

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.8 « Hydrogrammes de crue. Simulation de cotes dans une retenue »

Date : Décembre 2012 + corrections Août 2013

Rapport réalisé par :

⁽¹⁾ EDF/DTG

Avec la participation de :

⁽²⁾ Irstea, Centre d'Aix-en-Provence, OHAX

⁽³⁾ HYDRIS hydrologie

Auteurs :

E. Paquet¹, Y. Aubert^{2,3}



HYDRIS
hydrologie

TABLE DES MATIÈRES

1.	INTRODUCTION	5
2.	AMENAGEMENT FICTIF DU TECH	5
2.1.	CARACTERISTIQUES DU BASSIN VERSANT	5
2.1.1.	Caractéristiques morpho-climatiques	5
2.1.2.	L' <i>aiguat</i> de 1940	7
2.2.	CARACTERISTIQUES DE L'AMENAGEMENT	8
2.3.	MODELE HYDRAULIQUE DE L'AMENAGEMENT	10
3.	ESTIMATION DES CRUES EXTREMES – METHODE SCHADEX	10
3.1.	DONNEES DE L'ETUDE	11
3.2.	PLUIE DE BASSIN	12
3.2.1.	Calcul de la pluie de bassin	12
3.2.2.	Ajustement MEWP	12
3.3.	MODELE PLUIE-DEBIT	14
3.4.	SIMULATION SCHADEX – DISTRIBUTION DES DEBITS JOURNALIERS	14
3.5.	COEFFICIENT DE FORME DES CRUES	15
3.5.1.	Coefficient de forme constant	16
3.5.2.	Coefficient de forme variant – modèle dit « Kv-Kc »	16
3.6.	SIMULATION SCHADEX – DISTRIBUTION DES DEBITS DE POINTE	17
3.7.	DYNAMIQUE DES CRUES SIMULEES PAR SCHADEX	18
3.7.1.	Distribution des rapports QX/QJ	19
3.7.2.	Analyse des crues millénales simulées	19
3.7.3.	Commentaires sur les différentes approches du coefficient de forme	21
4.	SIMULATION DE COTES EXTREMES - SCHADEX	22
4.1.	ESTIMATION DES COTES INITIALES	22
4.2.	SIMULATION DES COTES EXTREMES	22
4.2.1.	Mécanisme de simulation	22
4.2.2.	Résultats de la simulation	23
4.2.3.	Étude de sensibilité	27
4.2.4.	Conclusions sur les simulations de cotes basées sur SCHADEX	29
5.	SIMULATION DE COTES EXTREMES – SHYPRE	30
5.1.	LA METHODE SHYREG	30
5.2.	LA METHODE SHYPRE	30
5.2.1.	Passage de SHYREG à SHYPRE	30
5.2.2.	Résultats du calage du modèle hydrologique de SHYPRE	31
5.3.	PAS DE TEMPS DE L'ETUDE POUR LA GESTION DU BARRAGE	32
5.3.1.	Prise en compte de l'occurrence des événements par mois	32
5.3.2.	Estimation de la cote du plan d'eau initiale et du débit de base avant chaque événement simulé	33
5.4.	SIMULATION DES COTES EXTREMES	35
5.4.1.	Hydrogrammes simulés par SHYPRE	35
5.4.2.	Analyse des hydrogrammes simulés par SHYPRE	36
5.4.3.	Analyse des événements supérieures à la cote millénaire (201 m NGF)	36
5.4.4.	Simulation des cotes avec un hydrogramme de forme constante	37
5.4.5.	Conclusions sur les simulations des cotes basées sur SHYPRE	37
6.	COMPARAISON DES RESULTATS	38
6.1.	DISTRIBUTIONS DES DEBITS EXTREMES	38
6.2.	DYNAMIQUE DES CRUES SIMULEES	39
6.3.	COTES EXTREMES	40
7.	CONCLUSION – PERSPECTIVES	42

8. REFERENCES.....	42
ANNEXE 1 – METHODE SCHADEX – AJUSTEMENTS MEWP SAISONNIERS	44
ANNEXE 2 – CALCUL DU COEFFICIENT DE FORME DES CRUES.....	52

1. INTRODUCTION

Le dimensionnement des organes évacuateurs de crue d'un barrage vise à ne pas dépasser, pour un événement hydrologique de référence (par exemple un débit de pointe de temps de retour 1000 ans), une cote de la retenue au-delà de laquelle la sécurité de l'ouvrage est compromise (cote de stabilité dépassée, submersion du barrage etc.).

