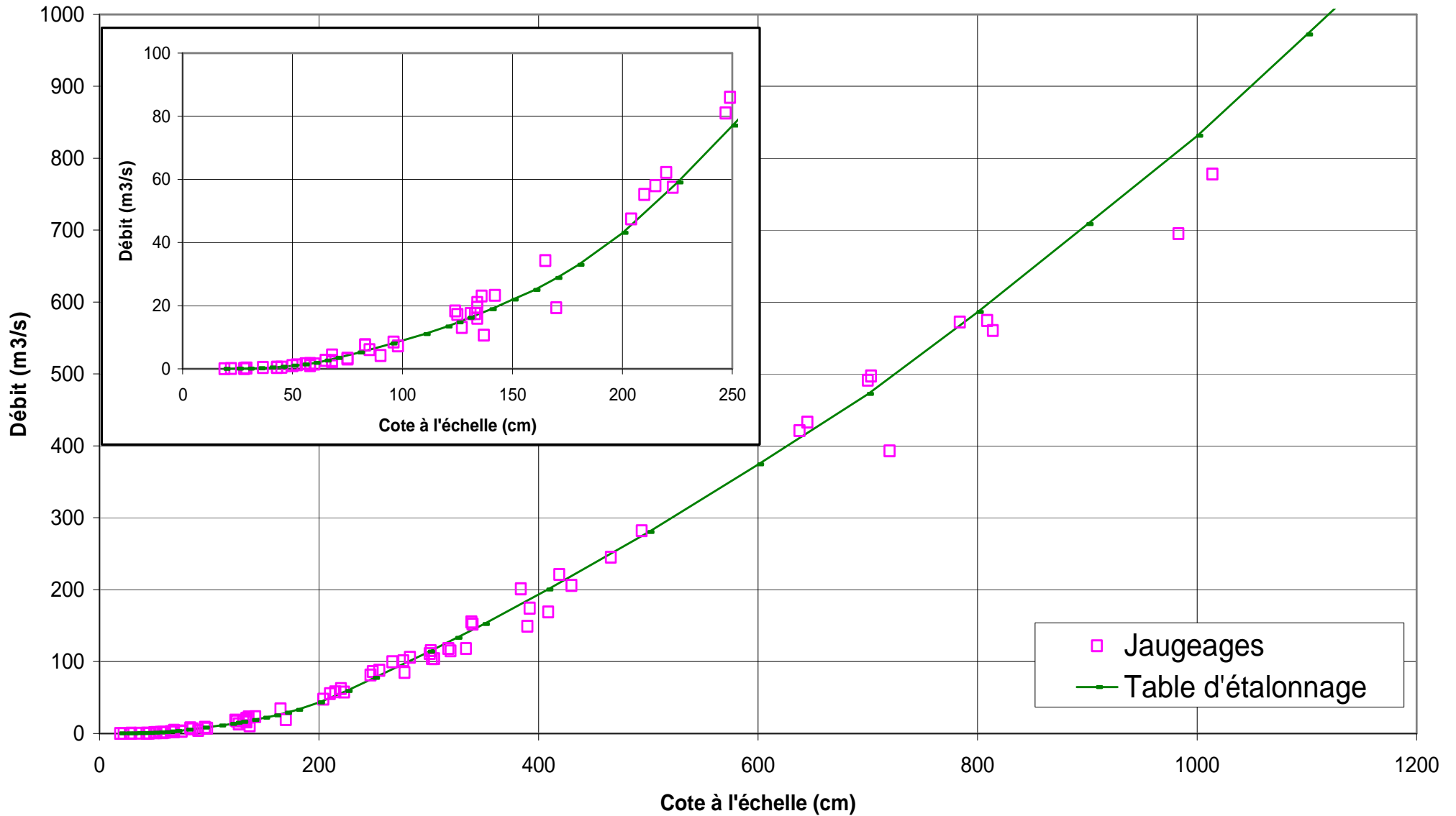
# Korodougou Marka

## Etalonnage de 1975 jusqu'à nos jours



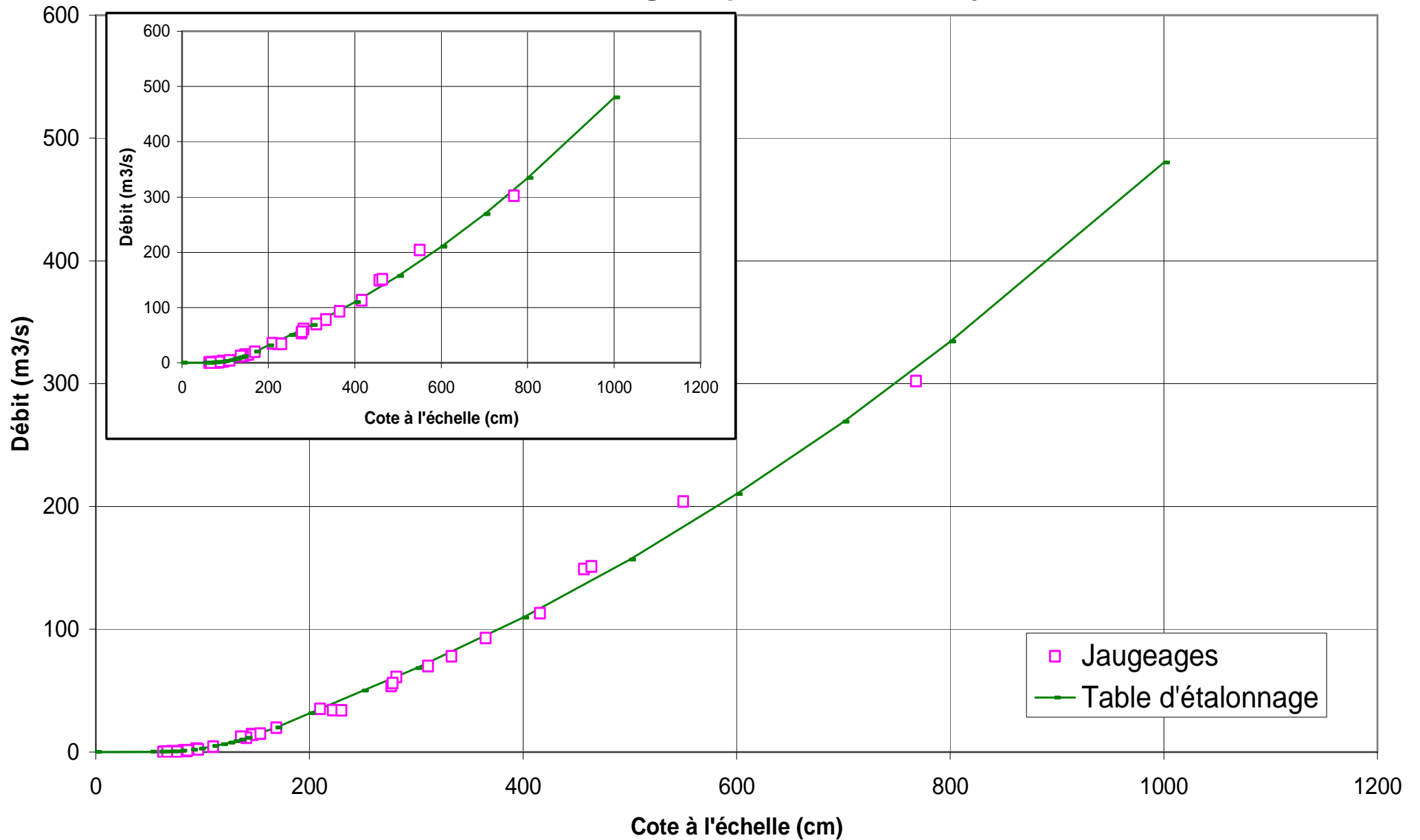
# Bougouni

## Courbe d'étalonnage de 1956 à nos jours



# Madina Diassa

## Courbe d'étalonnage depuis 1971 à nos jours



## *Résumé*

Le Bani est le principal affluent du fleuve Niger au Mali. Il a été particulièrement touché par la sécheresse apparue en 1970 en Afrique de l'Ouest et suscite l'intérêt du projet ANR RESSAC (vulnérabilité des Ressources en Eau Superficielle au Sahel aux évolutions Anthropiques et Climatiques). C'est dans ce cadre que s'insère ce travail de master 2. L'objectif est de tester et de sélectionner des méthodes de caractérisation des débits d'étiage afin de les appliquer au bassin du Bani. Les premières méthodes testées donnent des résultats encourageants. L'analyse des hydrogrammes et des débits spécifiques ont permis de mettre en évidence les sous-bassins versants les plus productifs. Nous avons également décelé la présence de pertes pour l'écoulement qui pourraient en partie provenir de prélèvements dans le cours d'eau. Les courbes de débits classés ont montré que la variabilité des débits pour ces sous-bassins versants particulièrement productifs était faible par rapport aux autres sous-bassins. Enfin les coefficients de tarissements calculés ont permis la mise en évidence de deux aquifères ayant des propriétés hydrodynamiques différentes et contenus dans des formations géologiques de nature différente : l'un dans des grès et le second dans des formations métamorphiques du socle. On suppose que les grès ont une perméabilité plus importante, ce qui permet un meilleur soutien des