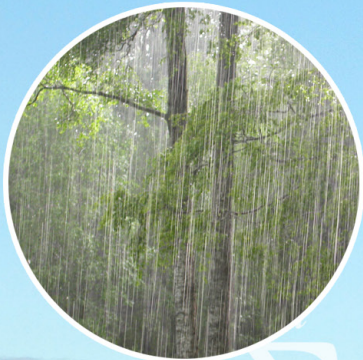


Caractérisation des hydrogrammes de crues pluviales sur des petits bassins versants forestiers



S. El Adlouni, A. N. Thiombiano,
A. St-Hilaire, N. El-Jabi et D. Caissie

Décembre 2011

Équipe de recherche

Ont participé à cette étude :

Nathalie Thiémonge



Nassir El-Jabi
Salaheddine El Adlouni
Alida N. Thiombiano



André St-Hilaire
Taha Ouarda
Fateh Chebana
Anik Daigle



Daniel Caissie



Fisheries and Oceans
Canada

Pêches et Océans
Canada

Sylvain Jutras



UNIVERSITÉ
LAVAL

Table des matières

Équipe de recherche	2
Table des matières	3
Liste des tableaux.....	5
Liste des figures.....	6
Liste des symboles et des acronymes	8
Résumé	9
Abstract	10
1. Introduction.....	11
2. Bassins versants retenus	13
2.1. Le petit bassin versant forestier du ruisseau Catamaran.....	14
2.2. Les sous-bassins versants forestiers aux sites 4 et 6 de La Grande Rivière	16
3 Données hydro-météorologiques.....	17
4. Approche méthodologique.....	18
4.1. Sélection des événements de crues pluviales.....	18
4.2. Séparation des hydrogrammes de crue	20
4.3. Caractérisation des hydrogrammes d'évènements pluvieux.....	22
4.4. Méthode CRUPEDIX de prédétermination des pointes et volumes de crue	24
5. Résultats.....	26
5.1. Caractérisation des évènements de crue pluviale échantillonnés pour le bassin versant du ruisseau Catamaran	26
5.2. Caractérisation des évènements de crue pluviale échantillonnés pour les sous-bassins versants aux sites 4 et 6 du bassin versant de La Grande Rivière.....	31
5.2.1. Sous-bassin au site 4 du bassin versant de La Grande Rivière	31
5.2.2. Sous-bassin au site 6 du bassin versant de La Grande Rivière	32
5.3. Comparaison inter-sites des comportements hydrologiques	36
5.4. Analyse en Composantes Principales (ACP)	37
5.5. Le coefficient de correction dans la méthode CRUPEDIX : estimation pour le bassin versant du ruisseau Catamaran.....	46
6. Conclusions et recommandations	47
7. Remerciements	49
8. Références.....	49
ANNEXES: Illustrations graphiques.....	52
Annexe A: Caractérisation des évènements hydrologiques pour le Catamaran.....	53
Annexe B: Caractérisation des évènements hydrologiques au sous-bassin versant du site 4 de la rivière La Grande	57
Annexe C: Caractérisation des évènements hydrologiques au sous-bassin versant du site 6 de la rivière La Grande	61
Annexe D: Ajustements statistiques et analyse fréquentielle de Q_{i10} et P_{j10}	65

Liste des tableaux

Tableau 1: Liste des petits bassins versants forestiers à l'étude	14
Tableau 2: Statistiques descriptives des événements hydrologiques échantillonnés pour le bassin du ruisseau Catamaran.....	28
Tableau 3: Statistiques descriptives des événements hydrologiques échantillonnés au site 4 du bassin de la rivière La Grande	34
Tableau 4: Statistiques descriptives des événements hydrologiques échantillonnés au site 6 du bassin de la rivière La Grande	35
Tableau 5: Moyennes et variances des statistiques des variables	36
Tableau 6: Données d'application de l'ACP pour le bassin versant du ruisseau Catamaran	38
Tableau 7: Données d'application de l'ACP pour le sous-bassin expérimental au site4	40
Tableau 8: Données d'application de l'ACP pour le sous-bassin expérimental au site6	40
Tableau 9: Maxima annuels observés de P_j et Q_i au bassin du Catamaran	46

Liste des figures

Figure 1: Bassin versant du ruisseau Catamaran	15
Figure 2: La Grande Rivière et ses sites expérimentaux.....	17
Figure 3: Chronique des débits et précipitation horaires observées pour le bassin versant du ruisseau Catamaran (année 1993)	19
Figure 4: Évènement de crue pluviale observé entre le 20 juin et le 24 juin 1993 au bassin versant du ruisseau Catamaran.....	20
Figure 5: Approches graphique de séparation de l'hydrogramme de crue pluviale observé entre le 20 et le 24 juin au bassin du ruisseau Catamaran	21
Figure 6: Méthode de détermination de A_i et x_i d'un hydrogramme.....	23
Figure 7: Clé de détermination de la réponse des bassins et du coefficient R.....	25
Figure 8: Variance expliquée des variables par chaque composante principale	41
Figure 9: Espace des variables statistiques de caractérisation des hydrogrammes des bassins versants.....	42
Figure 10: Nuage de points représentant les événements hydrologiques des bassins versants	44
Figure A 1: Totaux pluviométriques des événements hydrologiques (Catamaran).....	53
Figure A 2: Durée, temps de réponse du bassin et temps de montée de la crue pour chaque événement pluvieux (Catamaran) ...	53
Figure A 3: Intensités de précipitation des événements hydrologiques (Catamaran).....	54

Figure A 4: Débit de base, débit de pointe, débit moyen de chaque hydrogrammes (Catamaran)	54
Figure A 5: Volume d'eau écoulé pour chaque évènement hydrologique (Catamaran)	55
Figure A 6: Pentes de crue et décrue de chaque évènement hydrologique (Catamaran)	55
Figure A 7: Indices de dispersions des évènements hydrologiques (Catamaran).....	56
Figure A 8: Moyenne (Sm) et variance (Sv) des formes des hydrogrammes (Catamaran).....	56
Figure B 1: Totaux pluviométriques des évènements hydrologiques (Site 4)	57
Figure B 2: Durée, temps de réponse du bassin et temps de montée de la crue pour chaque évènement pluvieux (Site 4)	57
Figure B 3: Intensités de précipitation des évènements hydrologiques (Site 4)	58
Figure B 4: Débit de base, débit de pointe, débit moyen de chaque hydrogrammes (Site 4)	58
Figure B 5: Volume d'eau écoulé pour chaque évènement hydrologique (Site 4)	59
Figure B 6: Pentes de crue et décrue de chaque évènement hydrologique (Site 4)	59
Figure B 7: Indice de dispersion des évènements hydrologiques (Site 4)	60
Figure B 8: Moyenne (Sm) et variance (Sv) des formes des hydrogrammes (Site 4).....	60
Figure C 1: Totaux pluviométriques des évènements hydrologiques (Site 6)	61
Figure C 2: Durée, temps de réponse du bassin et temps de montée de la crue pour chaque évènement pluvieux (Site 6)	61
Figure C 3: Intensités de précipitation des évènements hydrologiques (Site 6)	62
Figure C 4: Débit de base, débit de pointe, débit moyen de chaque hydrogrammes (Site 6)	62
Figure C 5: Volume d'eau écoulé pour chaque évènement hydrologique (Site 6)	63
Figure C 6: Pentes de crue et décrue de chaque évènement hydrologique (Site 6)	63
Figure C 7: Indice de dispersion des évènements hydrologiques (Site 6)	64
Figure C 8: Moyenne (Sm) et variance (Sv) des formes des hydrogrammes (Site 6).....	64
Figure D 1: Ajustement de Gumbel (Maximum de vraisemblance) P_{j10}	65
Figure D 2: Ajustement par la loi Exponentielle (Maximum de vraisemblance) P_{j10}	65
Figure D 3: Ajustement Lognormale (Maximum de vraisemblance) P_{j10}	66

Figure D 4: Ajustement Gamma (Maximum de vraisemblance) P_{j10}	66
Figure D 5: Comparaison des lois par critères P_{j10}	67
Figure D 6: Ajustement par la loi Exponentielle (Maximum de vraisemblance) Q_{i10}	67
Figure D 7: Ajustement par la loi de Gumbel (Maximum de vraisemblance) Q_{i10}	68
Figure D 8: Ajustement par la loi Lognormale (Maximum de vraisemblance) Q_{i10}	68
Figure D 9: Ajustement par la loi Gamma (Maximum de vraisemblance) Q_{i10}	69
Figure D 10: Comparaison des lois par critères Q_{i10}	69

Liste des symboles et des acronymes

ACP :	Analyse en Composantes Principales
A :	Aire ou superficie (km ²)
ANCOVA :	Analyse de Covariance
CEMAGREF :	Devenu IRSTEA : Institut national de recherche en science et technologie pour l'environnement et l'agriculture.
CRSNG :	Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et Génie
D :	Durée de l'évènement hydrologique (h)
DB :	Débit de base (m ³ /s)
DM :	Débit moyen (m ³ /s)
DP :	Débit de pointe (m ³ /s)
EDF :	Groupe Électricité De France
h	Heure
ID :	Indice de dispersion des évènements hydrologiques
I Max/Moy :	Intensité maximale/moyenne de l'évènement pluvieux
INRS-ÉTÉ :	Institut National de la Recherche Scientifique Eau-Terre-Environnement
km²	Kilomètre carré
L :	Litre
m³/s	Mètre cube par seconde
mm	Millimètre
PC :	Pente de crue
PD :	Pente de décrue
P₁₀ :	Pluie journalière décennale (mm)
PT :	Précipitation totale de l'évènement hydrologique (mm)
Q₁₀ :	Débit instantané de crue de fréquence décennale (m ³ /s)
R :	Coefficient de correction des équations de prédétermination du débit de pointe
SCS :	Soil Conservation Service – Méthode de détermination d'un paramètre de stockage des pluies
Sm/Sv :	Moyenne/Variance de la forme de l'hydrogramme
Tm :	Temps de montée de la crue (h)
Tr :	Temps de réponse du bassin à l'évènement hydrologique (h)
V :	Volume d'eau écoulé (m ³)
Qdf :	Analyse débit-durée-fréquence

Le but de la présente étude est de caractériser la relation pluie-débit sur de petits bassins versants forestiers. En effet, une meilleure compréhension des processus hydrologiques à cette échelle est nécessaire pour améliorer l'étalonnage des modèles hydrologiques globaux en vue de la conception et de l'exploitation des ouvrages hydroélectriques. C'est dans ce contexte que cette étude poursuit l'objectif principal de faire une caractérisation hydrologique descriptive de petits bassins versants forestiers dont les superficies varient de quelques hectares à moins de 100 km². Les bassins versants retenus sont celui du ruisseau Catamaran au Nouveau-Brunswick et deux sous-bassins expérimentaux (numérotés 4 et 6) situés sur le bassin versant de La Grande Rivière au Québec. Des chroniques de données horaires de précipitation et de débits instantanés ont été colligées et la caractérisation des hydrogrammes de crues pluviales s'est faite sur une base événementielle et à partir de l'extraction de variables statistiques puis de l'application d'une analyse en composantes principales. Au total, trente-neuf événements hydrologiques de crues pluviales ont été sélectionnés pour le bassin du ruisseau Catamaran puis, respectivement cinq et sept événements pour les sous-bassins aux sites 4 et 6 de La Grande Rivière. Ces événements durent en moyenne 63 h au bassin du ruisseau Catamaran puis, 127 h et 103 h respectivement aux sous-bassins des sites 4 et 6 de la Grande Rivière. Ils génèrent des débits spécifiques de pointe moyens compris entre 40 L/s/km² et 50 L/s/km², avec des volumes spécifiques d'eau moyens de l'ordre de 4 m³/km² aux sous-bassins des sites 4 et 6 de La Grande Rivière, puis de moins 1,5 m³/km² au bassin du ruisseau Catamaran. L'analyse en composantes principales sur tous les événements échantillonnés, indique que la majorité d'entre eux présentent des caractéristiques similaires même si ces résultats sont très préliminaires. Quant à l'analyse en composantes principales sur les variables statistiques, elle a montré une corrélation positive de celles-ci, soit avec le premier axe principal (exemple du volume d'eau spécifique), soit avec le deuxième axe principal (exemple de l'intensité moyenne). Toutes ces analyses ont permis de caractériser les comportements hydrologiques des bassins versants forestiers retenus et de présenter un profil sommaire sur chacun à l'aide des tableaux détaillés et des figures réalisés.

Abstract

The purpose of this study is to characterize the rain-flow relationship on small forest watershed basins. Indeed, hydrological processes related to rainfall-runoff relations need to be better understood to improve the calibration of global hydrological models for the design and operation of hydroelectric development. This study fits into this context in pursuing the main goal of a descriptive hydrological characterization of small forested watershed with drainage areas ranging from a few hectares to 100 km². The selected watersheds are the Catamaran Brook watershed in New-Brunswick and sub-watersheds of the “La Grande Rivière” at experimental sites 4 and 6 in Quebec. Time series of hourly precipitation and instantaneous streamflow data have been obtained and the characterization of storm flood hydrographs was on an event basis and from some statistical variables extraction. An application of principal components analysis was also made. In total, thirty-nine storm flood hydrographs have been selected for Catamaran Brook and respectively five and seven events for Sites 4 and 6. These events have respectively 63 h at Catamaran Brook watershed and, 127 h and 103 h average durations at Sites 4 and 6 sub-watersheds of “La Grande Rivière”. They generate specific peak average speeds between 40 L/s/km² and 50 L/s/km², with specific volumes of water means of the order of 4 m³/km² in the sub-watershed at sites 4 and 6 of “La Grande Rivière”, and less than 1,5 m³/km² in Catamaran Brook watershed. The principal components analysis on all these events sampled, indicates that the majority of them have similar characteristics, even if these results are very preliminary. The same analysis but on the statistical variables, show a positive correlation of these variables, either with the main axis (eg. specific water volume), or with the second main axis (eg. average intensity). All these analyses allowed to characterize the forested watershed hydrological behaviours considered in this study and to present a profile using tables and figures for each of them.

1. Introduction

Les entreprises hydroélectriques canadiennes sont d'importants utilisateurs d'outils d'analyse, de caractérisation et de modélisation hydrologiques. En effet, ces outils permettent une meilleure compréhension des processus hydrologiques pour améliorer l'étalonnage des modèles hydrologiques globaux en vue de la conception et de l'exploitation des ouvrages hydroélectriques. Cependant, pendant longtemps, ce sont les grands bassins versants qui suscitaient de l'intérêt pour l'installation des centrales et des réservoirs. Toutefois, cela ne signifiait pas que les petits bassins versants de moins de 100 km² étaient dénués d'intérêt pour l'industrie. Bien au contraire, car d'une part, ces petits bassins sont les constituantes des grands bassins et les processus et phénomènes hydrologiques qui se produisent à une échelle spatiale plus fine expliquent en partie la variabilité hydrologique à une échelle plus grossière. D'autre part, les producteurs hydroélectriques sont aussi appelés à concevoir de petits ouvrages sur des bassins versants ayant des superficies modestes. De plus, les petits bassins versants, fréquemment drainés par des cours d'eau constituant très souvent des habitats aquatiques uniques à préserver, sont d'un intérêt; d'où la nécessité d'une bonne connaissance de leur régime hydrologique naturel (Poff et al., 1997). La recherche sur les processus hydrologiques des petits bassins versants forestiers offrirait ainsi des avantages au regard de ces contextes. Seulement, le principal handicap avec les petits bassins versants est le manque de données hydrométriques et pluviométriques disponibles. Cette lacune a mené au développement continu depuis quelques années, de méthodes simples et fiables d'estimation des débits de pointe de crue des bassins versants non jaugés. En effet, l'atteinte d'une telle finalité permettrait de développer des plans de prévention des risques, de connaître la fréquence des événements extrêmes, d'assurer un dimensionnement fonctionnel des ouvrages hydrauliques de franchissement, de protection et de sécurité, puis d'établir un plan de gestion des transports solides d'un bassin versant (Cipriani, 2010). Les approches de prédétermination des volumes et débits de pointe les plus fréquemment utilisées par les hydrologues ont été ainsi rangées en quatre catégories (Cipriani, 2010) :

- i. le traitement statistique de données hydrométriques à travers un ajustement statistique (loi de Gumbel, loi normale, loi lognormale, etc.) sur l'échantillon constitué;
- ii. les formulations empiriques sommaires comme celle de la méthode CRUPEDIX développée par le CEMAGREF de 1980-1982 pour des bassins versants dont la superficie est comprise entre 10 à 2000 km² et, la méthode SOCOSE également développée par le CEMAGREF en 1980 et qui s'applique à des bassins versants dont la superficie va de 2 à 200 km². Ces deux premières méthodes sont obtenues par traitements statistiques (Cipriani, 2010);

- iii. les méthodes déterministes semi-empiriques, notamment celle du SCS (Soil Conservation Service, 1975) et la méthode Rationnelle. Cette dernière est la plus ancienne mais est peu fiable pour les milieux forestiers (Akan, 2002) car elle a été développée surtout pour les bassins versants urbains. Quant à la méthode du SCS développée aux États-Unis, elle relie la précipitation au ruissellement à l'aide d'une classification hydrologique des sols et d'information sur l'utilisation des sols (Anctil et al., 2005). Ces deux méthodes déterministes sont fondées sur le phénomène de transformation de la pluie en débit de pointe;
- iv. les méthodes hydrométéorologiques : elles servent pour l'estimation des débits de fréquences rares. La méthode du GRADEX (Guillot, 1993) par exemple, fut développée par le groupe Électricité De France (EDF) en 1966 et s'applique aux bassins versants ayant une superficie de 0 à 5000 km² et dont le temps de concentration ou de ruissellement, est compris entre 1 h et 4 jours.

L'avantage des études menées sur les petits bassins versants est que les données peuvent être acquises plus facilement et surtout, les précipitations mesurées sur le bassin ont une probabilité plus élevée d'être représentative du régime pluvial (et nival) que celles mesurées sur de grands bassins, si on pose l'hypothèse que plus le bassin est petit, plus la précipitation est uniforme. Les relations pluie-débit établies sur de petits bassins versants ont du même coup de meilleures chances d'y être plus réalistes. Toutefois, il existe encore relativement peu d'information sur les particularités hydrologiques des petits bassins versants dont ceux forestiers au Canada, à l'exception des recherches faites sur des bassins versants expérimentaux et autres bassins versants d'intérêt (exemple du bassin versant forestier du ruisseau Catamaran au Nouveau-Brunswick depuis 1993). En effet, en raison des coûts d'installation et d'entretien des stations hydrométéorologiques, la vaste majorité des études sur les bassins expérimentaux ont été faites de manière indépendante; d'où une lacune importante.

Peu d'études proposent une analyse comparative des comportements hydrologiques de petits bassins versants forestiers pouvant y mener à une meilleure compréhension des relations pluie-débit. C'est dans ce contexte que s'inscrit la présente étude intitulée « *Caractérisation des hydrogrammes de crues pluviales sur des petits bassins versants forestiers* » et qui a permis de colliger les données hydrométéorologiques existantes, en vue de caractériser la relation pluie-débit sur de petits bassins versants forestiers.

L'objectif principal de cette étude est de faire une analyse de description des comportements hydrologiques des petits bassins versants forestiers sélectionnés, avec à l'appui une comparaison inter-sites.

Les objectifs spécifiques suivants sont définis dans cette perspective :

- i. Sélectionner les événements hydrologiques de crues pluviales sur la base

des chroniques de données obtenues pour chaque bassin versant retenu, et les analyser à l'aide de l'analyse en composantes principales (ACP);

- ii. Extraire les variables statistiques de caractérisation hydrologique pour chaque évènement, et observer leur corrélation dans une ACP;

Faire une analyse exploratoire de la méthode CRUPEDIX utilisée dans Cipriani (2010), pour la mise en place d'une clé de détermination de coefficients de correction des équations de prédétermination des débits et volumes de crue au niveau de bassins versants non jaugés.

2. Bassins versants retenus

Dans le cadre de cette étude, on s'intéresse aux bassins versants ayant une superficie inférieure à 100 km² et tels que, des relevés de précipitations et de débits concomitants soient disponibles. En effet, l'étude des crues des petits bassins versants forestiers nécessite l'acquisition de données à un pas de temps court (horaire ou moins). Aussi, faut-il que les relevés des paramètres hydro-météorologiques à l'étude soient disponibles aux mêmes dates et, pour ou à proximité de chacun des bassins versants jaugés. C'est ainsi que trois petits bassins versants forestiers sont considérés : le bassin versant du ruisseau Catamaran au Nouveau-Brunswick, puis les sous-bassins versants expérimentaux aux sites 4 (tourbière) et 6 (lac) du bassin versant de La Grande Rivière au Québec. Toutefois, il est prévu que d'autres petits bassins versants forestiers soient pris en compte dans une phase subséquente dépendamment des données disponibles.

En effet, il existe déjà des relevés météorologiques et hydrologiques de plus de vingt ans sur le bassin du ruisseau Catamaran. Aussi, Hydro-Québec détient des données hydro-météorologiques d'environ cinq ans dans le bassin de La Grande Rivière. Le tableau 1 présente les trois bassins versants à l'étude ainsi que leurs superficies et périodes d'analyses.

Tableau 1: Liste des petits bassins versants forestiers à l'étude

Bassins versants	Superficies	Périodes d'analyse	Références
Ruisseau Catamaran	51 km ² dont 27 km ² jaugés	1993 à 2001	Cunjak et al. (1993)
Site 4 (Tourbière) de la rivière La Forge, affluent de La Grande Rivière:	Bassin : 0,04 km ² Tourbière : 0,01 km ²	2005 à 2007	Tardif et al. (2009)
Site 6 (Lac) de la rivière La Forge, affluent de La Grande Rivière	Bassin : 0,07 km ² Lac : 0,03 km ²	2005 à 2008	

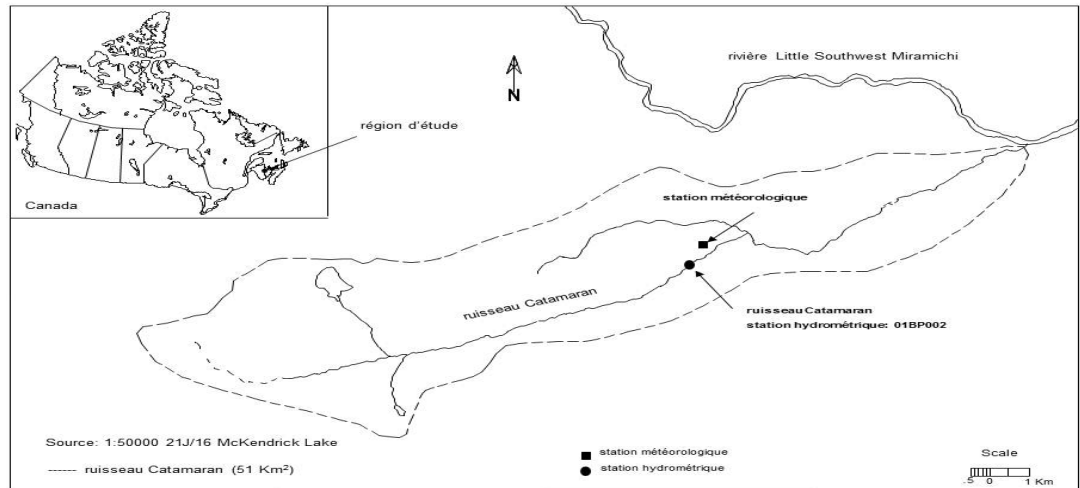
2.1. Le petit bassin versant forestier du ruisseau Catamaran

Le ruisseau Catamaran, petit affluent de la rivière «*Little Southwest Miramichi*» au Nouveau-Brunswick, a été le site d'études multidisciplinaires sur l'habitat des écosystèmes aquatiques au cours des quinze dernières années. En effet, sa station de recherche s'est avérée être un excellent site pour de nombreux projets de recherche scientifique. Il s'agit d'un cours d'eau de 3^{ème} ordre qui draine une superficie estimée à environ 51 km² dans le centre du Nouveau-Brunswick (Cunjak et al. 1990; Caissie et al. 1996; Caissie et al. 2002; St-Hilaire et al. 1998) avec une portion jaugée de 27 km² et sur laquelle porte le choix la présente étude. Le bassin versant du ruisseau Catamaran se situe sur la marge sud des hautes terres de la Miramichi et draine un plateau vallonné à une altitude de 250 m d'altitude. En effet, l'élévation du bassin varie de 91 m à l'embouchure du ruisseau Catamaran à 335 m à son point le plus haut (El-Jabi et al. 1999). D'après Caissie et al. (2002), des analyses sur la période 1961-1990 indiquent que la température moyenne mensuelle en janvier y était de -10,7°C et de 18,8°C en juillet puis, la précipitation moyenne annuelle de 1116 mm avec 27,9% des précipitations qui tombait sous forme de neige de novembre à avril. Quant au débit moyen annuel calculé sur la période 1990-1998, il indique une valeur de 0,64 m³/s soit 750 mm de l'écoulement terrestre.

De plus, l'analyse des hydrogrammes (Caissie et al., 2002) a permis d'une part d'identifier deux grandes périodes d'écoulements importants à savoir celle du printemps qui est la plus importante durant la plupart des années étudiées, et celle de l'automne qui pourrait tout aussi être significative. D'autre part, les données journalières hydrométriques pour ce ruisseau ont indiqué un pic record durant la fonte des neiges printanière de 1991 avec 13 m³/s au jour du 3 mai 1991, et le plus faible débit observé à la date du 3 septembre 1994 avec un débit de 0,016 m³/s. En outre, une analyse des hyétogrammes aux stations du bassin versant de ce ruisseau (El-Jabi et al, 1999), indique que la région du ruisseau Catamaran peut être considérée comme homogène sur le plan de la précipitation. Également, les analyses des crues et des étiages dans le cadre de la même étude, révèlent une fréquence élevée des crues au printemps avec le maximum en avril (ce qui résulterait surtout de la fonte des neiges, parfois accompagnée de précipitations), et une fréquence des crues généralement faible en hiver.

Sur le plan géologique, le bassin versant du ruisseau Catamaran repose sur la frontière entre deux divisions tectono-stratigraphiques, soit l'Anticlinorium de la Miramichi et le Synclinorium de Fredericton (Irrinki, 1979 *cité dans* El-Jabi et al. 1999). La majeure partie de la région est recouverte de moraine de fonds et de dépôts fluvio-glaciaires. L'empreinte humaine dans cet espace s'observe avec la coupe du bois qui a été et continue d'être la principale activité d'utilisation des terres. D'ailleurs, le bassin versant de ce ruisseau est aujourd'hui recouvert d'une forêt de seconde pousse à 65% faite

de conifères et 35% de feuillus (Carey et al. 2010). La figure 1 présente le cadre géographique de ce petit bassin versant forestier à l'étude.



Réalisation : Caissie D. (décembre 2011)

Figure 1: Bassin versant du ruisseau Catamaran

2.2. Les sous-bassins versants forestiers aux sites 4 et 6 de La Grande Rivière

La Grande Rivière est en fait un fleuve de la région du Nord-du-Québec qui se jette dans la baie James. Avant le développement de son potentiel hydroélectrique qui a doublé le débit moyen annuel à l'embouchure, La Grande Rivière était le quatrième plus important cours d'eau du Québec après le fleuve Saint-Laurent, la rivière des Outaouais et la rivière Koksoak au Nunavik. Elle compte quatre affluents majeurs qui sont à partir de l'amont: la rivière La Forge, celle de Pontois et les rivières Sakami et Kanaaupscow. La Grande Rivière draine un bassin de près de 100000 km². Son bassin versant naturel s'étend sur 97600 km² (Tardif, 2009) et son débit naturel s'élève à environ 1700 m³/s à l'embouchure. Longue de 893 km, La Grande Rivière prend sa source sur le plateau laurentien du Bouclier canadien à une élévation de plus de 500 m. Selon Tardif (2009), ce bassin est situé au milieu de la ceinture entre la forêt boréale au sud et la limite sud de la toundra arctique. Il a mené ses travaux de recherche sur sept sites localisés dans ce bassin, dont deux des sites (4 et 6) font l'objet d'intérêt dans la présente étude. Leurs bassins ont une superficie inférieure à 1 km² et sont localisés dans la partie Est à proximité de LA-1, humide et haute (supérieure à 400 m) du bassin versant de La Grande Rivière. En effet, Tardif (2009) souligne que les sites du secteur Est ont toujours reçu plus de précipitations et subi plus d'évapotranspiration que ceux du secteur Ouest à proximité de LG-2. Les données hydro-météorologiques qu'il a collectées indiquent que la précipitation totale annuelle était de 472 mm en 2005, 290 mm en 2006 et 581 mm en 2007 au site 4, puis respectivement de 559 mm, 433 mm et 649 mm au site 6. Quant à l'évapotranspiration totale annuelle, elle était

respectivement de 138 mm, 129 mm et 105 mm au site 4, et de 207 mm, 195 mm et 155 mm au site 6. La température moyenne journalière de l'air était de 9,6°C, 8,2°C et 8,0°C en 2005, 2006 et 2007 au site 4, puis respectivement de 9,5°C, 8,0°C et 7,7°C au site 6. Toutefois, tous les sites du bassin possèdent le même type de couvert forestier mature (*Picea Mariana*) et de tapis de lichens en périphérie des tourbières et lacs qui occupent une fraction superficielle importante (entre 32% et 47%) des bassins. La figure 2 tirée de Tardif (2009), présente le cadre géographique de La Grande Rivière et la position de tous les sites expérimentaux.

