

Projet ANR-08-RISK-03-01

# Prédétermination des valeurs extrêmes de pluies et de crues » (EXTRAFLO)

Programme RISKNAT 2008

## Tâche III : Inter-comparaison des méthodes probabilistes

Rapport III.7 « *Comparaison d'un large panel de méthodes d'estimation des pluies et crues extrêmes sur bassins test* »

Date : Décembre 2012

Rapport réalisé par :

<sup>(1)</sup> EDF/DTG

Avec la participation de :

<sup>(2)</sup> Artelia Grenoble

<sup>(3)</sup> Irstea, Centre d'Aix-en-Provence, OHAX

<sup>(4)</sup> Irstea, Centre de Lyon HHLY

<sup>(5)</sup> EDF/LNHE Chatou

Auteurs :

F. Garavaglia<sup>1</sup>, J.C. Carré<sup>2</sup>, Y. Aubert<sup>3</sup>, B. Renard<sup>4</sup>, P. Bernadara<sup>5</sup>





# SOMMAIRE

---

<b>1.</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>6</b>
1.1.	OBJECTIF DE L'ACTION 7.....	6
1.2.	ORGANISATION DU RAPPORT .....	6
<b>2.</b>	<b>LA BASE DE DONNEES.....</b>	<b>6</b>
2.1.	L'ARDECHE .....	6
2.1.1.	Les données hydrométriques.....	6
2.1.2.	Le données pluviométriques.....	7
2.1.3.	Les données de température de l'air .....	8
2.1.4.	Pas de temps de l'étude .....	8
2.2.	LES GARDONS .....	9
2.2.1.	Les données hydrométriques.....	9
2.2.2.	Le données pluviométriques.....	9
2.2.3.	Les données de température de l'air .....	10
2.2.4.	Pas de temps de l'étude .....	10
2.3.	LE TECH .....	11
2.3.1.	Les données hydrométriques.....	11
2.3.2.	Les données pluviométriques.....	11
2.3.3.	Les données de température de l'air .....	11
2.3.4.	Pas de temps de l'étude .....	12
<b>3.</b>	<b>ACTION DE COMPARAISON .....</b>	<b>12</b>
3.1.	COMPARAISON EN TERMES DE PLUIE DE BASSIN .....	13
3.1.1.	Les méthodes comparées .....	13
3.1.2.	Test de sensibilité au découpage saisonnier.....	13
3.1.3.	Test de sensibilité à la fonction prédictive .....	16
3.1.4.	Résultats de la comparaison.....	18
3.1.5.	Conclusions .....	21
3.2.	COMPARAISON EN TERMES DE VOLUMES ET POINTES DE CRUE.....	22
3.2.1.	Les méthodes comparées .....	22
3.2.2.	Résultats de la comparaison.....	23
3.2.3.	Comparaison avec les données historiques .....	28
3.2.4.	Résultats de la comparaison.....	32
<b>4.</b>	<b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>33</b>
<b>5.</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>35</b>
	<b>ANNEXE 1 - DESCRIPTIF DES METHODES DE PREDETERMINATIONS .....</b>	<b>37</b>
1.	ANALYSE FREQUENTIELLE STANDARD.....	37
1.1.	La distribution GEV et la loi de GUMBEL .....	37
1.2.	La distribution GP et la loi Exponentielle .....	37
1.3.	La loi Somme de deux Exponentielles.....	37
2.	APPROCHE HISTORIQUE .....	38
3.	METHODE GRADEX .....	40
3.1.	CONTEXTE HISTORIQUE .....	40
3.2.	PRINCIPES GÉNÉRAUX .....	40
4.	METHODE AGREGÉE.....	42
4.1.	PRINCIPES GÉNÉRAUX .....	42

5.	METHODE SPEED .....	44
5.1.	Principes de la méthode speed.....	44
5.2.	Analyse regionale des maxima annuels des pluies journalieres .....	44
5.3.	Analyse de la relation probabiliste pluie-debit.....	45
6.	METHODE SCHADEX .....	46
6.1.	CONTEXTE HISTORIQUE .....	46
6.2.	PRINCIPES GÉNÉRAUX .....	46
6.3.	DONNÉES REQUISES .....	46
6.3.1.	MODÈLE PROBABILISTE DE PLUIE .....	46
6.3.2.	MODÈLE PLUIE-DÉBIT .....	48
6.3.3.	PROCÉDÉ DE SIMULATION .....	48
7.	METHODE SHYREG .....	49
7.1.	Le générateur de pluie.....	49
7.2.	La transformation pluie débit.....	49
7.3.	L'agglomération des quantiles de débits.....	49
7.4.	Conclusion.....	50
8.	APPROCHE MULTI-FRACTALES .....	51

## TABLE DES FIGURES

Figure 1 - Localisation des 5 bassins versant à l'échelle de la France. ....	6
Figure 2 –Carte des bassins de l'Ardèche à Vallon-Pont-d'Arc et à Sauze. Localisation des stations pluviométriques et hydrométriques considérées.....	7
Figure 3 –Carte des bassins des Gardons de Générargues, Corbès et Anduze. Localisation de stations pluviométriques et hydrométriques considérées.....	9
Figure 4 –Carte du bassin du Tech à Reynès. Localisation de stations pluviométriques et de débit considérées. ....	11
Figure 5 - Histogramme des gradex mensuels de la pluie spatiale du Gardon à Corbès.....	14
Figure 6 - Test de sensibilité à l'échantillonnage saisonnier. Bassin versant de l'Ardèche à Sauze. ....	15
Figure 7 - Test de sensibilité à l'échantillonnage saisonnier : boxplot du score $DELTA_T$ . ....	16
Figure 8 - Test de sensibilité à la fonction prédictive. Bassin versant de l'Ardèche à Sauze. ....	17
Figure 9 - Test de sensibilité à la fonction prédictive : boxplot du score $DELTA_T$ .....	18
Figure 10 - Comparaison des estimations de pluie de 8 modèles considérés (courbe centrale et prédictive – Groupe 1). En rouge sont reportées les valeurs du score $SPAN_T$ . ....	19
Figure 11 - Comparaison des estimations de pluie de 8 modèles considérés (courbe centrale – Groupe 2).....	20
Figure 12 - Comparaison des estimations des volumes de crue des modèles considérés (courbe centrale). En rouge sont reportées les valeurs du score $SPAN_T$ . ....	24
Figure 13 - Comparaison des estimations des volumes de crue des modèles considérés (courbe centrale et prédictive). En rouge sont reportées les valeurs du score $SPAN_T$ .....	25
Figure 14 - Comparaison des estimations des pointes de crue des modèles considérés (courbe centrale). En rouge sont reportées les valeurs du score $SPAN_T$ . ....	26
Figure 15 - Comparaison des estimations des pointes de crue des modèles considérés (courbe centrale et prédictive). En rouge sont reportées les valeurs du score $SPAN_T$ .....	27
Figure 16 – Histogramme des score $DELTA_{T=1000}$ moyen par rapport l'estimation moyenne. ....	28
Figure 17 - Comparaison des estimations des pointes de crue des modèles considérés (courbe centrale). En bleu sont reportées les crues historiques avec des barres d'incertitude de $\pm 30\%$ . En rouge sont reportées les valeurs du score $SPAN_T$ .....	30
Figure 18 - Comparaison des estimations des pointes de crue des modèles considérés (courbe centrale et prédictive). En bleu sont reportées les crues historiques avec des barres d'incertitude de $\pm 30\%$ . En rouge sont reportées les valeurs du score $SPAN_T$ . ....	31
Figure 18 – Comparaison de distributions de crue sur le Gardon d'Anduze et le Gardon de Saint-Jean, avec ou sans prise en compte des erreurs sur les courbes de tarage des débits.....	39
Figure 19 – Méthode GRADEX : synthèse d'une l'étude. ....	40
Figure 20 – Méthode AGREGEE : domaines fréquentiels (depuis Lang et al (2007)).....	42
Figure 21 – Méthode SCHADEX : épisode pluvieux centré.....	46
Figure 22 - Méthode SCHADEX : types de temps de la distribution MEWP – champs géopotentiels 1000HPa moyens.....	47
Figure 23 - Méthode SCHADEX : distribution MEWP des pluies de Juin à Novembre à Lyon (1953-2005). ....	47
Figure 24 - Méthode SCHADEX : principe de la simulation de crues. ....	48
Figure 25 – Méthode SCHADEX : distributions de volumes et de débits de pointe observés et simulés. ....	48
Figure 26 - Le modèle GR simplifié.....	49

## TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Pluie spatiale de l'Ardèche à Sauze. ....	7
Tableau 2 - Pluie spatiale de l'Ardèche à Vallon-Pont-d'Arc. ....	8
Tableau 3 - Pluie spatiale du Gardon à Générargues.....	9
Tableau 4 - Pluie spatiale du Gardon à Corbès. ....	10
Tableau 5 - Pluie spatiale du Tech à Reynès.....	11
Tableau 6 - Méthodes considérées dans la comparaison.....	13
Tableau 7 - Saisons à risque des bassins versant considérés. ....	14
Tableau 8 - Critères $SPAN_T$ moyens pour les 4 groupes de modèles considérés.....	21
Tableau 9 - Méthodes considérées dans la comparaison des crues. ....	22
Tableau 10 - Critères $SPAN_T$ moyens.....	28

## 1. INTRODUCTION

### 1.1. OBJECTIF DE L'ACTION 7

*L'objectif de cette action est de comparer sur une base de bassins versants de référence les estimations de pluie et de débit issues de l'application des différentes méthodes étudiées dans le projet ExtraFlo.*

L'idée à la base de cette action est de comparer la plus large gamme possible de méthodes. Pour cette raison nous avons choisi de réduire les bassins versants considérés pour permettre aussi à toutes les méthodes « non automatique » (i.e. méthodes qui nécessitent un certain niveau d'expertise hydrologique) de participer à l'action de comparaison.

### 1.2. ORGANISATION DU RAPPORT

Ce rapport s'organise de la façon suivante. Tout d'abord la base de données de bassins versants de référence est définie dans la section 2. Dans la section 3 la comparaison des différentes méthodes est détaillée en traitant séparément la comparaison en termes de pluies, volumes et pointes de crue. Les conclusions et les perspectives de cette action de comparaison sont données à la fin du rapport.

## 2. LA BASE DE DONNEES

La base de données considérée dans cette action est constituée de 5 bassins versants. Les données disponibles pour chaque bassin sont détaillées dans les paragraphes suivants. La Figure 1 montre la localisation des 5 bassins versants à l'échelle de la France.

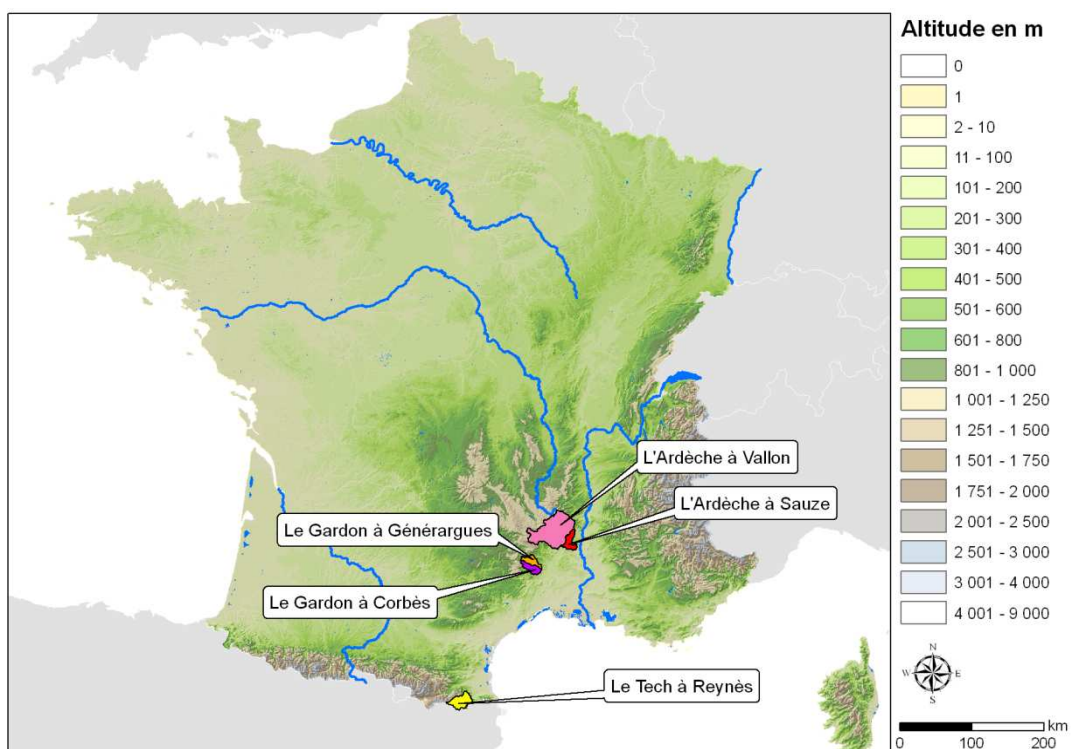


Figure 1 - Localisation des 5 bassins versant à l'échelle de la France.

### 2.1. L'ARDECHE

Nous avons considéré les bassins de l'Ardèche à Vallon-Pont-d'Arc (1930 km<sup>2</sup>) et à Sauze (2240 km<sup>2</sup>). On présente en Figure 2 la carte des bassins versant avec la localisation des postes pluviométriques et hydrométriques.

#### 2.1.1. Les données hydrométriques

Deux stations hydrométriques ont été considérées :

- La station banque hydro V5064010 de Sauze St Martin avec une disponibilité de données journalières sur la période 1955-2010 et de données horaires sur la période 1980-2010.
- La station banque hydro V5054010 de Vallon-Pont-d'Arc avec une disponibilité de données journalières sur la période 2000-2010 et de données horaires sur la période 2000-2010.



Figure 2 – Carte des bassins de l’Ardèche à Vallon-Pont-d’Arc et à Sauze. Localisation des stations pluviométriques et hydrométriques considérées.

### 2.1.2. Le données pluviométriques

Nous avons considéré dix stations pluviométriques avec une disponibilité de données journalières sur la période 1960-2008. Une pluie spatiale pour chaque bassin a été calculée selon une moyenne pondérée des postes pluviométriques par les polygones de Thiessen. Les poids relatifs de chaque poste sont récapitulés dans le Tableau 1 et dans le Tableau 2.

Pluviomètre	Coefficient de la pluie spatiale
EXTRA_PJ_0415MP	0.120
EXTRA_PJ_0417MP	0.142
EXTRA_PJ_0419MP	0.099
EXTRA_PJ_0420MP	0.061
EXTRA_PJ_0421MP	0.129
EXTRA_PJ_0422MP	0.062
EXTRA_PJ_0529MP	0.151
EXTRA_PJ_0577MP	0.096
EXTRA_PJ_0592MP	0.070
EXTRA_PJ_0645MP	0.071

Tableau 1 - Pluie spatiale de l'Ardèche à Sauze.



Pluviomètre	Coefficient de la pluie spatiale
EXTRA_PJ_0417MP	0.191
EXTRA_PJ_0419MP	0.114
EXTRA_PJ_0420MP	0.070
EXTRA_PJ_0421MP	0.098
EXTRA_PJ_0422MP	0.071
EXTRA_PJ_0529MP	0.175
EXTRA_PJ_0577MP	0.111
EXTRA_PJ_0592MP	0.081
EXTRA_PJ_0645MP	0.098

**Tableau 2 - Pluie spatiale de l'Ardèche à Vallon-Pont-d'Arc.**

### **2.1.3. Les données de température de l'air**

Les températures moyennes sur les bassins ont été établies entre 1953 et 2010 par interpolation à partir des données issues des postes voisins dans le cadre de la thèse de Gottardi (2009). Ces températures sont calculées à une altitude proche de l'altitude médiane de chaque bassin versant. On appelle ces séries les températures SPAZM.

### **2.1.4. Pas de temps de l'étude**

L'analyse des hydrogrammes de crue à Sauze, de la disponibilité de données, ainsi que la taille du bassin conduit à retenir le pas de temps 24h pour l'étude des pluies et des volumes de crue extrême.



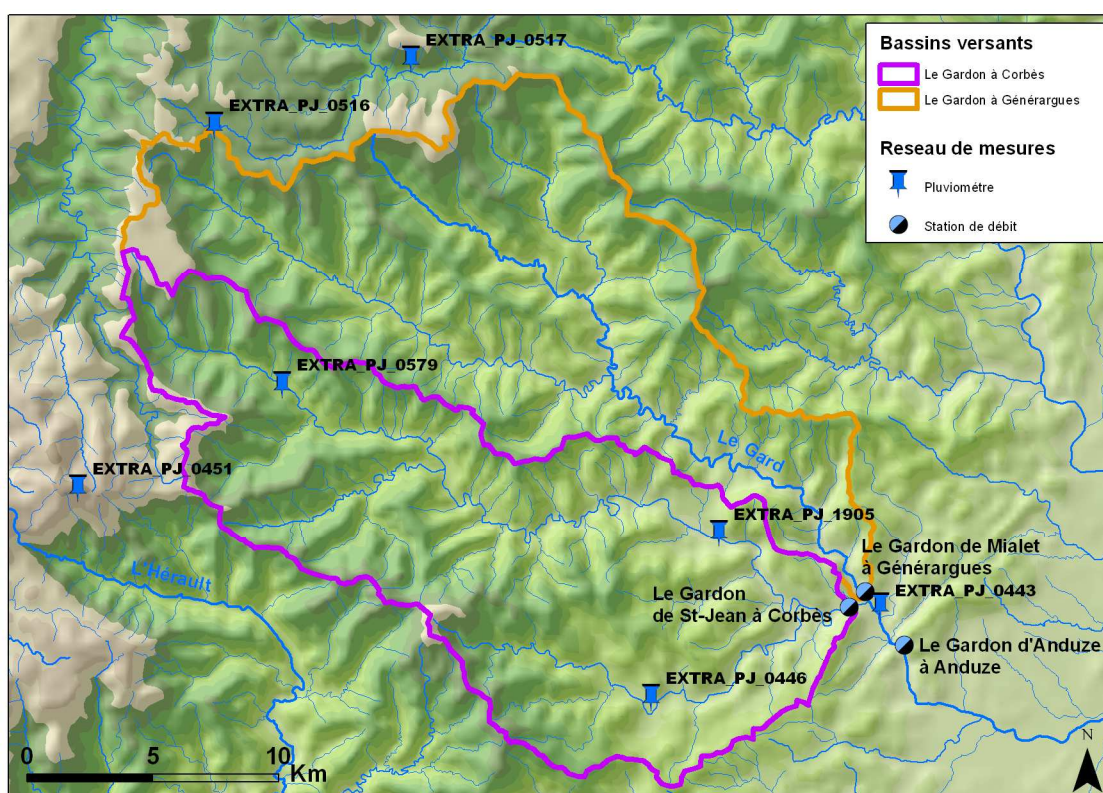
## 2.2. LES GARDONS

Nous avons considéré les bassins versant du Gardon de Mialet à Générargues (245 km<sup>2</sup>) et du Gardon de Saint Jean à Corbès (263 km<sup>2</sup>). On présente en Figure 3 la carte des bassins versant avec la localisation des postes pluviométriques et hydrométriques.

### 2.2.1. Les données hydrométriques

Deux stations hydrométriques ont été considérées :

- La station banque hydro V7124010 de Générargues avec une disponibilité de données journalières sur la période 1962-2010 et de données horaires sur la période 1971-2010.
- La station banque hydro Y9414010 de Corbès avec une disponibilité de données journalières sur la période 1967-2010 et de données horaires sur la période 1970-2010.



### 2.2.2. Les données pluviométriques

Nous avons considéré six stations pluviométriques avec une disponibilité de données journalières sur la période 1950-2008 et de données horaires sur la période 1984-2008. Une pluie spatiale pour chaque bassin a été calculée selon une moyenne pondérée des postes pluviométriques par les polygones de Thiessen. Les poids relatifs de chaque poste sont récapitulés dans le Tableau 3 et dans le Tableau 4

Pluviomètre	Coefficient de la pluie spatiale
EXTRA_PJ_0443	0,03
EXTRA_PJ_0516	0,14
EXTRA_PJ_0517	0,29
EXTRA_PJ_0579	0,25
EXTRA_PJ_1905	0,30

Tableau 3 - Pluie spatiale du Gardon à Générargues.

Pluviomètre	Coefficient de la pluie spatiale
EXTRA_PJ_0443	0,04
EXTRA_PJ_0446	0,32
EXTRA_PJ_0451	0,01
EXTRA_PJ_0516	0,01
EXTRA_PJ_0579	0,40
EXTRA_PJ_1905	0,23

Tableau 4 - Pluie spatiale du Gardon à Corbès.