étiages par les eaux souterraines issus des nappes contenues dans ces grès. D'autres méthodes restent à tester, en particulier en ce qui concerne les périodes de retour des étiages les plus secs (analyse fréquentielle) et la régionalisation de des indices qui permettra leur estimation sur des bassins non-jaugés (interpolation spatiale).

## *Abstract*

The Bani River is the most important tributary of the Niger River in Mali. It was particularly affected by the drought appeared in 1970 in West Africa and interest the plan ANR RESSAC (Vulnerability of superficial water resources in Sahel at anthropogenic and climatic evolutions). This is the surroundings of this Master 2's study. The objective is to test and choose several methods of low-flows characterization, and then apply them at the Bani River. The firsts tested methods give encouraging results. Hydrograph analysis and specific discharge permitted to find the most productive sub-basins and also to show some losses in the stream, may be due to abstractions. Flow Duration Curves (FDC) showed that discharge variability of these most productive basins was lower that discharge variability of other basins. Finally, the recession coefficient permitted to distinguish two aquifers with different hydrodynamic properties: one is contained into sandstones and the other is contained into metamorphic stones. We supposed that sandstones have a more important permeability that permit a best support of low-flows by groundwater. Other methods have to be tested, particularly frequency analysis (to assess return period of the driest low-flows) and regionalisation of low-flows indices to estimate them on ungauged basins.