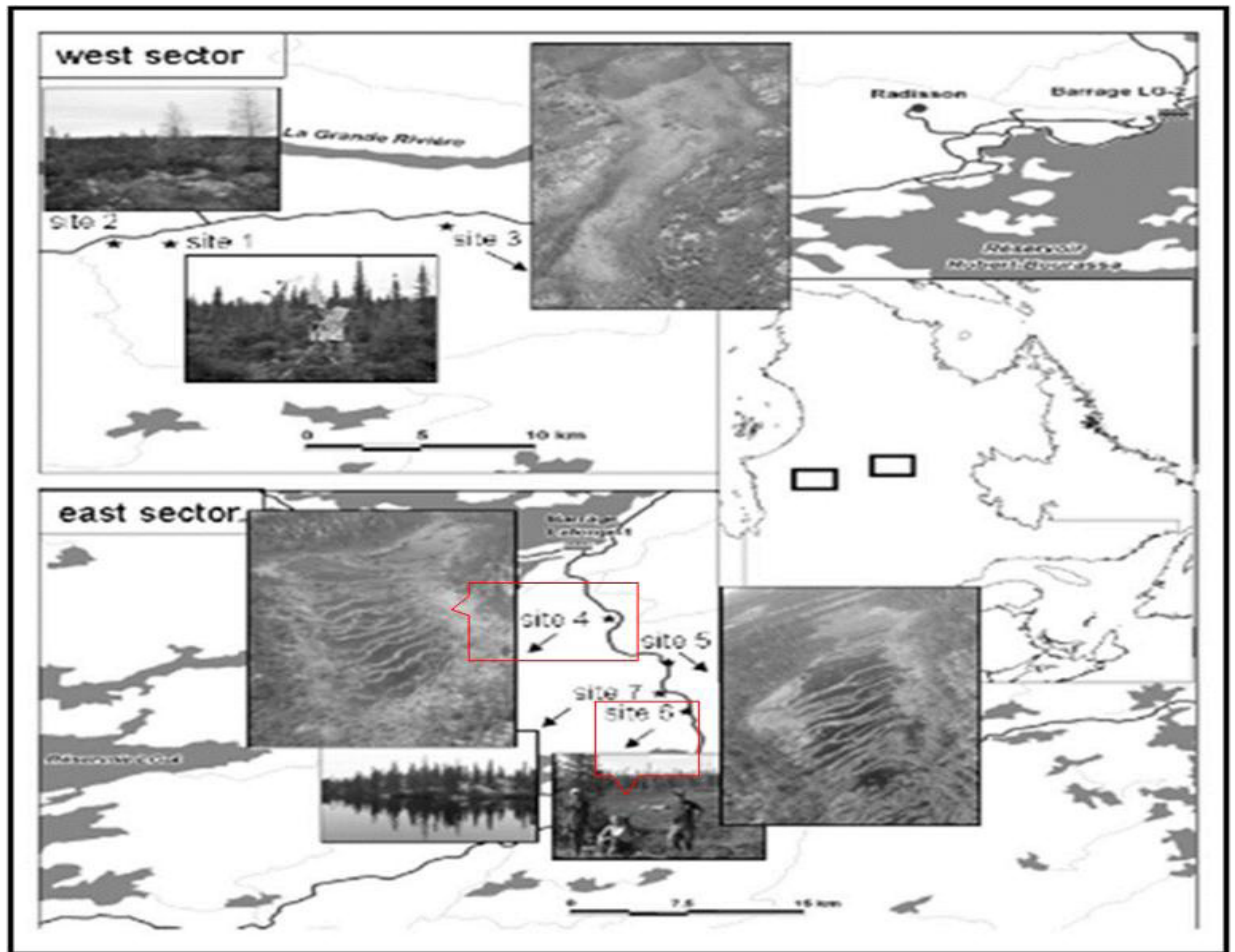


Figure 2: La Grande Rivière et ses sites expérimentaux

3. Données hydro-météorologiques

Les données utilisées dans cette étude sont des chroniques horaires de débits et de précipitations. Pour le bassin versant du ruisseau Catamaran, les données hydrométriques proviennent d'une station de jaugeage située au milieu du bassin versant (figure 1) et couvrant une superficie de 27 km². Les données disponibles en qualité exploitable de façon concomitante pour les débits et les précipitations au niveau de ce bassin versant, couvrent la période de 1993 à 2001 soit neuf ans de relevés. Concernant les sous-bassins aux sites 4 et 6 dans le bassin versant de La Grande Rivière, les données dis-

ponibles (en qualité exploitable également) et concomitantes pour les débits et les précipitations, sont celles collectées par Tardif (2009). Les tailles des séries y sont respectivement de trois ans (2005-2007) pour le sous-bassin au site 4 et de quatre ans (2005-2008) pour celui au site 6.

4. Approche méthodologique

Dans un premier temps, une sélection des évènements hydrologiques a été faite, suivie de la séparation des hydrogrammes de crues et de la présentation de leurs caractéristiques. Dans un second lieu, les évènements hydrologiques échantillonnés ainsi que les variables statistiques choisies ont fait l'objet d'une analyse en composantes principales. Enfin, la méthode CRUPEDIX telle que présentée dans Cipriani (2010), a été utilisée à travers une étude de cas.

4.1. Sélection des événements de crues pluviales

Il s'agit de l'étape première pour la comparaison des comportements hydrologiques (Tardif et al, 2009). Il existe plusieurs définitions d'un évènement hydrologique et dans cette étude, c'est celle de Tardif et al. (2009) qui a été retenue. En effet, ils définissent un évènement sur la série chronologique des débits, comme allant d'un creux à une pointe à un creux. Toutefois, ils ont éliminé tous les évènements de trop faible amplitude en considérant les évènements qui répondent aux classes d'intensités ci-dessous :

- intensité de 5 à 10 mm/h : évènements modérés (pluies modérées)
- intensité de plus de 10 mm/h : évènements importants (fortes pluies)

Leur approche de sélection des évènements permet de prendre en compte un nombre relativement plus élevé d'évènements hydrologiques qui pourraient être éliminés avec des options de seuils. En effet, il existe bien d'autres méthodes d'isolation des évènements hydrologiques qui amène à classer certains évènements comme non significatifs mais qui sont communément utilisées (Cipriani 2010) :

- la méthode de sélection du maximum annuel : c'est la plus simple et elle consiste à ne sélectionner qu'un maximum sur une année hydrologique ou une saison. Toutefois, l'échantillon constitué peut contenir des évènements non significatifs et occulter des évènements importants si plusieurs se produisent au cours de la même année. Particulièrement au Canada, l'usage de cette méthode risque de conduire aux choix d'évènements combiné de fonte de neige et de pluie.
- la méthode d'échantillonnage par valeur supérieure à un seuil (sup-seuil) : elle consiste à retenir la valeur maximale d'un ensemble d'évènements indépendants ayant dépassé un seuil donné. Elle offre une plus grande souplesse et robustesse en permettant de rassembler un plus grand nombre d'évènements sélectionnés, quoique si le seuil est suffisamment

élevé, seuls les évènements majeurs seront retenus. De plus, l'extraction via cette méthode est connue pour être délicate.

C'est ainsi qu'au bassin versant du ruisseau Catamaran et aux sous-bassins des sites 4 et 6 du bassin versant de La Grande Rivière, ce sont les portions d'hydrogramme aux pics importants et qui n'ont pas été influencés par la fonte de neige, qui ont été isolées sur chaque chronique horaire annuelle de débits et de précipitation. Ces évènements de crue pluviale se produisent durant la période du 1er juin (mois de mai dans certains cas) au 31 octobre, ce qui correspond respectivement à l'observation d'ordre 3600 et 7200 (en termes de $n^{\text{ième}}$ heure de l'année). La figure 3 illustre cet ordre de grandeur ainsi que la chronique de débits et de précipitations horaires observée en 1993 pour le bassin versant du ruisseau Catamaran.

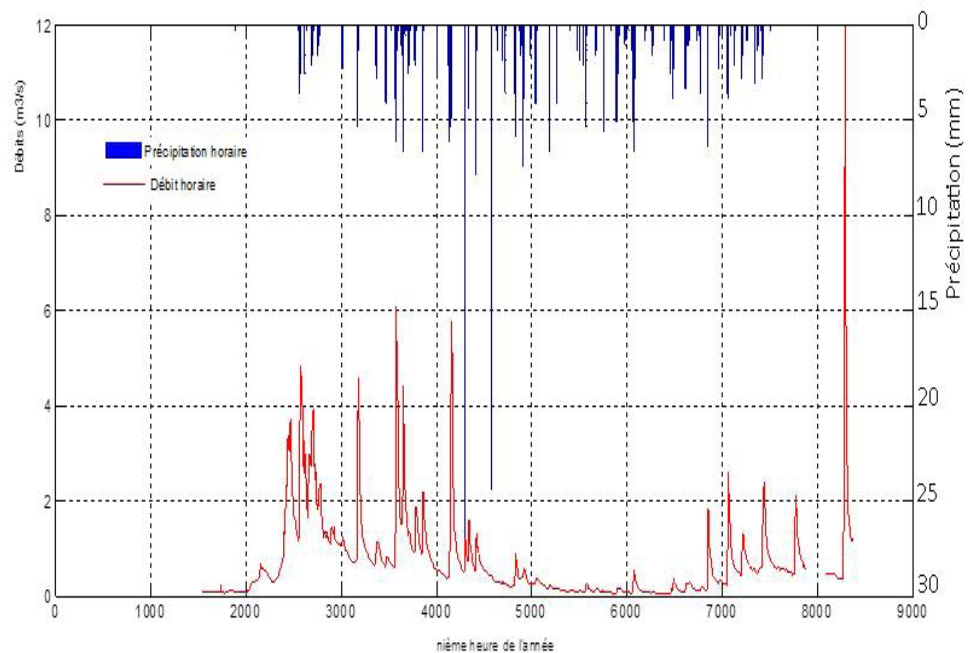


Figure 3: Chronique des débits et précipitation horaires observées pour le bassin versant du ruisseau Catamaran (année 1993)

La figure 4 présente ainsi un exemple de sélection d'évènement de crue pluviale observé entre le 20 juin et 24 juin 1993 au bassin versant du ruisseau Catamaran. Elle est obtenue par agrandissement de la portion 4000^{ième} heure de l'année de la figure 3.

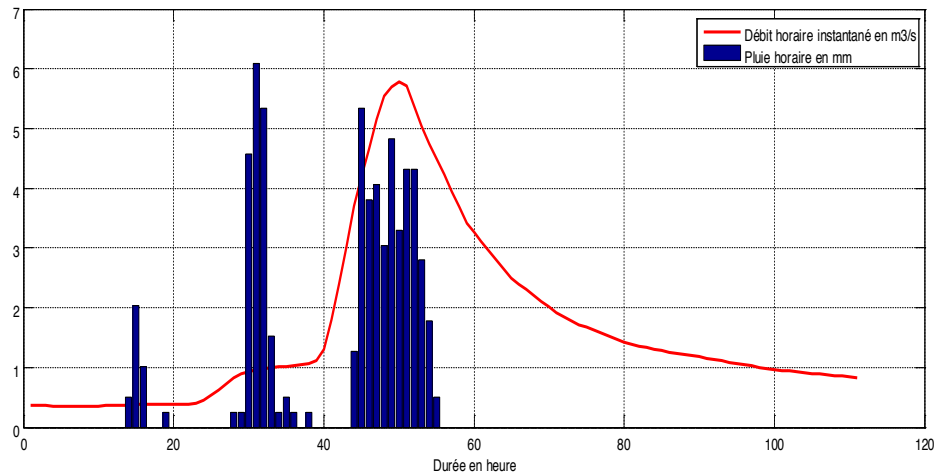


Figure 4: Évènement de crue pluviale observé entre le 20 juin et le 24 juin 1993 au bassin versant du ruisseau Catamaran

Par ailleurs, seuls les événements simples (hydrogrammes non complexes) ont été considérés dans cette étude du fait que, les événements qui incluent deux pointes ou plus, ont des caractéristiques de crue plus difficiles à définir. En outre, la détermination de ces événements a pris en compte les précipitations incluses dans la période de crue à savoir, toutes les averses enregistrées durant les trois derniers jours (72 heures avant le début de la crue).

4.2. Séparation des hydrogrammes de crue

Il est d'usage général de séparer le débit de base de l'écoulement de surface consécutif à un événement pluvieux. La revue de la littérature a permis de constater que la technique de séparation graphique des hydrogrammes est la plus utilisée (Caissie et al., 2002; Pramanik et al., 2010; Tardif et al., 2009; Torres et al., 2011). Cette approche graphique consiste en l'identification de la fin d'un événement au niveau de la pente de décrue de chaque hydrogramme (point d'inflexion). Par la suite, on relie la base du débit à la pointe à l'aide d'une pente constante ou d'une pente nulle ou encore d'une courbe concave (figure 5). Dans la présente étude, la technique de séparation avec la pente constante a été utilisée.

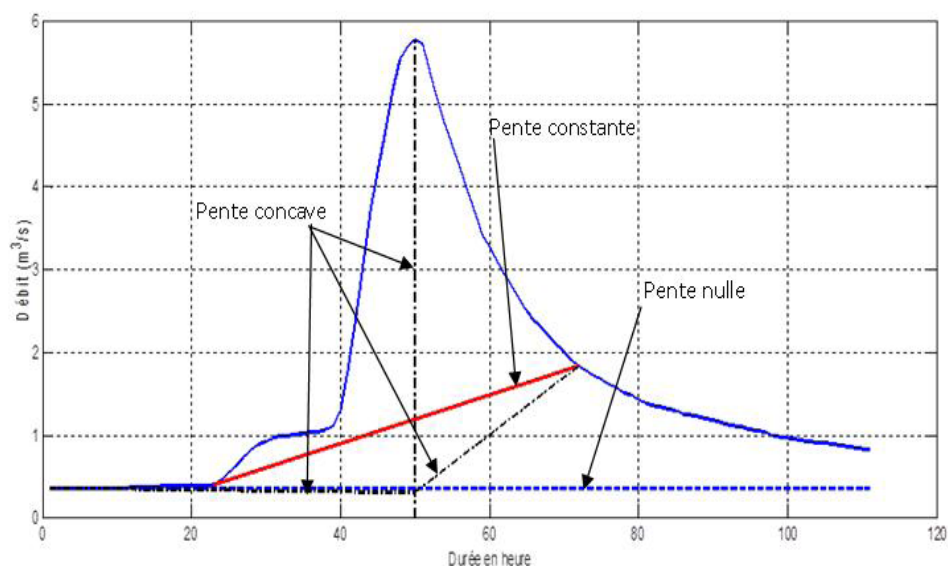


Figure 5: Approches graphique de séparation de l'hydrogramme de crue pluviale observé entre le 20 et le 24 juin au bassin du ruisseau Catamaran

En effet, la méthode de séparation de l'hydrogramme avec une pente constante a été retenue à cause de sa simplicité d'application (Caissie et al., 2002; Torres et al., 2011). En effet, cette méthode offre le double avantage de la simplicité relative de calcul et d'une bonne capacité à isoler des événements directement imputables aux précipitations reçues.

Toutefois, d'autres techniques de séparation des hydrogrammes sont également utilisées à savoir la technique de séparation chimique (basée sur la variation des concentrations en éléments chimiques des rivières), celle qui utilise les isotopes environnementaux stables comme des traceurs, et la technique de séparation géochimique (Kamagaté et al., 2008) basée sur la variation de la charge hydraulique dans les rivières. Cependant, ces techniques impliquent l'étude des propriétés chimiques de l'eau avant et après les événements pluvieux (Caissie et al., 1996; Hannula et al., 2003; Tekeli and Sorman, 2003).

4.3. Caractérisation des hydrogrammes d'événements pluvieux

La caractérisation des comportements hydrologiques dans cette étude est faite sur une base événementielle à l'aide de différents indices hydrologiques estimés après la séparation de chaque hydrogramme de crue pluviale. En effet, pour caractériser un épisode de crue, il existe un grand nombre de variables statistiques dont les valeurs conditionnent la sévérité des crues. Toutefois, les analyses hydrologiques ont toujours porté sur les pointes de crues alors que bien d'autres variables sont tout aussi importantes pour une bonne planification des ressources en eau et des ouvrages hydrauliques (Mediero et al., 2010; Pramanik et al., 2010). Dans cette étude, les variables suivantes,

ont été choisies pour la caractérisation des hydrogrammes de crues pluviales (El-Jabi et Rouselle, 1990; Mediero et al., 2010; Pramanik et al., 2010) :

- la durée «D» de l'évènement pluvieux (en h) : elle correspond au début de la courbe de montée à la fin de la courbe de décrue de l'hydrogramme.
- le délai ou temps de réponse «Tr» du bassin à l'évènement (en h) : il s'agit du temps séparant le centre de gravité de l'averse et la pointe de l'hydrogramme généré
- le temps de montée «Tm» de la crue générée par l'évènement pluvieux (en h) : c'est le temps séparant le début de la courbe de montée et la pointe de l'hydrogramme
- la précipitation totale «PT» observée pour chaque évènement pluvieux (en mm);
- l'intensité maximale «I Max» et l'intensité moyenne «I Moy» de chaque évènement pluvieux (en mm/h);
- le débit de base «DB», le débit moyen «DM», et le débit de pointe «DP» observés pour chaque hydrogramme de crue (m³/s); (les débits spécifiques correspondants en L/s/km²);
- le volume d'eau «V» produit par chaque évènement pluvieux (en m³); (le volume d'eau spécifique correspondant en m³/km²)
- l'indice de dispersion «ID» des évènements pluvieux : il représente la différence entre la médiane et le mode de l'hydrogramme de l'évènement pluvieux;
- les pentes de crue «PC» et de décrue «PD» des hydrogrammes d'évènements pluvieux
- l'indice moyen «Sm» et l'indice de variance «Sv» de la forme des hydrogrammes : concernant spécifiquement ces deux indices, ils ont été considérés dans Tardif et al. (2009) et présentés dans Yue et al. (2002). Le premier indice est en effet une mesure de la moyenne [moyenne de la forme] suivant l'équation (1) et le deuxième une mesure de dispersion [variance de la forme] suivant l'équation (2).

$$S_m = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n x_i A_i = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n x_i f(x_i) dx_i \quad (1)$$

$$S_v = \sum_{i=1}^n (x_i - S_m)^2 A_i = \sum_{i=1}^n (x_i - S_m)^2 f(x_i) dx_i \quad (2)$$

A_i aire en-dessous de l'hydrogramme pour une unité du temps;

x_i temps depuis le début de l'évènement;

A aire totale en-dessous de l'hydrogramme (volume de l'évènement);

$f(x_i)$ magnitude à l'instant x_i .

La figure 6 illustre la détermination des paramètres A_i et x_i des équations (1) et (2).

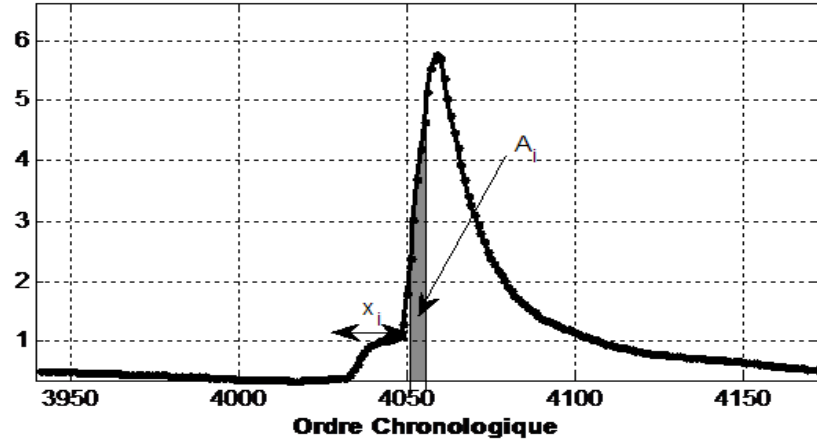


Figure 6: Méthode de détermination de A_i et x_i d'un hydrogramme

Ces variables statistiques sont ainsi estimées après la séparation de l'hydrogramme et ce, pour chaque événement hydrologique. Le volume d'eau écoulé par exemple, est calculé en utilisant la «méthode des trapèzes» (Pramanik et al., 2010) basée sur la détermination du point d'inflexion. Quant aux autres variables, elles sont estimées avec la méthode de la pente constante. Des moyennes et variances de ces statistiques sont ensuite générées pour chaque variable afin de faciliter les comparaisons intersites. En effet, ces extractions sont faites à des fins d'analyses qualitative et quantitative pour la caractérisation des événements sélectionnés et surtout pour une comparaison inter-sites des comportements hydrologiques des petits bassins versants forestiers retenus.

4.4. Méthode CRUPEDIX de prédétermination des pointes et volumes de crue

Plusieurs méthodes ont été développées pour la prédétermination des débits correspondant à une période de récurrence donnée au niveau de bassins versants non jaugés, au nombre desquelles il y a la méthode CRUPEDIX (Cipriani, 2010). Cette méthode a été utilisée à l'aide de l'équation (3) et optimisée à l'aide de la prise en compte de critères morphologiques et hydrogéologiques des bassins versants et ce, en vue d'une meilleure estimation des débits et des volumes de crue au niveau des bassins versants non jaugés.

$$Q_{i10} = A^{0,8} \left(\frac{P_{j10}}{80} \right) R \quad (3)$$

Q_{i10}	débit instantané de crue de fréquence décennale;
P_{j10}	pluie journalière décennale;
A	superficie ou aire du bassin versant;
R	coefficient correcteur de l'équation

En effet, la méthode CRUPEDIX est établie pour des bassins versants dont la superficie est comprise entre 2 et 2000 km² et permet l'estimation du débit instantané de crue de fréquence décennale en fonction de la superficie du bassin versant, de la pluie journalière décennale et d'un coefficient correcteur. Dans cette étude, une démarche inverse est faite de l'utilisation de l'équation (3) en vue d'estimer la valeur du paramètre «R». Pour ce faire, le bassin versant du ruisseau Catamaran (51 km² dont 27 km² jaugé) est pris comme étude de cas. En effet, l'idée est que ce coefficient une fois déterminé, pourra être appliqué aux équations de prédétermination des pointes et volumes de crue pour des bassins versants non jaugés présentant les mêmes caractéristiques physiographiques que le bassin versant du ruisseau Catamaran. Le processus normal d'estimation de ce coefficient correcteur passe par la mise en place d'une «clé de détermination» comme l'illustre la figure 7, tirée de Cipriani (2010). Celui-ci explique que le principe pour la définition de cette clé est basé sur la classification des bassins versants dépendamment de leurs paramètres morphologiques et hydrologiques. Quant à l'estimation du coefficient, elle permettra d'appliquer au besoin (en cas de sur-estimation ou de sous-estimation du débit calculé par le débit estimé et inversement), cette valeur de «R» (égale à 1 par défaut, pour représenter la moyenne des conditions) aux équations de prédétermination du débit de pointe en vue par exemple, d'inhiber une sous-estimation.

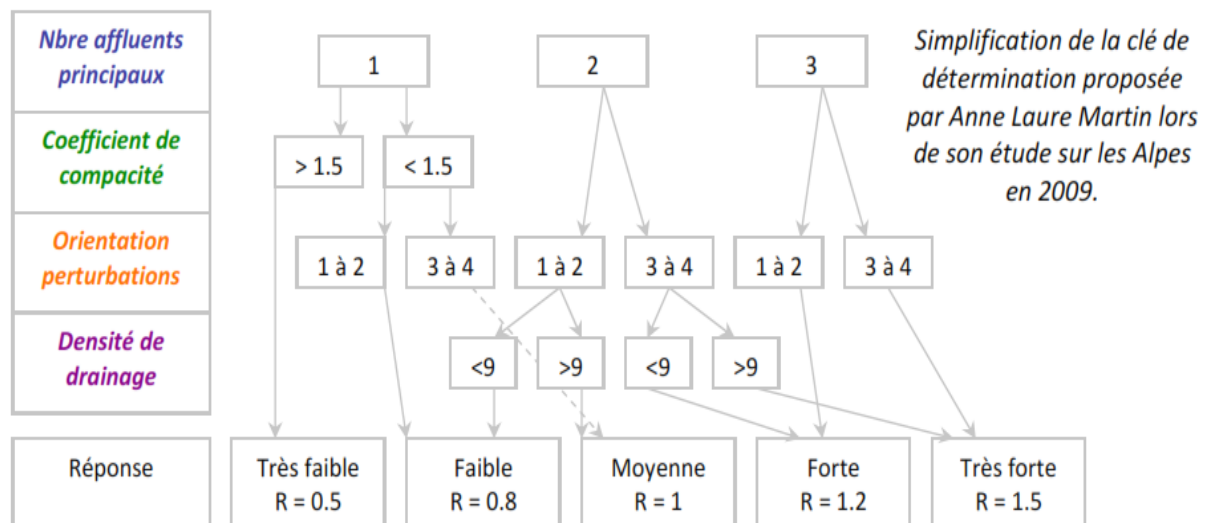


Figure 7: Clé de détermination de la réponse des bassins et du coefficient R

L'approche en sens inverse adoptée dans cette étude donnerait une perspective de validation des résultats d'une estimation des débits et volumes de crue au niveau d'un bassin versant non jaugé mais présentant les mêmes caractéristiques que le bassin du ruisseau Catamaran et ce, par le constat d'une valeur identique de R. En effet, la prédétermination des débits et volumes de crue au niveau des bassins versants non jaugés présente d'importants enjeux

de sociétés par exemple pour la gestion des eaux de ruissellement pluvial et la protection contre les inondations (Gargouri et Bargaoui, 2006). Ceux-ci présentent deux approches pour cette prédétermination à savoir la modélisation de la transformation pluie-débit basée sur la dynamique des écoulements, et la modélisation fréquentielle basée sur une approche statistique.

C'est ainsi que sur la base des données horaires de précipitations et de débits instantanés observées au bassin jaugé du Catamaran, Q_{i10} et P_{j10} ont été alors déterminés à l'aide d'une analyse fréquentielle faite avec le logiciel HYFRAN-PLUS (El Adlouni et Bobée, 2010). Quatre ajustements statistiques à savoir par la loi de Gumbel, la loi Exponentielle, la loi Lognormale et la loi Gamma ont été testés sur le débit maximum annuel instantané et la précipitation maximale annuelle journalière. L'application de la comparaison par les critères d'Akaike et Bayésien (Akaike, 1974; Fortin et al., 1998) a ensuite permis de retenir la loi qui ajuste le mieux chacune de ces deux variables.

5. Résultats

L'analyse des hydrogrammes des petits bassins versants forestiers retenus, a permis de sélectionner trente-neuf (39), cinq (5) et sept (7) événements hydrologiques de crue pluviale respectivement pour le bassin versant du ruisseau Catamaran et les sous-bassins aux sites 4 et 6 du bassin versant de La Grande Rivière. Les statistiques extraites pour chacun de ces événements sont compilées respectivement dans les tableaux 2, 3 et 4. Quant aux moyennes et variances de ces statistiques, elles sont présentées dans le tableau 5. Des figures sont également réalisées et insérées en annexes A, B et C respectivement pour le bassin du ruisseau Catamaran et les sous-bassins aux sites 4 et 6 du bassin de La Grande Rivière.