Une pratique courante de dimensionnement est de simuler hydrauliquement le passage de la crue millénaire (en pointe), avec un hydrogramme de référence et des conditions pénalisantes mais réalistes de remplissage de la retenue. Or, les scénarios hydrologiques les plus pénalisants sont très variables d'un aménagement à l'autre, suivant la conception du barrage, des organes débitants, la conjonction cote haute de la retenue-saison à risque hydrologique, les capacités de laminage etc. Ces scénarios sont caractérisés par de multiples variables (saison, cote initiale de la retenue, volume de la crue, débit de pointe, dynamiques de la crue). Les distributions des quantiles élevés de ces variables sont plus ou moins dépendantes, avec des fortes variations saisonnières. Apprécier la variabilité de ces scénarios au moyen de quelques tests peut être assez réducteur.

Les méthodes de simulations stochastique pluie-débit génèrent un très grand nombre d'événements de crue, de dynamique et de saisonnalité très variables (dans la limite du paramétrage de ces simulations, basé sur la climatologie et les crues observées sur le bassin). Il est donc logique de les coupler à une simulation hydraulique de l'aménagement étudié, de manière à produire la distribution des cotes atteintes dans la retenue du fait des crues simulées. Ainsi, le risque hydrologique peut être étudié à partir des quantiles extrêmes de la variable clé du dimensionnement (la cote), sur une grande variété de scénarios de crue. Ce couplage permet de tester à la fois des hypothèses hydrologiques et des hypothèses de dimensionnement, voire des scénarios de gestion de crue si la conduite de l'ouvrage peut raisonnablement être simulée.

Ce rapport présente les deux études de cotes extrêmes simulées à partir des méthodes SCHADDEX et SHYPRE-SHYREG, pour un aménagement « virtuel » (mais au dimensionnement réaliste) sur le bassin du Tech. Il présente les estimations de débit et celles de la simulation hydraulique des cotes associées, ainsi que des études de sensibilité pour mieux comprendre les mécanismes en jeu.

2. AMENAGEMENT FICTIF DU TECH

Un « aménagement fictif » a été conçu pour les besoins de l'étude, afin de disposer d'un cas test, à un endroit où l'hydrologie des crues présente des caractéristiques intéressantes, et d'un barrage aux dispositifs débitants simples (voire simplistes) et facilement modélisables, et de ne pas « charger » les résultats de l'étude des enjeux d'un aménagement réel.

2.1. CARACTERISTIQUES DU BASSIN VERSANT

L'« Atlas des zones inondables du bassin versant du Tech par la méthode hydrogéomorphologique », établi en 2006 par la Société SIEE pour le compte de la DIREN Languedoc-Roussillon (SIEE, 2006), fournit les éléments suivants :

2.1.1. Caractéristiques morpho-climatiques

Le Tech est un fleuve côtier des Pyrénées-Orientales qui s'écoule d'ouest en est, prenant sa source au pied du Roca Colom (massif du Canigou) et se jetant dans la Méditerranée à Argelès-sur-Mer. D'une longueur de près de 83 kilomètres, il draine un bassin versant de 730 km², de forme allongée. Le réseau hydrographique est bien hiérarchisé, avec un chevelu de cours d'eau élémentaires très fourni, alimentant de nombreux affluents importants qui fournissent au Tech une grosse partie de ses débits, tant liquides que solides. [...]

Prenant sa source vers 2345 m d'altitude, le Tech présente une forte pente dans sa section amont, 11,5% à l'amont de la Parcigoule, environ 8% jusqu'à Amélie-les-Bains, qui diminue sensiblement jusqu'à Céret (1,75 %), avant de se stabiliser à 0,3% à l'aval, permettant le raccord au niveau de base (marin). Il reçoit ses principaux affluents entre Prats-de-Mollo et Céret (Riuferrer, Mondony, Ample, Parcigoule...), dans son parcours montagneux. [...]