### 2.2.3. Les données de température de l'air

Les températures moyennes sur les bassins ont été établies entre 1953 et 2010 par interpolation à partir des données issues des postes voisins dans le cadre de la thèse de Gottardi (2009). Ces températures sont calculées à une altitude proche de l'altitude médiane de chaque bassin versant. On appelle ces séries les températures SPAZM.

### 2.2.4. Pas de temps de l'étude

L'analyse des hydrogrammes de crue à Générargues et à Corbès, de la disponibilité de données, ainsi que la taille du bassin conduit à retenir le pas de temps 8h pour l'étude des pluies et des volumes de crue extrême.

### 2.3. LE TECH

Nous avons considéré le bassin versant du Tech à Reynès (477 km<sup>2</sup>). On présente en Figure 4 la carte du bassin versant avec la localisation des postes pluviométriques et hydrométriques.

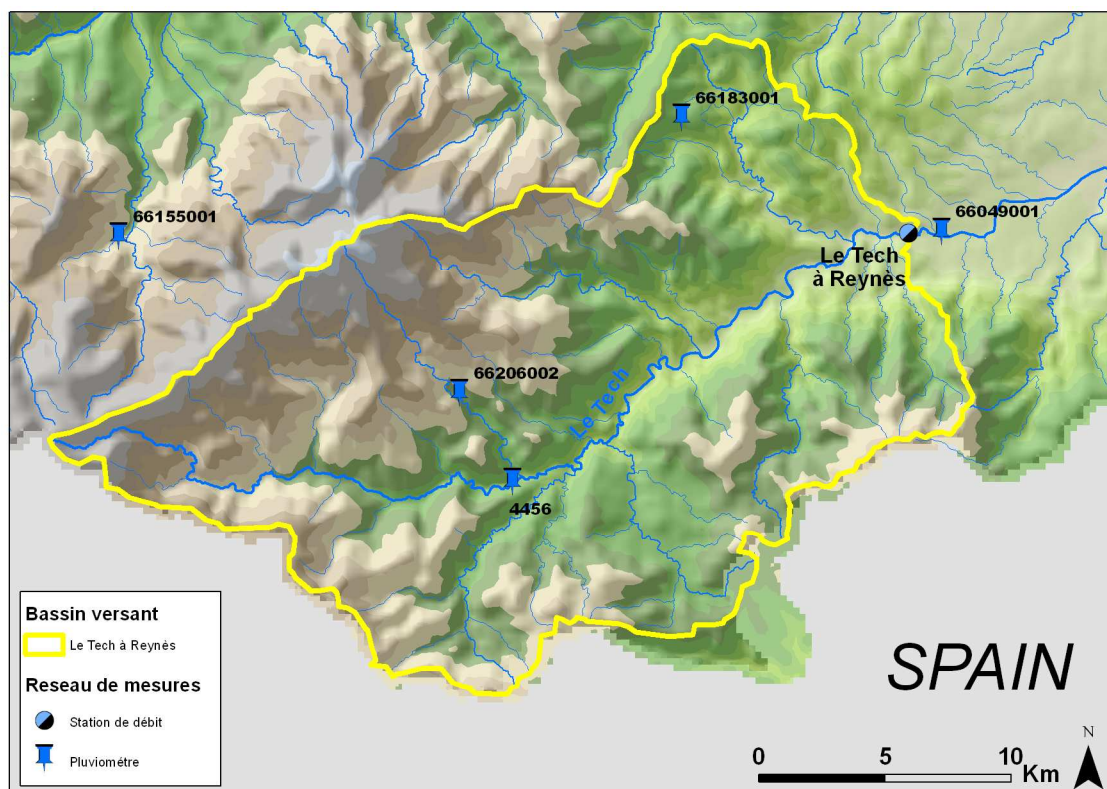


Figure 4 – Carte du bassin du Tech à Reynès.  
Localisation de stations pluviométriques et de débit considérées.

#### 2.3.1. Les données hydrométriques

Une station hydrométrique a été considérée : la station banque hydro Y0254040 de Reynès avec une disponibilité de données journalières sur la période 1967-2008 et de données horaires sur la période 1971-2010.

#### 2.3.2. Les données pluviométriques

Nous avons considéré cinq stations pluviométriques avec une disponibilité de données journalières sur la période 1953-2009. Une pluie spatiale a été calculée selon une moyenne pondérée des postes pluviométriques par les polygones de Thiessen. Les poids relatifs de chaque poste sont récapitulés dans le Tableau 5.

Pluviomètre	Coefficient de la pluie spatiale
PI_66155001	0,12
PI_66206002	0,28
PI_4456	0,29
PI_66183001	0,15
PI_66049001	0,16

Tableau 5 - Pluie spatiale du Tech à Reynès.

#### 2.3.3. Les données de température de l'air

Les températures moyennes sur les bassins ont été établies entre 1953 et 2010 par interpolation à partir des données issues des postes voisins dans le cadre de la thèse de Gottardi (2009). Ces températures sont calculées à une altitude proche de l'altitude médiane de chaque bassin versant. On appelle ces séries les températures SPAZM.

### 2.3.4. Pas de temps de l'étude

L'analyse des hydrogrammes de crue à Reynès, de la disponibilité de données, ainsi que la taille du bassin conduit à retenir le pas de temps 24h pour l'étude des pluies et des volumes de crue extrême.

## 3. ACTION DE COMPARAISON

**Nous avons choisi dans cette action de comparer les estimations des différentes méthodes en se focalisant sur trois variables hydrologiques : les pluies, les volumes de crue et les pointes de crue.**

Pour comparer et quantifier les écarts entre les différentes estimations deux scores ont été proposés : le score  $SPAN_T$  et le score  $DELTA_T$ . Le premier score évalue l'écart maximum entre plusieurs estimations exprimées en pourcentage de leur moyenne. Sa formulation est la suivante :

$$SPAN_T = \frac{\max\{E_{T,i=1,\dots,n}\} - \min\{E_{T,i=1,\dots,n}\}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_{T,i}}$$

où  $E_{T,i}$  est l'estimation  $i$  parmi  $n$  pour le temps de retour  $T$ . Ce score est toujours supérieur à 0 et il vaut 0 quand les estimations sont des différentes méthodes considérées sont identiques.

Lorsque nous nous intéressons à comparer exclusivement deux estimations, un deuxième score est calculé pour mettre en évidence les biais éventuels entre deux méthodes considérées, e.g. la méthode A donne des estimations toujours plus élevées de celles associées à la méthode B.

Soient  $E_{T,A}$  et  $E_{T,B}$  les estimations associés aux deux méthodes A et B pour le temps de retour  $T$ . La formulation du score  $DELTA_T$  est la suivante :

$$DELTA_T = \frac{E_{T,A} - E_{T,B}}{\frac{1}{2}(E_{T,A} + E_{T,B})}$$

Ce score vaut 0 quand les estimations des deux méthodes considérées sont identiques. Pour plus de détails sur ces deux scores faire référence à Garavaglia (2011).

### 3.1. COMPARAISON EN TERMES DE PLUIE DE BASSIN

#### 3.1.1. Les méthodes comparées

Dans la comparaison des estimations de pluie, nous avons pris en compte les modèles classiques issus de la statistique des valeurs extrêmes (i.e. loi GEV, loi GP, loi STE, voir Annexe 1). De plus nous avons aussi considéré la loi composite par types de temps (MEWP, Garavaglia *et al.*, 2010), la méthode SPEED (Cayla, 1995) et la méthode SHYREG (Lavabre *et al.* 2003).

En ce qui concerne la méthode SHYREG nous avons considéré les pluies abattues calculés aux centroïdes des bassins versants. L'abattement des pluies a été calculé avec la formule de Neppel (2007) :

$$K = \frac{1}{1 + \frac{0.02 S^{0.5}}{(1-F)^{0.07} T^{0.33}}}$$

où  $K$  est le coefficient d'abattement des pluies,  $T$  le pas de temps en heures,  $F$  la fréquence de non dépassement,  $S$  la superficie du bassin versant en  $\text{km}^2$ . Il est important de souligner que cette formule a été établie pour des pas de temps inférieurs à 24 h, pour des temps de retours supérieurs à 100 ans et des bassins de superficie supérieure à 2000  $\text{km}^2$ . Pour pouvoir comparer les résultats de la méthode SHYREG à pas de temps journalier nous avons corrigé le coefficient d'abattement avec un coefficient de Weiss de 1.16.

Les méthodes comparées, la population et la technique d'échantillonnage associées sont listées en Tableau 6.

Modèle	Code	Type de distribution	Population de pluie	Échantillonnage
Loi Gumbel	GUM	Courbe centrale	Pluie spatiale <sup>1</sup>	Maxima annuels par saisons
	Gum pred	Fonction prédictive		
Loi GEV	GEV	Courbe centrale	Pluie spatiale	Sup-seuil par saisons
	GEV pred	Fonction prédictive		
Loi EXP	EXP	Courbe centrale	Pluie spatiale	Sup-seuil par saisons
	EXP pred	Fonction prédictive		
Loi GPD	GPD	Courbe centrale	Pluie spatiale	Saisonnier
	GPD pred	Fonction prédictive		
Loi somme de deux exponentielles	STE	Courbe centrale	Pluie spatiale	Sup-seuil par saison et types de temps
	STE pred	Fonction prédictive		
Loi composite par Types de Temps	MEWP	Courbe centrale	Ajustement régional à partir des postes ponctuels	Maxima annuels
	MEWP pred	Fonction prédictive		
SPEED	SPEED moy	Courbe « moyenne »	Pixel au centroïde du BV abattu	Maxima annuels
	SPEED ext	Courbe « extreme »		
SHYREG	SHYREG	Courbe centrale		

Tableau 6 - Méthodes considérées dans la comparaison.

#### 3.1.2. Test de sensibilité au découpage saisonnier

Tout d'abord nous avons décidé d'évaluer l'impact de l'échantillonnage saisonnier sur les estimations des pluies extrêmes. Pour cela nous avons considéré les distributions GUM, GEV, EXP, GPD, STE et MEWP avec et sans découpage saisonnier.

<sup>1</sup> Il s'agit de la pluie spatiale définie aux paragraphes 2.1.2, 2.2.2 et 2.3.2



Le découpage saisonnier a été réalisé en s'appuyant sur la distribution de gradex<sup>2</sup> mensuels. Il s'agit d'ajuster une loi STE sur la pluie journalière de chaque mois et de regrouper les mois avec les gradex similaires. À titre d'exemple la Figure 5 montre l'histogramme des gradex mensuels pour la pluie spatiale du Gardon à Corbès. Les différentes couleurs mettent en évidence le découpage saisonnier choisi.

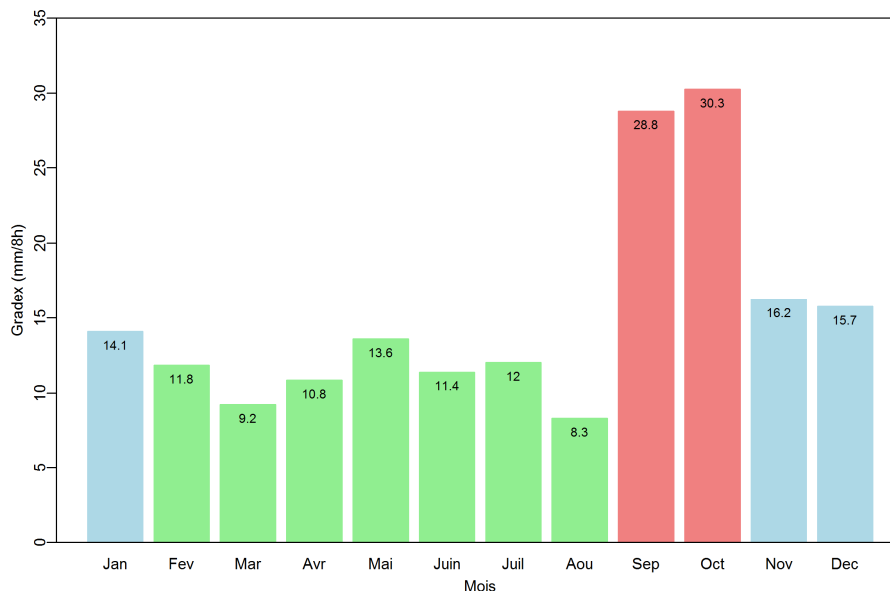


Figure 5 - Histogramme des gradex mensuels de la pluie spatiale du Gardon à Corbès.

Nous pouvons donc définir la « saison à risque » comme la saison à plus fort risque pluviométrique, c'est-à-dire les trois/quatre mois consécutifs qui maximisent la somme des gradex mensuels. Dans l'exemple montré en Figure 5 la saison septembre-octobre est la saison à risque. Le Tableau 7 résume les saisons à risque pour les cinq bassins traités.

Bassin versant	Saison à risque
<b>Ardèche à Sauze</b>	Septembre - Novembre
<b>Ardèche à Vallon</b>	Septembre - Novembre
<b>Gardon à Corbès</b>	Septembre - Octobre
<b>Gardon à Générargues</b>	Septembre - Octobre
<b>Tech à Reynès</b>	Octobre - Novembre

Tableau 7 - Saisons à risque des bassins versant considérés.

Nous avons donc comparé, pour chaque type de distribution, les estimations de pluie pour des temps de retour fixés (i.e. 10, 20, 50, 100 et 10000 ans) issues d'un ajustement sur l'année complète et sur la saison à risque. Pour quantifier les écarts, nous avons calculé le score  $DELTA_T$  entre les deux types d'estimations.

A titre d'exemple nous montrons en Figure 6 les ajustements pour le cas de l'Ardèche à Sauze. Les valeurs du score  $DELTA_T$  sont affichées sur chaque graphique. Nous pouvons observer que presque systématiquement les estimations issues d'un échantillonnage saisonnier sont plus élevées que celles obtenue avec un ajustement global. Cette tendance est observable de façon indépendante du type de loi considérée.

<sup>2</sup> GRADdient de l'Exponentielle. Paramètre de la deuxième exponentielle, égale à la pente asymptotique sur un graphique de Gumbel, i.e. paramètre principal de l'aléa pluviométrique pour des distributions à décroissance exponentielle.

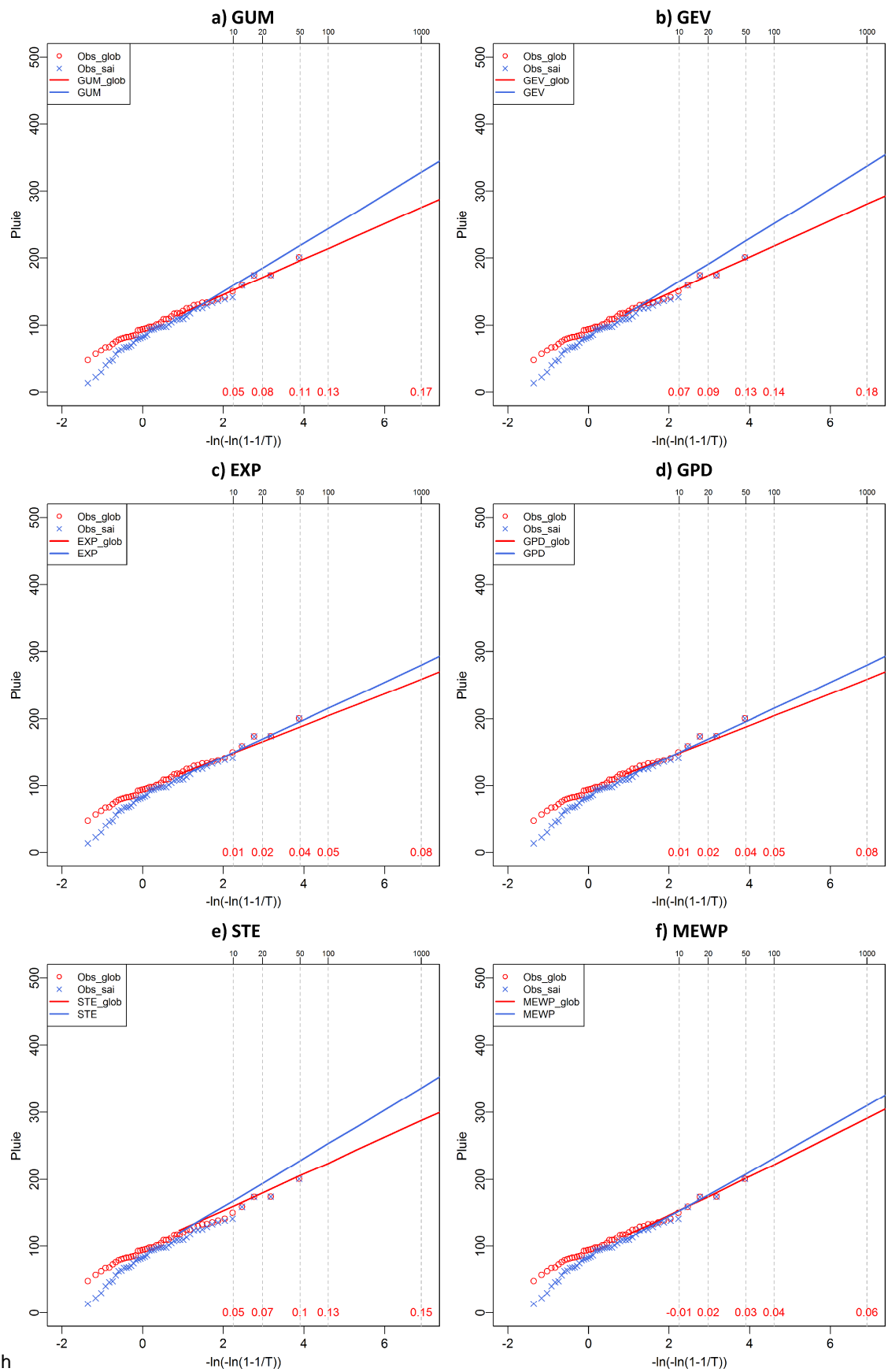


Figure 6 - Test de sensibilité à l'échantillonnage saisonnier. Bassin versant de l'Ardèche à Sauze. Les valeurs du score  $\Delta T$  sont reportées en rouge sur chaque figure.



Ce type d'analyse a été réalisé pour les cinq bassins versants. En Figure 7 on reporte le boxplot des scores  $DELTA_T$  pour les cinq temps de retour considérés, toutes distributions et bassins confondus. On peut vérifier que la tendance observée sur l'exemple de l'Ardèche à Sauze est confirmée. En guise de conclusion, nous pouvons affirmer qu'un échantillonnage saisonnier conduit à des estimations de pluie extrême plus élevées qu'un ajustement classique sur la totalité de l'année. L'écart entre les deux techniques d'échantillonnage augmente avec le temps de retour (i.e. pentes asymptotiques divergentes).

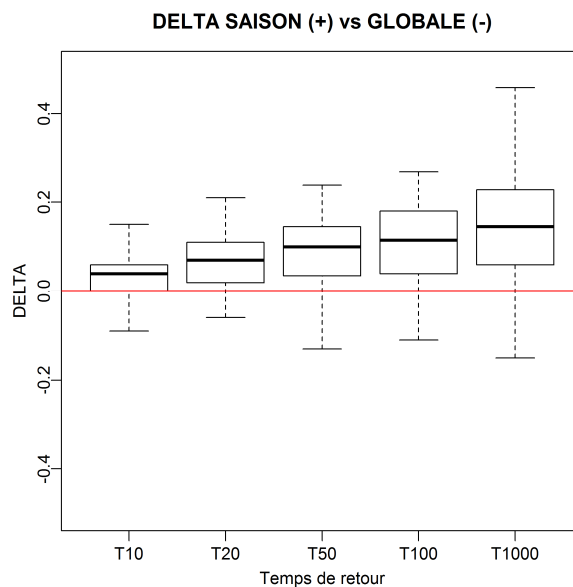


Figure 7 - Test de sensibilité à l'échantillonnage saisonnier : boxplot du score  $DELTA_T$ .

### 3.1.3. Test de sensibilité à la fonction prédictive

De façon analogue au test de sensibilité sur le découpage saisonnier, nous avons aussi testé la sensibilité à la fonction prédictive. L'idée de cette analyse est d'évaluer l'impact de la fonction prédictive sur les estimations des pluies extrêmes. Pour cela nous avons confronté les courbes centrales et les fonctions prédictives pour les distributions GUM, GEV, EXP, GPD, STE et MEWP.