5.1. Caractérisation des événements de crue pluviale échantillonnés pour le bassin versant du ruisseau Catamaran

Pour ce bassin versant, les débits et précipitations horaires sont disponibles pour la période 1993-2001. Au total, trente-neuf (39) événements hydrologiques ont été sélectionnés sur cette période comme indiqué dans le tableau 2. La durée moyenne des événements est de l'ordre de 63 h avec une durée maximale de 132 h et une durée minimale de 25 h. Ce bassin a un temps de réponse moyen de 7 h, maximal de 32 h et minimal de 2 h aux événements. La précipitation totale moyenne des événements est de 37 mm avec un maximum de 77 mm et un minimum de 11 mm. L'intensité maximale moyenne correspondante est d'environ 7 mm/h avec un débit spécifique moyen de l'ordre de 18 L/s/km², un débit spécifique de pointe moyen de plus de 47 L/s/km², et un volume d'eau moyen supérieur à 1 L/km²). L'indice de dispersion moyen des événements hydrologiques est de 0,32 indiquant ainsi que la forme pour la plupart des courbes des hydrogrammes est d'une asymétrie positive. Quant aux indices de la moyenne et de la variance des hydrogrammes de ces événements, leurs valeurs moyennes sont respectivement de 44 et 24. Les détails sur les autres variables (débit de base, temps de montée de la crue, pentes de crue et de décrue, intensité moyenne) sont consignés dans le tableau 2.

Les figures A1 à A8 en annexe A, donnent une illustration du comportement de toutes les variables statistiques pour les événements sélectionnés. En effet, on peut observer sur ces figures que sur l'échantillon des trente-neuf (39) événements :

- quatorze événements ont leur précipitation totale supérieure à 40 mm (figure A1);
- treize événements durent chacun plus de 70 h, ce qui implique que la majorité des événements du bassin durent moins de 70 h (figure A2);
- le temps de réponse du bassin est inférieur à 7 h pour seize événements (figure A2);

-
- quatorze évènements ont leur intensité maximale supérieure à 7 mm/h (figure A3);
 - neuf évènements ont leur débit moyen supérieur à $1 \text{ m}^3/\text{s}$ soit l'équivalent d'un débit spécifique moyen supérieur à 19 L/s/km^2 , et douze ont leur débit de pointe supérieur à $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ soit l'équivalent d'un débit spécifique de pointe de 49 L/s/km^2 (figure A4);
 - treize évènements produisent un volume d'eau supérieur à 75 m^3 soit l'équivalent d'un volume d'eau spécifique de $1,47 \text{ m}^3/\text{km}^2$ (figure A5);
 - onze évènements ont leur pente de crue supérieure à 0,5 (figure A6);
 - onze évènements ont leur pente de décrue supérieure à -0,2 (figure A6);
 - quatorze évènements ont leur indice de dispersion supérieur à 0,4 (figure A7);
 - seize évènements ont la moyenne de la forme de leur hydrogramme supérieure à 45 et treize évènements ont la variance de cette forme supérieure à 25 (figure A8).

Tableau 2: Statistiques descriptives des événements hydrologiques échantillonnés pour le bassin du ruisseau Catamaran

Début	Fin	DB (m ³ / s)	DB/A (L/s/ km ²)	D (h)	DP (m ³ / s)	DP/A (L/s/ km ²)	Tm (h)	Tr (h)	DM (m ³ / s)	DM/A (L/s/ km ²)	V (m ³)	V/A (m ³ / km ²)	PT (mm)	I Max (mm/ h)	I Moy (mm/ h)	ID	PC	PD	Sm	Sv
1993																				
11/05/1993	16/05/1993	0,73	14,31	80	4,6	90,20	21	6	1,63	31,96	127	2,49	35	5,33	0,29	0,43	0,56	-0,23	49	30
20/06/1993	24/06/1993	0,36	7,06	72	5,78	113,33	50	8	1,66	32,55	144	2,82	62	6,09	0,56	0,73	0,67	-0,35	59	21
11/10/1993	14/10/1993	0,11	2,16	50	1,85	36,27	21	4	0,74	14,51	46	0,90	37	6,35	0,46	0,49	0,35	-0,1	38	17
20/10/1993	24/10/1993	0,22	4,31	56	2,62	51,37	19	6	1,12	21,96	72	1,41	39	3,81	0,45	0,68	0,31	-0,13	36	20
26/10/1993	30/10/1993	0,42	8,24	63	1,31	25,69	20	8	0,85	16,67	48	0,94	22	2,79	0,22	-0,5	0,08	-0,03	43	25
04/11/1993	10/11/1993	0,59	11,57	103	2,39	46,86	30	10	1,04	20,39	94	1,84	20	2,79	0,13	0,23	0,16	-0,07	63	40
1994																				
24/05/1994	29/05/1994	0,65	12,75	80	2,24	43,92	53	3	1,26	24,71	85	1,67	37	6,09	0,3	-0,06	0,26	-0,07	60	30
13/06/1994	15/06/1994	0,5	9,80	40	0,9	17,65	16	6	0,73	14,31	22	0,43	15	5,58	0,24	0,23	0,05	-0,01	28	16
1995																				
22/10/1995	24/10/1995	0,45	8,82	43	0,34	6,67	15	5	0,21	4,12	9	0,18	19	7,62	0,28	0,06	0,08	-0,02	31	15
28/10/1995	01/11/1995	0,07	1,37	66	3,01	59,02	11	4	0,9	17,65	73	1,43	56	12,44	0,55	-0,35	0,8	-0,27	34	24
03/11/1995	07/11/1995	0,28	5,49	60	0,93	18,24	21	9	0,53	10,39	24	0,47	16	3,3	0,17	0	0,07	-0,05	39	22
1996																				
12/06/1996	14/06/1996	0,2	3,92	30	3,59	70,39	11	2	1,46	28,63	51	1,00	16	5,33	0,34	0,96	1,23	-0,27	20	10
13/07/1996	15/07/1996	0,22	4,31	27	11,64	228,24	16	4	4,06	79,61	155	3,04	71	14,24	1,55	3,06	3,57	-1,1	23	9
19/07/1996	25/07/1996	0,78	15,29	96	6,15	120,59	16	4	2,49	48,82	253	4,96	64	9,14	0,43	0,96	0,81	-0,41	55	36
13/09/1996	17/09/1996	0,09	1,76	66	2,99	58,63	29	9	0,99	19,41	82	1,61	61	5,58	0,6	0,54	0,4	-0,18	45	20
28/10/1996	02/11/1996	0,24	4,71	89	1,64	32,16	24	8	0,77	15,10	67	1,31	29	2,03	0,21	0,03	0,2	-0,07	61	35
1997																				
22/06/1997	25/06/1997	0,2	3,92	45	2,4	47,06	15	3	0,86	16,86	45	0,88	42	16,76	0,59	0,45	0,74	-0,17	30	16
25/06/1997	30/06/1997	0,4	7,84	76	1,95	38,24	19	5	1,01	19,80	79	1,55	39	6,35	0,33	0,51	0,31	-0,08	50	27
03/07/1997	07/07/1997	0,3	5,88	68	2,96	58,04	24	3	1,11	21,76	83	1,63	47	10,92	0,45	0,49	0,77	-0,13	45	22
11/08/1997	13/08/1997	0,06	1,18	25	0,29	5,69	9	2	0,18	3,53	5	0,10	19	7,36	0,47	-0,13	0,06	-0,01	18	10
20/09/1997	22/09/1997	0,05	0,98	46	0,72	14,12	30	9	0,36	7,06	20	0,39	23	4,57	0,32	0,28	0,05	-0,04	37	14

1998																				
14/06/1998	23/06/1998	0,225	4,41	132	4,41	86,47	77	32	1,37	26,86	217	4,25	63	13,2	0,31	0,29	1,28	-0,23	97	44
30/06/1998	04/07/1998	0,29	5,69	53	0,73	14,31	36	14	0,47	9,22	20	0,39	11	1,01	0,13	0,13	0,04	-0,04	40	20
05/07/1998	07/07/1998	0,24	4,71	39	1,02	20,00	23	9	0,57	11,18	24	0,47	16	3,81	0,26	-0,53	0,13	-0,05	30	14
09/07/1998	15/07/1998	0,27	5,29	92	1,44	28,24	54	14	0,75	14,71	72	1,41	24	3,04	0,17	0,38	0,1	-0,08	66	32
11/08/1998	13/08/1998	0,08	1,57	44	6,92	135,69	23	4	1,76	34,51	106	2,08	77	13,97	1,08	1	1,59	-0,64	32	13
30/09/1998	04/10/1998	0,33	6,47	53	4,23	82,94	23	5	1,53	30,00	92	1,80	28	7,36	0,34	0,06	1,06	-0,28	38	18
1999																				
24/05/1999	28/05/1999	0,395	7,75	53	1,33	26,08	24	7	0,77	15,10	38	0,75	22	4,06	0,26	0,32	0,12	-0,05	39	20
09/07/1999	14/07/1999	0,057	1,12	65	0,619	12,14	45	9	0,23	4,51	18	0,35	42	7,36	0,41	0,06	0,07	-0,02	52	20
16/09/1999	20/09/1999	0,038	0,75	60	1,875	36,76	27	11	0,78	15,29	61	1,20	72	11,43	0,78	0,47	0,57	-0,08	38	18
21/09/1999	27/09/1999	0,136	2,67	90	3,18	62,35	41	19	0,91	17,84	91	1,78	67	5,58	0,48	0,3	0,34	-0,39	56	28
13/10/1999	18/10/1999	0,154	3,02	72	2,683	52,61	27	5	0,87	17,06	75	1,47	46	8,89	0,41	0,48	0,45	-0,24	50	25
23/10/1999	27/10/1999	0,374	7,33	72	1,669	32,73	14	6	0,82	16,08	57	1,12	26	5,84	0,23	0,18	0,26	-0,12	44	29
2000																				
24/08/2000	27/08/2000	0,08	1,57	46	0,79	15,49	8	2	0,32	6,27	10	0,20	19	5,84	0,27	0,13	0,25	-0,14	26	81
15/09/2000	19/09/2000	0,05	0,98	59	0,53	10,39	17	4	0,23	4,51	16	0,31	51	10,92	0,56	0,07	0,17	-0,05	37	25
18/10/2000	23/10/2000	0,13	2,55	79	0,73	14,31	32	11	0,34	6,67	24	0,47	23	2,54	0,18	0,1	0,09	-0,08	55	36
05/11/2000	09/11/2000	0,23	4,51	66	1,4	27,45	34	8	0,73	14,31	49	0,96	32	3,55	0,31	0	0,15	-0,11	90	40
2001																				
31/08/2001	03/09/2001	0,03	0,67	40	0,67	13,14	17	5	0,21	4,12	10	0,20	33	7,11	0,54	0,12	0,15	-0,05	26	12
04/09/2001	08/09/2001	0,05	1,04	63	0,48	9,41	15	4	0,13	2,55	9	0,18	22	6,6	0,23	0,02	0,12	-0,03	33	22
Moyenne des statistiques calculées																				
		0,26	5,10	63	2,44	47,84	26	7	0,94	18,43	66	1,29	37	6,84	0,41	0,32	0,47	-0,17	44	24
Variance des statistiques calculées																				
		0,2	3,92	22	2,25	44,12	14	5	0,73	14,31	55	1,08	19	3,74	0,27	0,57	0,64	0,2	17	13

A : superficie du bassin (51 km²); DB : débit de base; DP : débit de pointe; DM : débit moyen; Tm : temps de montée de la crue; Tr : temps de réponse du bassin; D : durée de l'évènement pluvioux; V : volume d'eau écoulé; PT : précipitation totale de l'évènement; I Max : intensité maximale; I Moy : intensité moyenne; ID : indice de dispersion; PC/PD : pente de crue/de décrue; Sm et Sv: tmoenne et variance de la forme

5.2. Caractérisation des évènements de crue pluviale échantillonnés pour les sous-bassins versants aux sites 4 et 6 du bassin versant de La Grande Rivière

Pour ces deux sous-bassins, les débits et précipitations horaires sont disponibles pour les périodes 2005-2007 et 2005-2008 respectivement aux sites 4 et 6. Il faut souligner que les temps de réponse pour ces sous-bassins des évènements considérés dans le cadre de la présente étude s'avèrent importants par rapport à ceux du ruisseau Catamaran. En effet, contrairement au bassin versant du ruisseau Catamaran qui est principalement forestier, les sous-bassins aux sites 4 et 6 du bassin versant de la rivière La Grande ont une hydrologie plus amortie à cause de la présence d'un lac dans un cas (site 4) et d'une tourbière dans l'autre (site 6). Le lac et la tourbière occupant une portion beaucoup plus importante des sous-bassins à ces deux sites, l'effet de retenue d'eau par le lac et la tourbière se fait sentir.

5.2.1. Sous-bassin au site 4 du bassin versant de La Grande Rivière

Au niveau de ce site, cinq (5) évènements ont été sélectionnés sur la période 2005-2007 comme l'indique le tableau 3. La durée moyenne des évènements est de 127 h avec une durée maximale 232 h et une durée minimale de 65 h. Ce sous-bassin versant a un temps de réponse moyen de 15 h, maximal de 23 h et minimal de 9 h aux évènements. La précipitation totale moyenne des évènements est de 53 mm avec un maximum de 74 mm et un minimum de 27 mm. L'intensité maximale moyenne correspondante est de 7 mm/h avec un débit spécifique moyen de 25 L/s/km², un débit spécifique de pointe moyen de 50 L/s/km², et un volume d'eau spécifique moyen de 4 m³/km². L'indice de dispersion moyen des évènements hydrologiques est de 0,18 indiquant également pour ce sous-bassin que, la forme pour la plupart des courbes des hydrogrammes est d'une asymétrie positive. Les indices de la moyenne et de la variance de la forme des hydrogrammes sont respectivement de 91 et 51. Les détails sur les autres variables (débit de base, temps de montée de la crue, pentes de crue et de décrue, intensité moyenne) sont consignés dans le tableau 3. Les figures B1 à B8 en annexe B, donnent une illustration du comportement de toutes les variables pour les cinq (5) évènements échantillonnés. En effet, on peut observer sur ces figures que sur cet échantillon :

- deux évènements ont leur précipitation totale supérieure à 60 mm (figure B1);
- trois évènements durent chacun plus de 100 h et le temps de réponse du bassin est de moins de 15 h pour également trois évènements (figure B2);
- deux évènements ont leur intensité maximale supérieure à 7 mm/h (figure B3)
- deux évènements ont leur débit moyen supérieur à 0,001 m³/s soit l'équivalent d'un débit spécifique moyen supérieur à 25 L/s/km²; seul un évènement a son débit de pointe supérieur à 0,002 m³/s (débit spécifique de 50 L/s/km²) (figure B4);

- deux évènements produisent un volume d'eau supérieur à $0,15 \text{ m}^3$ soit l'équivalent d'un volume d'eau spécifique de $4 \text{ m}^3/\text{km}^2$ (figure B5);
- trois évènements ont leur pente de crue supérieure ou égale à 0,2 et deux évènements ont leur pente de décrue supérieure à -0,15 (figure B6);
- deux évènements ont leur indice de dispersion supérieur à 0,2 (figure B7);
- deux évènements ont la moyenne de la forme de leur hydrogramme supérieure à 90 et également deux évènements ont la variance de cette forme supérieure à 50 (figure B8).

5.2.2. Sous-bassin au site 6 du bassin versant de La Grande Rivière

Au niveau de ce site, sept (7) évènements ont été sélectionnés sur la période 2005-2008 comme l'indique le tableau 4. La durée moyenne des évènements est de 103 h avec une durée maximale 232 h comme au site 4, mais avec une durée minimale de 20 h. Ce sous-bassin a un temps de réponse moyen de 18 h, maximal de 40 h et minimal de 8 h aux évènements. La précipitation totale moyenne des évènements est de 38 mm avec un maximum de 82 mm et un minimum de 04 mm. L'intensité maximale moyenne correspondante est de près de 8 mm/h avec un débit spécifique moyen de plus de 28 L/s/km^2 , un débit spécifique de pointe moyen de $42,86 \text{ L/s/km}^2$ et un volume d'eau spécifique moyen avoisinant $4 \text{ m}^3/\text{km}^2$. L'indice de dispersion moyen des évènements hydrologiques est de 0,22 indiquant également pour ce bassin, que la forme pour la plupart des courbes des hydrogrammes est d'une asymétrie positive. Les valeurs moyennes de S_m et S_v sont respectivement de 73 et 41. Les détails sur les autres variables (débit de base, temps de montée de la crue, pentes de crue et de décrue, intensité moyenne) sont consignés dans le tableau 4. Les figures C1 à C8 en annexe C, donnent une illustration du comportement de toutes les variables pour les sept (07) évènements échantillonnés. On peut ainsi observer que dans cet échantillon :

- trois évènements ont leur précipitation totale supérieure à 40 mm (figure C1);
- deux évènements durent chacun plus de 100 h et le bassin a un temps de réponse inférieur à 18 h pour cinq évènements (figure C2).
- deux évènements ont leur intensité maximale supérieure ou égale à 10 mm/h (figure C3)
- deux évènements ont leur débit moyen supérieur à $0,002 \text{ m}^3/\text{s}$ soit l'équivalent d'un débit spécifique moyen supérieur à 28 L/s/km^2 ; également deux évènements ont leur débit de pointe supérieur à $0,003 \text{ m}^3/\text{s}$ ($42,86 \text{ L/s/km}^2$) (figure C4);
- deux évènements produisent un volume d'eau supérieur à $0,3 \text{ m}^3$ soit l'équivalent d'un volume d'eau spécifique de plus de $4 \text{ m}^3/\text{km}^2$ (figure C5);

-
- deux évènements ont leur pente de crue supérieure à 0,4 et seul un évènement a sa pente de décrue supérieure à -0,3 (figure C6);
 - trois évènements ont leur indice de dispersion supérieur à 0,2 (figure C7)
 - deux évènements ont la moyenne de la forme de leur hydrogramme supérieure à 80 et également deux évènements ont la variance de cette forme supérieure à 40 (figure C8).

Tableau 3: Statistiques descriptives des événements hydrologiques échantillonnés au site 4 du bassin de la rivière La Grande

Début	Fin	DB (m ³ /s)	DB/A (L/s/ km ²)	D (h)	DP (m ³ / s)	DP/A (L/s/ km ²)	T _m (h)	T _r (h)	DM (m ³ /s)	DM/A (L/s/ km ²)	V (m ³)	V/A (m ³ / km ²)	PT (mm)	I Max (mm/ h)	I Moy (mm/ h)	ID	PC	PD	Sm	Sv
2005																				
17/09/2005	21/09/2005	0,001	25,00	65	0,002	50,00	33	23	0,002	50,00	0,08	2,00	27	4,7	0,26	0,17	0,11	-0,098	49	28
2006																				
07/07/2006	13/07/2006	0,0004	10,00	93	0,002	50,00	30	14	0,001	25,00	0,13	3,25	53	7,47	0,37	0,97	0,2	-0,127	67	36
14/07/2006	29/07/2006	0,001	25,00	232	0,002	50,00	67	14	0,001	25,00	0,3	7,50	74	6,92	0,21	-0,33	0,28	-0,25	162	93
2007																				
26/06/2007	02/07/2007	0,0006	15,00	106	0,001	25,00	81	18	0,001	25,00	0,06	1,50	37	2,49	0,22	-0,4	0,09	-0,16	84	41
22/07/2007	31/07/2007	0,001	25,00	139	0,003	75,00	17	9	0,002	50,00	0,23	5,75	73	13,57	0,34	0,5	0,22	-0,1	96	57
Moyenne des statistiques calculées																				
		0,001	25,00	127	0,002	50,00	45	15	0,001	25,00	0,16	4,00	53	7,03	0,28	0,18	0,18	-0,15	91	51
Variance des statistiques calculées																				
		0	0,00	64	0,001	25,00	27	5	0,001	25,00	0,1	2,50	21	4,15	0,07	0,58	0,08	0,06	43	25

A : superficie du bassin (0.04 km²); DB : débit de base; DP : débit de pointe; DM : débit moyen; T_m : temps de montée de la crue; T_r : temps de réponse du bassin; D : durée de l'évènement pluvieux; V : volume d'eau écoulé; PT : précipitation totale de l'évènement; I Max : intensité maximale; I Moy : intensité moyenne; ID : indice de dispersion; PC/PD : pente de crue/de décrue; Sm et Sv: moyenne et variance de la forme

Tableau 4: Statistiques descriptives des événements hydrologiques échantillonnés au site 6 du bassin de la rivière La Grande

Début	Fin	DB (m ³ /s)	DB/A (L/s/ km ²)	D (h)	DP (m ³ /s)	DP/A (L/s/ km ²)	Tm (h)	Tr (h)	DM (m ³ /s)	DM/A (L/s/ km ²)	V (m ³)	V/A (m ³ / km ²)	PT (mm)	I Max (mm/ h)	I Moy (mm/ h)	ID	PC	PD	Sm	Sv
2005																				
20/08/2005	21/08/2005	0,002	28,57	20	0,003	42,86	15	8	0,002	28,57	0,03	0,43	4	1,66	0,13	0,17	0,27	-0,91	14	8
2006																				
19/07/2006	24/07/2006	0,002	28,57	79	0,003	42,86	18	9	0,002	28,57	0,14	2,00	31	7,19	0,25	0,33	0,39	-0,2	56	33
16/11/2006	19/11/2006	0,001	14,29	45	0,002	28,57	28	19	0,001	14,29	0,04	0,57	19	3,4	0,26	0,07	0,24	-0,19	34	19
2007																				
05/05/2007	20/05/2007	0,002	28,57	232	0,006	85,71	120	40	0,004	57,14	0,91	13,00	41	4,7	0,11	0,45	0,5	-0,31	171	93
16/07/2007	21/07/2007	0,001	14,29	79	0,002	28,57	31	15	0,002	28,57	0,11	1,57	27	7,47	0,22	-0,53	0,32	-0,14	58	32
22/07/2007	01/08/2007	0,001	14,29	166	0,005	71,43	82	27	0,003	42,86	0,5	7,14	82	9,96	0,32	1,15	0,68	-0,29	112	65
2008																				
06/07/2008	12/07/2008	0,001	14,29	99	0,002	28,57	18	8	0,001	14,29	0,13	1,86	62	20,76	0,41	-0,1	0,3	-0,16	71	41
Moyenne des statistiques calculées																				
		0,001	14,29	103	0,003	42,86	44	18	0,002	28,57	0,27	3,86	38	7,88	0,24	0,22	0,39	-0,31	73	41
Variance des statistiques calculées																				
		0,001	14,29	73	0,002	28,57	40	12	0,001	14,29	0,33	4,71	26	6,32	0,1	0,52	0,16	0,27	52	28

A : superficie du bassin (0.07 km²); DB : débit de base; DP : débit de pointe; DM : débit moyen; Tm : temps de montée de la crue; Tr : temps de réponse du bassin; D : durée de l'évènement pluvieux; V : volume d'eau écoulé; PT : précipitation totale de l'évènement; I Max : intensité maximale; I Moy : intensité moyenne; ID : indice de dispersion; PC/PD : pente de crue/de décrue; Sm et Sv: moyenne et variance de la forme

5.3. Comparaison inter-sites des comportements hydrologiques

Un des objectifs spécifiques de cette étude est de voir si les caractéristiques des hydrogrammes de crue pluviales échantillonnés, diffèrent d'un bassin versant à l'autre. C'est ainsi que sur la base des tableaux 2, 3 et 4, un tableau 5 est réalisé d'une part, pour présenter les moyennes et les variances des statistiques générées pour chacune des variables et dans chaque bassin versant forestier étudié, et d'autre part pour faciliter l'analyse de comparaison inter-sites.

Tableau 5: Moyennes et variances des statistiques des variables

Bassins étudiés	Catamaran (51 km ²)		Site 4. La Grande (0,04 km ²)		Site 6. La Grande (0,07 km ²)	
Évènements	39		05		07	
Variables	Moy.	Var.	Moy.	Var.	Moy.	Var.
Durée des évènements (h)	63	22	127	64	103	73
Débit spécifique de base (L/s/km ²)	5,10	3,92	25	0	14,29	14,29
Précipitation totale (mm)	37	19	53	21	38	26
Débit spécifique de pointe (L/s/km ²)	47,84	44,12	50	25	42,86	28,57
Temps de montée de la crue (h)	26	14	45	27	44	40
Temps de réponse du bassin (h)	7	5	15	5	18	12
Débit spécifique moyen (L/s/km ²)	18,43	14,31	25	25	28,57	14,29
Volume spécifique d'eau (m ³ /km ²)	1,29	1,08	4	2,50	3,86	4,71
Intensité maximale (mm/h)	6,84	3,74	7,03	4,15	7,88	6,32
Intensité moyenne (mm/h)	0,41	0,27	0,28	0,07	0,24	0,10
Indice de dispersion	0,32	0,57	0,18	0,58	0,22	0,52
Pente de crue	0,47	0,64	0,18	0,08	0,39	0,16
Pente de décrue	-0,17	0,20	-0,15	0,06	-0,31	0,27
Coefficient Sm	44	17	91	43	73	52
Coefficient Sv	24	13	51	25	41	28

On peut donc observer sur ce tableau 5, que les évènements pluvieux échantillonnés pour les trois bassins étudiés ont une intensité maximale moyenne comprise entre 6 et 8 mm/h et génèrent des débits spécifiques de pointe compris entre 40 et 50 L/s/km².

Toutefois, au niveau du bassin du ruisseau Catamaran, les évènements durent en moyenne tout au plus 63 h, alors que leur durée dépasse 100 h aux sous-bassins des sites 4 et 6 du bassin versant de La Grande Rivière. Également, une différence s'observe avec le temps de monté de la crue qui est en moyenne de 26 h au bassin du ruisseau Catamaran et de plus de 40h aux sous-bassins des sites 4 et 6. Les écarts entre ces deux extrémités en termes de taille du bassin, se perçoivent pour bien d'autres variables notamment le temps de réponse des bassins, les volumes d'eau spécifiques générés ainsi que les indices Sm et Sv. On comprend donc qu'il s'agit de comparaison inter-sites préliminaires et qu'il faudra des données provenant de bassins de

taille intermédiaire entre ces deux extrémités pour dégager véritablement les différences inter-sites.

Dans ce contexte soutenu par l'inadéquation entre les années de données disponibles pour chaque bassin et la longueur courte des séries de données surtout aux sites 4 et 6, cette partie du rapport pourra être approfondie avec l'ajout d'autres chroniques de données, la prise en compte d'autres petits bassins versants forestiers et l'application d'analyses de variance (ANCOVA) et/ou de tests non-paramétriques (Kruskal-Wallis). Des relations linéaires ou non-linéaires entre les caractéristiques hydrologiques et des variables physiographiques pourraient être ainsi établies dans un cadre univarié (régression linéaire) ou multivarié (régression multiple, modèle linéaire généralisé).

5.4. Analyse en Composantes Principales (ACP)

Toujours dans l'objectif de caractériser et de comparer les comportements hydrologiques au niveau de petits bassins versants forestiers, l'analyse en composantes principales (ACP) a été appliquée aux événements hydrologiques et variables statistiques des trois bassins versants étudiés. En effet, le choix de cette méthode se justifie par le fait qu'elle peut contribuer à expliquer certains comportements hydrologiques par la caractérisation et la classification des événements hydrologiques ainsi que des variables statistiques (Assani et Tardif, 2005). Pour les besoins de cette analyse, les données sur le volume d'eau écoulé, le débit de base, le débit moyen et le débit de pointe, ont été homogénéisées par la superficie au niveau de chaque bassin versant. En effet, la standardisation de ces métriques facilite la comparaison inter-sites de la forme des hydrogrammes. Notons également que l'ACP a été effectuée sur les côtes z des variables (variables centrées et réduites) afin d'éliminer l'effet de l'échelle sur la classification des événements.

Les tableaux 6, 7 et 8 présentent les données utilisées pour l'application de l'ACP respectivement au bassin versant du ruisseau Catamaran et aux sous-bassins expérimentaux des sites 4 et 6 du bassin versant de La Grande Rivière.