D'amont en aval, on distingue :

- le Vallespir, qui se compose du haut Vallespir des sources du Tech à Arles-sur-Tech du moyen Vallespir, d'Arles-sur-Tech à Céret et correspond à la haute vallée montagneuse du Tech
- les plaines du Roussillon qui se composent de la haute plaine du Roussillon ou bas Vallespir, de Céret au Boulou et de la plaine du Roussillon à proprement-dit, du Boulou au littoral et correspond à la basse vallée. [...]

De la source à Céret, le Tech et ses affluents parcourent la partie montagneuse du bassin versant, développée dans le socle paléozoïque, et qu'ils ont découpé en vallées étroites et encaissées. Les pentes des versants sont très fortes, les sommets encadrant la vallée culminant entre 1500 m (versant sud) et 2700 m (versant nord) alors que la vallée du Tech s'écoule entre 735 m à Prats-de-Mollo et 200 m à Amélie-les-Bains. Les plus fortes dénivelées se trouvent sur le flanc gauche de la vallée, avec

près de 2000 m de dénivellation sur 11 km pour la Coumelade (qui descend du flanc sud du massif du Canigou. La pente peut ainsi dépasser 25 % dans les parties hautes. Dans ces conditions topographiques, les cours d'eau présentent des caractères torrentiels marqués (écoulement et morphologie).[...]

La vallée du Vallespir [...], à l'exclusion des hauts massifs, connaît un climat méditerranéen dit altéré (Vigneau, 1986) par suite de l'absence de saison sèche. Relativement abritée des grands vents qui soufflent sur la basse plaine, la moyenne vallée bénéficie d'un grand ensoleillement et de douces températures. Par contre, sa situation intermédiaire entre les hautes montagnes et la basse vallée l'expose à des précipitations intenses et fréquentes.

La station pluviométrique de référence est située au village du Tech, et totalise une hauteur de pluie annuelle de 1080 mm. Les précipitations sont d'une grande variabilité inter-annuelle mais mieux réparties au cours de l'année que ce que connaissent les basses plaines. Les moyennes annuelles décroissent vers l'aval (elles sont 2 fois supérieures dans le Vallespir que sur les plaines du Roussillon), avec 1118 mm à Prats-de-Mollo, 920 mm à Arles-sur-Tech, et 679 mm à Céret (139 m d'altitude).

Concernant les événements pluviométriques marquants, on peut citer les quelques exemples suivants, recensés depuis les années cinquante, qui donnent une bonne idée des hauteurs d'eau précipitées :

[...]

28 et 29 septembre 1968 : 176 mm à Arles, maximum de 307.9 mm au Pas-du-Loup et 342 mm au Mas Toure

10 et 11 octobre 1970 : 186.4 mm à Arles, 260 mm au Mas Toure

23 et 24 décembre 1973 : 150 mm à Arles, 206 mm à Prats-de-Mollo

18 octobre 1977 : 249 mm à Amélie avec un maximum de 270 mm à Saint-Laurent-de-Cerdans

[...]