Nous avons donc comparé, pour chaque type de distribution, les estimations de pluie pour des temps de retour fixés (i.e. 10, 20, 50, 100 et 10000 ans) issues d'un ajustement centrale et la fonction prédictive. Pour quantifier les écarts, nous avons calculé le score  $DELTA_T$  entre les deux types d'estimations.

A titre d'exemple nous montrons en Figure 8 les ajustements pour le cas de l'Ardèche à Sauze. Les valeurs du score  $DELTA_T$  sont affichées sur chaque graphique. Nous pouvons observer que les deux estimations sont assez proches. Cependant la fonction prédictive donne, de façon systématique, des estimations plus élevées que la courbe centrale. Cela vient de l'asymétrie de l'intervalle de confiance avec une borne supérieure plus éloignée que la borne inférieure de la distribution estimée.

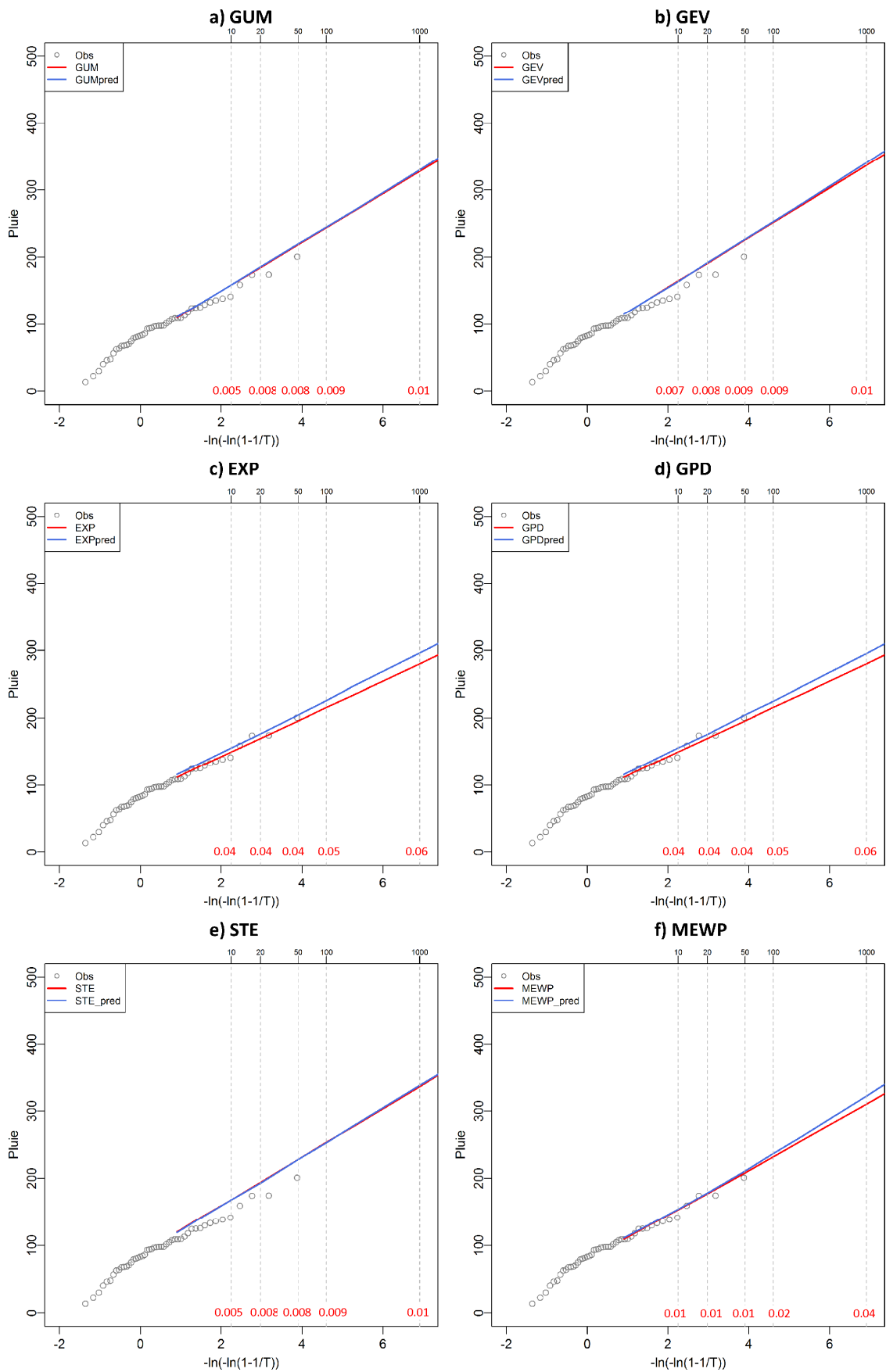


Figure 8 - Test de sensibilité à la fonction prédictive. Bassin versant de l'Ardèche à Sauze.

Ce type d'analyse a été réalisé pour les cinq bassins versant. En Figure 7 on reporte le boxplot des scores  $DELTA_T$  pour les cinq temps de retour considérés, toutes distributions et bassins confondus. On peut vérifier que la tendance observée sur l'exemple de l'Ardèche à Sauze est confirmée.

Nous pouvons affirmer que la fonction prédictive conduit à des estimations de pluie extrême plus élevées que la courbe centrale. Nous pouvons remarquer que les écarts entre les deux techniques d'ajustement augmentent avec le temps de retour (i.e. pentes asymptotiques divergentes).

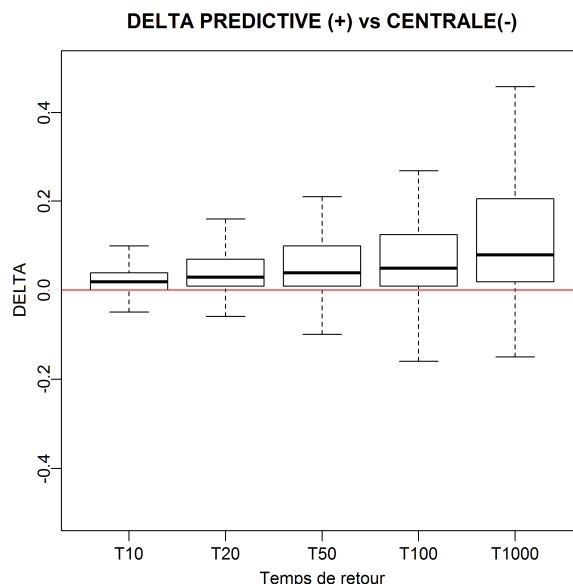


Figure 9 - Test de sensibilité à la fonction prédictive : boxplot du score  $DELTA_T$ .

### 3.1.4. Résultats de la comparaison

Après avoir évalué la sensibilité au découpage saisonnier et à la fonction prédictive, nous avons comparé les 15 estimations des 8 modèles considérés sur les 5 bassins versants. La comparaison graphique des ajustements est reportée en **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

Pour quantifier les écarts entre les différentes estimations, nous avons calculé le score  $SPAN_T$  pour des temps de retours fixés (i.e. 10, 20, 50, 100 et 1000 ans). Les valeurs de ce score sont reportées pour chaque bassin versant en **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Pour mieux comprendre la dispersion des résultats et regrouper les méthodes en « familles » nous avons calculé le score  $SPAN_T$  pour 4 sous-populations de modèles (Tableau 8) :

- **GROUPE 1** : tous les modèles en considérant à la fois l'estimation centrale et la fonction prédictive (15 estimations);
- **GROUPE 2** : tous les modèles en considérant exclusivement la courbe centrale (9 estimations) ;
- **GROUPE 3** : tous les modèles sauf SPEED et SHYREG en considérant à la fois l'estimation centrale et la fonction prédictive (12 estimations) ;
- **GROUPE 4** : tous les modèles SPEED et SHYREG en considérant exclusivement la courbe centrale (6 estimations) ;

Les groupes 2 et 4 ont été introduits pour évaluer l'impact de la fonction prédictive, vis à vis respectivement des groupes 1 et 3. Les groupes 3 et 4 sont considérés pour quantifier les écarts entre les méthodes statistiques travaillant directement sur les pluies de bassin, sachant que les méthodes SPEED et SHYREG ne sont pas ajustées sur une pluie du bassin et qu'une correction a posteriori<sup>3</sup> a été réalisée pour prendre en compte l'abattement spatial de la pluie.

<sup>3</sup> En ce qui concerne la méthode SHYREG.

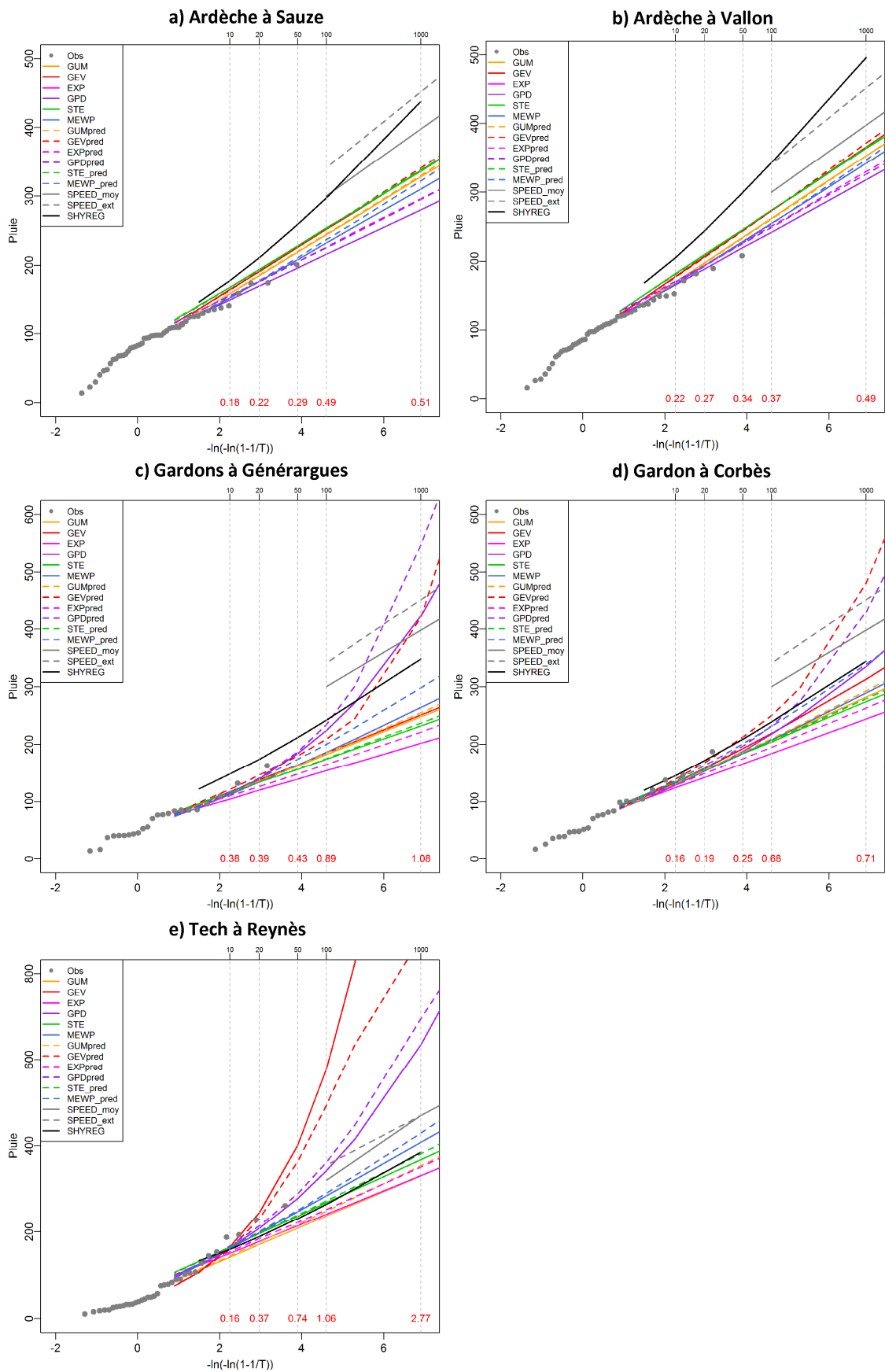


Figure 10 - Comparaison des estimations de pluie de 8 modèles considérés (courbe centrale et prédictive – Groupe 1). En rouge sont reportées les valeurs du score  $SPAN_T$ .

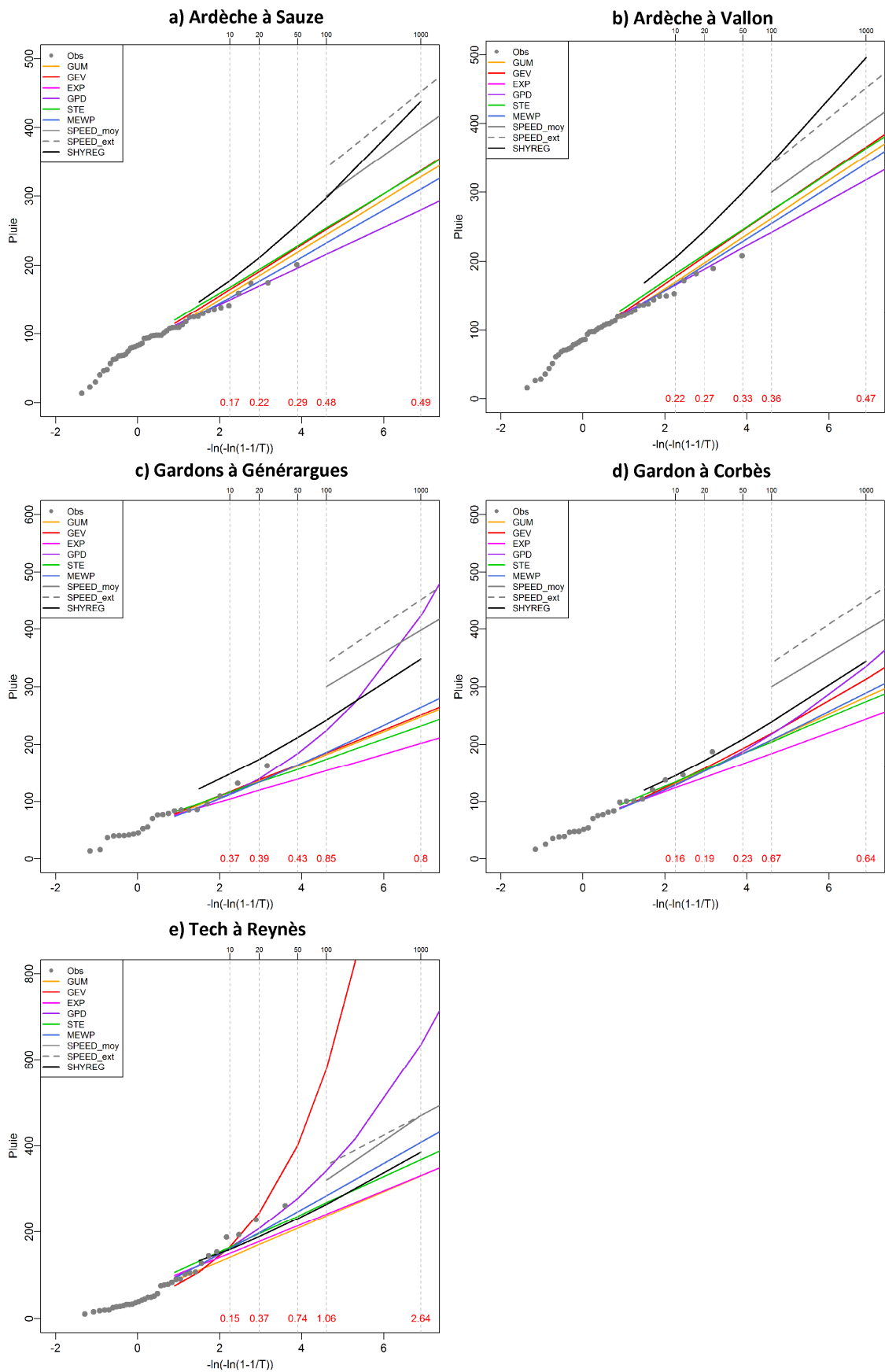


Figure 11 - Comparaison des estimations de pluie de 8 modèles considérés (courbe centrale – Groupe 2). En rouge sont reportées les valeurs du score SPAN<sub>T</sub>.

Groupe	SPAN <sub>T</sub>				
	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	1000 ans
<b>GROUPE 1</b>	0.26	0.32	0.45	0.74	1.18
<b>GROUPE 2</b>	0.24	0.29	0.43	0.72	1.07
<b>GROUPE 3</b>	0.12	0.19	0.31	0.41	0.97
<b>GROUPE 4</b>	0.11	0.17	0.28	0.38	0.76

Tableau 8 - Critères SPAN<sub>T</sub> moyens pour les 4 groupes de modèles considérés.

### 3.1.5. Conclusions

A la fin de cette comparaison nous pouvons déduire les conclusions suivantes :

- **Sensibilité au découpage saisonnier. Le fait de réaliser un découpage saisonnier revoit de façon systématique à la hausse les ajustements :** le DELTA<sub>T</sub> moyen augmente avec le temps de retour avec une valeur moyenne à 1000 ans d'environ 0.15.
- **Sensibilité à la fonction prédictive. Le fait de considérer une estimation prédictive revoit de façon systématique à la hausse les ajustements :** le DELTA<sub>T</sub> moyen augmente avec le temps de retour avec une valeur moyenne à 1000 ans d'environ 0.10. L'augmentation due à l'estimation prédictive reste en moyenne inférieure à l'effet de considérer un découpage saisonnier, i.e. score DELTA<sub>T</sub> inférieur.
- **Lorsqu'on considère les méthodes statistiques classiques, la dispersion des résultats reste raisonnable :** le SPAN<sub>T</sub> moyen augmente avec le temps de retour avec une valeur à 1000 ans de 0.76.
- **Toutes méthodes confondues, la dispersion des résultats devient plus importante :** le SPAN<sub>T</sub> moyen augmente avec le temps de retour avec une valeur à 1000 ans de 1.11.
- **Les estimations fournies par la méthode SPEED sont pour 4 bassins sur 5 (Ardèche et Gardons) systématiquement plus élevées que celles des autres méthodes statistiques.** Cette différence est explicable par le fait que les estimations de la méthode SPEED ne considèrent pas un abattement spatial de la pluie. Ce constat est valable aussi pour la méthode SHYREG dans les cas des bassins de l'Ardèche et des Gardons (pour le bassin versant du Tech ce constat n'est pas valable), bien qu'une correction pour la prise en compte de l'abattement de pluie a été appliquée (formule de Neppel). Cela justifie pleinement les précautions données au paragraphe 3.1.1 sur l'application de la formule d'abattement employée.

## 3.2. COMPARAISON EN TERMES DE VOLUMES ET POINTES DE CRUE

### 3.2.1. Les méthodes comparées

Dans la comparaison des estimations des crues, nous avons pris en compte différentes méthodes, qui peuvent être divisées en 7 catégories :

1. **Analyse fréquentielle standard des débits de crue**, i.e. les modèles statistiques classiques comme la distribution GEV et la distribution Gumbel ;
2. **Approche historique**. Il s'agit de s'appuyer sur des crues historiques pour compléter les chroniques de débits disponibles. Une analyse fréquentielle sur l'ensemble de l'échantillon (crues observées et crues historiques) est toujours réalisée, mais en faisant en sorte d'adapter la technique d'ajustement afin de prendre en compte l'information manquante sur la période considérée (Naulet *et al.*, 2005).
3. **Modèles probabilistes simplifiés basés sur l'information pluviométrique**. C'est-à-dire toutes les méthodes qui s'appuient sur l'information pluviométrique pour définir une borne supérieure à la distribution des crues extrêmes, i.e. méthode Gradex (CFBR, 1994), méthode AGREGEE (Margoum, 1992), méthode SPEED (Cayla, 1995).
4. **Modèles probabilistes par simulation basés sur l'information pluviométrique (i.e. méthodes basées sur la simulation pluie-débit)**. Plus précisément les méthodes fondées sur un simulateur d'averses couplé à un modèle pluie-débit, i.e. méthode SCHADDEX (Paquet *et al.*, 2006, Garavaglia, 2011), méthode SHYREG (Lavabre *et al.*, 2003).
5. **Approche Multi-fractales**<sup>4</sup>.
6. **Approche régionale**. Ces méthodes s'appuient sur l'information provenant de plusieurs postes afin de consolider l'analyse fréquentielle des débits de crue d'un site.
7. **Approche régionale et historique**, c'est-à-dire la fusion des approches régionale (approche 6) et de l'approche historique (approche 2).

Les méthodes comparées sont listées en Tableau 9. Pour plus d'information, on reporte en Annexe 1 un bref résumé de chaque méthode.