Tableau 6: Données d'application de l'ACP pour le bassin versant du ruisseau Catamaran

Indicateur ACP	Début	Fin	DB/A (L/s/km ²)	D (h)	DP/A (L/s/km ²)	T _m (h)	T _r (h)	DM/A (L/s/km ²)	V/A (m ³ /km ²)	PT (mm)	I Max (mm/h)	I Moy (mm/h)	ID	PC	Sm	Sv
C1	11/05/1993	16/05/1993	14,31	80	90,20	21	6	31,96	2,49	35	5,33	0,29	0,43	0,56	49	30
C2	20/06/1993	24/06/1993	7,06	72	113,33	50	8	32,55	2,82	62	6,09	0,56	0,73	0,67	59	21
C3	11/10/1993	14/10/1993	2,16	50	36,27	21	4	14,51	0,90	37	6,35	0,46	0,49	0,35	38	17
C4	20/10/1993	24/10/1993	4,31	56	51,37	19	6	21,96	1,41	39	3,81	0,45	0,68	0,31	36	20
C5	26/10/1993	30/10/1993	8,24	63	25,69	20	8	16,67	0,94	22	2,79	0,22	-0,50	0,08	43	25
C6	04/11/1993	10/11/1993	11,57	103	46,86	30	10	20,39	1,84	20	2,79	0,13	0,23	0,16	63	40
C7	24/05/1994	29/05/1994	12,75	80	43,92	53	3	24,71	1,67	37	6,09	0,30	-0,06	0,26	60	30
C8	13/06/1994	15/06/1994	9,80	40	17,65	16	6	14,31	0,43	15	5,58	0,24	0,23	0,05	28	16
C9	22/10/1995	24/10/1995	8,82	43	6,67	15	5	4,12	0,18	19	7,62	0,28	0,06	0,08	31	15
C10	28/10/1995	01/11/1995	1,37	66	59,02	11	4	17,65	1,43	56	12,44	0,55	-0,35	0,80	34	24
C11	03/11/1995	07/11/1995	5,49	60	18,24	21	9	10,39	0,47	16	3,30	0,17	0,00	0,07	39	22
C12	12/06/1996	14/06/1996	3,92	30	70,39	11	2	28,63	1,00	16	5,33	0,34	0,96	1,23	20	10
C13	13/07/1996	15/07/1996	4,31	27	228,24	16	4	79,61	3,04	71	14,24	1,55	3,06	3,57	23	9
C14	19/07/1996	25/07/1996	15,29	96	120,59	16	4	48,82	4,96	64	9,14	0,43	0,96	0,81	55	36
C15	13/09/1996	17/09/1996	1,76	66	58,63	29	9	19,41	1,61	61	5,58	0,60	0,54	0,40	45	20
C16	28/10/1996	02/11/1996	4,71	89	32,16	24	8	15,10	1,31	29	2,03	0,21	0,03	0,20	61	35
C17	22/06/1997	25/06/1997	3,92	45	47,06	15	3	16,86	0,88	42	16,76	0,59	0,45	0,74	30	16
C18	25/06/1997	30/06/1997	7,84	76	38,24	19	5	19,80	1,55	39	6,35	0,33	0,51	0,31	50	27
C19	03/07/1997	07/07/1997	5,88	68	58,04	24	3	21,76	1,63	47	10,92	0,45	0,49	0,77	45	22
C20	11/08/1997	13/08/1997	1,18	25	5,69	9	2	3,53	0,10	19	7,36	0,47	-0,13	0,06	18	10
C21	20/09/1997	22/09/1997	0,98	46	14,12	30	9	7,06	0,39	23	4,57	0,32	0,28	0,05	37	14
C22	14/06/1998	23/06/1998	4,41	132	86,47	77	32	26,86	4,25	63	13,20	0,31	0,29	1,28	97	44
C23	30/06/1998	04/07/1998	5,69	53	14,31	36	14	9,22	0,39	11	1,01	0,13	0,13	0,04	40	20
C24	05/07/1998	07/07/1998	4,71	39	20,00	23	9	11,18	0,47	16	3,81	0,26	-0,53	0,13	30	14
C25	09/07/1998	15/07/1998	5,29	92	28,24	54	14	14,71	1,41	24	3,04	0,17	0,38	0,10	66	32
C26	11/08/1998	13/08/1998	1,57	44	135,69	23	4	34,51	2,08	77	13,97	1,08	1,00	1,59	32	13

C27	30/09/1998	04/10/1998	6,47	53	82,94	23	5	30,00	1,80	28	7,36	0,34	0,06	1,06	38	18
C28	24/05/1999	28/05/1999	7,75	53	26,08	24	7	15,10	0,75	22	4,06	0,26	0,32	0,12	39	20
C29	09/07/1999	14/07/1999	1,12	65	12,14	45	9	4,51	0,35	42	7,36	0,41	0,06	0,07	52	20
C30	16/09/1999	20/09/1999	0,75	60	36,76	27	11	15,29	1,20	72	11,43	0,78	0,47	0,57	38	18
C31	21/09/1999	27/09/1999	2,67	90	62,35	41	19	17,84	1,78	67	5,58	0,48	0,30	0,34	56	28
C32	13/10/1999	18/10/1999	3,02	72	52,61	27	5	17,06	1,47	46	8,89	0,41	0,48	0,45	50	25
C33	23/10/1999	27/10/1999	7,33	72	32,73	14	6	16,08	1,12	26	5,84	0,23	0,18	0,26	44	29
C34	24/08/2000	27/08/2000	1,57	46	15,49	8	2	6,27	0,20	19	5,84	0,27	0,13	0,25	26	81
C35	15/09/2000	19/09/2000	0,98	59	10,39	17	4	4,51	0,31	51	10,92	0,56	0,07	0,17	37	25
C36	18/10/2000	23/10/2000	2,55	79	14,31	32	11	6,67	0,47	23	2,54	0,18	0,10	0,09	55	36
C37	05/11/2000	09/11/2000	4,51	66	27,45	34	8	14,31	0,96	32	3,55	0,31	0,00	0,15	90	40
C38	31/08/2001	03/09/2001	0,67	40	13,14	17	5	4,12	0,20	33	7,11	0,54	0,12	0,15	26	12
C39	04/09/2001	08/09/2001	1,04	63	9,41	15	4	2,55	0,18	22	6,60	0,23	0,02	0,12	33	22

A= superficie du bassin versant (51km²) D= durée PT= précipitation totale DB= débit de base DM= débit moyen
DP= débit de pointe V= volume Tm= temps de montée PC= pente de crue Tr= temps de réponse
I Max= intensité maximale ID= indice de dispersion I Moy= intensité moyenne Sm= moyenne de la forme
Sv= variance de la forme ; C1 à C39 = évènements hydrologiques ; en bleu, ce sont les évènements exceptionnels.

Tableau 7: Données d'application de l'ACP pour le sous-bassin expérimental au site4

Indicateur ACP	Début	Fin	DB/A (L/s/km ²)	D (h)	DP/A (L/s/km ²)	T _m (h)	T _r (h)	DM/A (L/s/km ²)	V/A (m ³ /km ²)	PT (mm)	I Max (mm/h)	I Moy (mm/h)	ID	PC	Sm	Sv
S41	17/09/2005	21/09/2005	25,00	65	50,00	33	23	50,00	2,00	27	4,70	0,26	0,17	0,11	49	28
S42	07/07/2006	13/07/2006	10,00	93	50,00	30	14	25,00	3,25	53	7,47	0,37	0,97	0,20	67	36
S43	14/07/2006	29/07/2006	25,00	232	50,00	67	14	25,00	7,50	74	6,92	0,21	-0,33	0,28	162	93
S44	26/06/2007	02/07/2007	15,00	106	25,00	81	18	25,00	1,50	37	2,49	0,22	-0,40	0,09	84	41
S45	22/07/2007	31/07/2007	25,00	139	75,00	17	9	50,00	5,75	73	13,57	0,34	0,50	0,22	96	57

Tableau 8: Données d'application de l'ACP pour le sous-bassin expérimental au site6

Indicateur ACP	Début	Fin	DB/A (L/s/km ²)	D (h)	DP/A (L/s/km ²)	T _m (h)	T _r (h)	DM/A (L/s/km ²)	V/A (m ³ /km ²)	PT (mm)	I Max (mm/h)	I Moy (mm/h)	ID	PC	Sm	Sv
S61	20/08/2005	21/08/2005	28,57	20	42,86	15	8	28,57	0,43	4	1,66	0,13	0,17	0,27	14	8
S62	19/07/2006	24/07/2006	28,57	79	42,86	18	9	28,57	2,00	31	7,19	0,25	0,33	0,39	56	33
S63	16/11/2006	19/11/2006	14,29	45	28,57	28	19	14,29	0,57	19	3,40	0,26	0,07	0,24	34	19
S64	05/05/2007	20/05/2007	28,57	232	85,71	120	40	57,14	13,00	41	4,70	0,11	0,45	0,50	171	93
S65	16/07/2007	21/07/2007	14,29	79	28,57	31	15	28,57	1,57	27	7,47	0,22	-0,53	0,32	58	32
S66	22/07/2007	01/08/2007	14,29	166	71,43	82	27	42,86	7,14	82	9,96	0,32	1,15	0,68	112	65
S67	06/07/2008	12/07/2008	14,29	99	28,57	18	8	14,29	1,86	62	20,76	0,41	-0,10	0,30	71	41

A= superficie du bassin versant (0.04 km² pour S4 ; 0.07km² pour S6) ;

S41 à S45 = évènements hydrologiques au site4 ; S61 à S67 = évènements hydrologiques au site6

D= durée PT= précipitation totale DB= débit de base DM= débit moyen DP= débit de pointe V= volume

Tm= temps de montée PC= pente de crue Tr= temps de réponse I Max= intensité maximale

ID= indice de dispersion I Moy= intensité moyenne Sm= moyenne de la forme Sv= variance de la forme ;

en bleu, ce sont les évènements exceptionnels

L'ACP permet de tenir compte des différentes variables (caractéristiques) de tous les événements et de trouver ceux qui sont les plus proches en termes de distance dans l'espace canonique. Cet espace est déterminé à partir des composantes principales qui permettent de résumer l'information obtenue sur toutes les variables en un nombre restreint de composantes. La figure 8 présente ainsi la variance expliquée par chaque composante principale. On remarque sur cette figure que les deux premières composantes principales expliquent à elles seules 75% de la variance de l'ensemble des variables considérées ; D'où leur choix pour l'ACP dans cette étude.

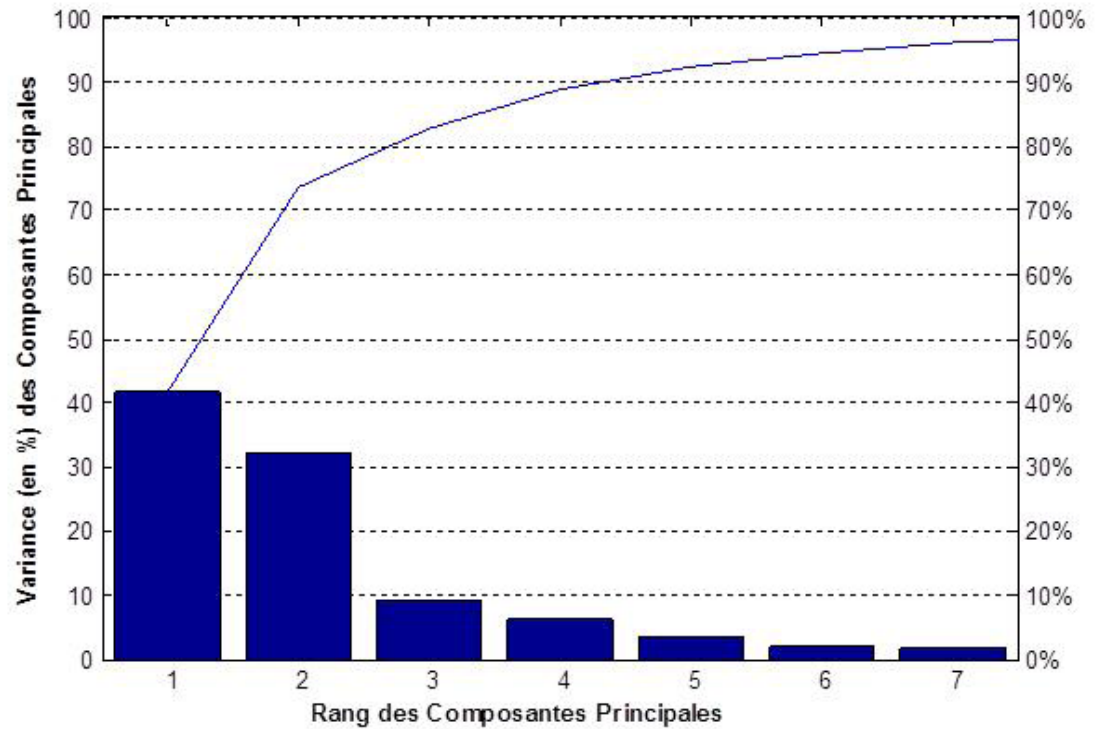
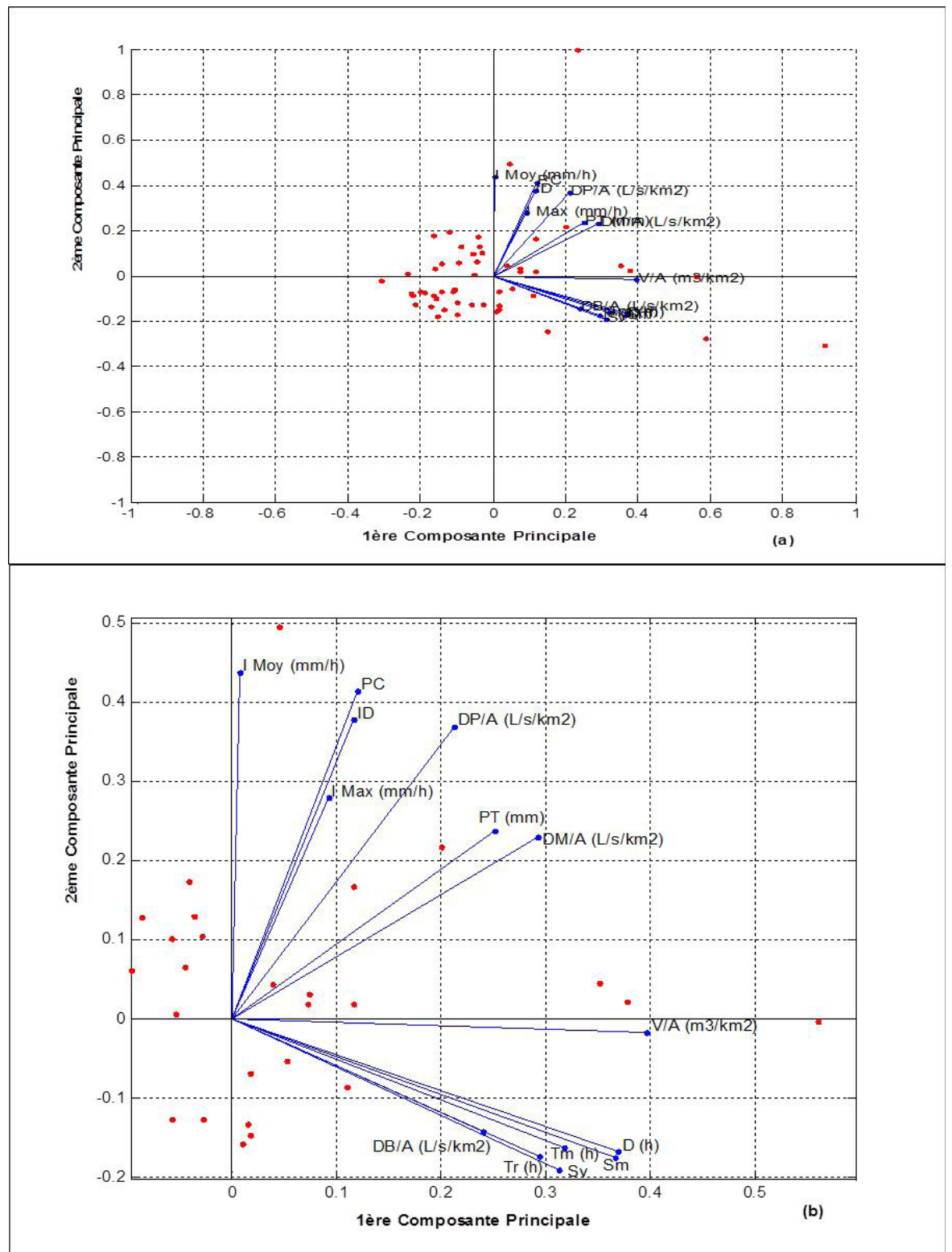


Figure 8: Variance expliquée des variables par chaque composante principale

La réduction de la dimension de l'espace des individus (espace des événements hydrologiques) et des variables (espaces des variables statistiques) avec l'ACP a ainsi permis une classification et une visualisation des résultats en dimension 2 pour les deux premières composantes principales comme l'illustre respectivement l'espace des variables statistiques à la figure 9 et le nuage de points à la figure 10, pour les trois bassins versants.



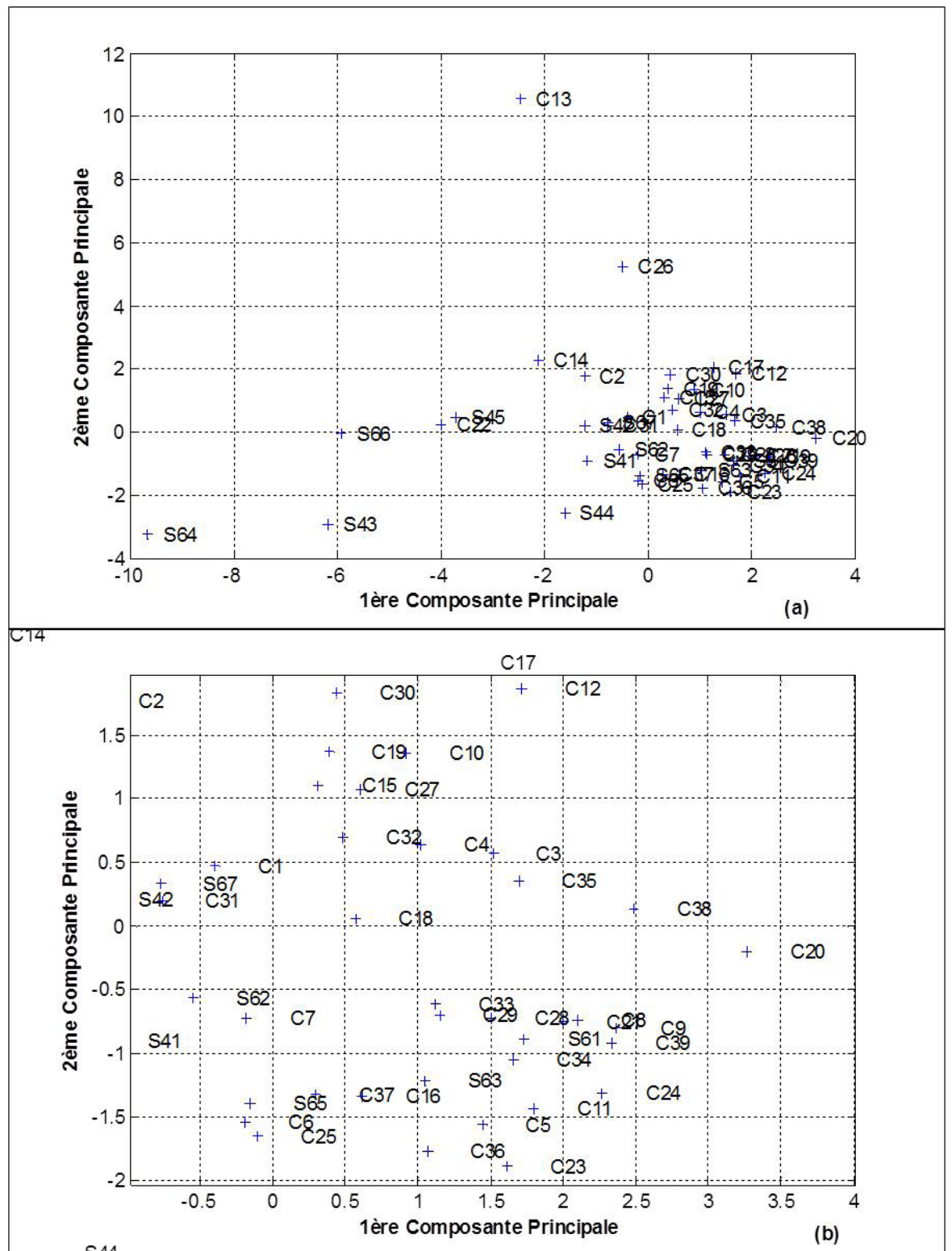
(a)= figure de base ; (b)= agrandissement de la partie sur les variables de (a)

Figure 9: Espace des variables statistiques de caractérisation des hydrogrammes des bassins versants

La représentation graphique des variables statistiques (figure 9) permet de déterminer les variables qui sont les plus corrélées à chacune des composantes principales. On remarque sur cet espace des variables que, le premier axe principal est positivement corrélé avec respectivement le volume d'eau écoulé, la durée de l'évènement, l'indice S_m , le temps de montée de la crue, le débit de base, le temps de réponse du bassin et l'indice S_v . Quant au deuxième axe principal, il est positivement corrélé avec respectivement l'intensité moyenne, la pente de crue, l'indice de dispersion, l'intensité maximale, le débit de pointe, la précipitation totale et le débit moyen.

Notons toutefois, qu'une variable statistique à savoir la pente de décrue, a été éliminée dans le cadre de cette ACP en vue de réduire les colinéarités au sein du groupe de variables. En effet, elle est la seule variable avec des valeurs négatives et qui soit très corrélée négativement avec la pente de crue sur le deuxième axe principal.

Sur la figure 10 qui correspond à l'espace des évènements hydrologiques, les événements correspondants au bassin versant du ruisseau Catamaran sont notés par C_i et ceux correspondants aux sous-bassins expérimentaux aux sites 4 et 6 du bassin versant de La Grande Rivière, respectivement par $S4_i$ et $S6_i$, où i est l'ordre chronologique de l'évènement.



(a)= figure de base ; (b)= agrandissement sur le nuage de points confus en (a)

Figure 10: Nuage de points représentant les évènements hydrologiques des bassins versants

On remarque sur cet espace des évènements hydrologiques, que presque tous les événements échantillonnés aux bassins du ruisseau Catamaran et aux sous-bassins des sites 4 et 6 de La Grande Rivière, sont regroupés pour les deux premières composantes principales. Ce regroupement indique que la majorité des événements hydrologiques échantillonnés pour ces trois bassins, ont des caractéristiques similaires. Toutefois, on ne peut donner de conclusions qui soient définitives sur les caractéristiques des hydrogrammes de ces bassins, en raison de l'absence de données provenant de bassins de taille intermédiaire entre les deux extrêmes que sont le bassin du ruisseau Catamaran avec 51 km^2 et les sous-bassins aux sites 4 (0.04 km^2) et 6 (0.07 km^2) de La Grande Rivière. D'ailleurs, quelques événements exceptionnels (écartés du nuage) sont observés pour ces trois bassins étudiés comme l'indique les parties surlignées en bleu dans les tableaux 6, 7 et 8.

C13 (observé du 13 juillet au 15 juillet 1996), C14 (observé du 19 juillet au 25 juillet 1996), C22 (observé du 14 juin au 23 juin 1998) et C26 (observé du 11 août au 13 août 1998). En se basant sur le tableau 6, on remarque que ces événements à l'exception de C22 avec $86,47 \text{ l/s/km}^2$, se caractérisent par les débits de pointe les plus élevées de l'échantillon d'évènements constitué : 228 l/s/km^2 , $135,69 \text{ l/s/km}^2$ et $120,59 \text{ l/s/km}^2$ respectivement pour C13, C26 et C14.

S43 (observé du 14 juillet au 29 juillet 2006), S44 (observé du 26 juin au 02 juillet 2007) et S45 (observé du 22 juillet au 31 juillet 2007). En observant le tableau 7, on remarque que S45 a le débit de pointe le plus élevé de l'échantillon (75 l/s/km^2) tandis que S44 a le plus faible débit de pointe (25 l/s/km^2).

S64 (observé du 05 mai au 20 mai 2007) et S66 (observé du 22 juillet au 01 août 2007). A la lumière du tableau 8, on constate que les événements S64 et S66 se démarquent des autres avec des débits de pointe respectifs de $85,71 \text{ l/s/km}^2$ et $71,43 \text{ l/s/km}^2$.

5.5. Le coefficient de correction dans la méthode CRUPEDIX : estimation pour le bassin versant du ruisseau Catamaran

Les données de débits ainsi que de précipitations horaires observées au bassin du ruisseau Catamaran ont été compilées en vue de l'extraction des maxima annuels de la pluie journalière et du débit instantané comme l'indique le tableau 9.

Tableau 9: Maxima annuels observés de Pj et Qi au bassin du Catamaran

Années \ Variables	Pj: max annuel journalier (mm)	Qi: max annuel instantané (m³/s)
1993	39,4	12
1994	40,1	11,3
1995	47,2	6,33
1996	71,1	11,6
1997	41,9	9,81
1998	60,7	6,92
1999	64,5	5,16
2000	52,8	10,6
2001	78	8,61

Une analyse fréquentielle a été ensuite faite pour la détermination de Q_{i10} et P_{j10} (équation 3). Quatre ajustements statistiques (ajustements par la loi de Gumbel, la loi Exponentielle, la loi Lognormale et la loi Gamma) ont été testés sur chacune de ces deux variables. Les figures D1 à D10 en annexe D, illustrent ces différents ajustements. À l'aide de la comparaison par critère (Akaike, 1974; Fortin et al., 1998), l'ajustement par la loi exponentielle a été retenu pour P_{j10} et, l'ajustement par la loi Gamma pour Q_{i10} . Ainsi, Q_{i10} a donné 12,5 m³/s et $P_{j10} = 78,1$ mm. En tirant R de l'équation (3), on aboutit à l'équation (4) :

$$R = \frac{80Q_{i10}}{P_{j10}A^{0.8}} \quad (4)$$

Sachant que $A = 51 \text{ km}^2$, $R = 0,55$. Cette valeur de R est différente de la valeur par défaut 1.

Dans la perspective du développement d'une méthode de prédétermination des débits et volumes de crues pour des bassins versants non jaugés aux caractéristiques similaires à celle du bassin versant du Catamaran, ce coefficient pourrait être appliqué à l'équation de prédétermination. Par ailleurs, une définition de critères morphologiques et hydrologiques des petits bassins versants forestiers canadiens pourrait être faite en vue de la mise en place d'une «clé de détermination» (figure 7) qui corresponde aux caractéristiques des bassins canadiens. Cette clé permettra de connaître «R» pour

différents types de bassin et de faire de meilleurs estimations des débits et volumes de crues au niveau des bassins versants non jaugés.

6. Conclusions et recommandations

Cette étude descriptive et d'analyse de comparaison inter-sites des hydrogrammes de crues pluviales au niveau des petits bassins versants forestiers du ruisseau Catamaran et aux sites 4 et 6 de La Grande Rivière, a permis d'explorer leurs comportements hydrologiques et de les caractériser à travers des variables statistiques pertinentes. D'ores et déjà, on retient à la suite de ces analyses que pour la plupart des hydrogrammes de crue, la forme de leur courbe est d'une asymétrie positive, les indices de dispersion moyens étant positifs. Quant aux événements pluvieux en général, ils connaissent une durée moyenne au-dessus de 50 h au niveau du bassin versant du Catamaran avec un volume d'eau spécifique moyen de plus de $1 \text{ m}^3/\text{km}^2$, tandis que cette durée est de plus de 100 h au niveau des sous-bassins versants des sites 4 et 6 avec un volume d'eau spécifique moyen de l'ordre de $4 \text{ m}^3/\text{km}^2$. De plus, le bassin du ruisseau Catamaran mettrait moins de 10 h à répondre à un événement pluvieux, tandis-que les sous-bassins aux sites 4 et 6 en mettraient plus de 10 h. On peut donc dire que toutes les variables statistiques générées ont permis de dresser un profil de base pour chacun de ces bassins. Cela constitue un acquis quoique à approfondir surtout en matière de longueur de série de données, pour la suite de cette étude. En effet, le manque de donnée sur une période assez importante ainsi que le nombre réduit des bassins versants, a limité l'entendue de cette étude à savoir la comparaison inter-sites des comportements hydrologiques en vue d'une meilleure compréhension de la relation pluie-débit au niveau des petits bassins forestiers. Toutefois, l'ACP ainsi que de l'analyse fréquentielle ont donné des résultats intéressants quoique préliminaires. En effet, l'ACP a montré que la plupart des événements échantillonnés dans les trois bassins versants étudiés, présentent des caractéristiques similaires, et qu'une partie des variables statistiques sont en association positive avec le premier axe principal (exemple du volume d'eau spécifique), l'autre partie l'étant avec le deuxième axe principal (exemple de l'intensité moyenne). Les objectifs fixés pour cette étude ont été alors globalement atteints au regard des résultats produits par les différentes analyses faites.

Ainsi, au regard du besoin actuel de développement de méthodologies fiables pour la caractérisation des crues et des étiages des petits bassins versants forestiers canadiens ainsi que l'estimation des débits et volumes équivalents, la principale recommandation porte sur la caractérisation morphologique et hydrologique des petits bassins versants forestiers et la définition de zones hydrologiques homogènes.