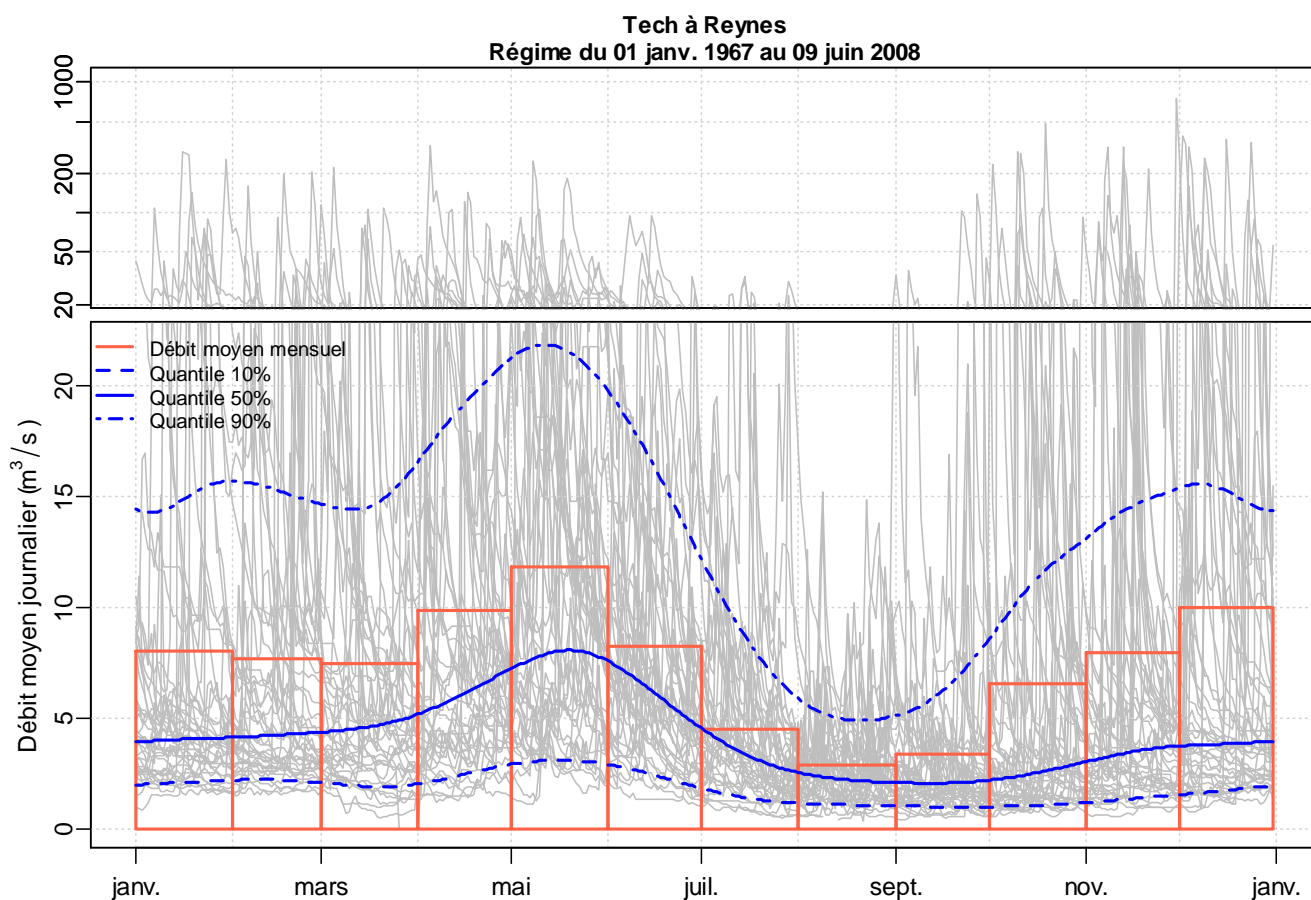
12 novembre 1988 : 245 mm de pluie en 24 h à Amélie

L'épisode de 1940 est bien entendu le plus important dont on ait conservé la trace, avec de 800 à 1200 mm en dans la journée du 17 octobre à l'usine électrique de la Llau et en Haut Vallespir (record européen pour une pluie de 24 h), et un total de 1930 mm sur 5 jours (du 16 au 20/10/1940).

La vallée du Tech est ainsi la plus arrosée du département des Pyrénées-Orientales du fait de sa situation méridionale, de son orientation qui favorise la pénétration des vents humides et de son relief montagneux.

On connaît assez bien aujourd'hui le type le contexte atmosphérique responsable de ces abats d'eau torrentiels : l'établissement d'une situation anticyclonique sur l'Europe Centrale favorise des descentes d'air polaire jusqu'aux latitudes du golfe de Gascogne, lequel affronte les masses d'air chaud subtropicales, qui sont déviées vers la cuvette méditerranéenne et le Golfe du Roussillon. Le vent marin pousse ces masses d'air chaud et humide vers les Pyrénées ; au contact des massifs montagneux, elles s'élèvent et la rencontre de masses d'air froid provoque leur condensation. Ce contraste thermique, accentué par des intrusions d'air sec et froid de secteur nord est à l'origine des précipitations pluvieuses spectaculaires et exceptionnellement neigeuses. Le relief joue donc un rôle essentiel de barrière orographique, qui concentrent les précipitations les plus fortes sur le tiers central du bassin versant (Parcigoule, Coumelade, Riuferrer, Mondony...), tandis que la plaine et le haut bassin sont relativement protégés. [...]