Approche	Modèle	Code	Type de distribution	Comparaison Volumes	Comparaison Pointes
Approche 1	Loi Gumbel	GUM	Courbe centrale	Oui	Oui
		Gum pred	Fonction prédictive		
	Loi GEV	GEV	Courbe centrale		
		GEV pred	Fonction prédictive		
Approche 2	Loi GEV	Histo	Courbe centrale	Oui	Oui
		Histo pred	Fonction prédictive		
Approche 3	GRADEX	Gradex	-	Oui	Oui
	AGREGEE	Agregee	-	Oui	Oui
	SPEED	Speed	-	Non	Oui
Approche 4	SCHADDEX	Schadex	-	Oui	Oui
	SHYREG	Shyreg	-	Oui	Oui
Approche 5	Multi-fractales	Fractales	-	Oui <sup>5</sup>	Oui <sup>6</sup>
Approche 6	Loi GEV	GEV reg	Courbe centrale	Oui	Oui
		GEV reg pred	Fonction prédictive		
Approche 7	Loi GEV	Histo reg histo	Courbe centrale	Oui	Oui
		Histo reg pred	Fonction prédictive		

Tableau 9 - Méthodes considérées dans la comparaison des crues.

<sup>4</sup> Exclusivement pour le bassin versant de l'Ardèche à Sauze.

<sup>5</sup> Exclusivement pour le bassin versant de l'Ardèche à Sauze.

<sup>6</sup> Exclusivement pour le bassin versant de l'Ardèche à Sauze.



### **3.2.2. Résultats de la comparaison**

Tout d'abord nous avons comparé les estimations des différentes méthodes considérées en termes de volumes de crue, c'est-à-dire les débits des crues aux pas de temps choisi pour l'étude. La comparaison graphique des ajustements est reportée en Figure 12 (courbe centrale) et en Figure 13 (courbe centrale et prédictive).

Ensuite nous avons comparé les estimations des différentes méthodes considérées en termes de pointes de crue, c'est-à-dire les débits des crues aux pas de temps choisi pour l'étude. La comparaison graphique des ajustements est reportée en Figure 14 (courbe centrale) et en Figure 15 (courbe centrale prédictive).

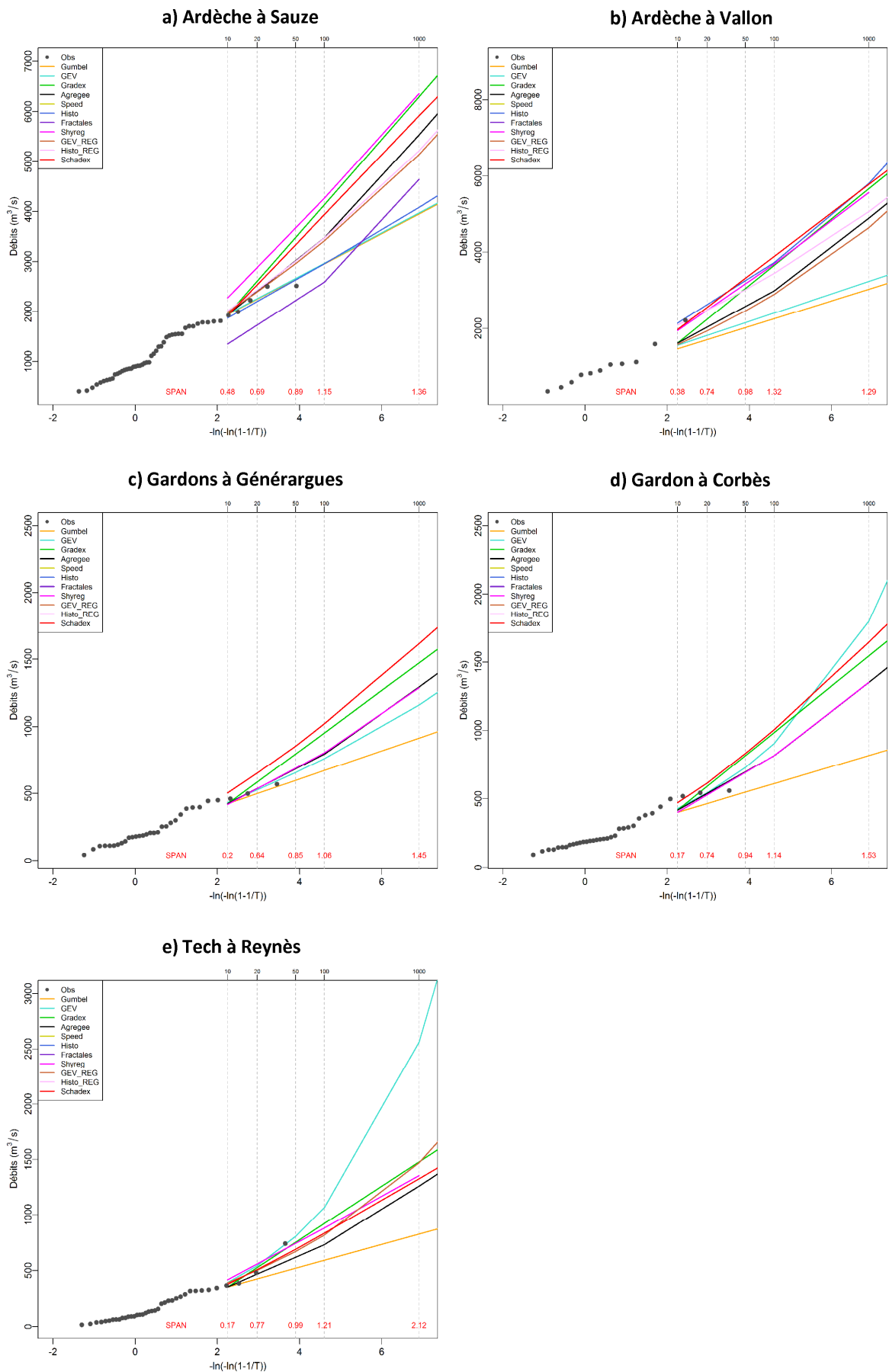


Figure 12 - Comparaison des estimations des volumes de crue des modèles considérés (courbe centrale). En rouge sont reportées les valeurs du score  $SPAN_T$ .

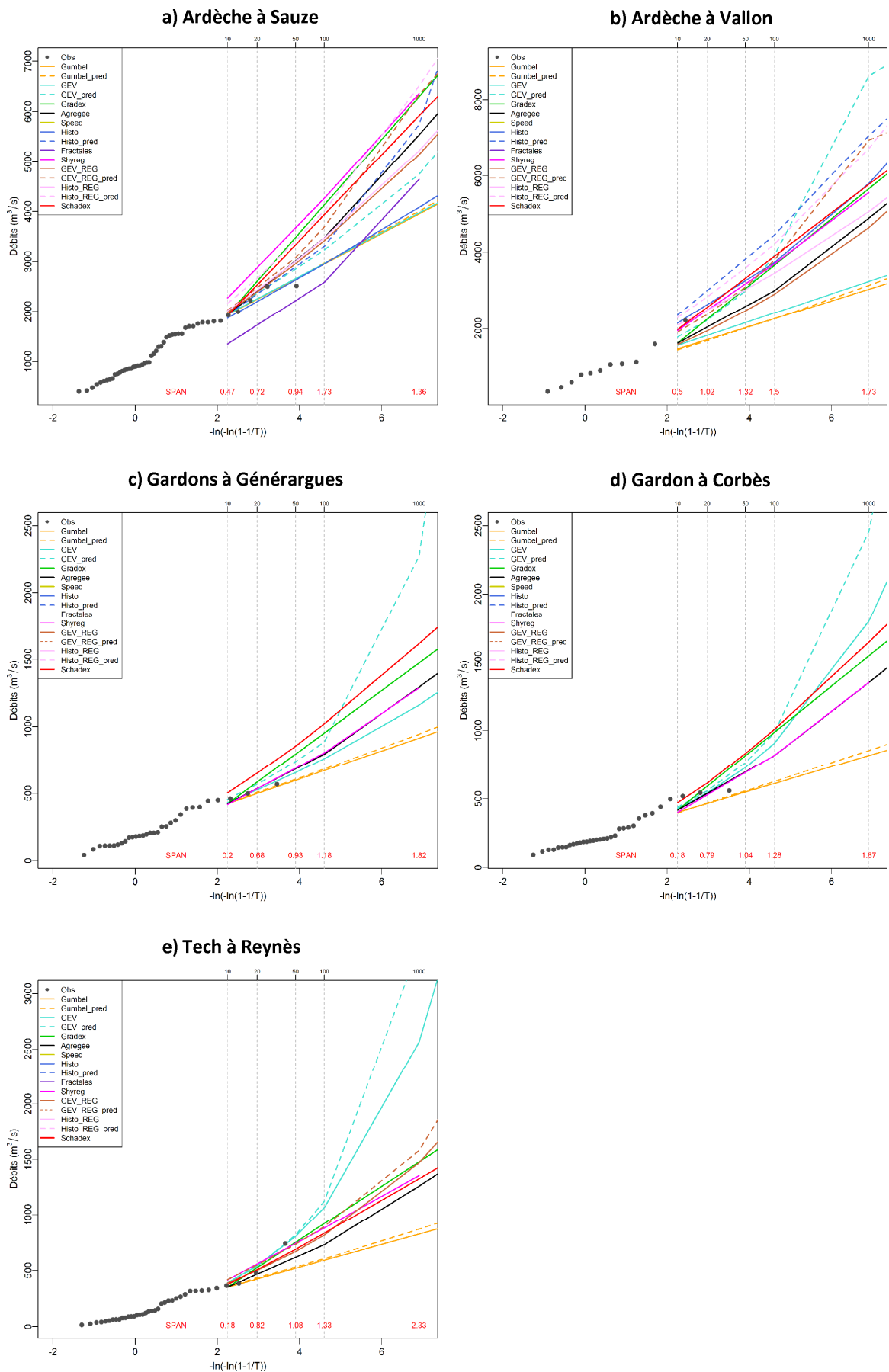


Figure 13 - Comparaison des estimations des volumes de crue des modèles considérés (courbe centrale et prédictive). En rouge sont reportées les valeurs du score  $SPAN_T$ .

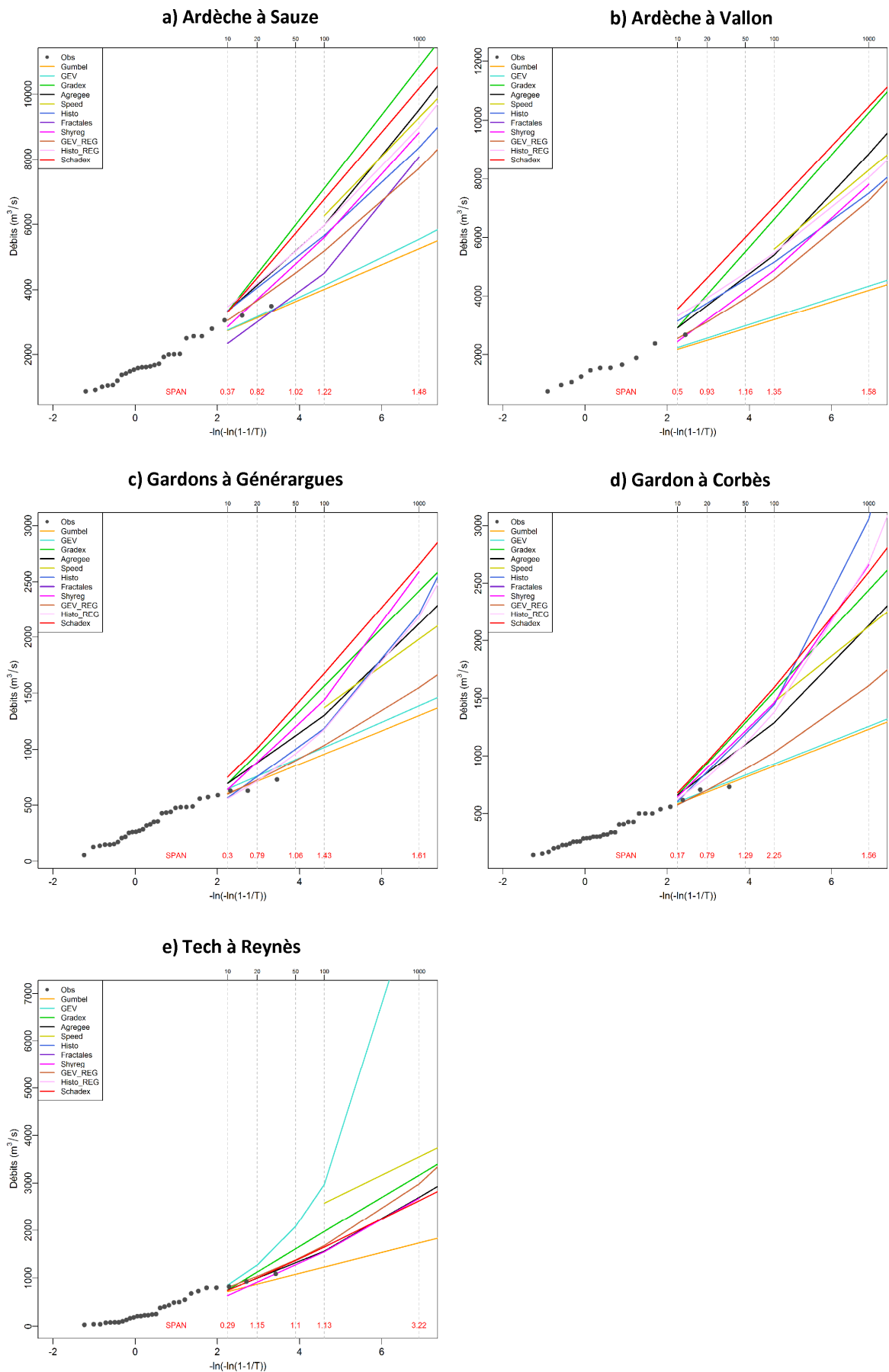


Figure 14 - Comparaison des estimations des pointes de crue des modèles considérés (courbe centrale). En rouge sont reportées les valeurs du score  $SPAN_T$ .

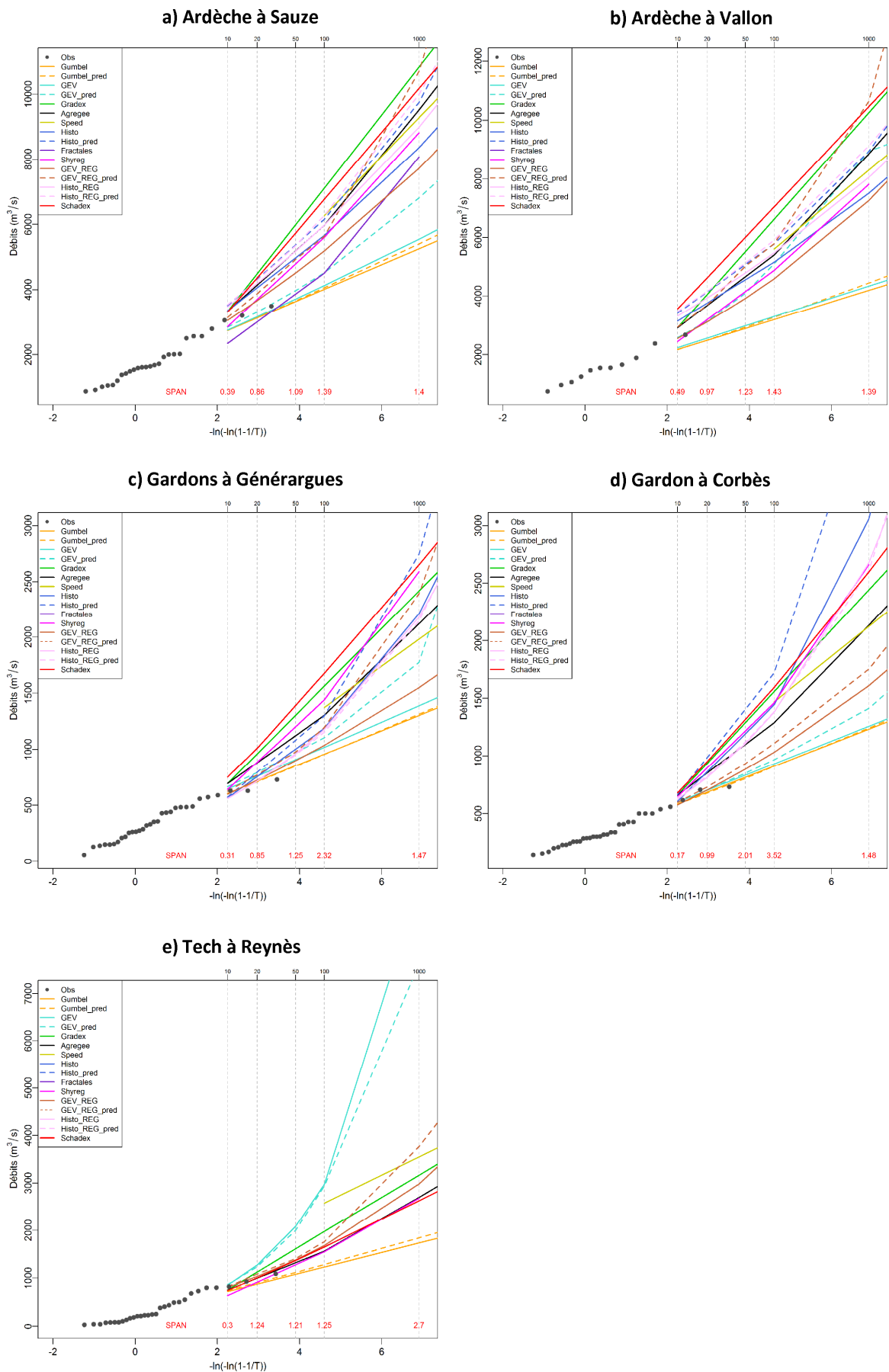


Figure 15 - Comparaison des estimations des points de crue des modèles considérés (courbe centrale et prédictive). En rouge sont reportées les valeurs du score SPANT.

Pour quantifier les écarts entre les différentes estimations, nous avons calculé le score  $SPAN_T$  pour des temps de retour fixés (i.e. 10, 20, 50, 100 et 10000 ans). Les valeurs du score sont reportées pour chaque bassin versant en Figure 12, Figure 13, Figure 14 et Figure 15. Le Tableau 10 donne les valeurs du score  $SPAN_T$  moyen, pour les 5 temps de retour considérés, à la fois pour les volumes et pour les pointes.

Groupe	$SPAN_T$				
	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	1000 ans
<b>Volumes</b> (centrale)	0.28	0.71	0.93	1.18	1.55
<b>Volumes</b> (centrale + prédictive)	0.33	0.90	1.13	1.48	1.89
<b>Pointes</b> (centrale)	0.31	0.81	1.06	1.40	1.82
<b>Pointes</b> (centrale + prédictive)	0.33	0.98	1.36	1.98	2.15

Tableau 10 - Critères  $SPAN_T$  moyens.

Pour mieux synthétiser les résultats de la comparaison sur les pointes, nous reportons en Figure 16 l'histogramme des scores  $DELTA_{T=1000}$  moyen (i.e. moyenne sur les 5 bassins) calculés par rapport à l'estimation moyenne (i.e. moyenne des toutes les méthodes comparées). En rouge nous reportons les méthodes qui sont inférieures à la moyenne, et vice-versa en bleu celles qui donnent des estimations supérieures à la moyenne. On peut affirmer que les méthodes basées sur l'information pluviométrique (approche 3) et par simulation (approche 4) donnent des estimations systématiquement plus élevées que l'estimation moyenne.

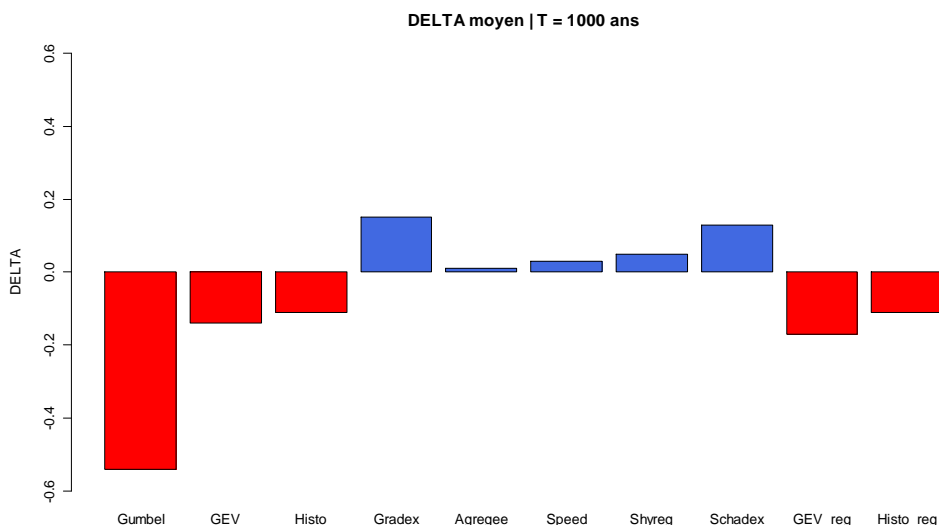


Figure 16 – Histogramme des score  $DELTA_{T=1000}$  moyen par rapport l'estimation moyenne.