L'étude exploratoire des méthodes empiriques et déterministes existantes pour l'estimation des crues comme la méthode empirique CRUPEDIX présentée par Cipriani (2010), est également suggérée avec des bassins versants jaugés et la validation des estimations sur des bassins versants non jaugés de la même classe. Par ailleurs, dans la perspective d'un usage de la méthode

CRUPEDIX, pour une meilleure estimation des débits et volumes de crue de bassins versants non jaugés, les critères ci-dessous, reconnus pour avoir un effet d'amélioration de la performance des méthodes statistiques sommaires, seraient à prendre en considération :

- délimiter les bassins versants dans ArcGis et définir des unités géomorphologiques et hydrogéologiques en vue d'un zonage hydrologique homogène ;
- examiner les paramètres physiographiques susceptibles d'influer les débits de crue puis établir des relations statistiques sommaires à partir d'une analyse régionale ;
- calculer l'indice de compacité de Gravelius K_c pour caractériser la forme des bassins ;
- déterminer la dénivelée spécifique D_s pour expliquer la rapidité de réponse des bassins ;
- décrire la structure du réseau hydrographique : cela comprend la détermination de la densité du réseau de drainage et des drains élémentaires et secondaires, ainsi que la cartographie des massifs karstiques ;
- analyser l'exposition des bassins versants face aux flux de perturbations pluvieuses qui engendrent les crues : en effet, il est intéressant de faire le lien entre l'orientation d'un bassin et l'origine du flux de perturbation responsable des plus fortes crues. Ce critère d'exposition peut donner une très bonne indication sur le potentiel de réponse du bassin versant face à une perturbation. Elle permet aussi de déterminer et d'analyser les types d'averses fréquentes ou probables sur les bassins ;
- mettre en place une clé de détermination propre aux bassins canadiens et développer une matrice des corrélations des variables étudiées ; Dans cette perspective, l'étude bénéficierait de l'intégration de bassins versants d'autres rivières comme celle des Eaux Volées et Nécopastic. En effet, ceci permettrait de raffiner la clé de détermination à mettre en place.
- utiliser au besoin l'analyse Qdf pour la détermination des volumes de crues et pour l'observation des hydrogrammes en fonction des saisons d'une part, et celle des relations entre débit de pointe et durée caractéristique d'autre part.

7. Remerciements

Cette étude a été financée par le conseil de recherche des sciences naturelles et génie du Canada en partenariat avec Hydro-Québec et des chercheurs de l'Université de Moncton et leurs collaborateurs.

8. Références

- Anctil F., Rousselle J. et N. Lauzon (2005). *Hydrologie : cheminement de l'eau*. Presses Internationales Polytechnique, 317p.
- Akaike H. (1974). *A new look at the statistical model identification*. IEEE Transactions on Automatic Control 19 (9), 716-723.
- Akan A. O. (2002). *Modified rational method for sizing infiltration structures*. Canadian Journal of Civil Engineering, NRC 29, 539-542.
- Assani A. A. et S. Tardif (2005). *Classification, caractérisation et facteurs de variabilité spatiale des régimes hydrologiques naturels au Québec (Canada)*. Approche éco-géographique. Revue des sciences de l'eau 18 (2), 247-266.
- Caissie D., Pollock T. L., R. A. Cunjak (1996). *Variation in stream water chemistry and hydrograph separation in a small drainage basin*. Journal of Hydrology, 178, 137-157.
- Caissie D., Jolicoeur S., Bouchard M., E. Poncet (2002). *Comparison of streamflow between pre and post timber harvesting in Catamaran brook (Canada)*. Journal of Hydrology, 258, 232-248.
- Carey S. K., Tetzlaff D., Seibert J., Soulsby C., Buttle J., Laudon H., McDonnell J., McGuire K., Caissie D., Shanley J., Kennedy M., Devito K. and J. W. Pomeroy (2010). *Inter-comparison of hydro-climatic regimes across northern catchments: synchronicity, resistance and resilience*. Hydrological Processes 24, 3591-3602.
- Cipriani T. (2010). *Analyses statistiques des hydrogrammes de crue de petits bassins versants alpins, en vue de la prédétermination des volumes et pointes de crue*. Mémoire de stage, Hydrosiences Montpellier, Cemagref Grenoble, Université Montpellier II, 89p.
- Cunjak R. A., Caissie D. & N. El-Jabi (1990). *The Catamaran brook habitat research project: description and general design of the study*. Canadian Technical report of Fisheries and Aquatic Sciences n°1751, 21p.
- El Adlouni S. et B. Bobée (2010). *Système d'Aide à la Décision pour l'estimation du risque hydrologique*. Numéro spécial du Journal des Sciences Hydrologiques, et présenté à la conférence FRIEND 2010.
- El-Jabi N. et J. Rousselle (1990). *Hydrologie fondamentales : Deuxième édition revue et corrigée*. Éditions de l'École Polytechnique de Montréal. Notes de cours.
- El-Jabi N., Loua P. et D. Caissie (1999). *Hydrométéorologie du ruisseau Catamaran*. Revue de l'Université de Moncton, numéro spécial Génie et Technologie, 5-17.
- Fortin V., Bernier J. et B. Bobée (1998). *Détermination des crues de conception*. Chaire en Hydrologie Statistique, rapport N0 R-532.
- Gargouri E. E. et Z. K. Bargaoui (2006). *Prédétermination des débits maximaux de crue par simulation Monte-Carlo de la pluie nette*. Revue des sciences de l'eau 19 (4), 327-345.
- Guillot P. (1993). *The arguments of the gradex method: a logical support to as-*

- less extreme floods. Extreme Hydrological Events: Precipitation, Floods and Droughts* (Proceedings of the Yokohama Symposium, July 1993) IAHS Publ. (213), 287-298.
- Hannula S. R., Esposito K. J., Chermak J. A., Runnells D. D., Keith D. C. and H. E. Larry (2003). *Estimating ground water discharge by hydrograph separation*. GROUND WATER 41 (3), 368-375.
- Kamagaté B., Séguis L., Goné D. L., Favreau G. et K. Kouadio (2008). *Processus hydrogéochimiques et séparation d'hydrogrammes de crue sur un bassin versant en milieu soudano-tropical de socle au Bénin (Donga, haute vallée de l'Ouémé)*. Revue des sciences de l'eau 21 (3), 363-372.
- Mediero L., Jimenez-Alvarez A. and L. Garrote (2010). *Design flood hydrographs from the relationship between flood peak and volume*. Hydrol. Earth Syst. Sci. 14, 2495-2505.
- Poff L.N., Allan J. D., Bain M. B., Karr J. R., Prestegard K. L., Richter B. D., Sparks R. E., et J. C. Stromberg (1997). *The natural flow regime: a paradigm for river conservation and restoration*. Bioscience 47 (11), 769-784.
- Pramanik N., Panda R. K. and D. Sen (2010). *Development of design flood hydrographs using probability density functions*. Hydrological Processes 24, 415-428.
- St-Hilaire A., D. Caissie, N. El-Jabi et G. Morin (1998). *Évaluation de l'applicabilité d'une méthode statistique aux variations saisonnières des relations concentration-débit sur un petit cours d'eau*. Revue des sciences de l'eau 11, 175-190.
- Tardif S. (2009). *Hydrologie comparative des tourbières et des lacs de la Baie de James dans un contexte d'aqualyse. Thèse de Doctorat en sciences de l'eau*. Université du Québec, INRS-Eau-Terre-Environnement, 164p.
- Tardif S., St-Hilaire A., Roy R., Bernier M. et S. Payette (2009). *Statistical Properties of Hydrographs in Minerotrophic Fens and Small Lakes in Mid-Latitude Québec, Canada*. Can. Water Resour. J. / Rev. Can. Ressour. Hydr. 34 (4), 365-380.
- Tekeli Y. I. and A. U. Sorman (2003). *Separation of hydrograph components using stable isotopes case study: the Güvenç basin, Ankara. Turkish*. J. Eng. Env. Sci. 27, 383-395.
- Torres I. B. LT, Amatya D. M., Sun G., T. J. Callahan (2011). *Seasonal rainfall-runoff relationships in a lowland forested watershed in the southeastern USA*. Hydrological Processes, 2011, Published online.
- Yue S., Ouarda T. B. M. J., Bobée B., Legendre P. and P. Bruneau (2002). *Approach for describing statistical properties of flood hydrograph*. Journal of Hydrologic Engineering 7 (2), 147-153.

ANNEXES: Illustrations graphiques

Annexe A: Caractérisation des évènements hydrologiques pour le Catamaran

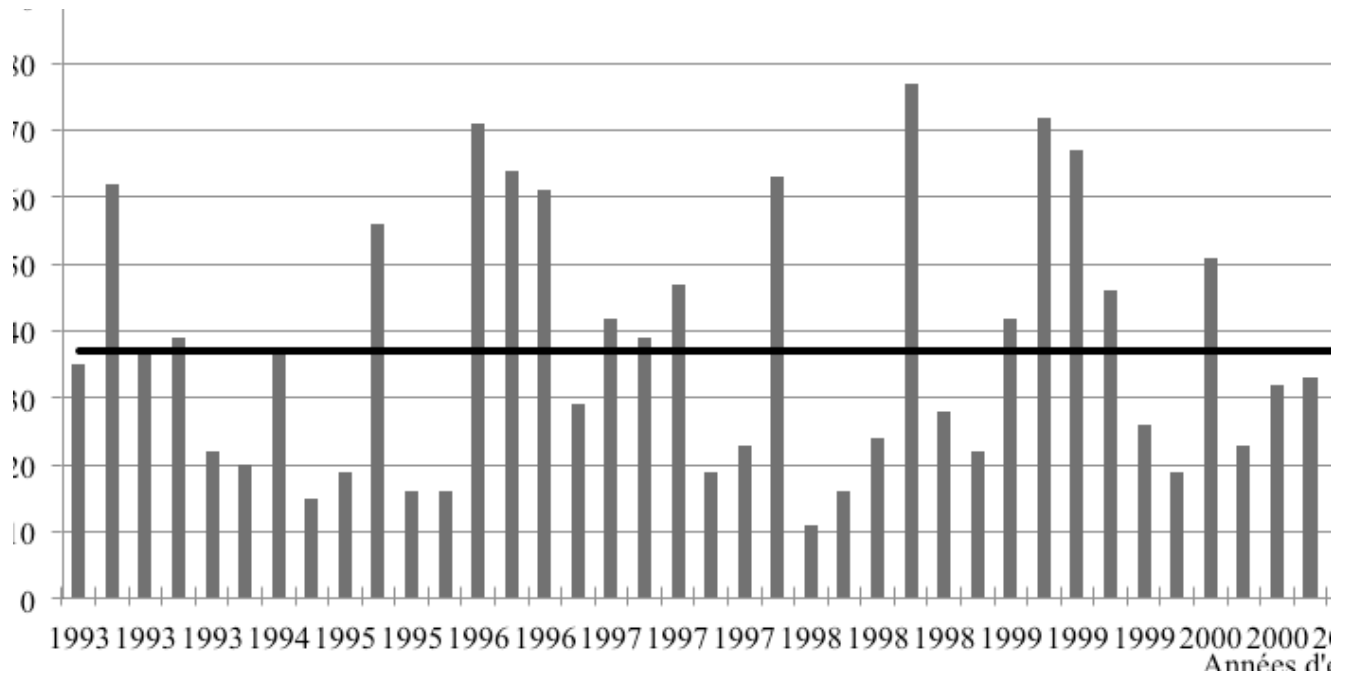


Figure A 1: Totaux pluviométriques des évènements hydrologiques (Catamaran)

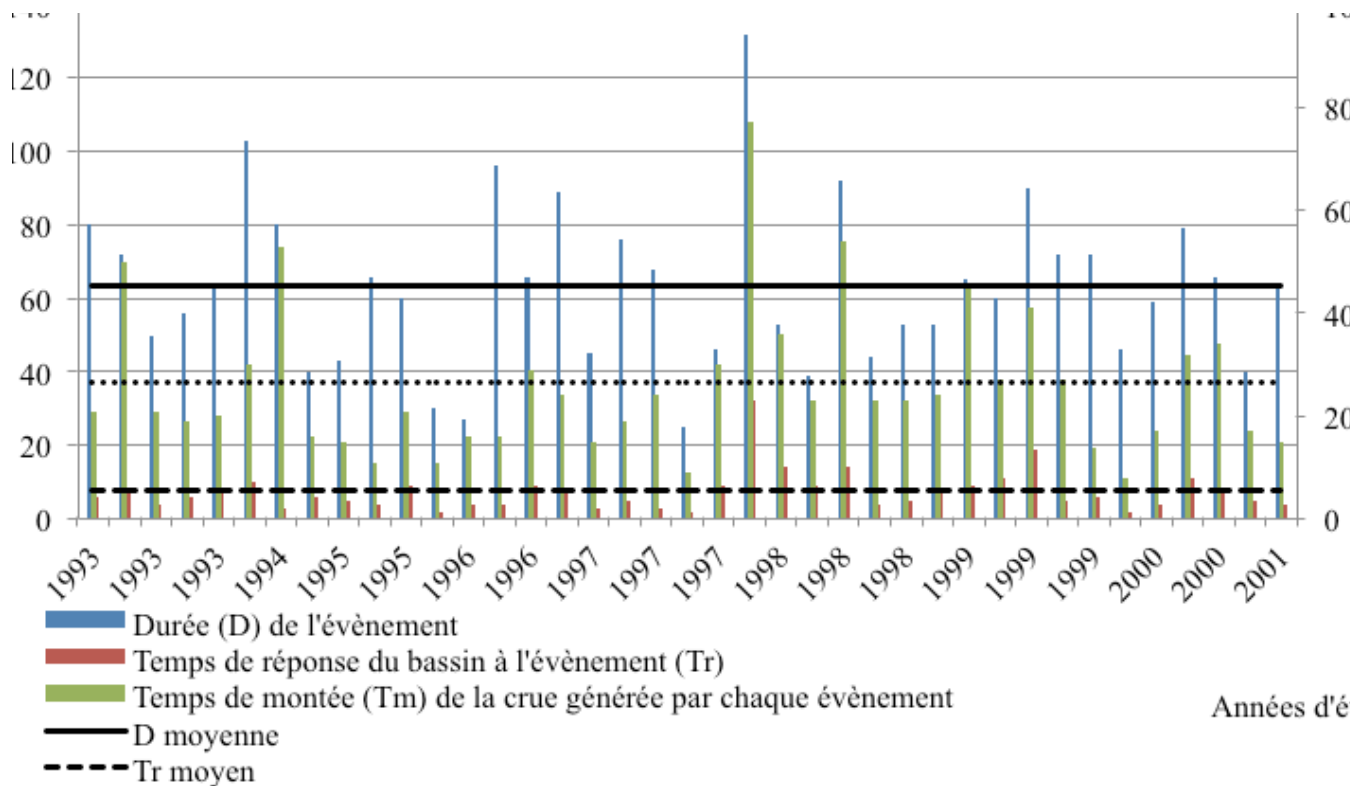


Figure A 2: Durée, temps de réponse du bassin et temps de montée de la crue pour chaque évènement pluvieux (Catamaran)

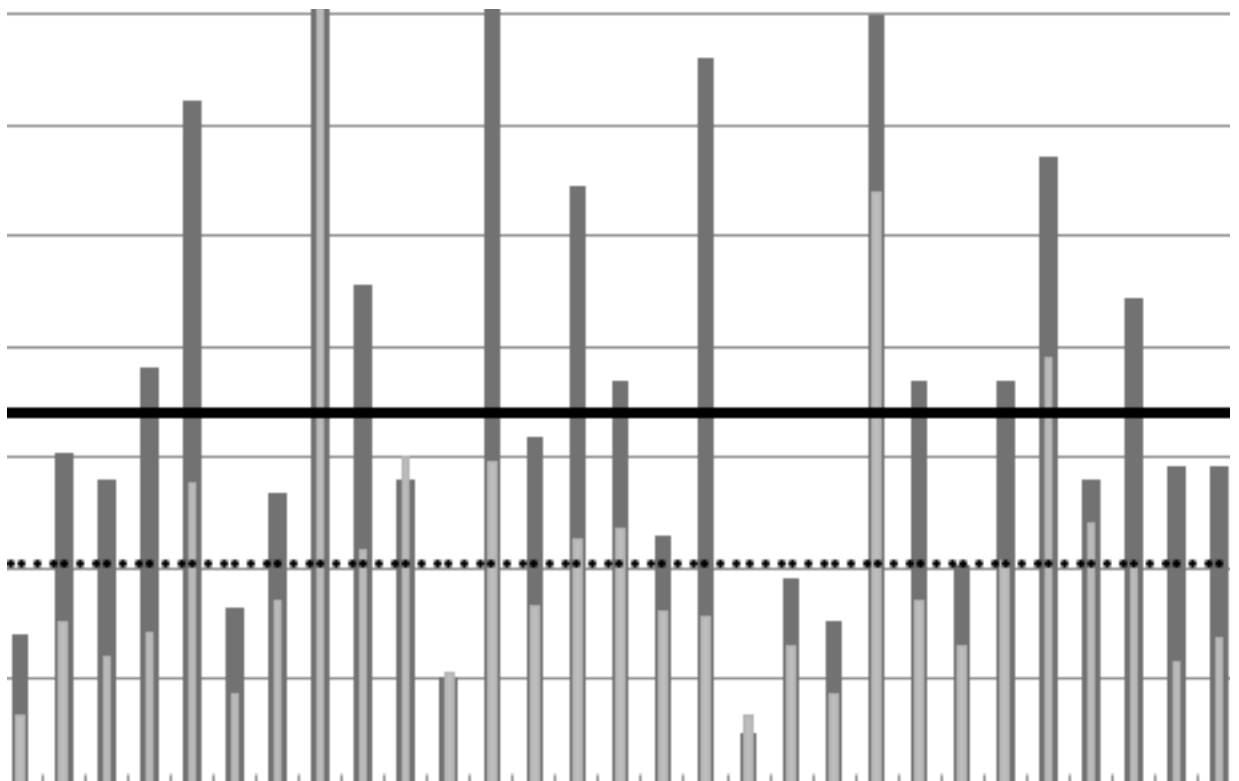


Figure A 3: Intensités de précipitation des événements hydrologiques (Catamaran)

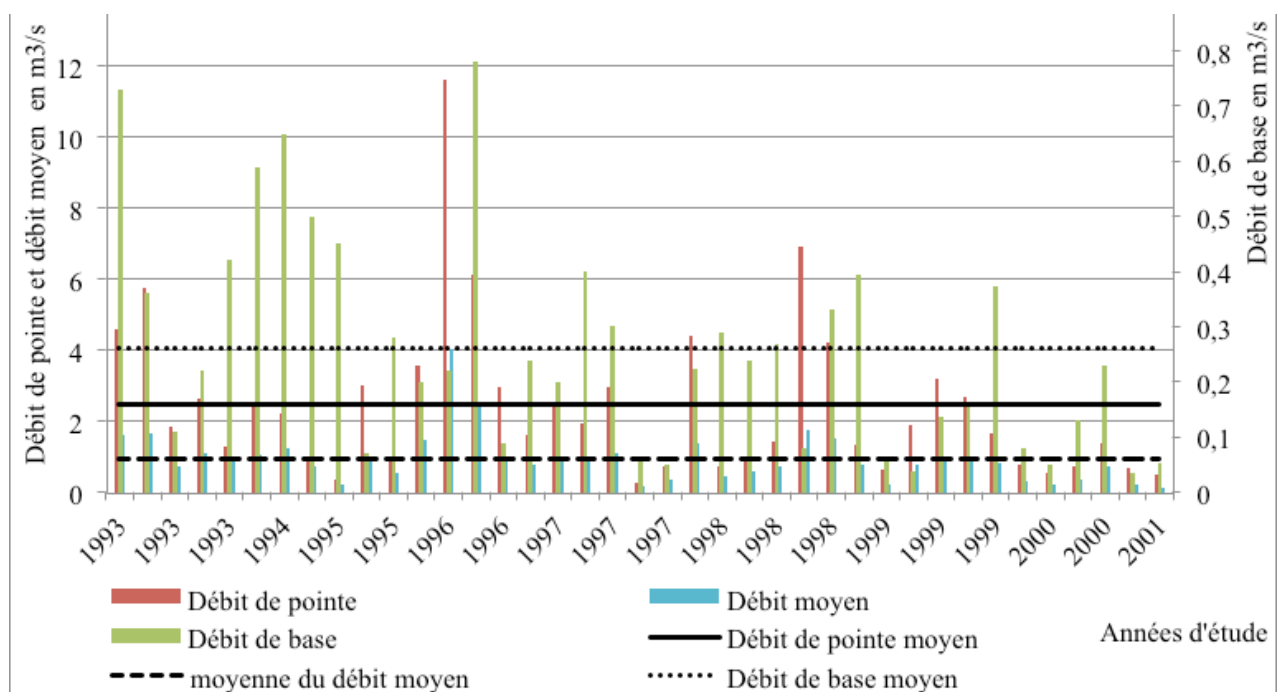


Figure A 4: Débit de base, débit de pointe, débit moyen de chaque hydrogrammes (Catamaran)

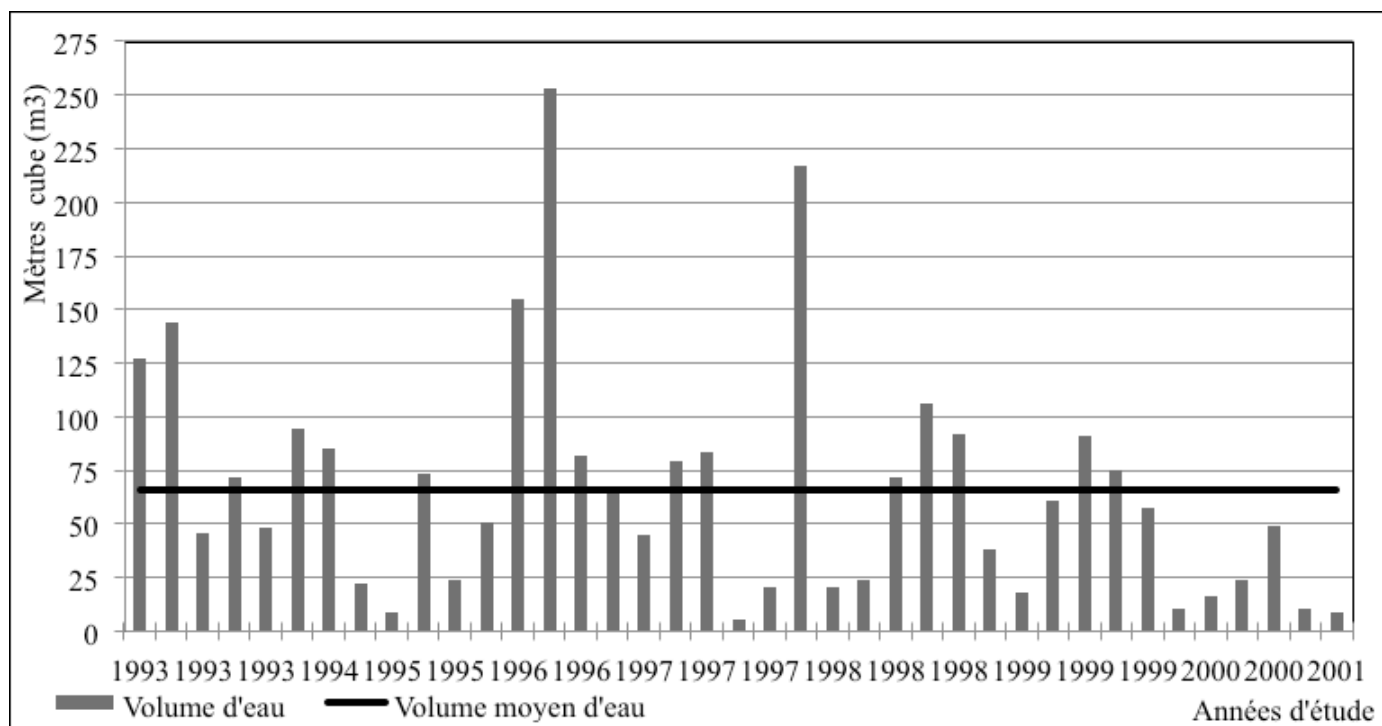


Figure A 5: Volume d'eau écoulé pour chaque évènement hydrologique (Catamaran)

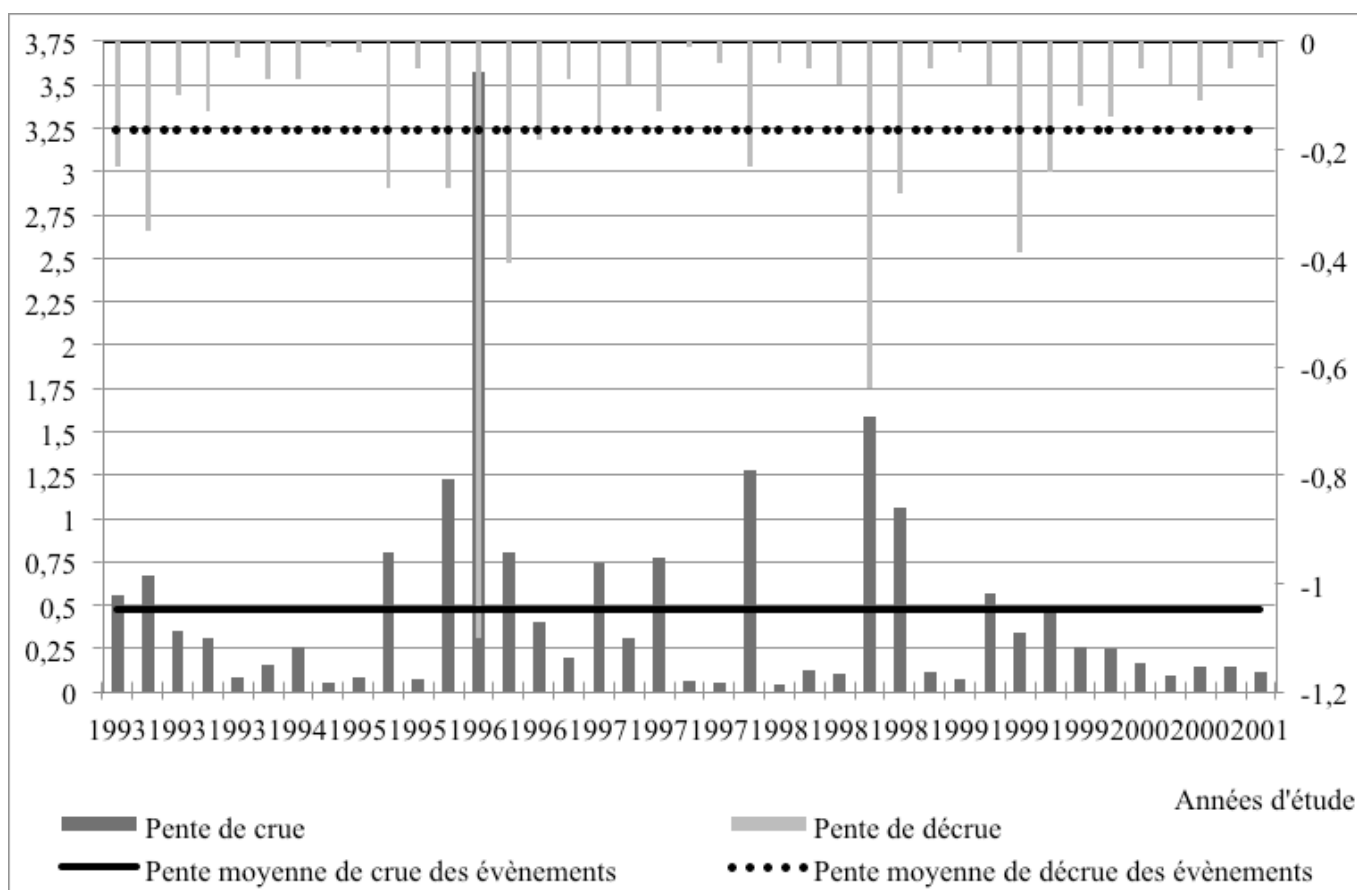


Figure A 6: Pentes de crue et décrue de chaque évènement hydrologique (Catamaran)