La Figure 1 présente le régime du Tech à Reynès, établi sur les données de 1967 à 2008 :



2.1.2. L' aiguat de 1940

La crue formidable du Tech en 1940 est causée par des précipitations d'une intensité, d'une extension spatiale et d'une durée exceptionnelle, dont le cumul atteint en certains points du Vallespir jusqu'à 1000 mm par jour (flanc sud du Canigou), et 2000 mm en 4 jours. Provoqué par des pluies résultant de la conjugaison d'une perturbation méditerranéenne stationnant 3 à 4 jours et d'un afflux d'air frais venant de l'ouest ou du nord-ouest, l'événement pluvieux qui connaît son paroxysme le 17 octobre au soir est centré sur le Canigou.

La crue engendrée par ces pluies a été très rapide : la montée des eaux a été de 3 m en moins d'une demi-heure à Amélie les bains (d'après Pardé 1941), et les vitesses considérables, en particulier entre La Preste et Arles-sur-Tech. La crue s'est caractérisée par des ondes résultant de la rupture d'ouvrages ou d'amas d'embâcles. Les débits liquides mentionnés dans la littérature sont exceptionnels et seraient compris dans une fourchette de 2500 à 4500 m³/s selon les études. Pour CL Benech (1990), la période de retour de la crue de 1940 serait « entre 150 et 400 ans pour le Tech à l'amont d'Amélie-les-Bains... peut être au-delà pour le Tech amont et certains de ses affluents à l'amont du village El Tech ».

Les précipitations ont eu des impacts considérables sur les versants : la saturation hydrique et le jaillissement de résurgences ont provoqué des glissements de terrain, des « chaldes », qui sont une brusque mise en mouvement des terrains suite à saturation en eau, des ravinements torrentiels généralisés aboutissant à une érosion intense qui a fourni la charge solide aux cours d'eau.

La crue fit 48 victimes et provoqua des dégâts énormes dans toute la vallée du Tech, notamment : endommagement et destruction partielle du réseau de voies de communication, destruction de dizaines de ponts, de deux dépassant 50 m, destruction complète d'immeubles (60 à Arles-sur-Tech et à Amélie, une dizaine à Prats-de-Mollo), d'usines hydroélectriques, de fabriques, de la gare d'Amélie les Bains, d'un casino, et des dégâts importants à plusieurs centaines de maisons. Des terres agricoles furent emportées, érodées, ravinées, ou recouvertes sous un épais dépôt de sédiments.

2.2. CARACTERISTIQUES DE L'AMENAGEMENT

Le barrage étudié serait situé sur le Tech, entre les villages du Pont de Reynès et du Pont de Céret dans le département des Pyrénées Orientales (Figure 2). La surface du bassin versant est de 477 km², Le débit moyen journalier du Tech à Reynès (code banque HYDRO Y0254040), calculé sur la période 1967-2008, s'élève à 7.4 m³/s, soit un débit spécifique de 15.5 l/s/km².