### 3.2.3. Comparaison avec les données historiques

Après avoir comparé les méthodes en les confrontant avec les distributions empiriques des volumes et des pointes issues des données systématiques, nous avons choisi de rajouter à cette comparaison les distributions des pointes de crue issues des données historiques. Sachant que la prédétermination des débits est confrontée au manque d'observations, l'idée à la base de cette analyse est d'enrichir la chronique des observations à l'aide des données historiques (Llasat *et al.*, 2005, Naulet *et al.*, 2005, Payrastra *et al.*, 2005).

Grâce aux nombreuses études concernant l'information historique, ce type d'analyse a été possible pour les 5 bassins versant considérés. Pour chaque bassin versant nous disposons des informations historiques suivantes :

- **Ardèche à Sauze** Les données sont issues des travaux de thèse de Naulet (Naulet, 2002 et Naulet *et al.*, 2005). En considérant un seuil de perception de 2250 m<sup>3</sup>/s, 40 crues ont été retenues sur la période 1644-1977. L'épisode le plus important est la crue du septembre 1890, avec environ 7750 m<sup>3</sup>/s.
- **Ardèche à Vallon**. Comme dans le cas de l'Ardèche à Sauze, aussi pour Vallon les données sont issues des travaux de thèse de Naulet (Naulet, 2002 et Naulet *et al.*, 2005). En considérant un seuil de perception de 2500 m<sup>3</sup>/s, 42 crues sont disponibles sur la période 1644-1977. L'épisode le plus important est toujours la crue du septembre 1890, avec environ 7750 m<sup>3</sup>/s. Le deuxième événement le plus fort est la crue du 1827, avec environ 6850 m<sup>3</sup>/s.
- **Gardon à Générargues**. Les données sont issues du projet InondHis-LR (2007). En considérant un seuil de perception de 867 m<sup>3</sup>/s, 3 crues ont été retenues sur la période 1744-1970. L'épisode le plus important est la crue du 1861, avec environ 2530 m<sup>3</sup>/s.
- **Gardon à Corbès**. Comme dans le cas du Gardon à Générargues, les données de Corbès sont issues du projet InondHis-LR (2007). En considérant un seuil de perception de 1216 m<sup>3</sup>/s, 3 crues sont disponibles sur la période 1744-1970. L'épisode le plus important est toujours la crue du 1861, avec environ 2600 m<sup>3</sup>/s. Le deuxième événement le plus fort est la crue du 1847, avec environ 2150 m<sup>3</sup>/s.
- **Tech à Reynes**. Les données sont issues de la thèse de Aubert (2012). En considérant un seuil de perception de 1000 m<sup>3</sup>/s, 11 crues ont été retenues sur la période 1869-1971. L'épisode le plus important est la crue du 1940, avec environ 2300 m<sup>3</sup>/s.

Nous reportons en Figure 17 et en Figure 18, la comparaison des estimations des différentes méthodes considérées en terme de pointes de crue, en les confrontant graphiquement avec les distributions empiriques des débits systématiques et historiques. Les données historiques sont affectées d'une barre d'erreur de  $\pm 30\%$ . Cette incertitude est associée au type d'informations et à la modalité de reconstitution de la loi hauteur-débit. Pour plus de détails, on suggère au lecteur de s'adresser directement aux documents source des données cités auparavant.

**Compte tenu de la qualité des données historiques et des incertitudes associées, il est important de souligner que ce type d'analyse est utile pour mettre en évidence des tendances pour les forts temps de retour et éventuellement qualifier/disqualifier certaines méthodes.**



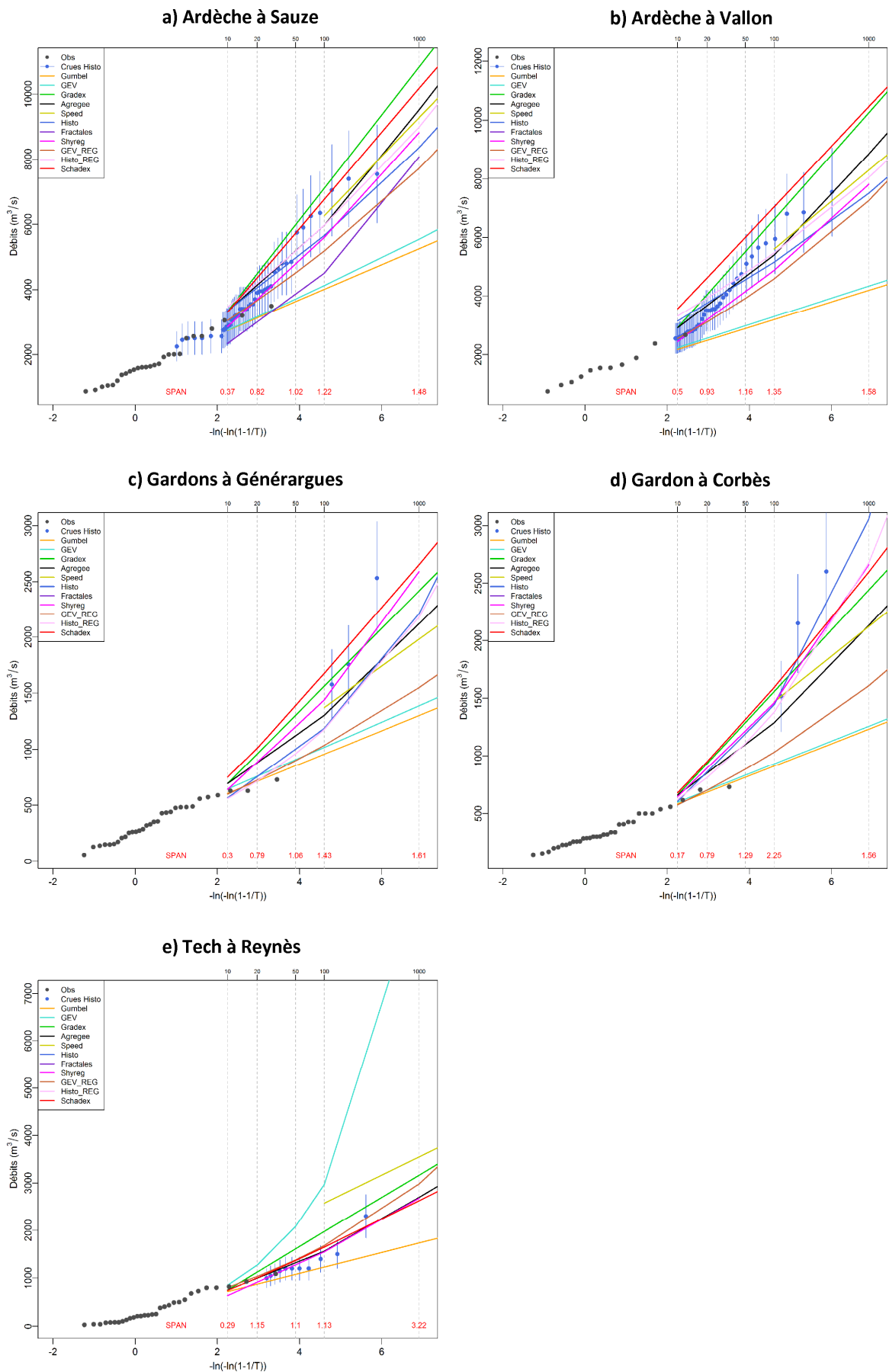


Figure 17 - Comparaison des estimations des pointes de crue des modèles considérés (courbe centrale). En bleu sont reportées les crues historiques avec des barres d'incertitude de  $\pm 30\%$ . En rouge sont reportées les valeurs du score  $SPAN_T$ .

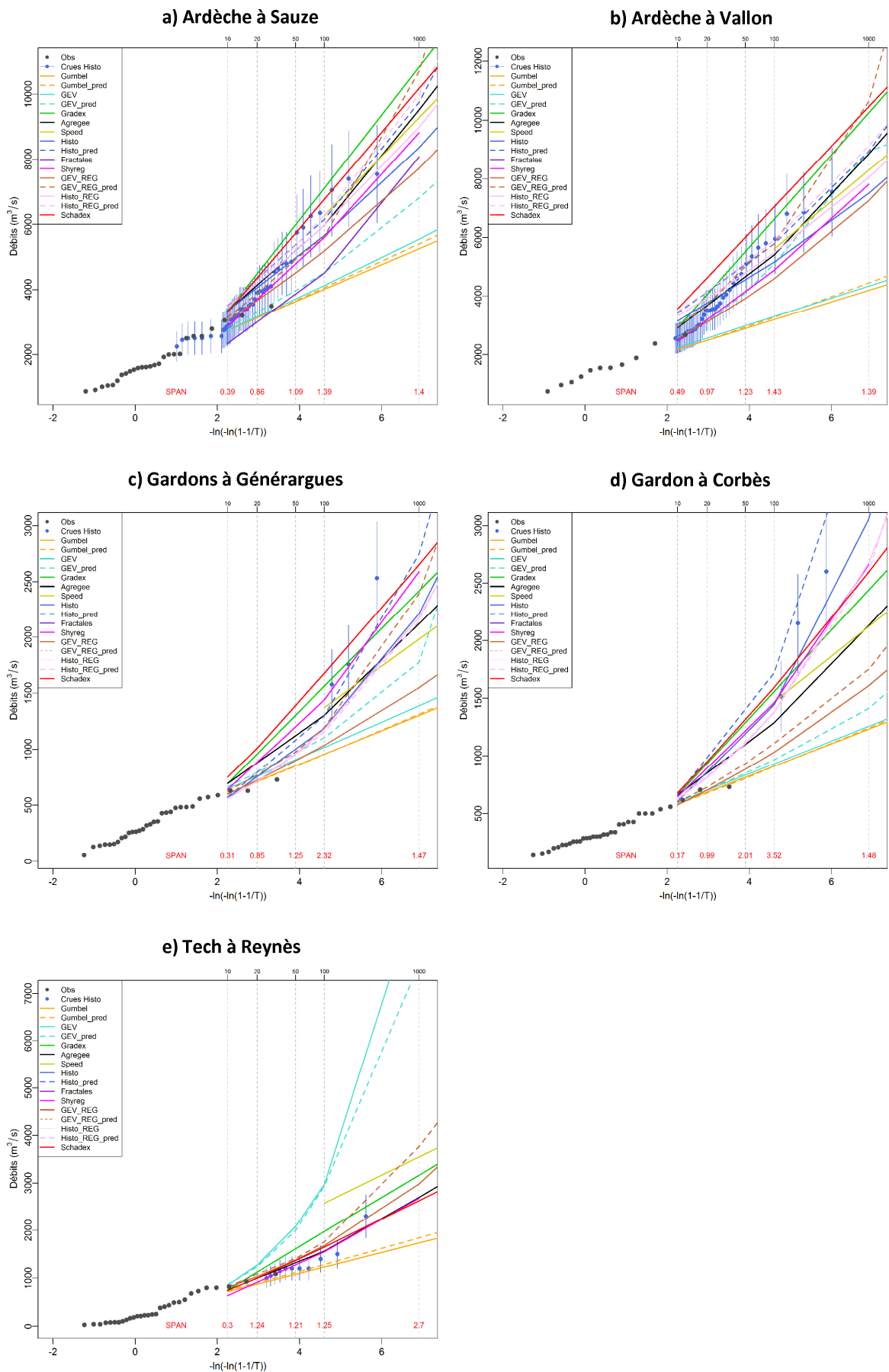


Figure 18 - Comparaison des estimations des points de crue des modèles considérés (courbe centrale et prédictive). En bleu sont reportées les crues historiques avec des barres d'incertitude de  $\pm 30\%$ . En rouge sont reportées les valeurs du score  $SPAN_T$ .

### 3.2.4. Résultats de la comparaison

A la fin de cette comparaison nous pouvons déduire les conclusions suivantes :

- **La dispersion de résultats augmente avec le temps de retour** à la fois pour les volumes et pour les pointes de crue, i.e. les critères  $SPAN_T$  augmentent avec le temps de retour (Tableau 10).
- **Les estimations des pointes de crue des différentes méthodes sont plus dispersées que les estimations des volumes**, i.e. valeurs du critère  $SPAN_T$  plus importantes :  $SPAN_{T=1000}$  moyen vaut 1.48 (1.18 en considérant que le courbe centrale) pour les volumes et 1.98 pour les pointes (1.40 en considérant que le courbe centrale).
- **Concernant les résultats, deux familles de méthodes sont distinguables: les méthodes qui utilisent de l'information supplémentaire pour conditionner l'extrapolation des débits** (approche historique, approche régionale et méthodes basées sur l'information pluviométrique, i.e. approches 2, 3, 4, 6, et 7 voir Tableau 9) **et les autres** (analyse fréquentielle standard des débits de crue et approche multi-fractales, i.e. approche 1 et 5).
- **Les distributions Gumbel et GEV donnent quasi-systématiquement des estimations plus faibles que celles des autres méthodes.** Ce constat est valable à la fois pour les pointes et pour les volumes, mis à part pour la distribution GEV prédictive qui s'approche sensiblement des estimations basées sur l'information pluviométrique (approches 3 et 4). Dans le cas du bassin du Tech à Reynès la distribution GEV (centrale et prédictive) donne des estimations remarquablement plus élevées que les autres méthodes (effet du calage local).
- **Les distributions centrales (et prédictives) de l'approche régionale donnent des résultats intermédiaires entre les estimations de l'analyse fréquentielle (approche 1) et les estimations des basées sur l'information historique (approche 2) et pluviométrique (approche 3 et 4).** Une exception à ce constat est observable dans le cas du bassin du Tech à Reynès où les estimations de l'approche régionale sont très proches des estimations des approches 3 et 4.
- **Les distributions centrales (et prédictives) de l'approche historique et historique régionale donnent des résultats très proches des méthodes basées sur l'information pluviométrique.** Pour les deux approches, la distribution prédictive donne des estimations systématiquement plus élevées de la distribution centrale. L'écart le plus important entre les méthodes basées sur la pluie et l'approche historique classique (approche 2) est observé dans le cas du Gardon à Corbès. Cet écart est réabsorbé si on considère l'approche historique-régionale (approche 7).
- **Les méthodes basées sur l'information pluviométrique (approches 3 et 4) donnent des estimations très proches, à la fois en terme de volumes et de pointes**, i.e. critère  $SPAN_{T=1000}$  moyen sur les pointes de crue vaut environ 0.26. Une exception à ce constat est observable dans le cas du bassin du Tech à Reynès où les estimations de la méthode SPEED s'éloignent des estimations des autres méthodes basées sur l'information pluviométrique.
- **La méthode Multi-Fractales**, qui a été calculée exclusivement pour le cas de l'Ardèche à Sauze, **donne des résultats en termes de volumes sensiblement plus faibles que ceux des autres méthodes.** En ce qui concerne les pointes de crue, cette méthode fournit des résultats similaires aux distributions Gumbel et GEV.
- **La comparaison avec les données historiques a mis en évidence que les méthodes basées sur l'information pluviométrique, en plus de l'approche historique et historique-régionale, donnent des estimations cohérentes avec les distributions empiriques des données historiques** (points bleu en Figure 17 et Figure 18). Il est important de remarquer qu'à différence de l'approche historique, les méthodes basées sur l'information pluviométrique n'utilisent pas les données historiques pour le calage des paramètres, c'est-à-dire les données historiques sont à considérer comme des données de validation. **De plus nous pouvons constater que les distributions Gumbel et GEV (estimation centrale) donnent des estimations en complet désaccord avec les données historiques.** Par ailleurs, nous pouvons remarquer aussi que pour certains bassins la distribution prédictive de la distribution GEV est un moins éloignée de la distribution des données historiques.

## 4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le but principal de cette action a été de comparer, sur une base de bassins versants de référence, les estimations de pluie et de débit issues de l'application des différentes méthodes étudiées dans le projet ExtraFlo. Un nombre raisonnable de cinq bassins versants a été retenu pour permettre ainsi à toutes les méthodes qui nécessitent un certain niveau d'expertise hydrologique de participer à l'action de comparaison.

Dans cette action, nous nous sommes concentrés sur la comparaison des estimations des différentes méthodes en se focalisant sur trois variables hydrologiques : les pluies, les volumes de crue et les pointes de crue.

En ce qui concerne la comparaison en terme de pluie, nous pouvons tirer les conclusions générales suivantes :

- **Nous pouvons mettre en évidence l'importance du découpage saisonnier, qui permet de ne pas sous-estimer le risque pluviométrique.** Plus précisément, le fait de réaliser un découpage saisonnier revoit de façon systématique à la hausse les ajustements : le  $DELTA_T$  moyen augmente avec le temps de retour avec une valeur moyenne à 1000 ans d'environ 0.15.
- **Concernant la sensibilité à la fonction prédictive, le fait de considérer ce type d'estimation, revoit de façon systématique à la hausse les ajustements :** le  $DELTA_T$  moyen augmente avec le temps de retour avec une valeur moyenne à 1000 ans d'environ 0.10. L'augmentation due à l'estimation prédictive reste en moyenne inférieure à l'effet de considérer un découpage saisonnier, i.e. score  $DELTA_T$  inférieur. Nous pouvons affirmer que la fonction prédictive est une façon « élégante » et « pragmatique » pour prendre en compte les incertitudes. En Figure 8, nous pouvons observer une bonne adéquation entre les distributions empiriques observées et les fonctions prédictives.
- **Lorsqu'on considère les méthodes statistiques sur des pluies de bassin, la dispersion des résultats reste raisonnable** (le  $SPAN_T$  moyen augmente avec le temps de retour avec une valeur moyenne à 1000 ans de 0.76). Par contre, toutes méthodes confondues, la dispersion des résultats devient plus importante (le  $SPAN_T$  moyen augmente avec le temps de retour avec une valeur moyenne à 1000 ans de 1.11). Nous pouvons remarquer que les estimations fournies par la méthode SPEED sont systématiquement (4 bassins sur 5) plus élevées que celles des autres méthodes. Comme nous avons dit auparavant, cette différence est explicable par le fait que les estimations de la méthode SPEED ne considèrent pas un abatement spatial de la pluie.

En ce qui concerne la comparaison en terme de débits, nous pouvons tirer les conclusions générales suivantes :

- **La dispersion de résultats augmente avec le temps de retour** à la fois pour les volumes et pour les pointes de crue, i.e. les critères  $SPAN_T$  augmentent avec le temps de retour. Plus précisément, nous pouvons affirmer que **les estimations des pointes de crue des différentes méthodes sont plus dispersées que les estimations des volumes**, i.e. valeurs du critère  $SPAN_T$  plus importantes :  $SPAN_{T=1000}$  moyen vaut 1.48 (1.18 en considérant que la courbe centrale) pour les volumes et 1.98 pour les pointes (1.40 en considérant que la courbe centrale).
- **Globalement concernant les résultats, on peut distinguer les méthodes en deux familles : les méthodes qui utilisent de l'information supplémentaire pour conditionner l'extrapolation des débits** (approche historique, approche régionale et méthodes basées sur l'information pluviométrique, i.e. approches 2, 3, 4, 6, et 7 voir Tableau 9) **et les autres** (analyse fréquentielle standard des débits de crue et approche multi-fractales, i.e. approche 1 et 5). En particulier les méthodes basées sur l'information pluviométrique (approches 3 et 4) donnent des estimations très proches, à la fois en terme de volumes et de pointes, i.e. critère  $SPAN_{T=1000}$  moyen sur les pointes de crue vaut environ 0.26. De plus, nous pouvons remarquer que les **distributions Gumbel et GEV donnent quasi-systématiquement des estimations plus faibles que celles des autres méthodes**, sauf pour la série du Tech où les données de la période récente (1971-2010) induisent une forte courbure de la loi GEV, démentie par les données historiques.
- **La comparaison avec les données historiques a mis en évidence que les méthodes basées sur l'information pluviométrique, en plus de l'approche historique, donnent des estimations cohérentes avec les distributions empiriques des données historiques.** Les distributions Gumbel et GEV donnent des estimations en complet désaccord avec les données historiques. Par contre, compte tenu de la qualité des données historiques et des incertitudes associées, nous nous ne pouvons pas discriminer les différentes méthodes basées sur l'information pluviométrique. **Pour résumer, nous pouvons affirmer que l'ajustement d'une loi statistique directement sur les débits de pointe conduit à sous-estimer le risque global et que l'extrapolation fournie par les méthodes basées sur l'information pluviométrique est cohérente avec la distribution empiriques des données historiques (données de validation).**
- **En ce qui concerne la méthode Multi-Fractales, nous pouvons observer des résultats en terme de volumes sensiblement plus faibles que ceux des autres méthodes.** De plus, par rapport aux pointes de crue, cette méthode fournit des résultats similaires aux distributions Gumbel et GEV.