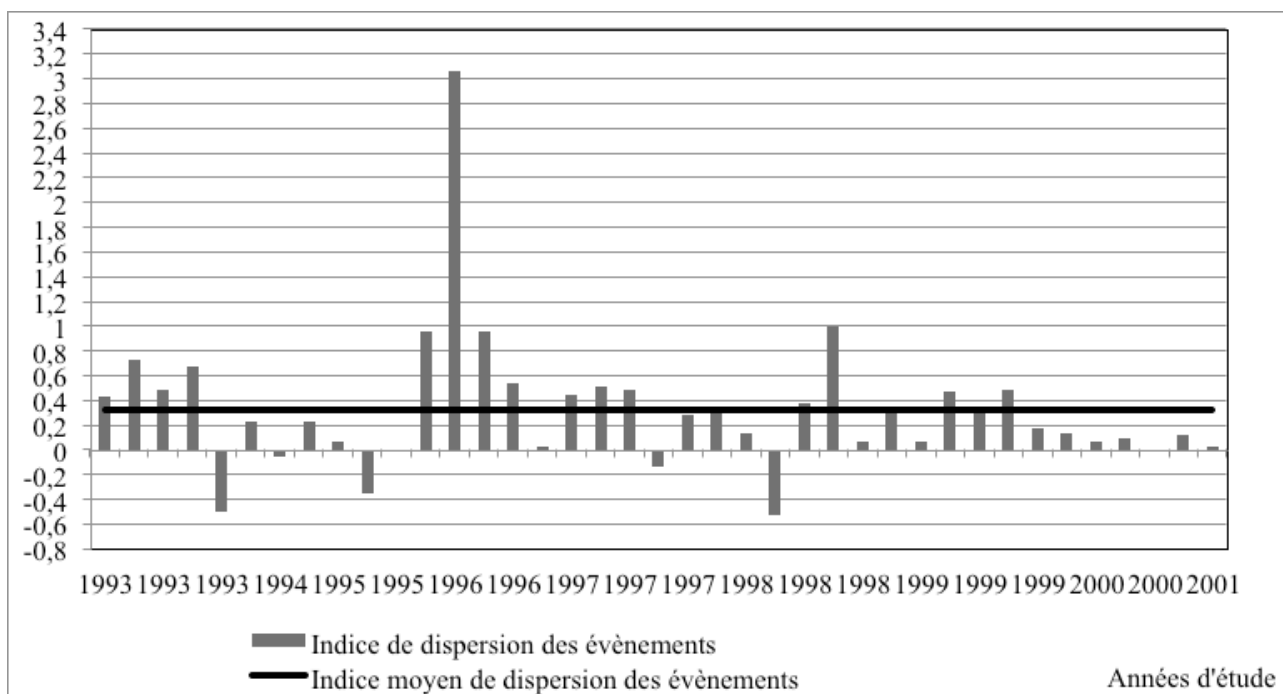


Figure A 7: Indices de dispersions des évènements hydrologiques (Catamaran)

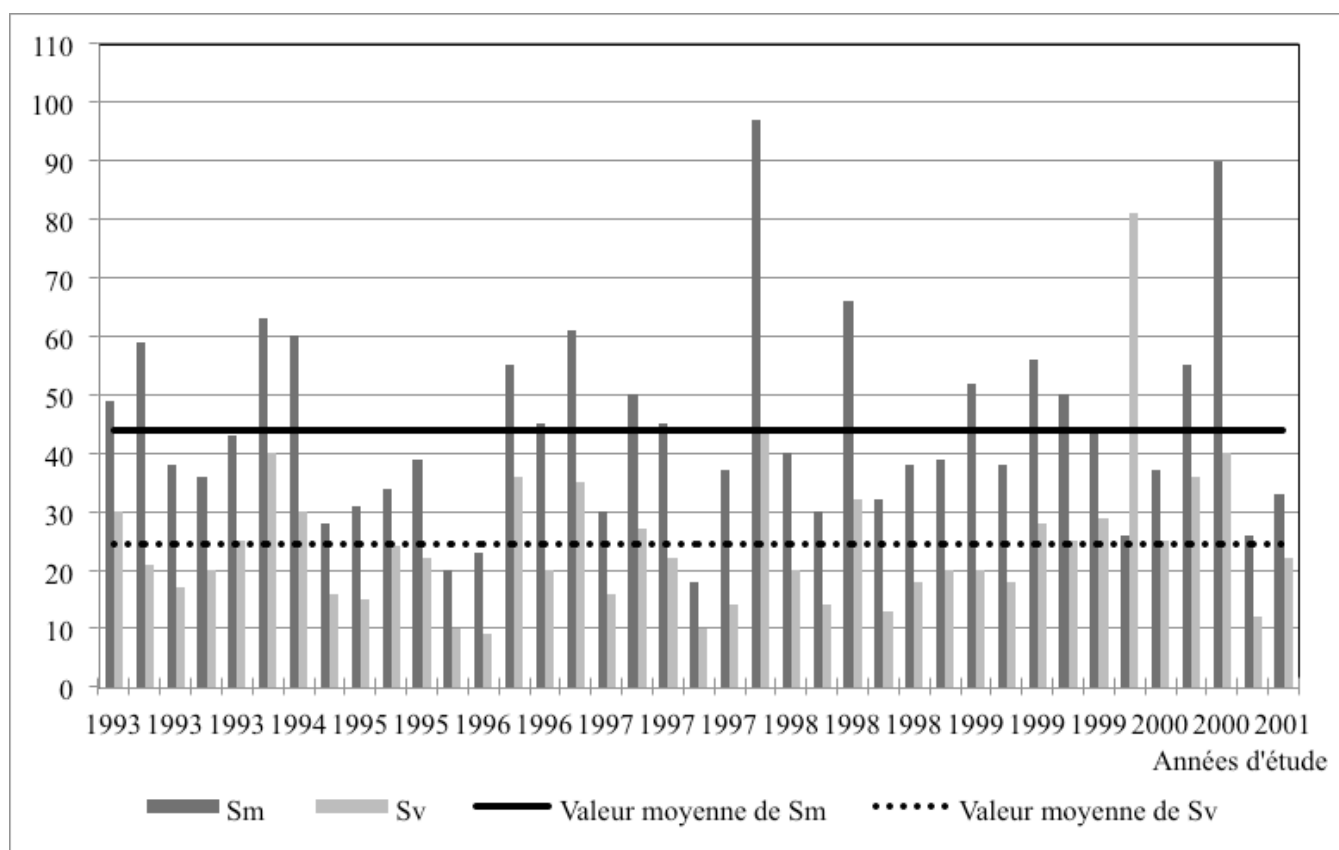


Figure A 8: Moyenne (Sm) et variance (Sv) des formes des hydrogrammes (Catamaran)

Annexe B: Caractérisation des évènements hydrologiques au sous-bassin versant du site 4 de la rivière La Grande

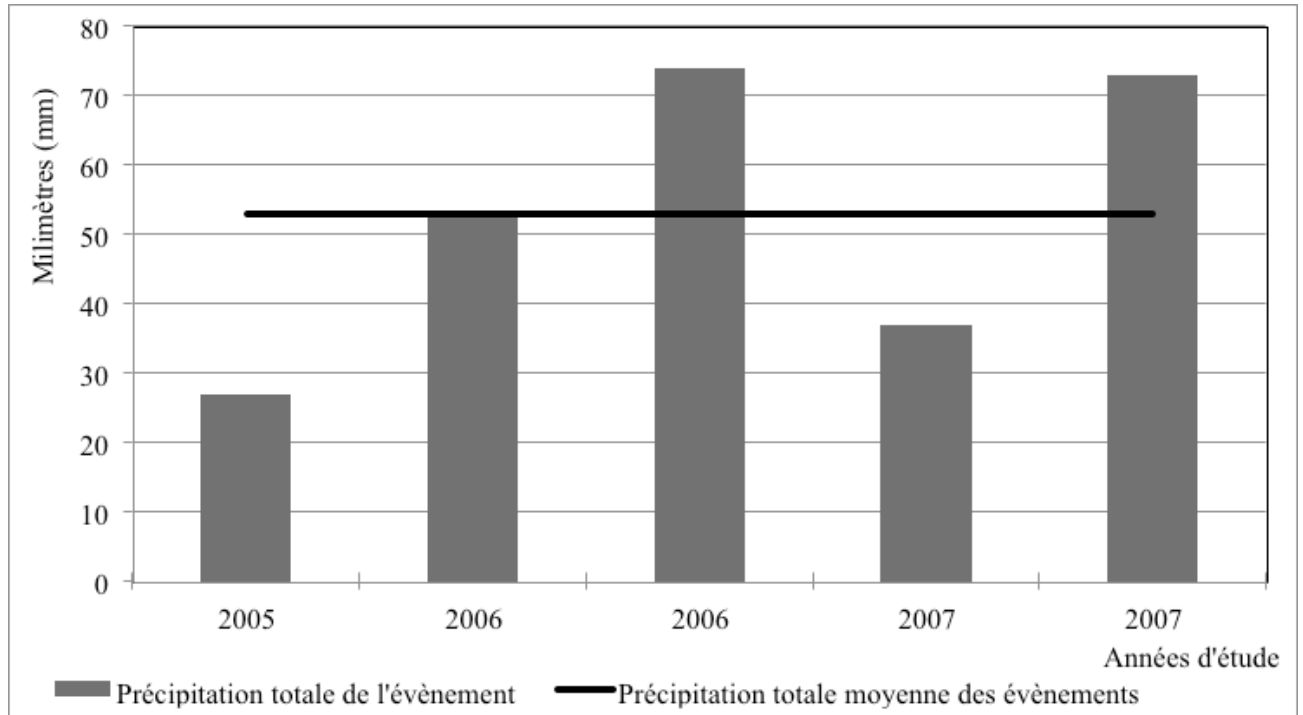


Figure B 1: Totaux pluviométriques des évènements hydrologiques (Site 4)

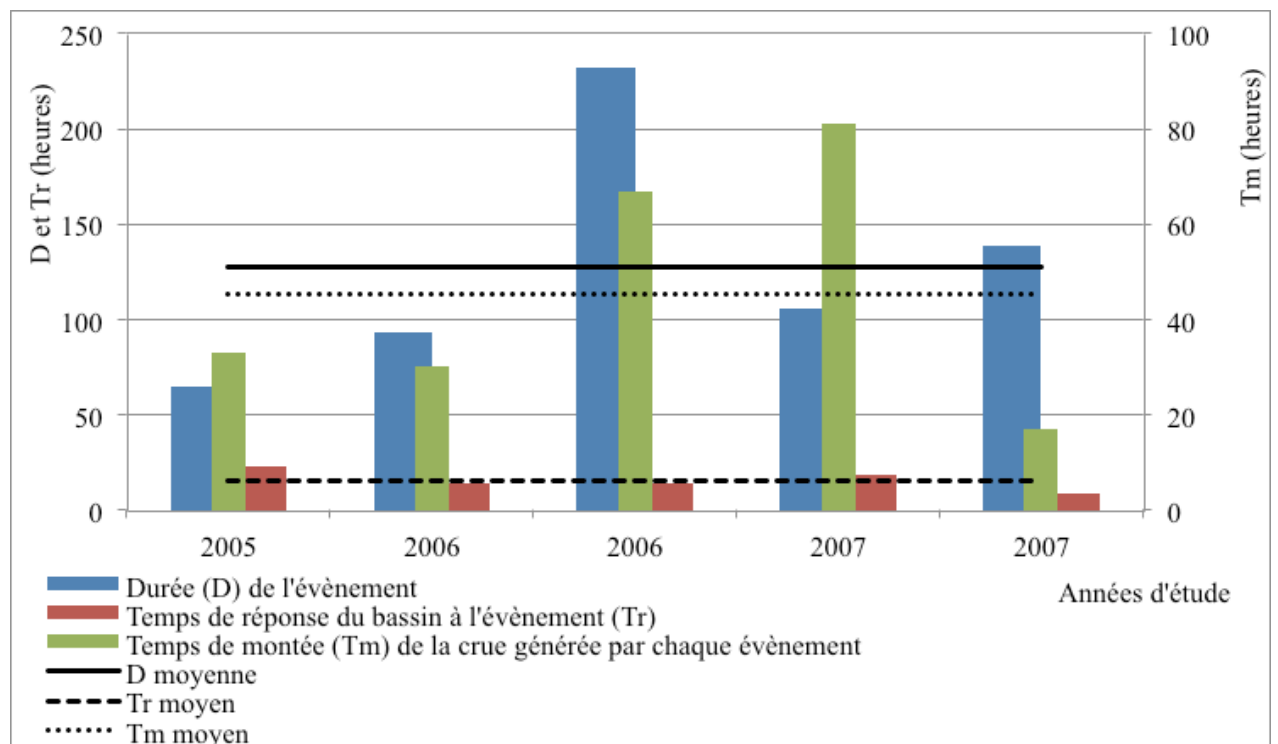


Figure B 2: Durée, temps de réponse du bassin et temps de montée de la crue pour chaque évènement pluvieux (Site 4)

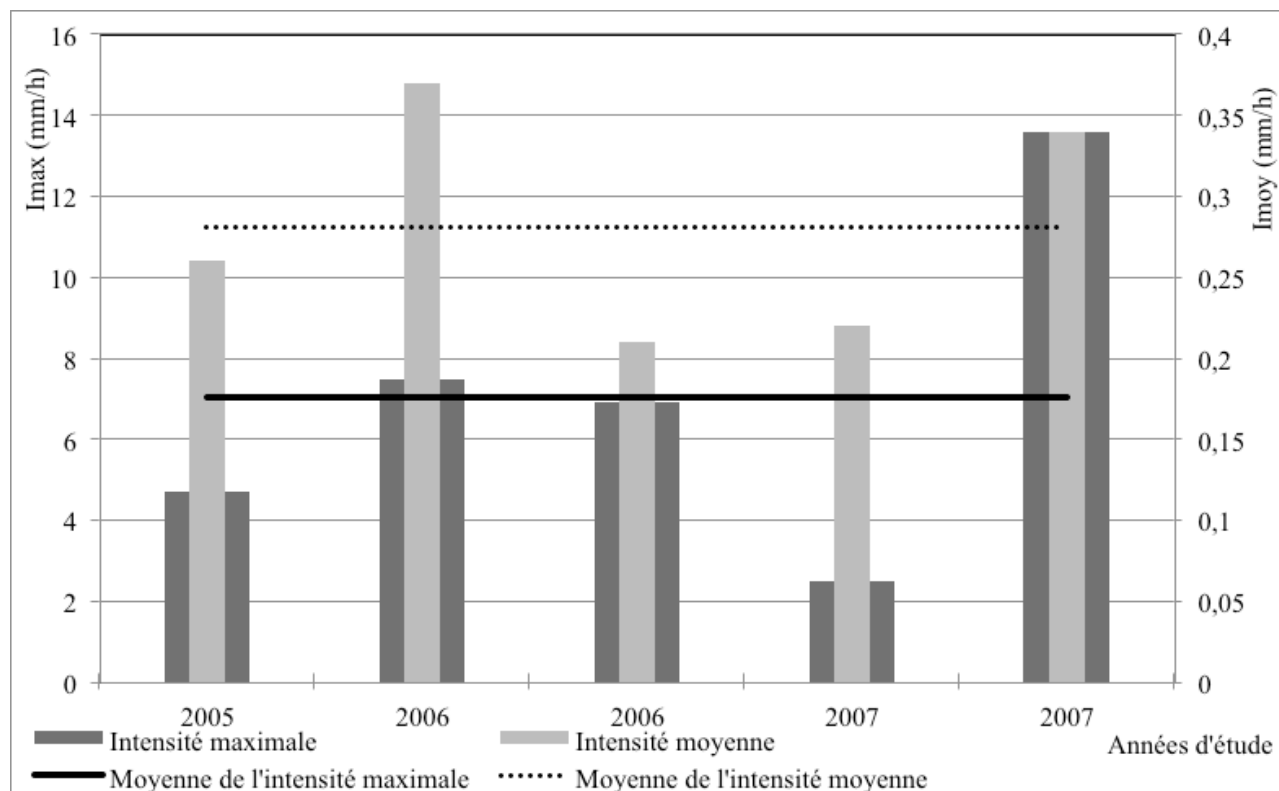


Figure B 3: Intensités de précipitation des événements hydrologiques (Site 4)

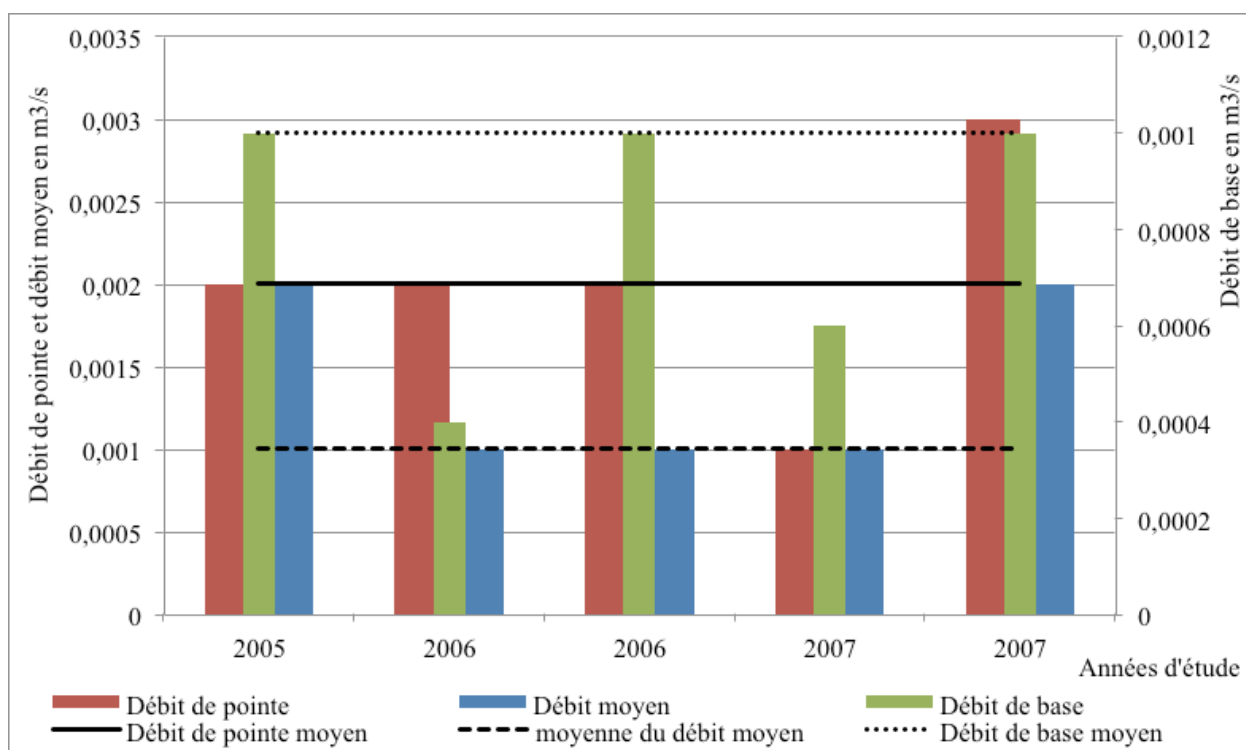


Figure B 4: Débit de base, débit de pointe, débit moyen de chaque hydrogrammes (Site 4)

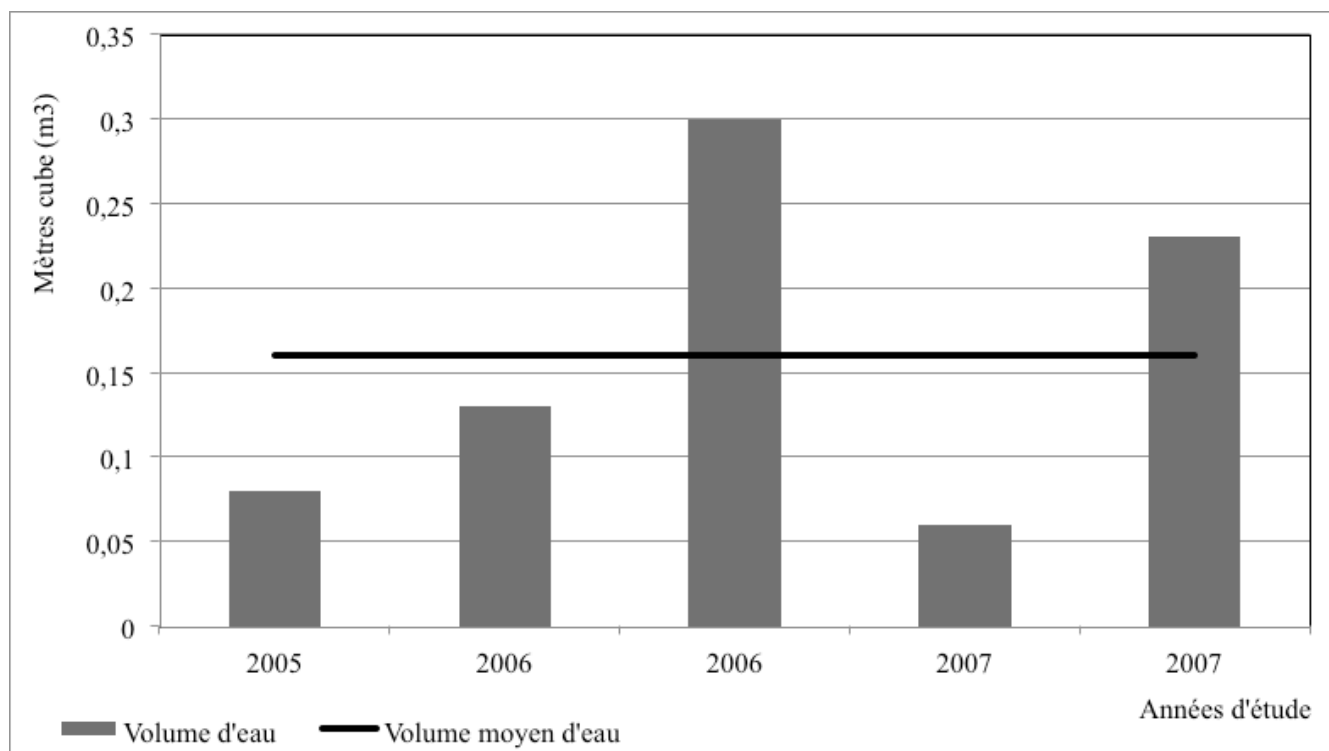


Figure B 5: Volume d'eau écoulé pour chaque évènement hydrologique (Site 4)

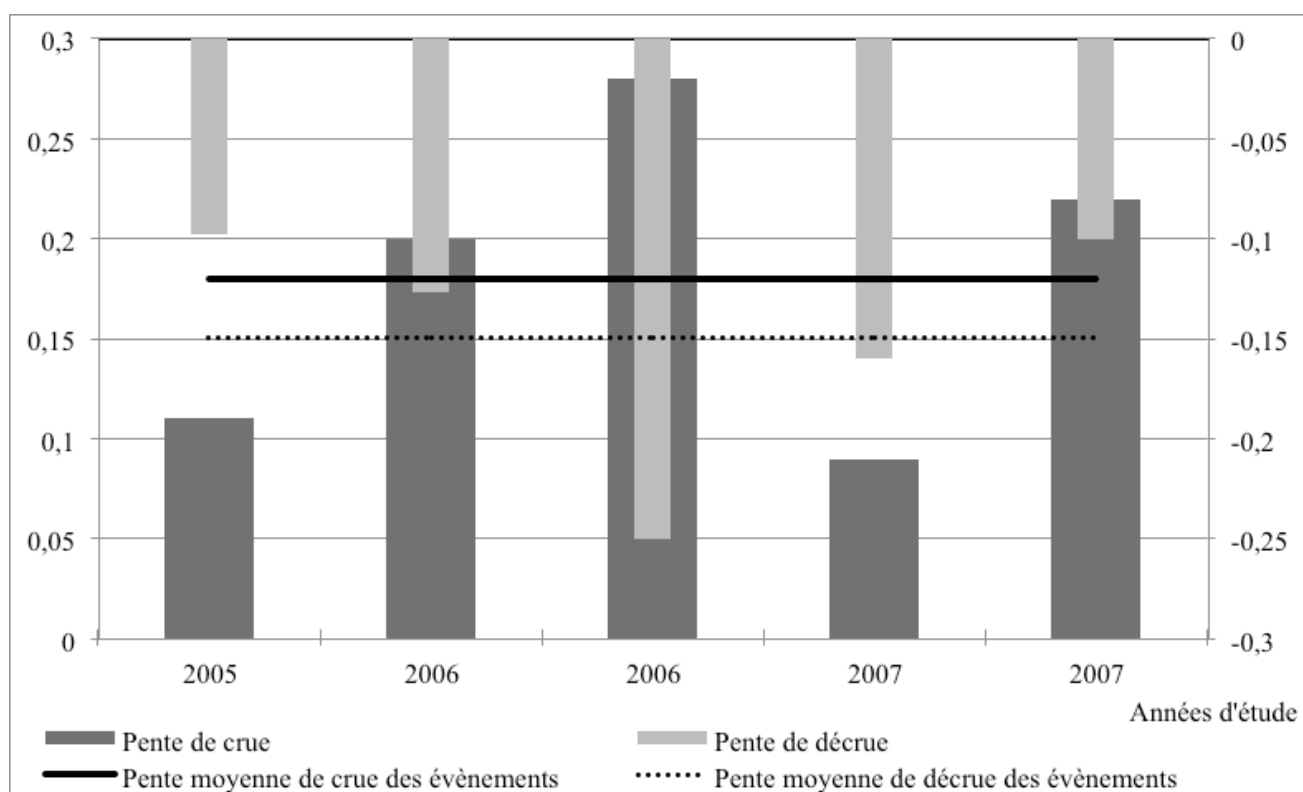


Figure B 6: Pentes de crue et décrue de chaque évènement hydrologique (Site 4)

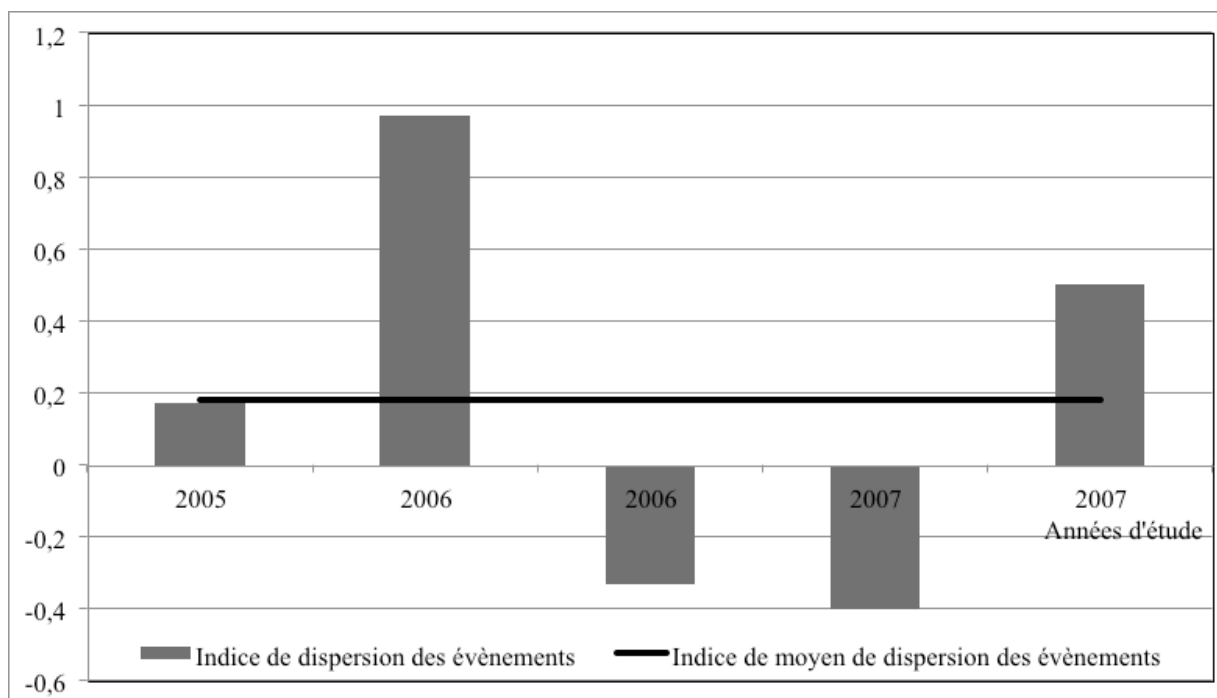


Figure B 7: Indice de dispersion des évènements hydrologiques (Site 4)