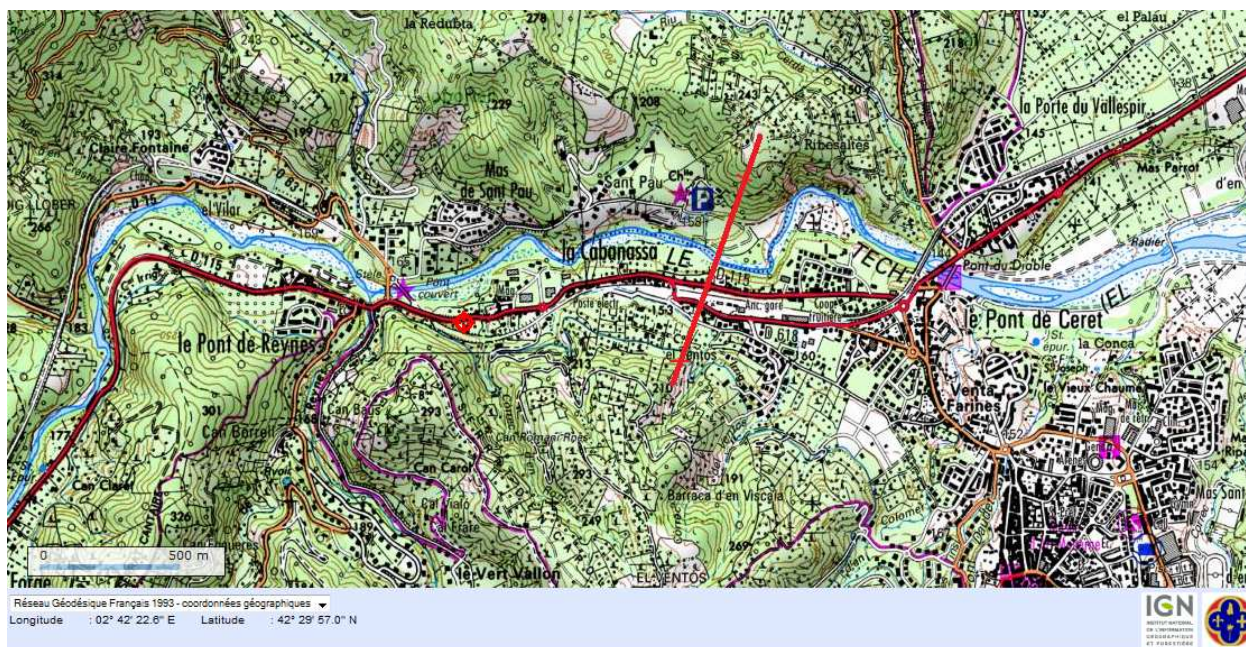


Figure 2 - Localisation du barrage virtuel sur le Tech

Les caractéristiques de l'aménagement ont été définies pour qu'il assure principalement un rôle d'écrêteur de crues et accessoirement de soutien d'étiage pendant les périodes les plus sèches. Il a donc été dimensionné en s'inspirant des barrages de Vinça et de l'Agly, situés dans la même région et qui ont le même rôle vis-à-vis de l'écrêtement des crues. On a donc choisi, par analogie avec Vinça, des dimensions qui permettent un stockage de l'ordre de 3 fois le volume sur 24h d'une crue décennale.

Pour l'évacuateur, on choisit un déversoir simple à seuil libre, dimensionné de façon à ce que la hauteur sur le seuil ne dépasse pas 3 m pour un débit évacué égal à celui de la crue millénaire. La loi de débitance utilisée sera la loi classique de seuil dénoyé :

$$Q_d = \mu_d \cdot L_d \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{3/2}$$

Les caractéristiques choisies sont résumées dans le tableau 1.

Caractéristique	Valeur
Longueur du barrage	705 m
Hauteur du barrage	65 m
Capacité de stockage	93.10 ⁶ m ³
Côte du déversoir	197 m
Longueur déversante L _d	110 m
Coef. de débitance de surface μ _d	0.4

Tableau 1 - Caractéristiques du barrage virtuel

Pour $Q_d \approx 2600 \text{ m}^3/\text{s}$ (débit de pointe millénal estimé par SCHADEX), la cote de la retenue serait donc de 201,5 mNGF pour une hauteur d'eau sur le seuil h_s d'environ 3 m (avec $h_s \approx \frac{2}{3} H$, où $H = \text{cote retenue} - \text{cote seuil}$).