En ce qui concerne les perspectives, un autre axe de recherche important serait aussi d'étendre la comparaison à des bassins versants plus nivaux (i.e. bassins versants des alpes) pour voir comme les différentes méthodes peuvent prendre en compte la composante nivale dans la détermination du risque de crue.

Enfin il serait intéressant d'inclure dans les méthodes testées les approches PMP/PMF par maximisation. Ce travail n'a pu être réalisé dans le cadre du projet ExtraFlo (absence de partenaire français maîtrisant cette technique), mais une comparaison entre les estimations PMP/PMF et SCHADEX a pu être menée dans le cadre de l'action européenne Cost FloodFreq (Lawrence et al. 2013)

## 5. BIBLIOGRAPHIE

- Y. AUBERT : Estimation des valeurs extrêmes de débits par la méthode SHYREG. Réflexions sur l'équifinalité dans la modélisation de la transformation pluie en débit. Thèse de doctorat. Université Pierre et Marie Curie, thèse de doctorat, pp. 316, 2012
- A. BEN-ZVI : About "évaluation des crues extrêmes dans les régions de faibles précipitations" by guillot, p. (1979). in : The hydrology of areas of low precipitation (proceedings of the canberra symposium, december 1979), 79-86. IAHS publ. no. 128. Journal des Sciences Hydrologiques, 25(3):331, 1980.
- M. BERAN : Letter to the editor on "the gradex method". Journal des Sciences Hydrologiques, 26(2) : 223–224, 1981.
- P. BERNARDARA : Multifractal analysis in hydrology, Application to time series. Éditions Quæ ed. Update Sciences & Technologies. 2007, Versailles.
- A. BIAOU : De la Meso-échelle à la Micro-échelle: Désagregation spatio-temporelle multifractale des précipitations. 2004, Ecole de Mines de Paris.
- O. CAYLA: Probability calculation of design floods and inflows - SPEED. Waterpower 1995, San Francisco, California 1995.
- CFGB: Design flood determination by the gradex method. Bulletin du Comité Français des Grands Barrages News 96, 18th congress CIGB-ICOLD n2, nov:108, 1994.
- M.I.P De Lima : Multifractals and the temporal structure of rainfall. 1998, Agricultural University: Wageningen. p. 229.
- D. DUBAND : Evaluation des risques de fortes précipitations sur les régions alpines françaises selon la saison - utilisation du gradex. AISH Red Book, 106:383–395, 1973.
- D. DUBAND et R. GARÇON : Extreme precipitation values and their frequencies : can we rely on our estimates ? In CIGB. Symposium on Dams and Extreme Floods. Granada, Granada, 1992.
- D. DUBAND *et al.* : Évaluation des crues extrêmes et de la crue de projet par la méthode du gradex. 16th Congrès International des Grands Barrages, San Francisco, June 1988, 4: Question 63 R.60, 1988.
- D. DUBAND *et al.* : Unit hydrograph revisited : an alternate iterative approach to UH and effective precipitation identification. Journal of Hydrology, 150(1):115–149, septembre 1993.
- F. GARAVAGLIA *et al.* : Introducing a rainfall compound distribution model based on weather patterns sub-sampling. Hydrology and Earth System Sciences, 14(6) : 951–964, 2010.
- F. GARAVAGLIA : Méthode SCHADEX de prédétermination des crues extrêmes. Méthodologie, applications, études de sensibilité. Université de Grenoble, thèse de doctorat, pp. 381, 2011.
- F. GARAVAGLIA *et al.* : Reliability and robustness of rainfall compound distribution model based on weather pattern sub-sampling. Hydrology and Earth System Sciences, 15(6) : 519-532, 2011.
- R. GARÇON : Prévion opérationnelle des apports de la Durance à Serre-Ponçon à l'aide du modèle MORDOR. La Houille Blanche, 5:–, 1996.
- F. GOTTARDI : Estimation statistique et réanalyse des précipitations en montagne. Utilisation d'ébauches par types de temps et assimilation de données d'enneigement. Application aux grands massifs montagneux français. Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2009.
- D. GUILLOT : Letter to the editor on "the gradex method". Journal des Sciences Hydrologiques, 26(3): 334–336, 1981.
- D. GUILLOT : The arguments of the gradex method : a logical support to assess extreme floods. AISH Red Book, 213:287–298, 1993.
- D. GUILLOT et D. DUBAND : La méthode du gradex pour le calcul de la probabilité des crues à partir des pluies. In Colloque international sur les crues et leur évaluation, Leningrad, 15 au 18 août, IASH, 1967.
- P. GUILLOT : Évaluation des crues extrêmes dans les régions de faibles précipitations. AISH Red Book, 128:79, 1979.
- P. Hubert et al. : Introduction aux fractals et multifractals, in Cahier GANG-France. 1994, URA-CNRS 1367. p. 59.
- INONDHIS-LR : analyse régionale des précipitations et crue anciennes en Languedoc-Roussillon. Rapport scientifique de fin de contrat, pp. 90, 2007
- M. LANG : Les chroniques en hydrologie. Modélisation comparée par un système de gestion de bases de données relationnel et orienté-objet. Traitements de base et intervalles de confiance des quantiles de crues. Techniques d'échantillonnage par la méthode du renouvellement. Thèse de doctorat, Université J. Fourier Grenoble, 1995.
- M. LANG : New developments with AGREGEE, a statistical model using hydrometeorological information. In Oberlin G., Desbos E. (dir.), FRIEND projects H-5-5 et H-1-1. Third report 1994 – 1997. Cemegref Editions 1997.
- M. LANG et J. LAVABRE : Estimation de la crue centennale pour les plans de prévention des risques d'inondations. Update Sciences & technologies, 2007.
- M. LANG et al. : Extrapolation of rating curves by hydraulic modelling, with application to flood frequency analysis. Hydrological Science Journal. Special Issue. "Court of Miracles of Hydrology", Engref Paris, 18-20 June 2008, 55(6), 883-898, 2010.
- D. LAWRENCE et al., 2013. Comparison of precipitation/runoff methods for design flood estimation in two Norwegian catchments. NHES, special number "Advanced Methods for Flood Estimation in a Variable and Changing Environment", soumis.

- J. LAVABRE *et al.* : SHYREG : une méthode pour l'estimation régionale des débits de crue. application aux régions méditerranéennes françaises. Ingénierie EAT, 97–111, 2003.
- D. LAVALLEE : On the determination of the codimension function, in Scaling, fractals and nonlinear variability in geophysics. 1991, eds. D. Schertzer and S. Lovejoy, Kluwer press. p. 99-109.
- C. LLIASAT *et al.* : Floods in Catalonia (NE Spain) since the 14<sup>th</sup> century. Climatological and meteorological aspects from historical documentary sources and old instrumental records. Journal of hydrology, 313 (1-2) : 25-43, 2005.
- S. LOVEJOY : Functional box-counting and multiple elliptical dimensions in rain. Science, 1987. 235: p. 1036-1038.
- C. MICHEL : Extrapolation par la méthode du Gradex. Note du 3 mai 1982, Cemagref Antony. 1982.
- M. MARGOUM: Estimation des crues rares et extrêmes : le modèle AGREGEE. Conceptions et premières validations. PhD, Ecole des Mines de Paris, 1992.
- M. MARGOUM *et al.* : Estimation des crues rares et extrêmes : principes du modèle AGREGEE. Hydrologie Continentale, 9 (1):83–98, 1994.
- R. NAULET : Utilisation de l'information des crues historiques pour une meilleure prédétermination du risque d'inondation. Application au bassin de l'Ardèche à Vallon Pont-d'Arc et St Martin d'Ardèche. Université Joseph Fourier et Université du Québec, pp. 322, 2002.
- R. NAULET *et al.* : Flood frequency analysis on the Ardèche river using French documentary sources from the two last centuries. Journal of Hydrology, 313:58–78, 2005.
- L. NEPPEL *et al.* : Connaissance régionale des pluies extrêmes. : Comparaison de deux approches appliquées en milieu méditerranéen. Comptes Rendus Geosciences, 339(13):820–830, 2007.
- L. NEPPEL *et al.* : Flood frequency analysis using historical data: accounting for random and systematic errors. Hydrological Science Journal, 55 :2, 192-208, 2010.
- E. PAQUET *et al.* : Evolution of GRADEX method: improvement by atmospheric circulation classification and hydrological modelling, La Houille Blanche, 5, 80–90, 2006.
- O. PEYRASTRE : Faisabilité et utilité du recueil de données historique pour l'étude des crues extrêmes de petits cours d'eau. Étude du cas de quatre bassins versant affluents de l'Aude. École Nationale Des Ponts et Chaussées, thèse de doctorat, pp 390, 2005.
- D. W. REED : On the gradex method of estimatif extreme floos. Dams & Reservoirs, 1:17–19, 1994.
- D. SCHERTZER *et* S. LOVEJOY S. : Physical modeling and analysis of rain and clouds by anisotropic scaling multiplicative processes. Journal of Geophysical Research, 1987. 92(D8): p. 9693-9714.
- D. SCHERTZER *et al.* : Non linear variability in geophysics: scaling and multifractal processes. 1993: Insitutit d'études scientifiques de Cargèse.
- A.M. Yaglom : The influence of the fluctuation in energy dissipation on the shape of turbulent characteristics in the inertial interval. Sov. Phys. Dokl., 1966. 2: p. 26-30.



## ANNEXE 1 - DESCRIPTIF DES METHODES DE PREDETERMINATIONS

### 1. ANALYSE FREQUENTIELLE STANDARD

Ils sont ici présentés les distributions classiques de la théorie des valeurs extrêmes qu'ils ont été employé dans cette action pour la prédétermination des pluies et des débits.

#### 1.1. LA DISTRIBUTION GEV ET LA LOI DE GUMBEL

La distribution généralisée des valeurs extrêmes (GEV) est caractérisée par la fonction de répartition suivante :

$$F(x|\mu, \lambda, \xi) = 1 - \exp\left(-\left[1 + \xi\left(\frac{x-\mu}{\lambda}\right)\right]^{-1/\xi}\right)$$

où  $\mu$  est le paramètre de position,  $\lambda$  celui d'échelle et  $\xi$  celui de forme.

Le domaine des paramètres est :  $\{(\mu, \lambda, \xi) : \mu, \xi \in \mathfrak{R}, \lambda > 0\}$ .

Un cas particulier de la distribution GEV est la loi de Gumbel (GUM) où le paramètre de forme  $\xi$  est égal à 0. Sa fonction de répartition est :

$$F(x|\mu, \lambda) = \exp\left[-\exp\left\{-\left(\frac{x-\mu}{\lambda}\right)\right\}\right]$$

Comme la théorie des valeurs extrêmes le suggère, ces deux distributions seront ajustées sur l'échantillon de maxima par blocs de la variable aléatoire considérée, e.g. pluie ou débit.

#### 1.2. LA DISTRIBUTION GP ET LA LOI EXPONENTIELLE

La distribution généralisée de Pareto (GP) est caractérisée par la fonction de répartition suivante :

$$F(x|\lambda, \xi) = 1 - \left(1 + \xi \frac{x}{\lambda}\right)^{-1/\xi}$$

où  $\lambda$  est le paramètre d'échelle et  $\xi$  celui de forme.

Le domaine des paramètres est :  $\{(\lambda, \xi) : \xi \in \mathfrak{R}, \lambda > 0\}$ .

Un cas particulier de la distribution GP est la loi Exponentielle (EXP) où le paramètre de forme  $\xi$  est égal à 0. Sa fonction de répartition est :

$$F(x|\lambda) = 1 - \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right)$$

Comme la théorie des valeurs extrêmes le suggère ces deux distributions seront ajustées sur l'échantillon au-dessus d'un seuil donné.

#### 1.3. LA LOI SOMME DE DEUX EXPONENTIELLES

La loi Somme de deux Exponentielles (STE, acronyme anglais de Sum of Two Exponentials) est la distribution historiquement utilisée dans la méthode du Gradex (Duband *et al.*, 1988 ; Duband et Garçon, 1992). Sa fonction de répartition est la suivante :

$$F(x|\alpha, \beta, a, c) = 1 - \alpha \exp\left(-\frac{x}{a}\right) - \beta \exp\left(-\frac{x}{c}\right)$$

où  $a$  et  $c$  sont les paramètres d'échelle (i.e.  $a$  le gradex de la première exponentielle et  $c$  celui de la deuxième). Les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  doivent respecter la condition :  $\alpha + \beta = 1 + F_0$ , où  $F_0$  est la fréquence empirique de pluie nulle. Cette loi sera ajustée sur l'échantillon journalier de la variable aléatoire considérée.

## 2. APPROCHE HISTORIQUE

L'intérêt d'une recherche historique sur les inondations est d'élargir le champ chronologique d'analyse en recueillant des informations sur les événements majeurs ayant déjà eu lieu dans le passé. Il est possible de compléter les informations sur les crues récentes issues du réseau de mesure hydrométrique à partir de différentes sources d'information :

- relevés hydrométriques de niveaux de crue par les services d'annonce des crues qui ont été créés à partir de la seconde moitié du XIXe siècle ;
- laisses de crues issues de marques sur le terrain, de plans techniques ;
- témoignages sur l'ampleur d'inondation passées, avec des informations indirectes permettant de reconstituer un niveau de submersion.

Ces niveaux de crue sont ensuite convertis en débit, à partir de courbes de tarage existantes, que l'on corrigera dès lors que la configuration des écoulements (topographie de la section du lit mineur et du lit majeur, influence d'ouvrage hydraulique) a changé au cours du temps. Il est alors possible de compléter une série de débits de crue de la période récente (habituellement sur quelques dizaines d'années) par une collection de crues historiques réputées les plus fortes sur une période historique d'une centaine d'années voire davantage.

Le traitement statistique est spécifique aux données historiques, pour prendre en compte que l'on ne dispose pas d'un échantillon continu d'observations mais seulement des plus fortes crues connues sur une période, et pour exploiter le fait que les données historiques de crue sont entachées d'une erreur de reconstitution plus forte que celle des crues récentes. Deux effets opposés interviennent : le fait de disposer d'informations sur une période plus large conduit à réduire l'incertitude d'échantillonnage (fonction de la taille de l'échantillon), alors que l'introduction de débits de crue imprécis détériore la qualité de l'estimation.

Différents cadres statistiques ont été développés pour exploiter dans un modèle probabiliste un échantillon mixte  $\mathbf{X}$  composé de crues récentes  $x_k$  en continu sur quelques dizaines d'années, et d'une collection discrète  $y_k$  de quelques crues historiques sur une période bien plus large (un siècle voire davantage). Dans le cadre du projet ExtraFlo, nous avons utilisé un modèle bayésien avec la formulation classique pour la fonction de vraisemblance :

$$p(\mathbf{X} | \mu, \lambda, \xi) \propto \prod_{k=1, N_s} f(x_k | \mu, \lambda, \xi) \prod_{k=1, N_h} [F(y_k^+ | \mu, \lambda, \xi) - F(y_k^- | \mu, \lambda, \xi)] [F(S | \mu, \lambda, \xi)]^{NA_h - N_h}$$

avec une loi GEV de distribution  $F(x | \mu, \lambda, \xi)$ . Le premier terme multiplicatif correspond aux  $N_s$  crues  $x_k$  de la période systématique ( $N_s$  années), alors que le second correspond à chacune des  $N_h$  crues historiques  $y_k$ , considérées connues dans un intervalle  $[y_k^-; y_k^+]$ , et le troisième représente les  $(NA_h - N_h)$  crues non connues sur la période historique ( $NA_h$  années) supposées inférieures à un seuil de perception  $S$ . Un modèle d'erreur multiplicatif a été rajouté (cf. Neppel *et al.*, 2010 ; Lang *et al.*, 2010) pour représenter les erreurs de reconstitution des débits de crues issues de la transformation pluie-débit.

Suivant les séries traitées, l'information historique permet de réduire l'incertitude d'estimation sur les crues extrêmes ou au contraire ne doit pas être utilisée lorsque les incertitudes sur la reconstitution des débits de crues anciennes sont trop fortes. Sur la figure suivante issue de Lang *et al.* (2010), on trouve la distribution des crues sur le Gardon d'Anduze à Anduze, et le Gardon de Saint-Jean à Saint-Jean, avec trois périodes : 1980-2004 (1<sup>ière</sup> ligne), 1892-2004 (2<sup>ième</sup> ligne), 1741-2004 (3<sup>ième</sup> ligne). Lorsque l'on ignore les erreurs sur la reconstitution des débits de crue (intervalle de confiance en rose), le fait de rajouter des données anciennes permet toujours de réduire l'incertitude sur l'estimation de la distribution des crues. Lorsqu'elles sont prises en compte via un modèle multiplicatif d'erreur (intervalle de confiance en lignes noires pointillé), on voit que l'incertitude est réduite en passant de la première à la seconde période, mais qu'elle augmente en rajoutant des crues trop incertaines sur la période 1741-1891.

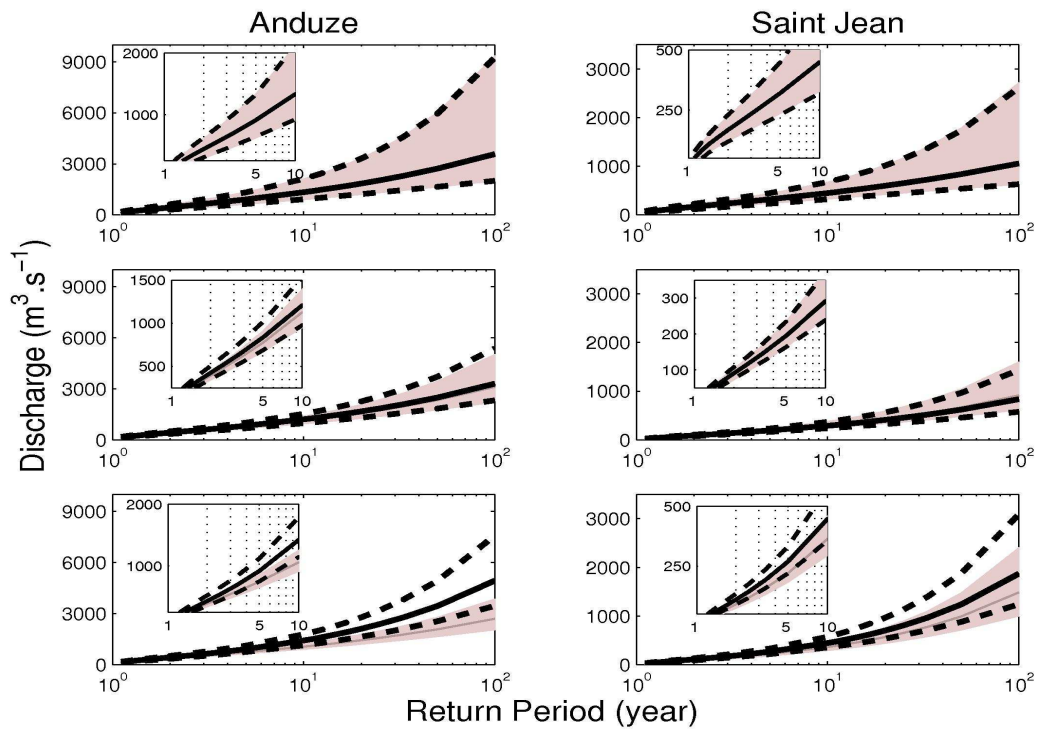


Figure 19 – Comparaison de distributions de crue sur le Gardon d'Anduze et le Gardon de Saint-Jean, avec ou sans prise en compte des erreurs sur les courbes de tarage des débits

### 3. METHODE GRADEX

#### 3.1. CONTEXTE HISTORIQUE

Pour le dimensionnement des organes d'évacuation des crues de ses barrages, EDF a utilisé, depuis la fin des années 1960, la méthode du GRADEX. Celle-ci a été développée à EDF et a fait l'objet d'importantes modifications méthodologiques depuis. La méthode du GRADEX bénéficie d'une importante notoriété nationale et a fait l'objet de nombreuses publications : Guillot et Duband (1967); Duband (1973); Guillot (1979, 1981, 1993), pour n'en citer que quelques-unes.