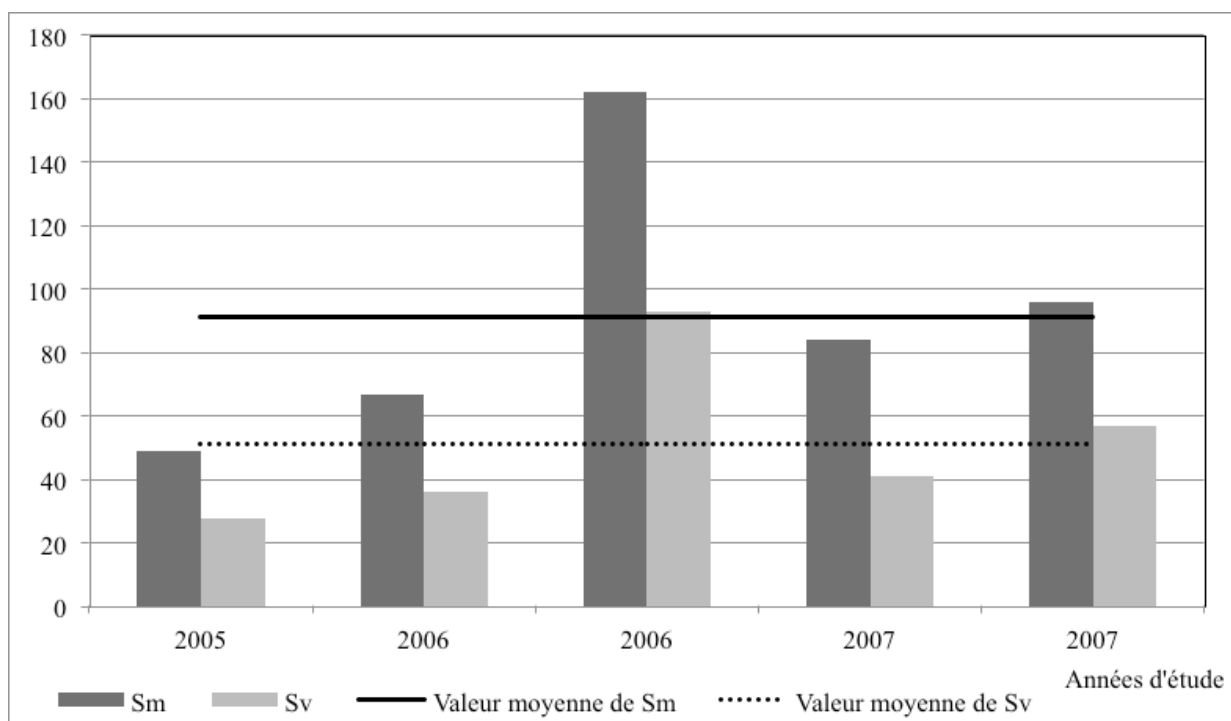


Figure B 8: Moyenne (Sm) et variance (Sv) des formes des hydrogrammes (Site 4)

Annexe C: Caractérisation des événements hydrologiques au sous-bassin versant du site 6 de la rivière La Grande

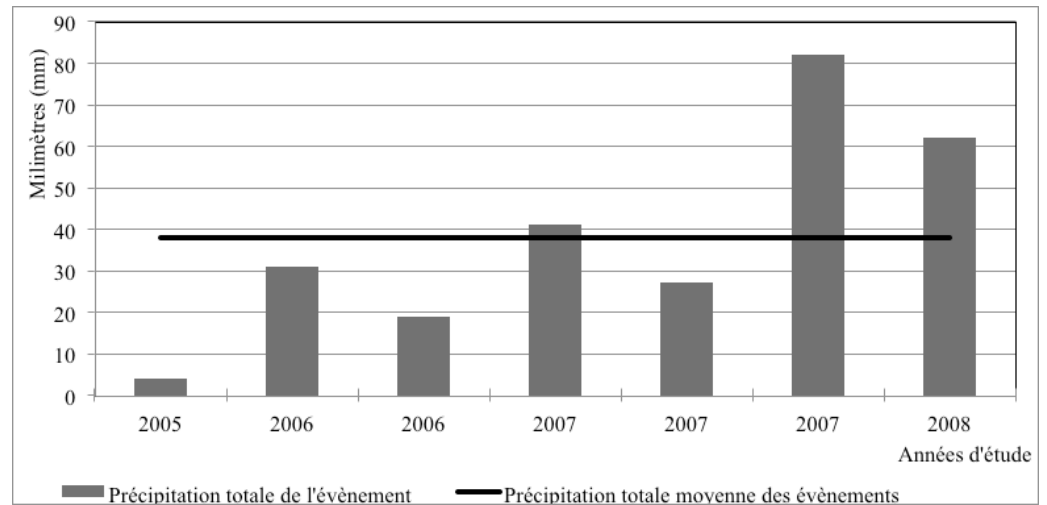


Figure C 1: Totaux pluviométriques des évènements hydrologiques (Site 6)

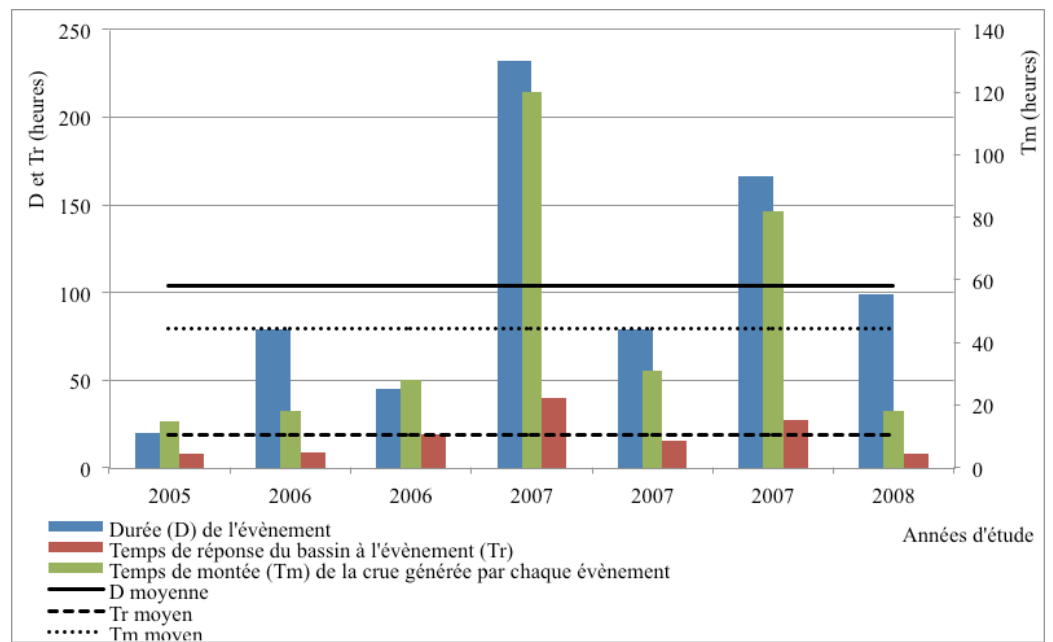


Figure C 2: Durée, temps de réponse du bassin et temps de montée de la crue pour chaque évènement pluvieux (Site 6)

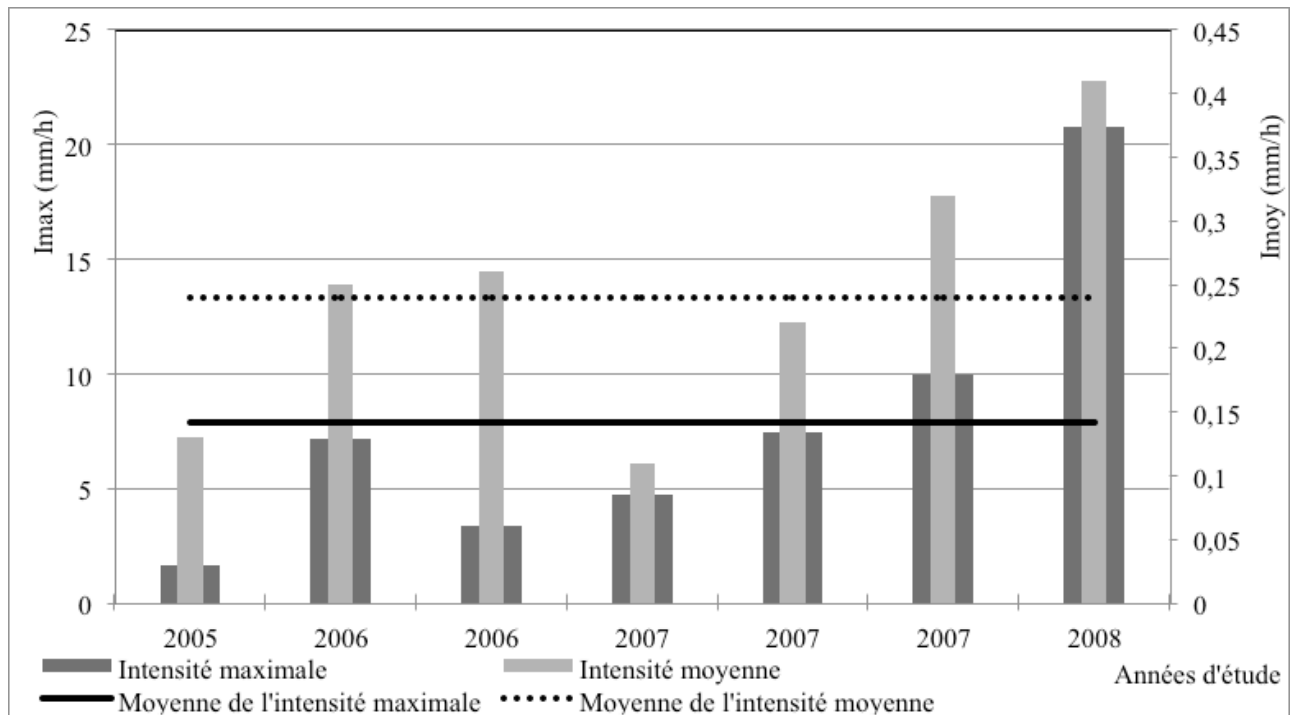


Figure C 3: Intensités de précipitation des événements hydrologiques (Site 6)

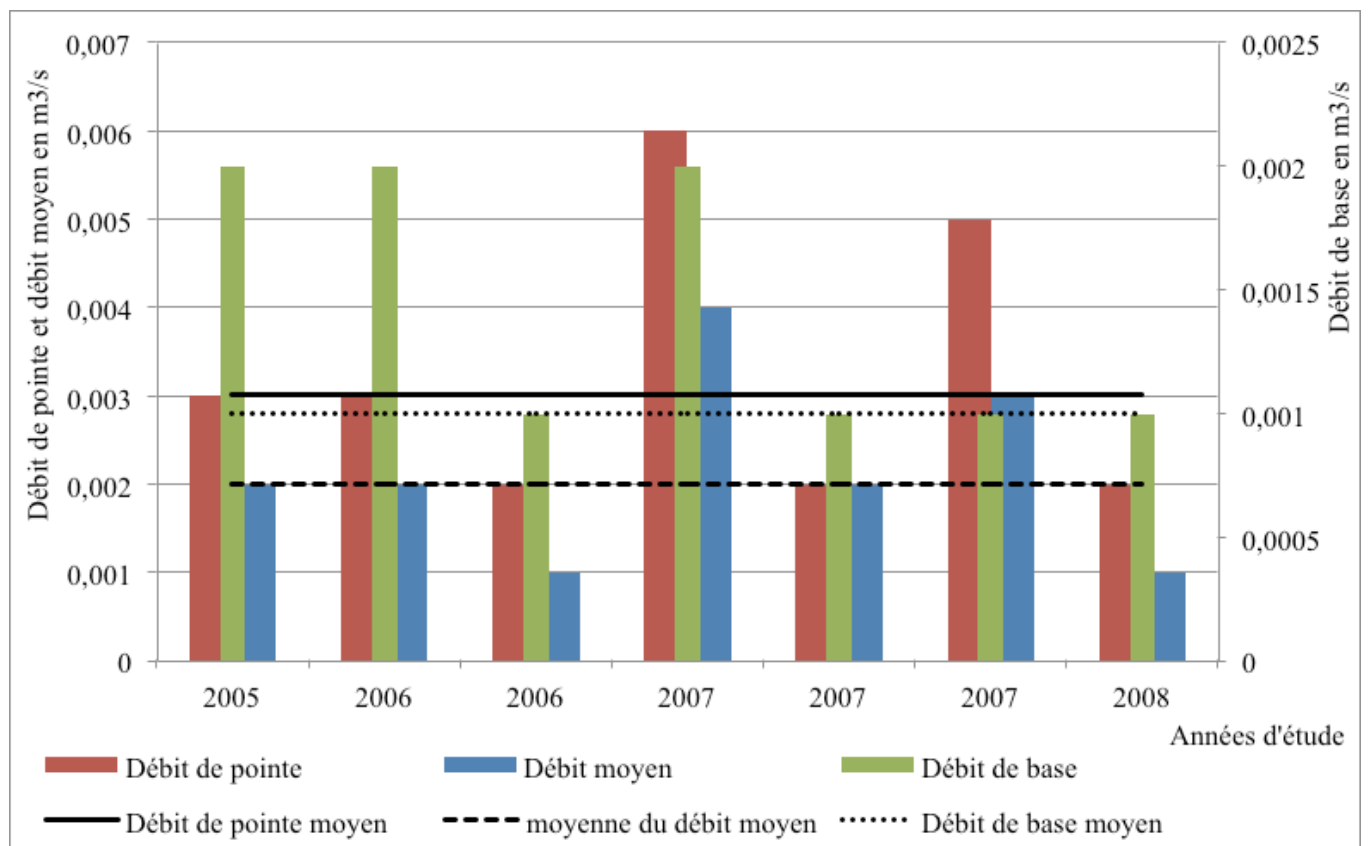


Figure C 4: Débit de base, débit de pointe, débit moyen de chaque hydrogrammes (Site 6)

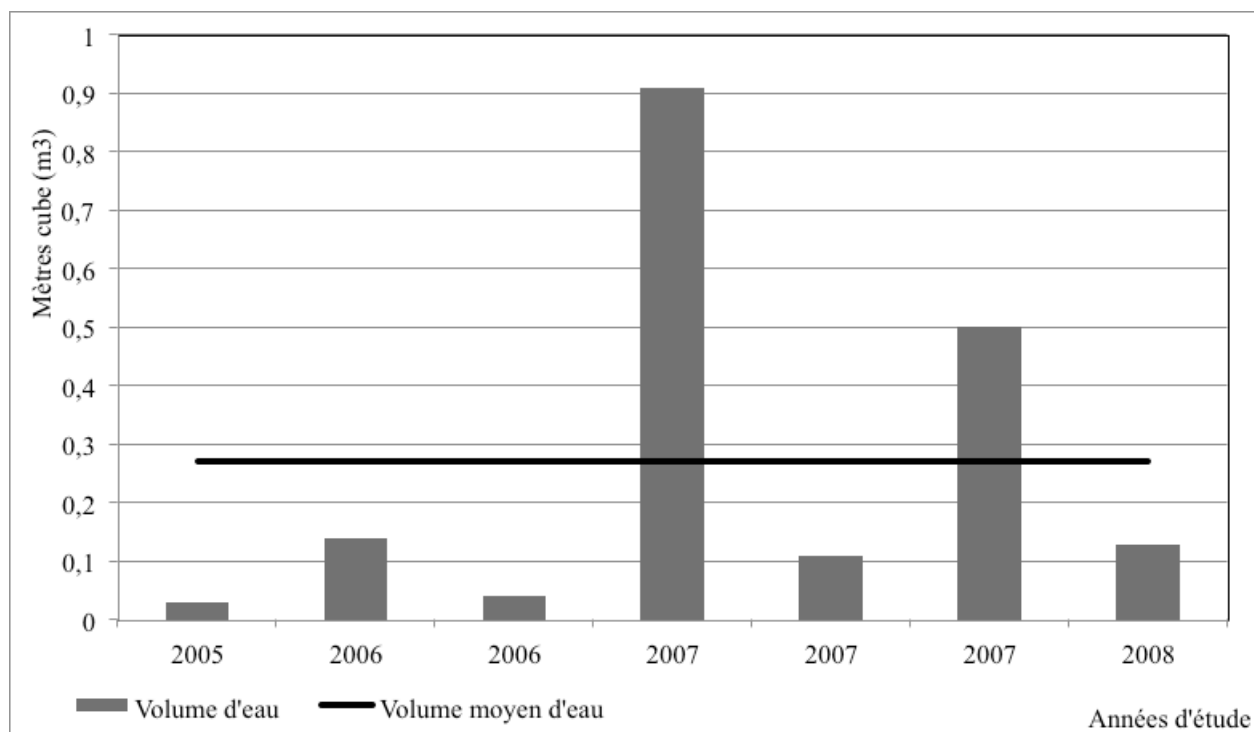


Figure C 5: Volume d'eau écoulé pour chaque évènement hydrologique (Site 6)

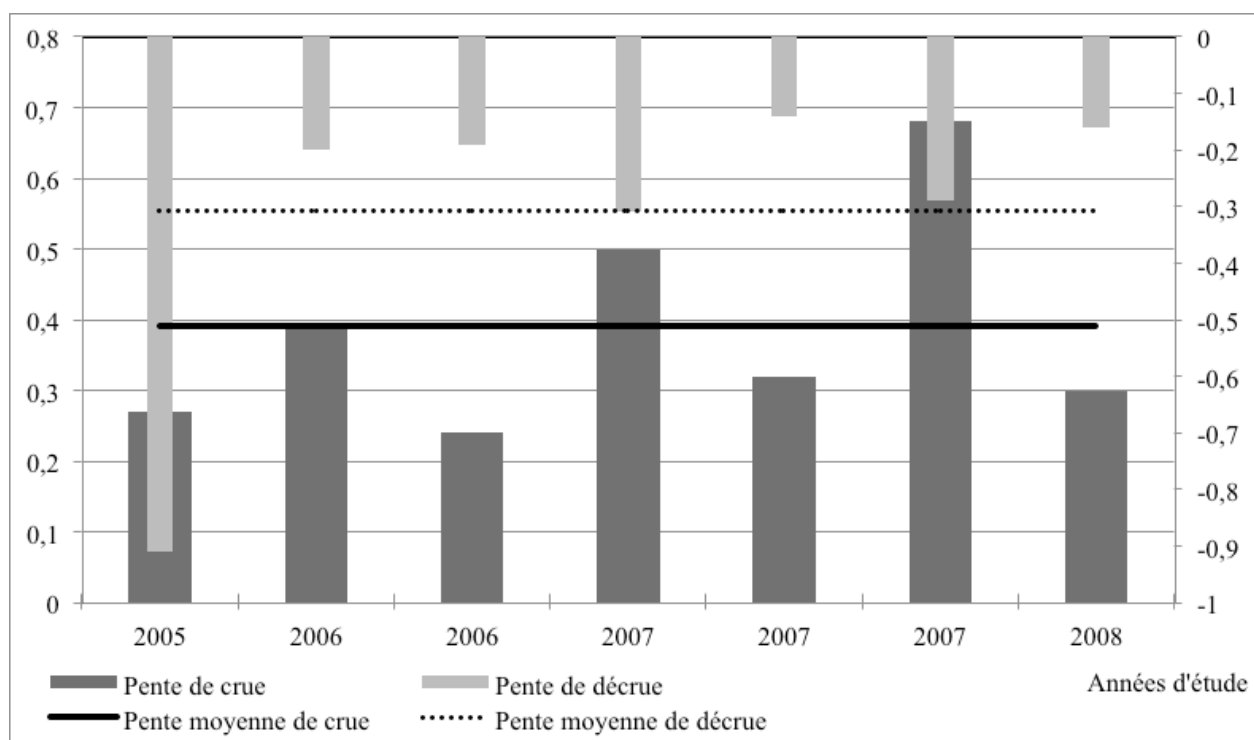


Figure C 6: Pentes de crue et décrue de chaque évènement hydrologique (Site 6)

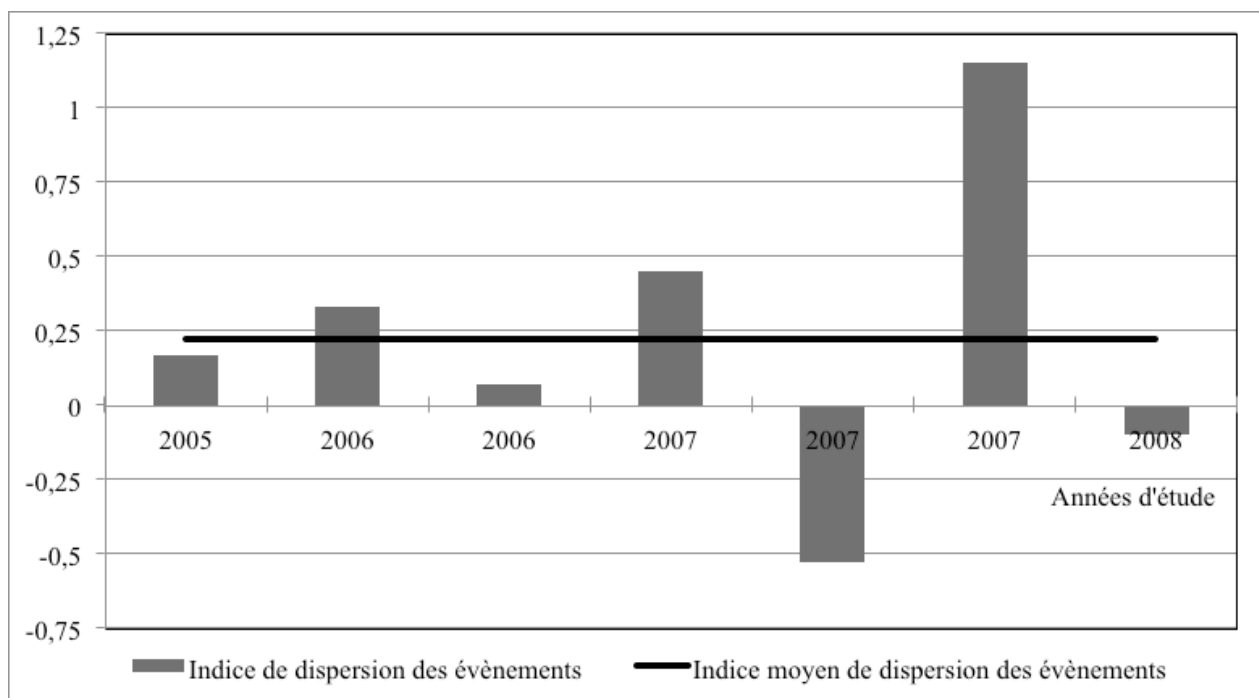


Figure C 7: Indice de dispersion des événements hydrologiques (Site 6)

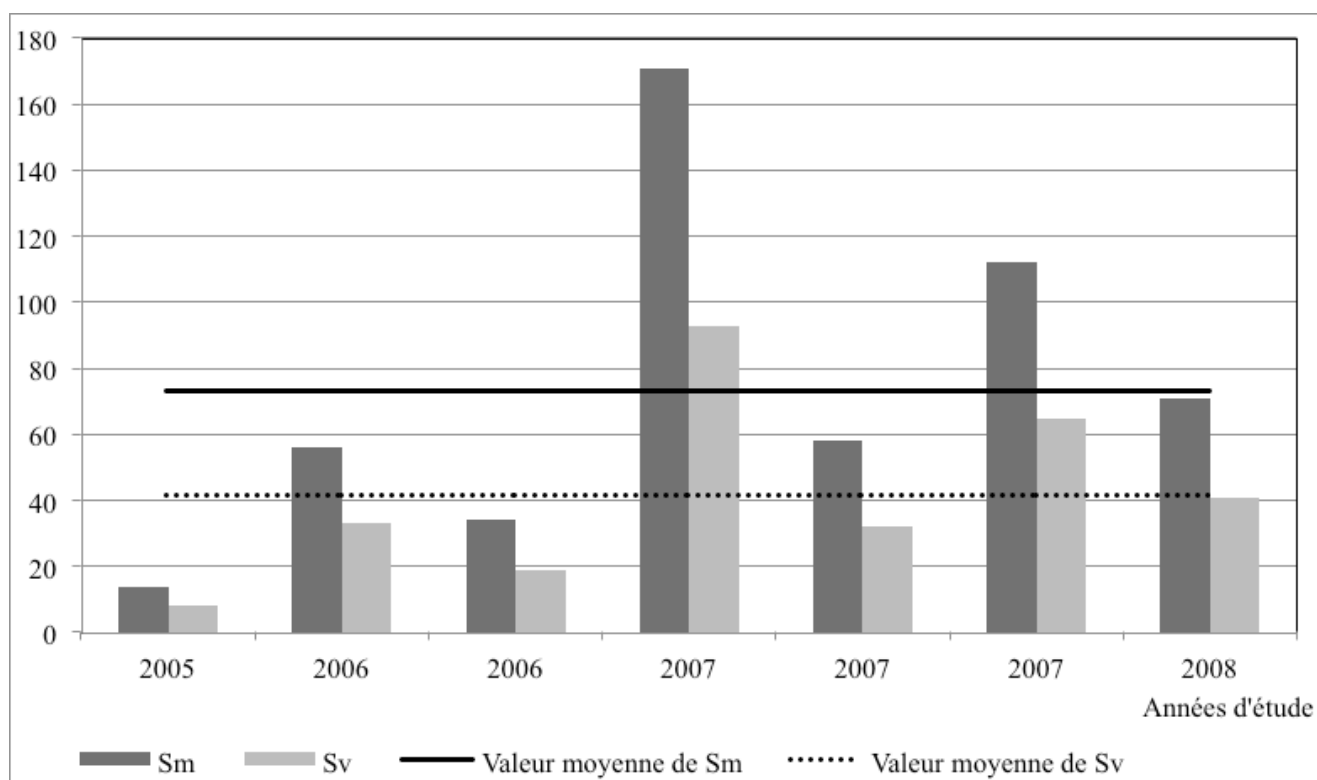


Figure C 8: Moyenne (Sm) et variance (Sv) des formes des hydrogrammes (Site 6)

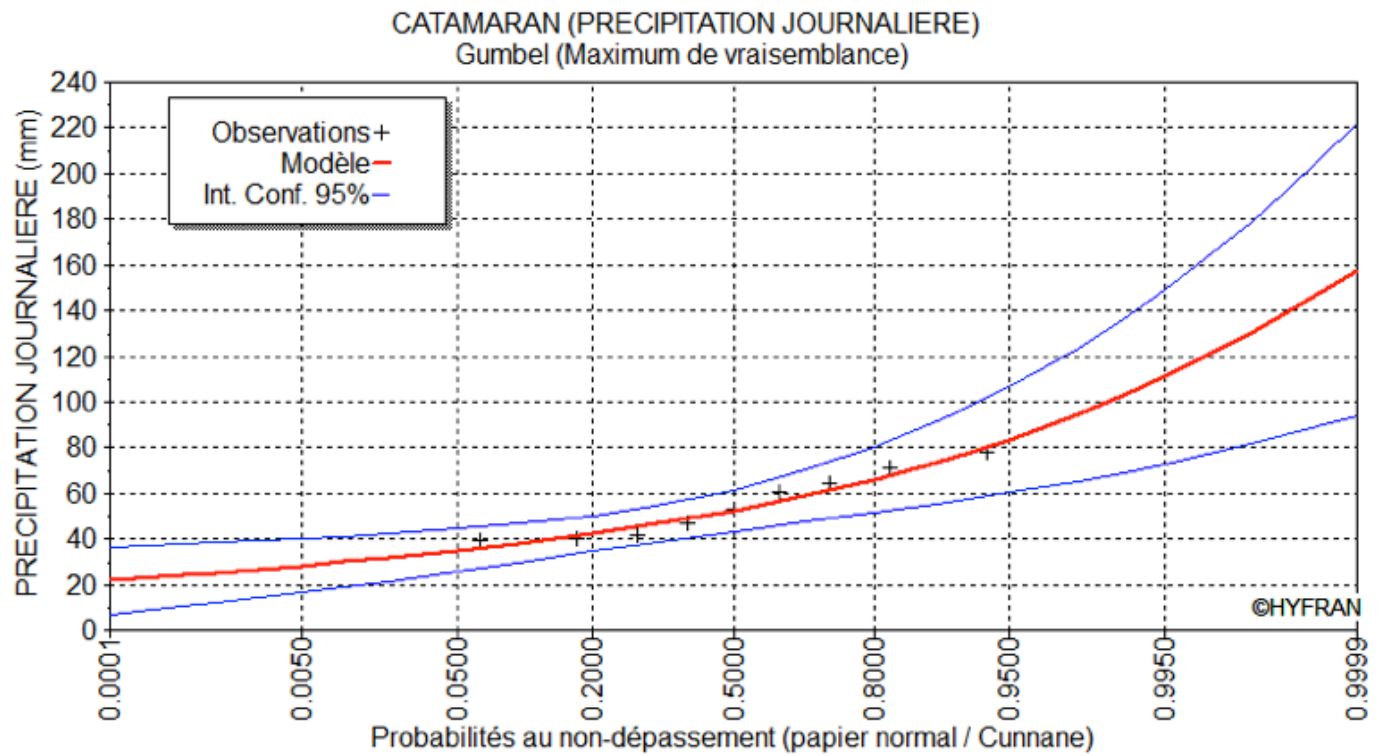


Figure D 1: Ajustement de Gumbel (Maximum de vraisemblance) P_{j10}

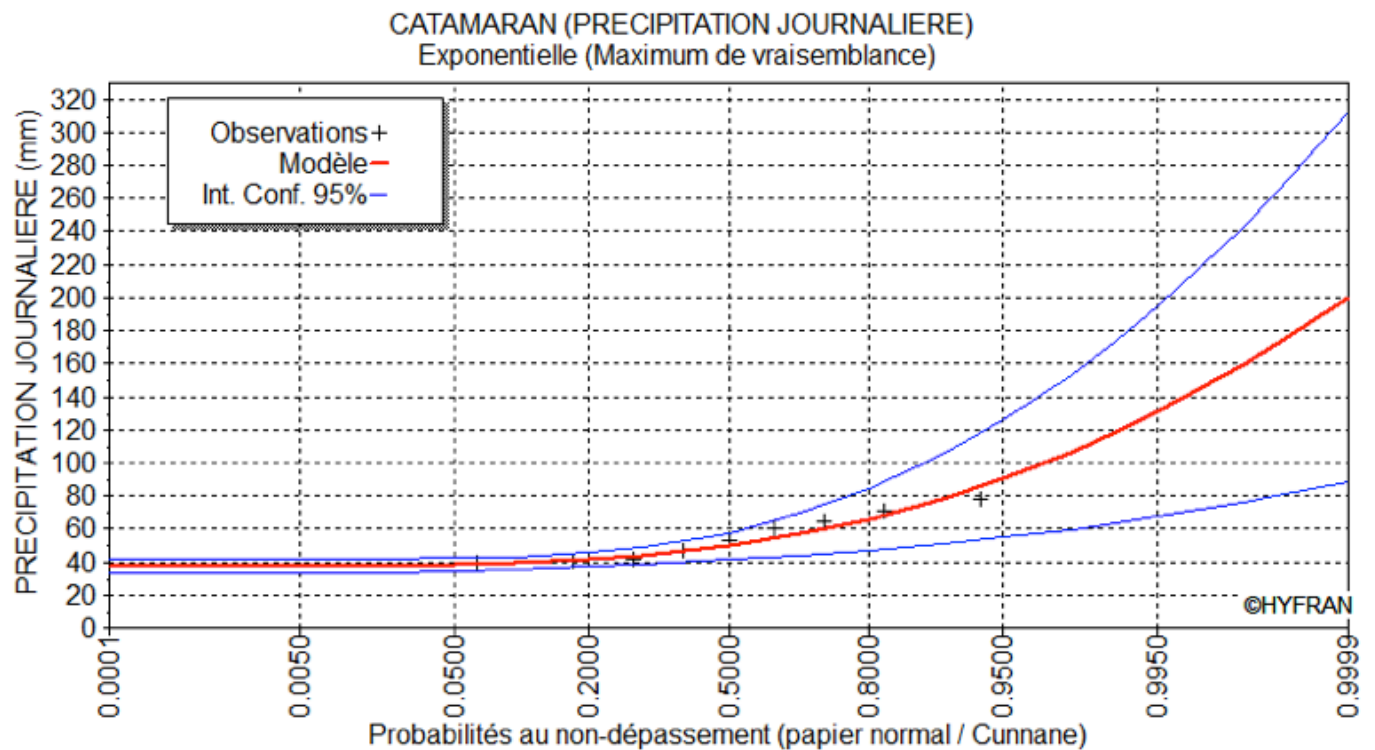


Figure D 2: Ajustement par la loi Exponentielle (Maximum de vraisemblance) P_{j10}