La courbe de capacité du barrage ainsi dimensionné est issue du modèle numérique de terrain du bassin :

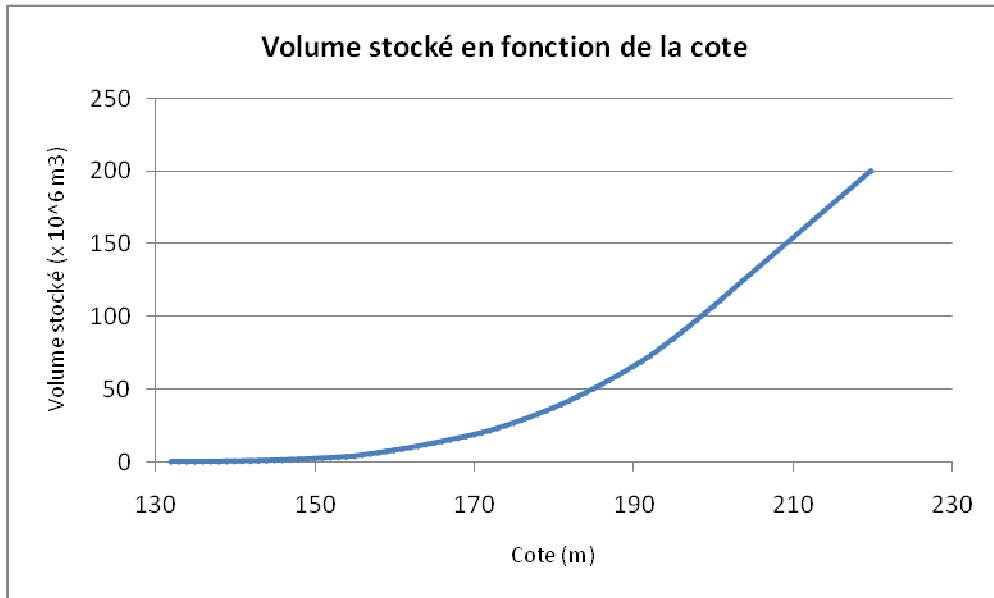


Figure 3 - Courbe de capacité du barrage virtuel

On dote ensuite le barrage d'une vidange de fond permettant de restituer l'eau hors déversement. La vidange de fond est assimilée à un orifice obéissant à la loi suivante :

$$Q_v = \mu_v S_v \sqrt{2gH}$$

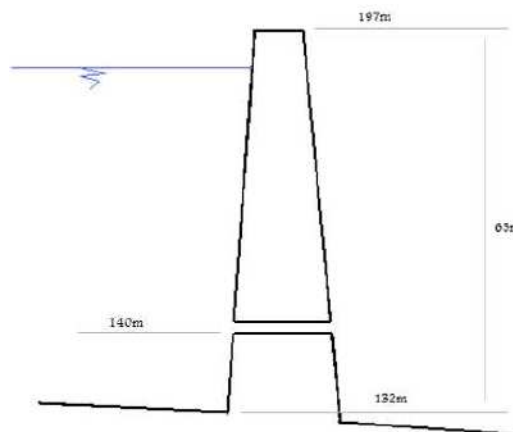


Figure 4 - Cotes caractéristiques de la retenue

Pour avoir une simulation aussi réaliste que possible de la saisonnalité de la cote d'une telle retenue, la surface de l'orifice débitant S_v variera dans l'année de manière à obtenir une évolution annuelle moyenne du volume stocké similaire à celle du barrage de Vinça, avec une retenue d'eau entre Janvier et Août pour éventuellement faire du soutien d'étiage, et une retenue vide à partir de fin Septembre pour être prête à laminier les grosses crues d'automne. La courbe de remplissage du barrage de Vinça est présentée Figure 5 :