#### 3.2. PRINCIPES GÉNÉRAUX

La méthode du GRADEX, en s'appuyant sur l'information pluviométrique, constitue une amélioration substantielle des méthodes de prédétermination des crues basées sur le traitement statistique des seules valeurs de débits observés. Pour autant, malgré ces qualités, il ne s'agit que d'un modèle et nécessairement il s'appuie sur certaines approximations de modélisation qui peuvent être déclinées selon les trois hypothèses suivantes :

**Hypothèse 1.** La fonction de répartition des précipitations tombant sur le bassin, au pas de temps retenu comme pertinent, est asymptotiquement à décroissance exponentielle simple. Elle peut être décrite par une loi de Gumbel ou par une loi exponentielle selon le type d'échantillonnage utilisé, respectivement maxima annuels ou valeur sup-seuil (Figure 20 : courbe grise en pointillés). Par conséquent, nous pouvons définir le GRADEX comme le paramètre d'échelle de cette distribution. Plus précisément, il correspond à la pente de la fonction de répartition sur un graphique représentant la pluie en fonction du logarithme de la période de retour.

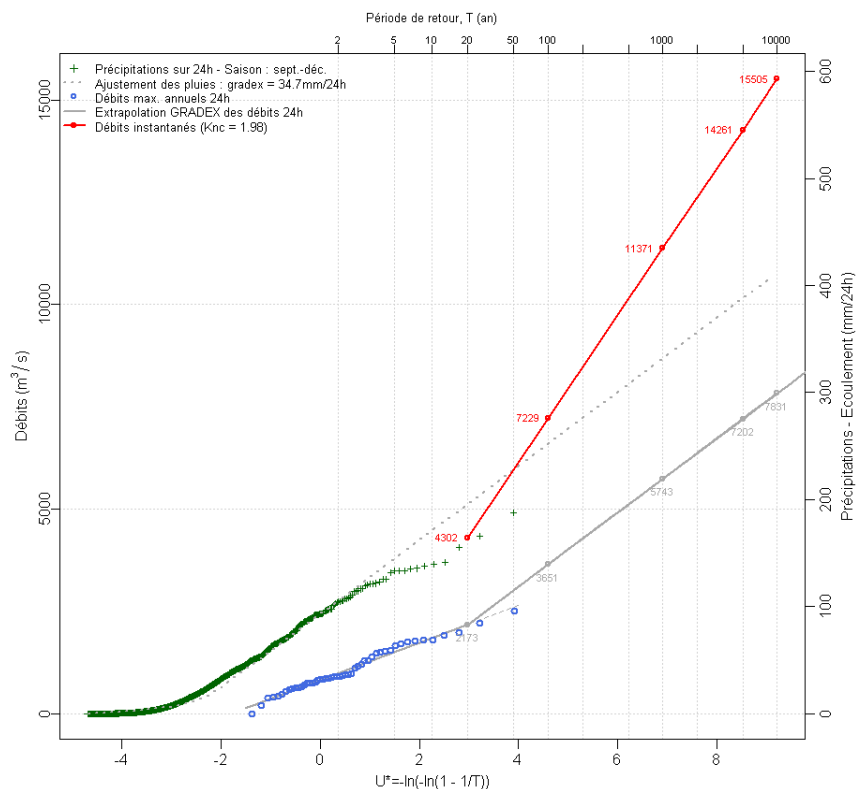


Figure 20 – Méthode GRADEX : synthèse d'une l'étude.

**Hypothèse 2.** Le déficit d'écoulement, défini comme la différence entre le volume d'eau précipité et le volume d'eau écoulé à l'exutoire du bassin versant pendant un pas de temps équivalent, n'augmentent plus, en valeur moyenne, au-delà d'une certaine valeur de pluie. En d'autres termes, nous pouvons dire que, à partir d'un certain état de saturation du bassin versant, la distribution du déficit d'écoulement ne dépend plus de la valeur de pluie ou de débit. Cette hypothèse se traduit graphiquement par un parallélisme entre la fonction de répartition des précipitations et celle des écoulements au pas de temps équivalent (Figure 20 : courbe grise en trait plein). Le point de départ de cette extrapolation, nommé point pivot, est fixé à une période de retour  $T_p$  comprise, le plus souvent, entre 10 et 50 ans selon le bassin versant considéré.

**Hypothèse 3.** Quelle que soit sa fréquence ou durée de retour, le débit de pointe de crue (valeur maximale observée) peut être calculé à partir du volume écoulé (sur le pas de temps considéré) en utilisant un coefficient multiplicatif moyen caractéristique du bassin versant (Figure 20: courbe rouge). Ce coefficient, nommé coefficient de forme ou coefficient d'affinité, peut être estimé à partir des hydrogrammes de crues enregistrés sur le bassin versant.

La communauté hydrologique française, sans être uniformément adepte de la méthode, s'est accordée sur le fait que le GRADEX propose un compromis précision-robustesse précieux pour l'ingénieur en charge du dimensionnement d'ouvrages. Cependant, au niveau international, de nombreuses critiques ont été soulevées vis-à-vis de cette méthode, pour cela on peut faire référence aux publications de Ben-Zvi (1980), Beran (1981) et Reed (1994).

Globalement, d'un point de vue opérationnel d'EDF, on peut constater un retour d'expérience positif : il n'y a aucune indication significative de la sous-estimation de la crue de projet sur un ensemble de 450 dimensionnements d'ouvrage en France métropolitaine sur la période 1965-2010.

## 4. METHODE AGREEGEE

### 4.1. PRINCIPES GÉNÉRAUX

Différents développements de la méthode du Gradex ont été proposés (CFGB,1994), notamment pour répondre à certaine critique mais aussi pour élargir son domaine fréquentiel d'application aux événements de période de retour inférieure à 1000 ans. Nous pouvons mentionner le modèle Agregée (Margoum, 1992 ; Margoum *et al.*, 1994 ; Lang 1995, 1997), qui respecte le parallélisme entre les distributions de pluie et de débit (deuxième hypothèse de la méthode du GRADEX). Plus précisément, le modèle Agregée comporte trois domaines fréquentiels (Figure 21) :

- **le domaine des crues observables**, utilisant l'information des débits observés en continu et éventuellement celle de crues historiques ;
- **le domaine des crues rares**, issu d'un raccordement progressif entre le premier et le troisième domaine ;
- **le domaine des crues extrêmes**, piloté par la distribution des pluies.

Au-delà du troisième domaine, on considère que l'extrapolation est trop importante pour pouvoir être réalisée par une approche probabiliste. Des approches par maximisation de l'aléa (PMP, courbes enveloppes, géomorphologie et paléohydrologie) peuvent éventuellement prendre le relais.

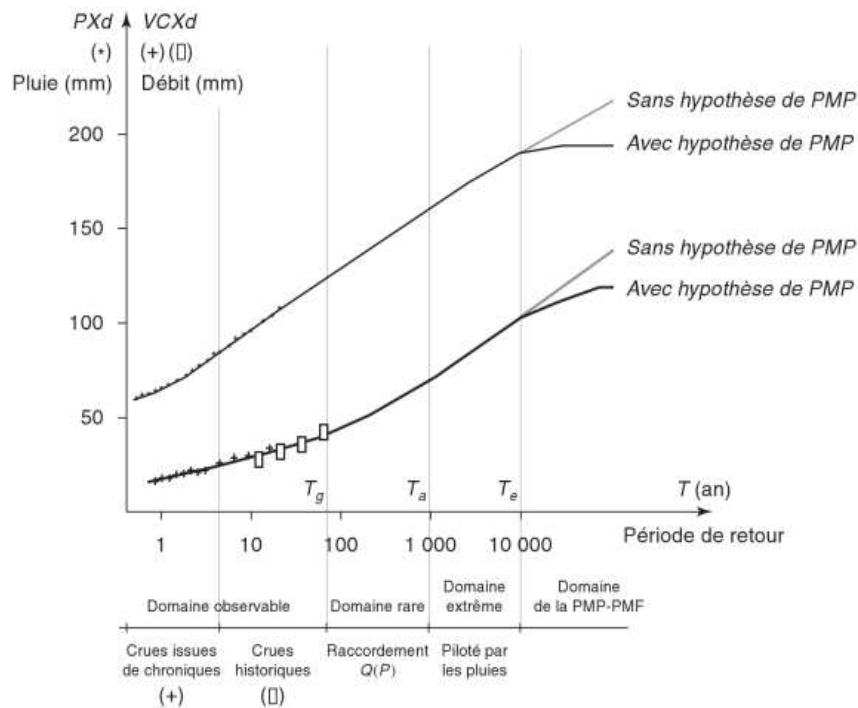


Figure 21 – Méthode AGREEGEE : domaines fréquentiels (depuis Lang et al (2007)).

Au-delà du premier domaine, pour  $T > T_g$ , la formulation analytique du quantile est la suivante :

$$VCXd(T) = VCXd(T_g) + \frac{\alpha_z(d)}{K_p - K_q} \left[ K_p \ln\left(\frac{T + K_p}{T_g + K_p}\right) - K_q \ln\left(\frac{T + K_q}{T_g + K_q}\right) \right]$$

avec :

$$\bullet \begin{cases} K_p = \left( \frac{\alpha_z(d)}{\alpha_p(T_g, d)} - 1 \right) \cdot T_g \text{ et } K_q = \left( \frac{\alpha_p(T_g, d)}{\alpha_q(T_g, d)} - 1 \right) \cdot T_g \\ \alpha_z(d) = \lim_{T \rightarrow \infty} \alpha_p(T, d) \\ \alpha_p(T, d) = \frac{\partial PXd(T)}{\partial \ln T} (T = T_g) \text{ et } \alpha_q(T, d) = \frac{\partial VCXd(T)}{\partial \ln T} (T = T_g) \end{cases}$$

Les paramètres  $a_p(T, d)$  et  $a_q(T, d)$ , appelés respectivement pseudo-gradex des pluies et des débits, représentent la pente de la distribution (des pluies ou des débits) dans un graphique de Gumbel pour la période de retour  $T$ . Lorsque les pluies suivent une loi de Gumbel (pseudo-gradex  $a_p(T, d)$  constant égal à  $a_e(d)$ ), l'expression devient (avec  $K_p = 0$ ) :

$$VCXd(T) = VCXd(T_g) + a_e(d) \ln \left( 1 + \frac{a_q(T_g, d)}{a_e(d)} \cdot \frac{T - T_g}{T_g} \right)$$

expression proposée par Michel (1982), dite du Gradex esthétique.

Le modèle Agregée conserve donc l'hypothèse de base de la méthode du Gradex (sur la loi conditionnelle des pertes), tout en proposant des développements sur l'extrapolation progressive de la distribution des crues à partir du seuil  $T_g$ , et enfin la généralisation de la loi des pluies à des distributions à caractère asymptotiquement exponentiel (existence d'une limite  $a_e(d)$ ).

## 5. METHODE SPEED

### 5.1. PRINCIPES DE LA METHODE SPEED

La méthode SPEED (Système Probabiliste d'Etude par Evénements Discrets) est fondée d'une part sur une analyse particulière et régionale des pluies et, d'autre part, sur la relation probabiliste mise en évidence par ARTELIA (ex SOGREAH) entre pluie et débit de crue. Elle présente donc deux aspects distincts :

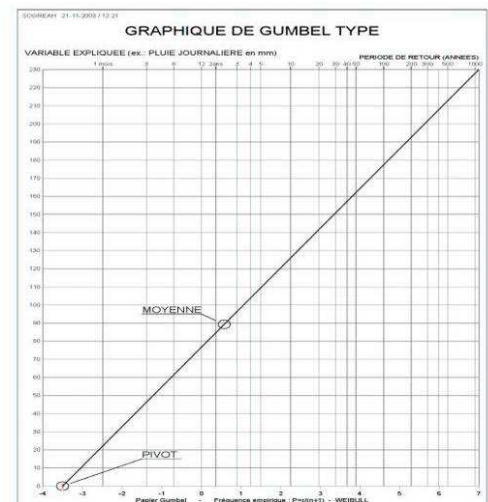
#### ANALYSE REGIONALE DES PLUIES

Les maxima annuels des pluies journalières, comme d'autres phénomènes météorologiques accidentels, suivent une loi de Gumbel ; L'ajustement des pluies observées sur graphique de Gumbel se traduit par une droite définie par  $Y_0$ , le pivot de la distribution et  $P_{jm}$ , la valeur moyenne des pluies journalières. Le pivot est la valeur de la variable de Gumbel pour laquelle la droite de Gumbel coupe l'axe  $P_j=0$ .

On a pu démontrer qu'il est lié au nombre d'événements indépendants d'où sont tirés les maxima annuels. Ce nombre est donc invariant sur une région donnée.

Ce paramètre  $Y_0$  étant connu, la caractérisation des pluies sur le bassin ne dépend plus alors que de la seule valeur moyenne des pluies et des éventuelles cassures liées à l'orographie ou à des phénomènes de goutte froide.

Cette méthode a donc, en principe, l'avantage de réduire l'incertitude sur la détermination des pluies.



#### RELATION PROBABILISTE PLUIE-DEBIT

Les recherches théoriques ont montré que la formulation suivante est compatible avec les théories de l'hydrogramme unitaire et du Gradex, en tenant compte de précipitations réparties en intensité-durée-fréquence par une loi classique de Montana (cf graphique associé page suivante)

$$Q_T = \frac{S^{0,75}}{12} [C_0 (P_T - P_{0i})] \quad \text{si } T < T_0 \quad \quad \quad Q_T = \frac{S^{0,75}}{12} (P_T - P_0) \quad \text{si } T > T_0$$

Avec :  $Q_T$  = débit de pointe de crue de période de retour  $T$  (années),  $P_T$  = précipitation journalière ponctuelle de même période  $T$ ,  $S$  = superficie du bassin versant, en  $km^2$ ,  $P_0$  = seuil probabiliste de ruissellement, en mm,  $P_{0i}$  = pertes initiales, en mm,  $C_0$  = coefficient de proportionnalité des faibles crues aux pluies.

La détermination de ces différents paramètres s'effectue par comparaison des pluies journalières  $P_j$  et de la variable  $Q_{re}$  appelée « débit réduit » et calculée comme suit :

$$Q_{re} = \frac{12 \cdot Q}{S^{0,75}}$$

Le déroulement d'une étude hydrologique selon SPEED est le suivant.

### 5.2. ANALYSE REGIONALE DES MAXIMA ANNUELS DES PLUIES JOURNALIERES

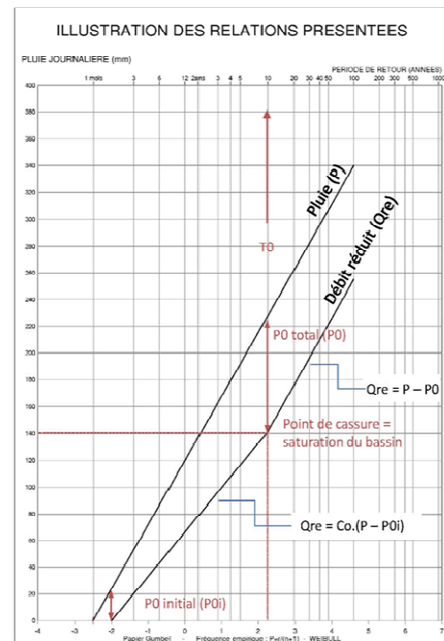
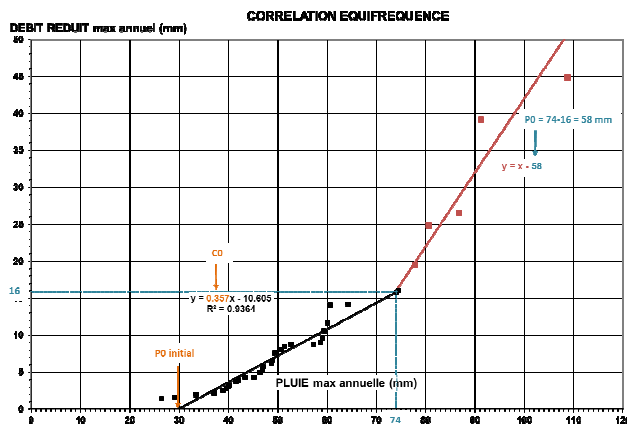
1. Lister les stations pluviométriques à analyser, extraire les données associées de la banque Publiothèque de Météo France.
2. Déterminer le pivot  $Y_0$  (ou les pivots en zone de transition entre deux zones d'influence distinctes) :
3. Dans le cas où le pivot n'est pas connu sur le secteur d'étude, sélectionner les stations ne présentant a priori pas de cassure.
4. Déterminer pour chacune d'elles le pivot à l'aide de la détermination de la droite de Gumbel par la méthode des moments.
5. Déterminer l'intervalle de confiance à 80% de la valeur du pivot.
6. Rechercher ensuite la valeur du pivot qui intercepte au moins 80% des intervalles de confiance.



- Établir les ajustements sur graphique de Gumbel et définir les cassures éventuelles par une analyse de la géographie et de la variation spatiale des Gradex.

### 5.3. ANALYSE DE LA RELATION PROBABILISTE PLUIE-DEBIT

- Lister les stations Hydrométriques, extraire les données associées de la banque Hydro de la DREAL/DIREN.
- Transformer les débits instantanés en débits réduits
- Comparer pluies et débits réduits par corrélation équiréquence (détermination des coefficients  $C_0$ ,  $P_{0i}$ ,  $P_0$ ) par graphique EXCEL.



- Déterminer les ajustements finaux des débits réduits par application des coefficients aux ajustements des pluies représentatives de la pluviométrie sur le bassin étudié.
- En déduire les valeurs caractéristiques du débit réduit (c'est-à-dire pour des périodes de retour particulières).
- Calculer les débits de pointes caractéristiques aux points du bassin de superficie drainée  $S_{BVi}$  par la formule suivante :

$$Q_i(T) = \frac{S_{BVi}^{0.75} \cdot Q_{Re}(T)}{12}$$

## 6. METHODE SCHADEX

### 6.1. CONTEXTE HISTORIQUE

Le développement de La méthode SCHADEX (Simulation Climato-Hydrologique pour l'Appréciation des Débits EXtrêmes) est une évolution de la méthode RADEX et son développement a été mené de 2004 à 2006 à EDF-DTG ce qui a permis d'aboutir à une version opérationnelle de la méthode (Paquet *et al.*, 2006, Garavaglia, 2011). SCHADEX est la méthode de référence pour le calcul de la crue de projet servant au dimensionnement des évacuateurs des barrages d'EDF, ayant été utilisée, depuis 2007, dans plus de 70 études de crues extrêmes.

### 6.2. PRINCIPES GÉNÉRAUX

SCHADEX est une méthode probabiliste d'estimation des crues extrêmes qui combine, au moyen d'une simulation stochastique événementielle, un modèle probabiliste de pluies extrêmes basé sur des types de temps et un modèle hydrologique conceptuel. La méthode a été développée pour estimer les crues de temps de retour de  $10^2$  à  $10^4$  ans pour des bassins de quelques kilomètres carrés à plusieurs milliers, en zone de relief.

En parcourant avec le modèle hydrologique une longue chronique observée de précipitations et températures, on décrit la variabilité des états de saturation du bassin, sans faire d'hypothèse sur l'alternance de séquences sèches / humides. On remplace chaque épisode de pluie observé par un événement simulé dont la valeur (et non la probabilité) a été tirée au hasard, ce qui permet de simuler efficacement de nombreux épisodes pluvieux intenses survenant dans toutes les conditions hydrologiques possibles.

L'étude est menée à un pas de temps approprié, proche de la durée typique des crues issues d'événements pluvieux intenses (typiquement tel que le rapport pointe / volume des plus grosses crues soit voisin de 1.5).

SCHADEX travaille avec une pluie spatiale, combinaison linéaire de pluies observées sur ou autour du bassin, qui permet de prendre en compte l'abatement spatial des événements intenses. Les événements pluvieux simulés sont définis sur trois pas de temps : la pluie centrale a la valeur la plus forte, elle est suivie et précédée de deux valeurs plus faibles, les pluies adjacentes. Ceci constitue un événement pluvieux centré (Figure 22).