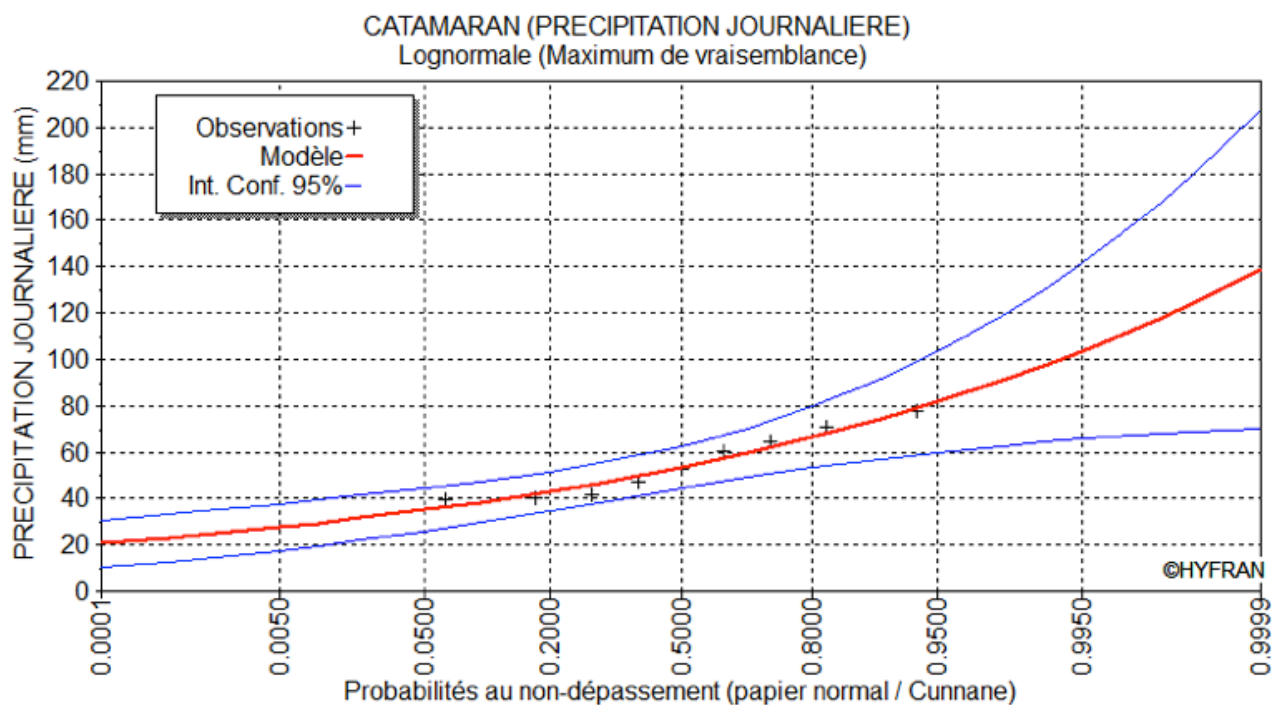


Figure D 3: Ajustement Lognormale (Maximum de vraisemblance) P_{j10}

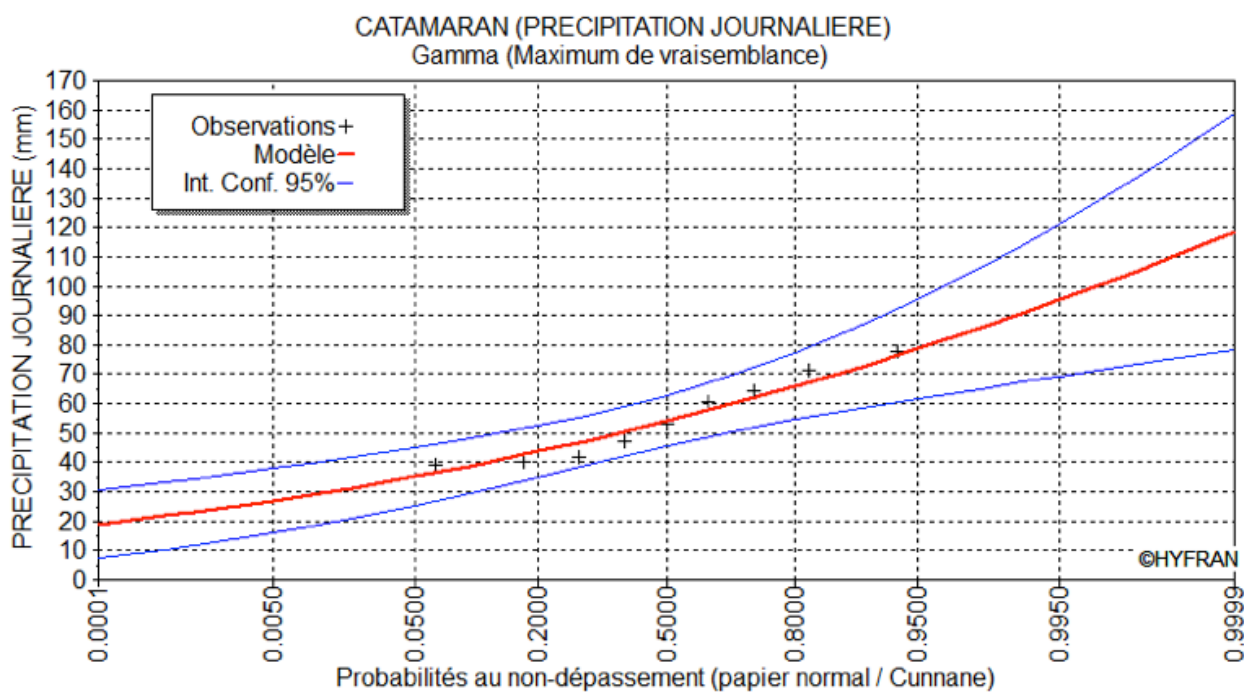


Figure D 4: Ajustement Gamma (Maximum de vraisemblance) P_{j10}

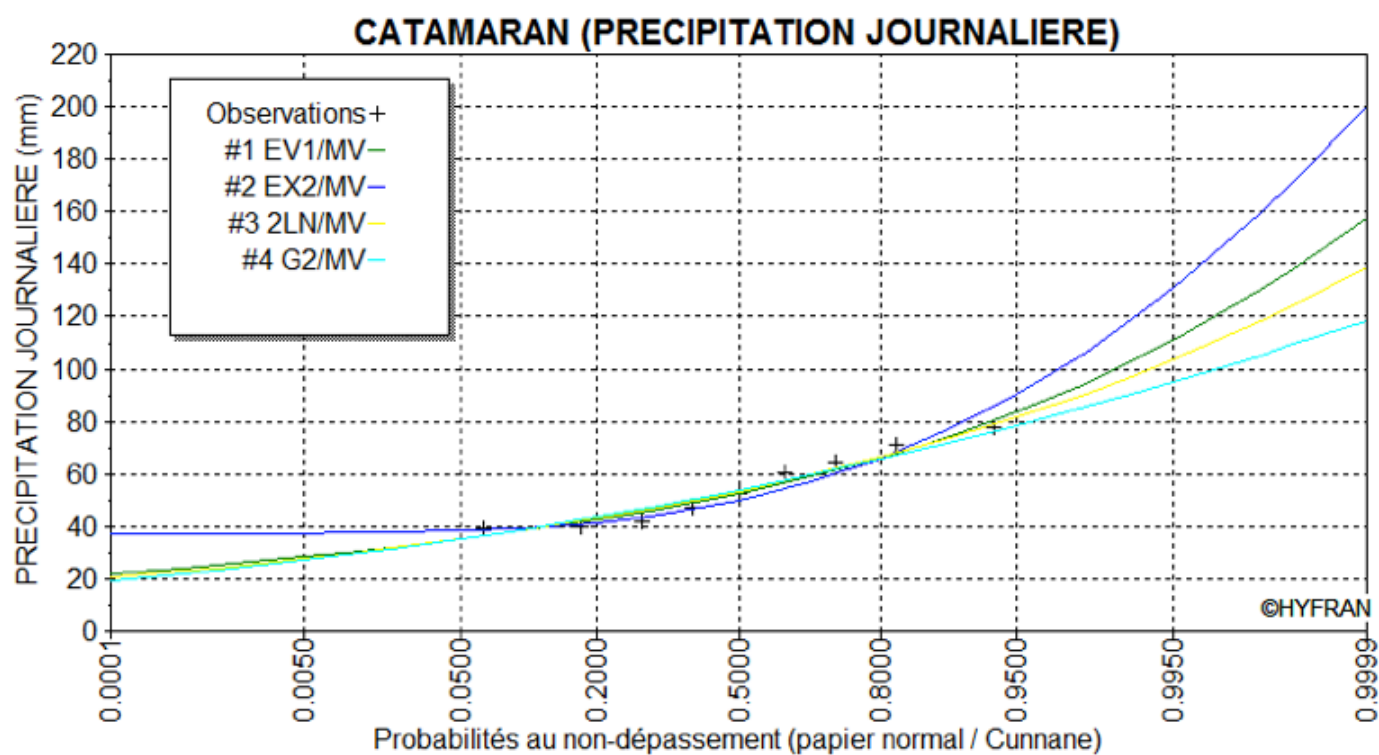


Figure D 5: Comparaison des lois par critères P_{j10}

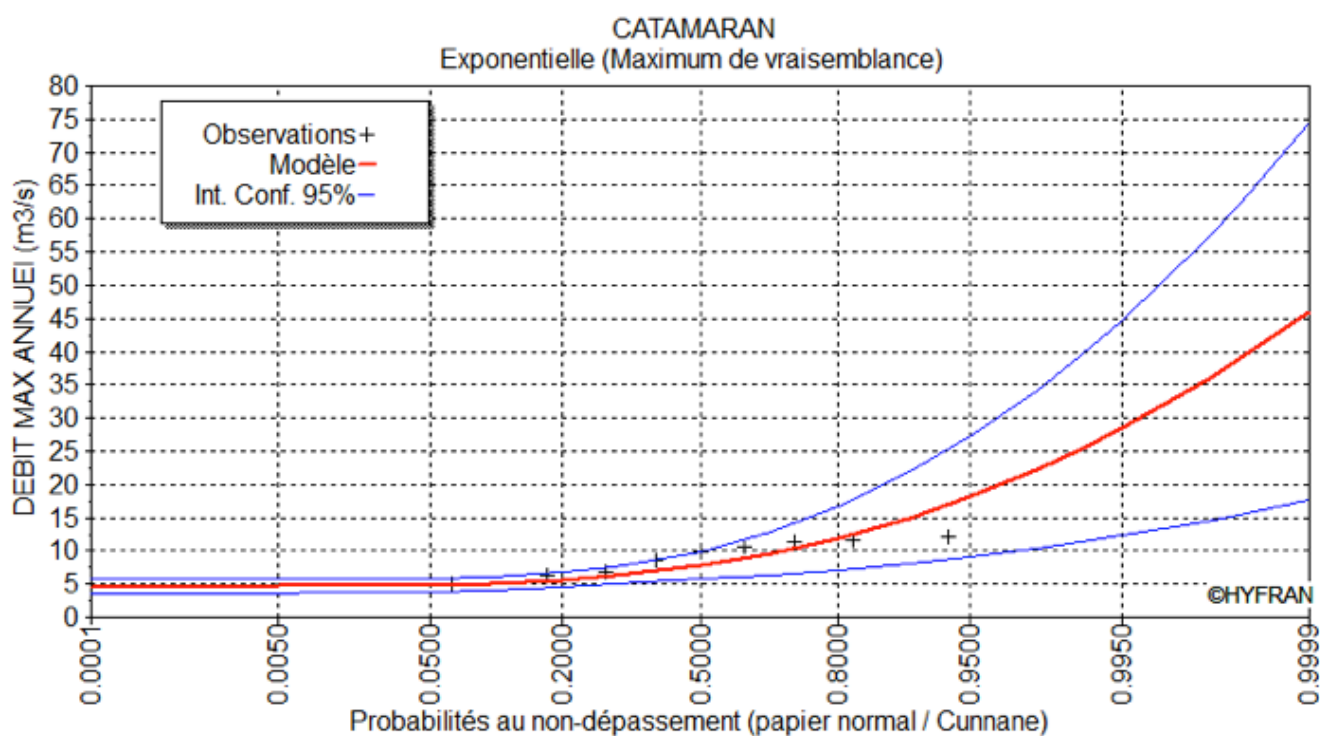


Figure D 6: Ajustement par la loi Exponentielle (Maximum de vraisemblance) Q_{j10}

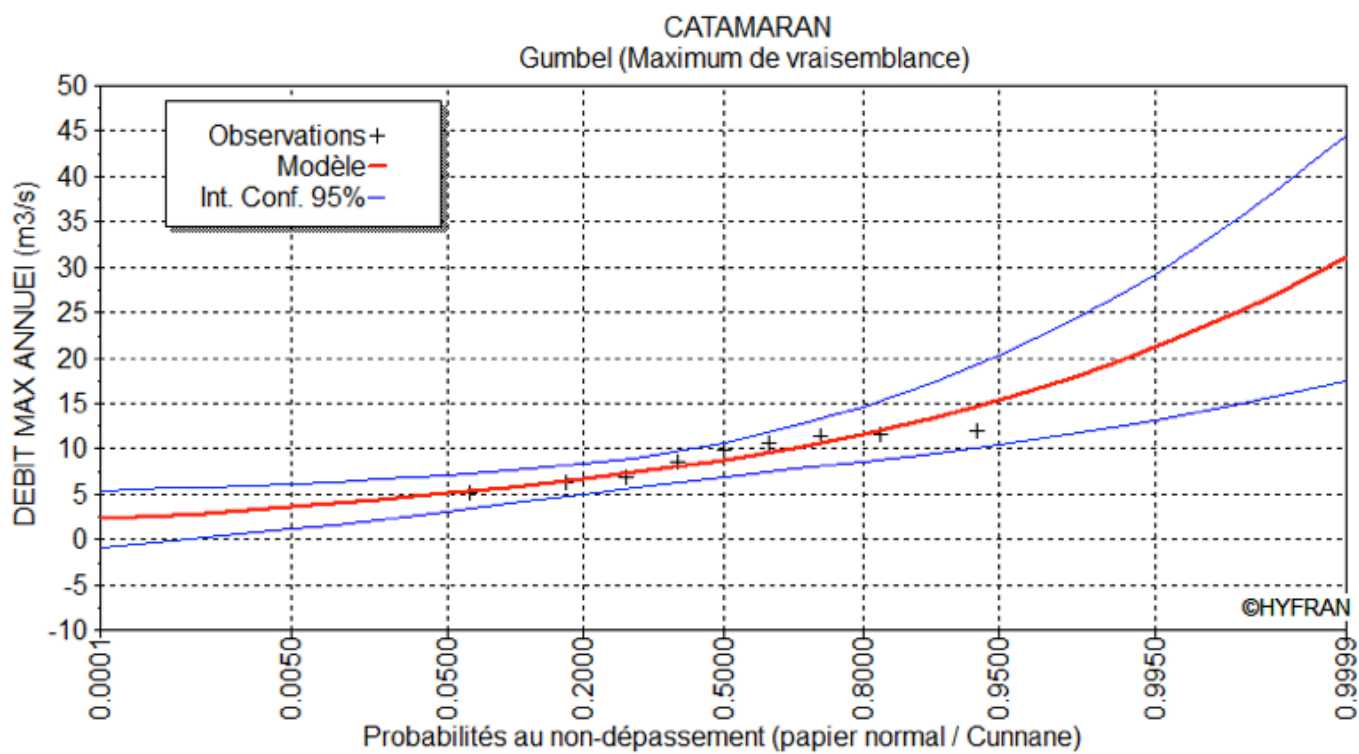


Figure D 7: Ajustement par la loi de Gumbel (Maximum de vraisemblance) Q_{110}

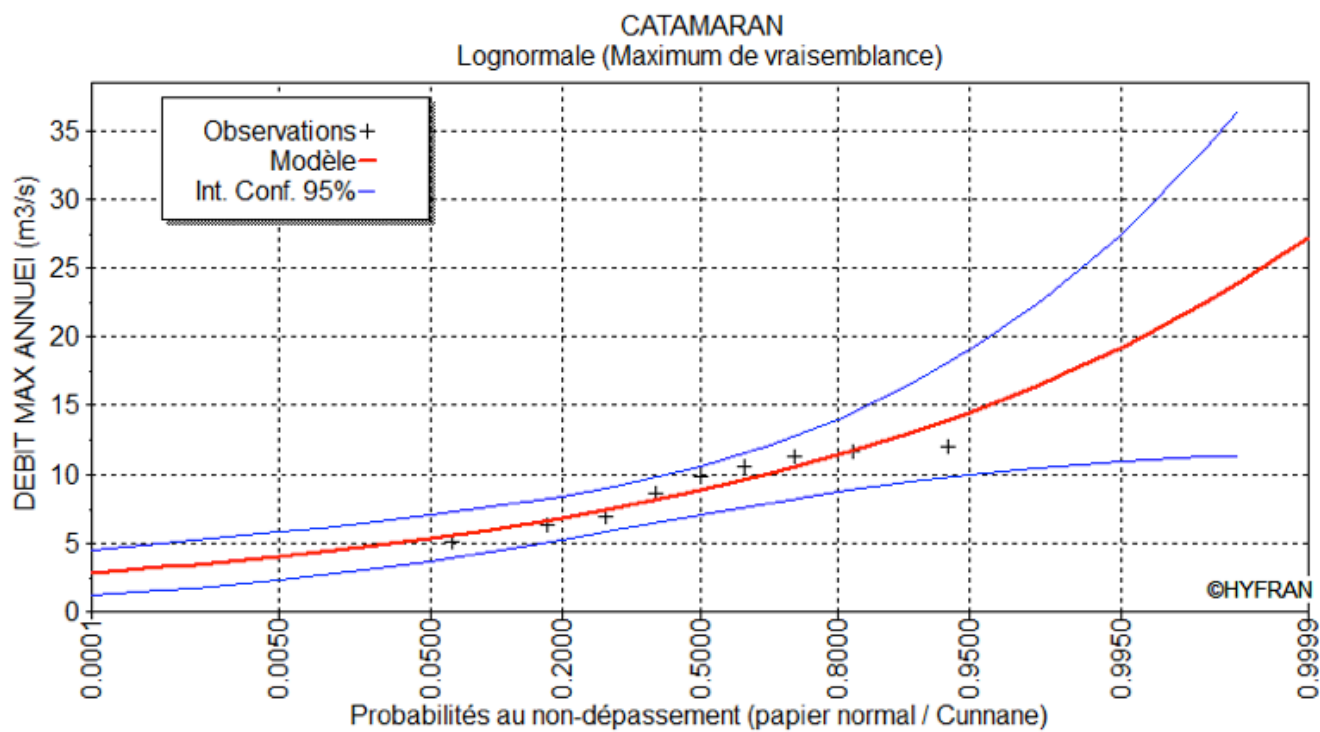


Figure D 8: Ajustement par la loi Lognormale (Maximum de vraisemblance) Q_{110}

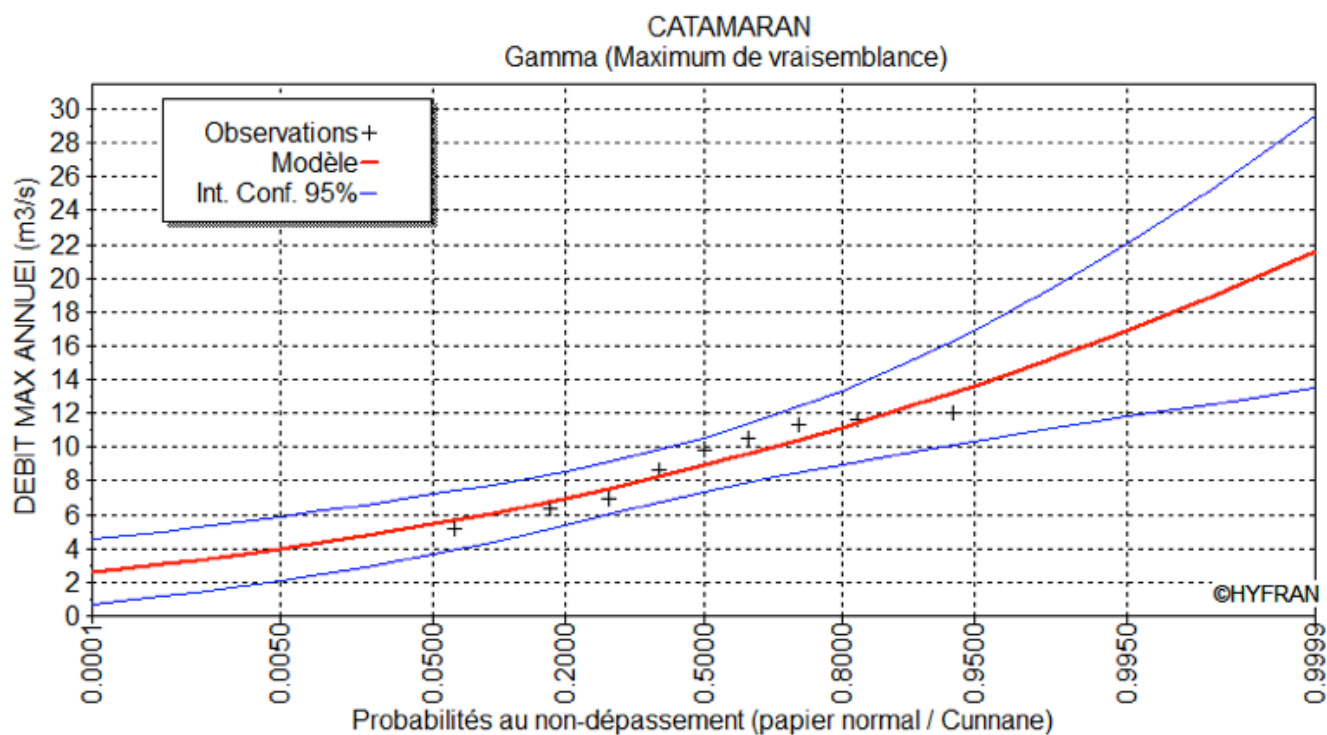


Figure D 9: Ajustement par la loi Gamma (Maximum de vraisemblance) Q_{110}

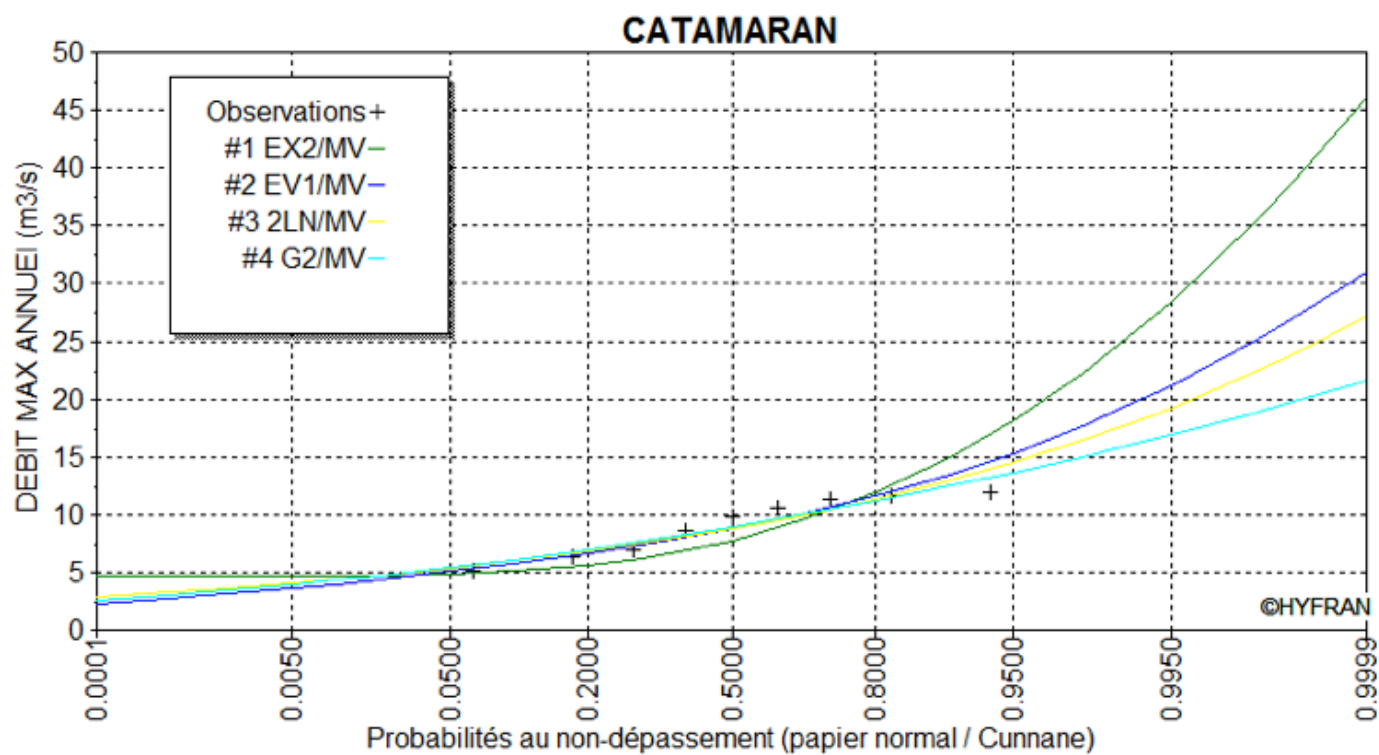


Figure D 10: Comparaison des lois par critères Q_{110}