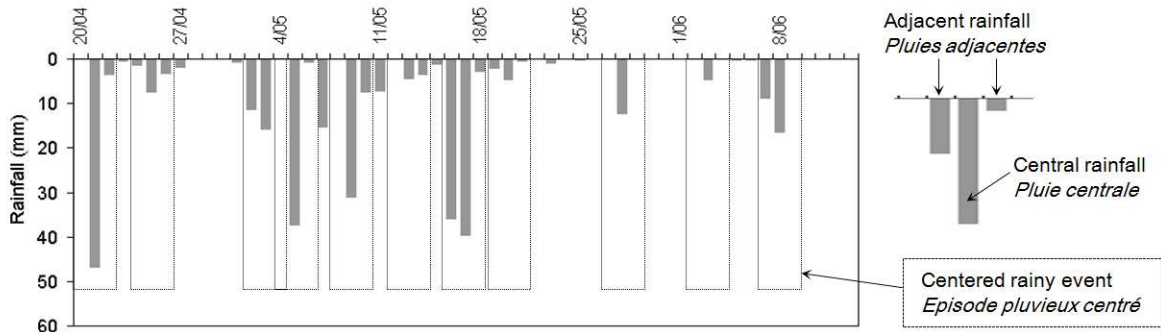


Figure 22 – Méthode SCHADEX : épisode pluvieux centré.

### 6.3. DONNÉES REQUISES

Un minimum de 20 ans d'observations pluviométriques au pas de temps de l'étude est nécessaire à l'ajustement robuste du modèle probabiliste des pluies. Pour l'utilisation de la distribution par type de temps MEWP, un catalogue des types de temps applicable à la climatologie du bassin devra être établi. Une chronique d'au moins 15 ans de débits moyens naturels à l'exutoire du bassin est requise pour la calibration du modèle hydrologique et la validation des crues simulées. Des hydrogrammes de crues significatives (idéalement 30 à 50 crues) sont en outre nécessaires au calcul du coefficient de forme. Ces données sont complétées par une chronique de température de l'air pour la modélisation de l'évapotranspiration et de la neige.

#### 6.3.1. MODÈLE PROBABILISTE DE PLUIE

SCHADEX utilise la distribution MEWP (Multi-Exponential Weather Patterns) pour la description probabiliste des pluies centrales (Garavaglia *et al.*, 2010). Huit circulations atmosphériques typiques mais contrastées (les types de temps) ont été identifiées pour la France et, chaque journée depuis 1948 a été affectée à l'un de ces types de temps.

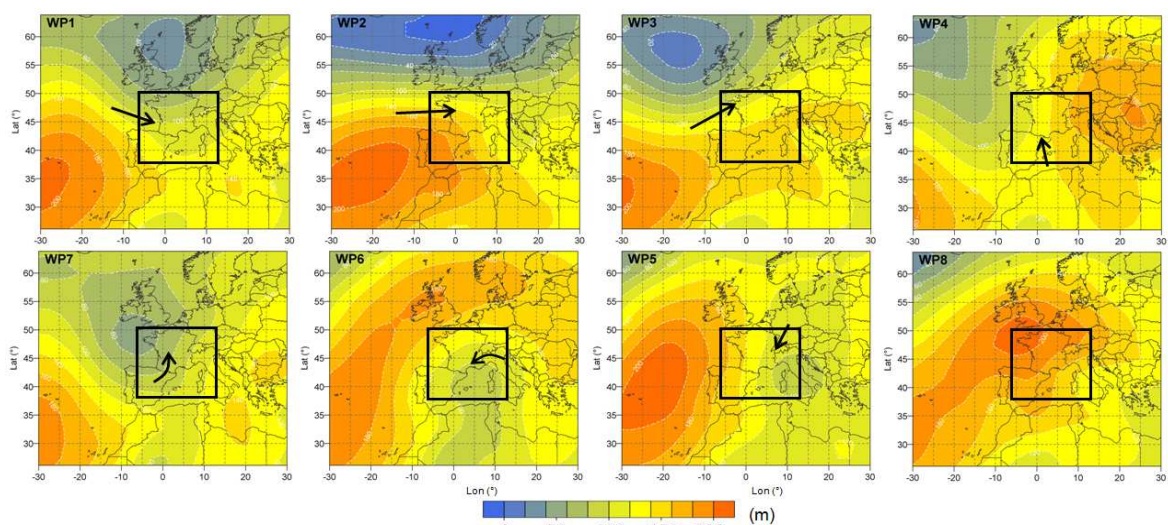


Figure 23 - Méthode SCHADEX : types de temps de la distribution MEWP – champs géopotentiels 1000hPa moyens.

Pour la pluie spatiale étudiée, trois à quatre saisons sont définies, puis la chronique pluviométrique est divisée en sous-échantillons, supposés plus homogènes, correspondant à chaque type de temps. Sur chaque distribution marginale par type de temps, une loi exponentielle est ajustée sur les quantiles élevés (généralement au dessus du quantile 70% des pluies non nulles). La distribution MEWP est la composition des huit lois marginales, pondérées par la fréquence d'occurrence relative de chaque type de temps.

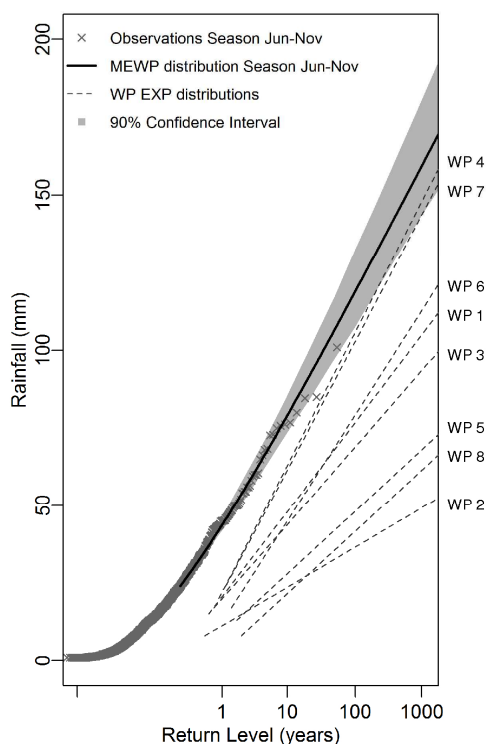


Figure 24 - Méthode SCHADEX : distribution MEWP des pluies de Juin à Novembre à Lyon (1953-2005).

Les performances de la distribution MEWP ont été étudiées sur une vaste base de données pluviométriques (Garavaglia *et al.* 2011). Sa fiabilité (capacité d'attribuer une probabilité correcte aux plus fortes observations) et sa robustesse (stabilité des résultats à des modifications des données d'entrée) ont été étudiées, en comparaison avec d'autres modèles courants : exponentielle, Pareto Généralisée (GP), etc. Les statistiques établies prouvent l'intérêt d'un échantillonnage par type de temps et montrent les bonnes performances de lois exponentielles utilisées dans ce contexte. En particulier, à fiabilité équivalente, la distribution MEWP est plus robuste que son équivalente MGPWP construite avec des lois GP.

### 6.3.2. MODÈLE PLUIE-DÉBIT

SCHADEX et a été développé et majoritairement appliqué avec le modèle hydrologique MORDOR (Garçon, 1996). C'est un modèle conceptuel global, à réservoirs. Ses données d'entrées sont, au pas de temps de l'étude, une pluie spatiale et une température de l'air. Il représente les principaux processus hydrologiques : évapotranspiration, ruissellement rapide et retardé, vidange de nappe, accumulation et fonte de neige, etc. Il est utilisé par EDF depuis près de 15 ans en études et prévisions opérationnelles hydrologiques.

Pour chaque étude, les paramètres du modèle sont optimisés automatiquement et expertisés par le chargé d'études, pour représenter au mieux les débits observés d'une période représentative. Une attention particulière est portée à la saisonnalité des débits représentés, à la distribution des quantiles élevés et aux plus grandes crues observées.

### 6.3.3. PROCÉDÉ DE SIMULATION

Chaque épisode pluvieux centré de la chronique de simulation (15 ans au minimum de pluie et température) est remplacé tour à tour par un épisode simulé : la pluie centrale est tirée au hasard entre 1 et une valeur extrême, et les pluies adjacentes sont calculées à partir de ratios pluies adjacentes/centrales tirés au hasard selon leur distribution empirique. Les trois pluies de l'épisode simulé sont alors substituées aux valeurs observées dans la chronique, le reste de la chronique restant inchangé. Une simulation à partir de cette chronique modifiée est réalisée avec le modèle hydrologique, et le volume maximal simulé pour cet événement est stocké.

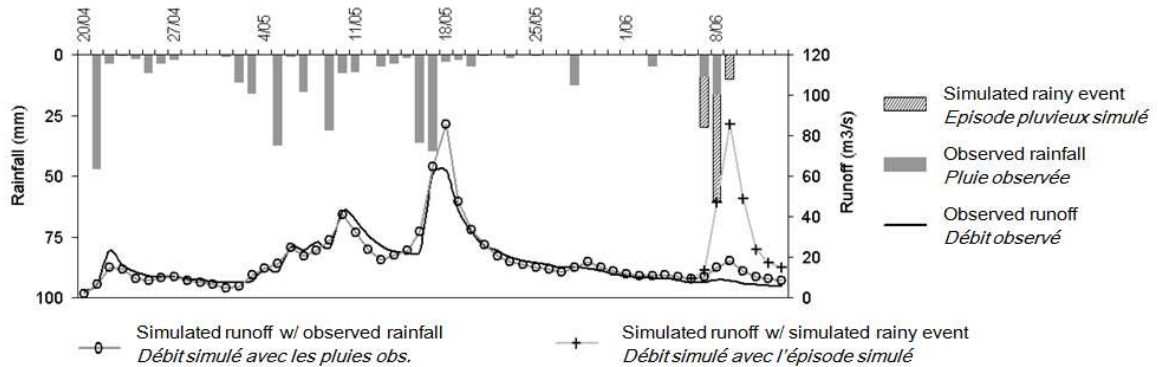


Figure 25 - Méthode SCHADEX : principe de la simulation de crues.

Ce procédé est répété plusieurs centaines de fois (avec des tirages différents) pour chaque épisode pluvieux observé, ce qui permet de simuler plusieurs millions de crues au total. La probabilité affectée aux crues simulées est la probabilité de l'épisode pluvieux générateur, qui combine la probabilité de la pluie centrale générée (au sens de la distribution MEWP) et celle des ratios entre la pluie centrale et les pluies adjacentes.

À l'issue de la simulation, la fonction de répartition des volumes de crues simulées est calculée et comparée à la distribution des crues observées. Les débits de pointe sont ensuite calculés en appliquant un rapport pointe-volume (coefficient de forme) identifié sur une sélection de crues observées. Comme pour les volumes, la fonction de répartition des débits de pointe simulés est établie et confrontée aux observations. Les valeurs aux quantiles extrêmes (couramment, de 102 à 104 ans) sont finalement identifiées.

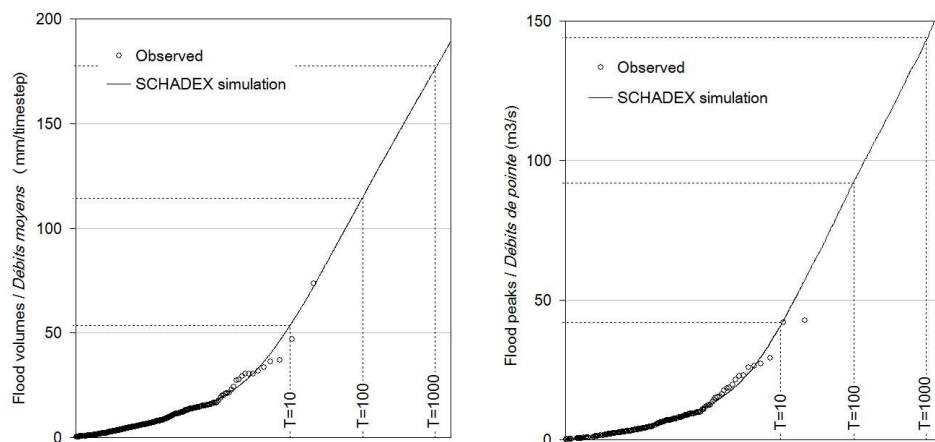


Figure 26 – Méthode SCHADEX : distributions de volumes et de débits de pointe observés et simulés.

## 7. METHODE SHYREG

### 7.1. LE GENERATEUR DE PLUIE

SHYREG est une méthode développée pour la connaissance régionale des débits de crue de différentes durées et de différentes fréquences. La méthode utilisée associe un simulateur de pluies horaires et une modélisation simple de la pluie débit. L'information des paramètres nécessaires est contenue dans des surfaces appelées pixels de 1 km<sup>2</sup>.

Chaque pixel est caractérisé par 3 variables (NE, DTOT, PJMAX), qui permettent de paramétrer le simulateur de pluie horaire en tout point de la zone étudiée.

- NE : traduit l'occurrence des événements de chaque saison
- PJMAX : traduit l'intensité de la pluviométrie de chaque saison
- DTOT : traduit la durée des événements pluvieux de chaque saison

### 7.2. LA TRANSFORMATION PLUIE DEBIT

La transformation de la pluie en débit est réalisée à l'aide du GR-Distribué simplifié Figure 27 . C'est un modèle conceptuel à 3 paramètres, dont trois paramètres sont fixés au pixel.

- Le premier paramètre A qui correspond à la capacité du réservoir A est déterminé en fonction de PJMAX.
- Le second paramètre est le paramètre de transfert qui est fixé à 100 mm en hiver et 50 mm en été.
- Nous fixons à 30% de la capacité initial du réservoir de transfert, B en chaque début d'évènement.
- **Il reste à déterminer la valeur du taux initial d'eau dans le réservoir de production, S0/A.**

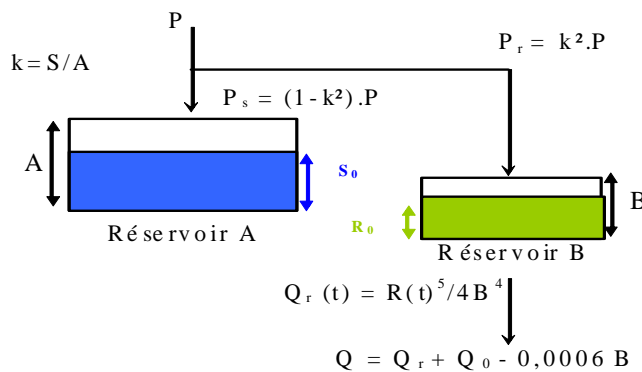


Figure 27 - Le modèle GR simplifié

### 7.3. L'AGGLOMERATION DES QUANTILES DE DEBITS

Pour obtenir le débit à l'exutoire d'un bassin versant, il est nécessaire de définir une règle d'agglomération des débits des pixels qui le composent. L'agglomération des quantiles des pixels d'un bassin versant donné pour estimer le quantile de débit à l'exutoire du bassin versant n'est une pratique classique. Elle nous amène à proposer la notion de fonction d'abattement des quantiles. Elle est basée sur la sommation des quantiles associée à un abattement en fonction de la surface. (Équation 1).

$$\text{Pour } d > 24 h \quad Q(d, T) = \bar{q}(d, T) \cdot S \cdot \frac{1 + a}{1 + a \cdot S^{b \cdot K_j \cdot (1 - S^{0.5})}}$$

$$\text{Pour } d < 24 h \quad Q(d, T) = Q(24 h, T) + \left[ \bar{q}(d, T) - \bar{q}(d = 24 h, T) \right] \cdot S \cdot \frac{1 + a}{1 + a \cdot S^{b \cdot K_p \cdot (1 - S^{0.5})}}$$

Équation 1 - La fonction d'abattement des quantiles de débits

Avec :

S : surface du bassin versant

Q(d,T) : débit moyen de durée d et de période de retour T, calculé à l'exutoire du bassin versant par la fonction d'abattement

$\bar{q}(d, T)$  : débit moyen du pixel du bassin versant simulé de durée d et de période de retour T.

Les coefficients de la fonction d'abattement des quantiles ont été optimisés sur 1723 bassins versants sur l'ensemble de la France avec  $K_j=0.55$  et  $K_p=1.50$

#### **7.4. CONCLUSION**

La méthode nécessite de caler uniquement un seul paramètre celui du modèle hydrologique, soit  $S0/A$ . Le calage du modèle se fait sur 6 quantiles de débits : les débits de pointe (période de retour 2, 5 et 10 ans) et les débits journaliers (période de retour 2, 5 et 10 ans).

## 8. APPROCHE MULTI-FRACTALES

L'analyse multifractale est un cadre approprié pour traiter et modéliser des séries présentant une corrélation temporelle de longue durée et une distribution non-gaussienne des observations. Elle introduit notamment la notion d'invariance d'échelle, c'est-à-dire le lien qui existe entre une mesure et l'échelle de cette mesure. Pour décrire les observations, le formalisme multifractal introduit la notion de singularité, notée  $\gamma$ , définie comme suit :

$$\gamma = \log_{\lambda}(\varepsilon_{\lambda})$$

La singularité  $\gamma$  est une transformation logarithmique en base  $\lambda$  des observations,  $\varepsilon$  mesurées à l'échelle  $\lambda$ . L'échelle  $\lambda$  est définie comme l'échelle d'agrégation temporelle du phénomène

$$\lambda = \frac{T1}{T2}$$

Où  $T2$  représente l'échelle d'étude la plus grande, et  $T1$  l'échelle plus fine à laquelle le phénomène est observé et à laquelle  $\lambda$  correspond. Les singularités  $\gamma$  étant définies, nous nous intéressons à la loi de probabilité théorique qui les concerne, à travers le concept de fonction de codimension, notée  $c(\gamma)$ . Dans le cas le plus général, la fonction de distribution de probabilité qui décrit une variable environnementale dépendent de l'échelle  $\lambda$ . Dans le cas multifractal, elle prend une forme particulière invariante d'échelle, notamment

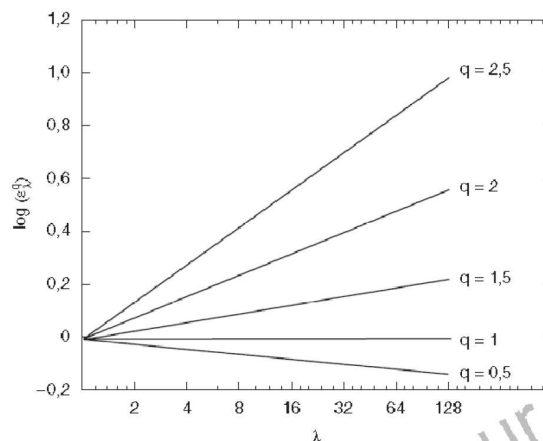
$$Pr(\varepsilon_{\lambda} > \lambda^{\gamma}) = \lambda^{-c(\gamma)}$$

Une fois définie la fonction  $c(\gamma)$  on est capable de calculer la probabilité au dépassement de la variable  $\varepsilon$  pour n'importe quelle échelle d'observation  $\lambda$ . Le modèle multifractal universel, Schertzer et Lovejoy (1987) proposent une forme de paramétrisation de la fonction  $c(\gamma)$

$$c(\gamma - H) = C1 \left( \frac{\gamma}{C1\alpha'} + \frac{1}{\alpha'} \right)^{\alpha'}$$

qui dépend des trois paramètres  $H$ ,  $\alpha$  et  $\alpha'$ . Plusieurs méthodes existent pour estimer ces trois paramètres, Lovejoy *et al.* (1987) et Lavalée *et al.* (1991) ont respectivement proposé les méthodes de functional box-counting et de probability distribution multiple scaling pour l'estimation de la fonction  $c(\gamma)$ , d'autres techniques basées sur l'estimation des moments de la fonction  $c(\gamma)$  existent et elles sont présentées dans Lavalée *et al.* (1991) et De Lima (1998).

Pour la correcte application de la méthode multifractale, il faudra vérifier que la propriété d'invariance d'échelle est vérifiée pour la série en objet et sur quelle plage d'échelles. On vérifiera donc que les moments empiriques de différents ordres,  $q$ , de la série en objets, suivent une loi de puissance en fonction des échelles, comme indiqué dans la figure suivante :



On remarquera aussi que la fonction  $c(\gamma)$  change sa forme au delà de la valeur  $\gamma_D$  et elle devient

Cet effet étant du à la divergence des moments de la série, préconisée dans la théorie des cascades multiplicatives, Yaglom (1966). Ces cascades représentent en effet des modèles capables de reproduire des séries multifractales. Il conviendra donc d'estimer les paramètres  $q_D$  et  $\gamma_D$  pour vérifier les limites d'applicabilité de la formule classique de  $c(\gamma)$ . Des considérations pour l'estimation de ces deux paramètres supplémentaires sont reportées dans Bernardara *et al.* (2007).