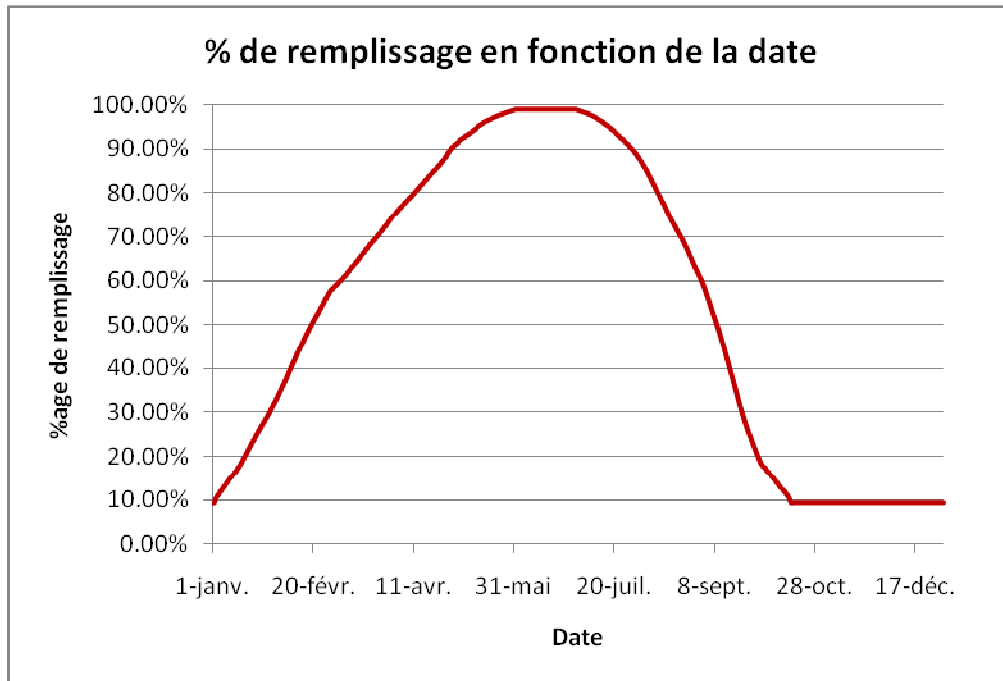


Figure 5 - Courbe enveloppe type du réservoir de VINÇA

Pour déterminer l'évolution de S_v , on simule le fonctionnement hydraulique du barrage (cf. 4.1) à partir des chroniques de débit à Reynès observées d'Octobre 1967 à Octobre 2008 (éventuellement complétées avec les chroniques modélisées par le modèle hydrologique MORDOR calibré pour la simulation SCHADEX). Avec un coefficient de débitance μ_v fixé à 0.6, on règle la valeur de S_v et son évolution dans l'année pour obtenir, en moyenne sur les 41 ans de simulation, une évolution annuelle semblable à celle du barrage de Vinça. La surface débitante S_v vaut donc 1.05 m² de mars à août, et 2.07 m² de septembre à février.

2.3. MODELE HYDRAULIQUE DE L'AMENAGEMENT

Pour simuler l'évolution de la cote de retenue du barrage, on calcule à un pas de temps Δt suffisamment fin (30 minutes pour les simulations basées sur SCHADEX) un bilan hydraulique de l'aménagement qui prend en compte le débit entrant Q_e , le débit déversé Q_d (quand la cote est supérieure à celle de la crête déversante du barrage) et le débit de la vidange de fond du barrage Q_v .

Le volume initial de la retenue est calculé à partir de la cote initiale et de la courbe de capacité de la retenue. Les volumes V (et donc les cotes de retenue correspondante à partir de la courbe de capacité) aux pas de temps suivants sont calculés itérativement en réalisant le bilan de l'eau suivant :

$$V(t+1) = V(t) + \left(\frac{Q_e(t+1) + Q_e(t)}{2} - \frac{Q_d(t+1) + Q_d(t)}{2} - \frac{Q_v(t+1) + Q_v(t)}{2} \right) \Delta t$$

Avec $\Delta Q_e(t+1) = Q_e(t+1) - Q_e(t)$, et de même pour ΔQ_d et ΔQ_v

$$V(t+1) = V(t) + \left[(Q_e(t) - Q_d(t) - Q_v(t)) + \frac{1}{2} (\Delta Q_e(t+1) - \Delta Q_d(t+1) - \Delta Q_v(t+1)) \right] \Delta t$$

Avec un pas de temps suffisamment fin, on suppose que $\Delta Q_e(t+1) \approx \Delta Q_e(t)$ de même pour ΔQ_d et ΔQ_v

Le bilan de l'eau s'écrit donc finalement :

$$V(t+1) = V(t) + \left[Q_e(t) - Q_d(t) - Q_v(t) + \frac{1}{2} (\Delta Q_e(t) - \Delta Q_d(t) - \Delta Q_v(t)) \right] \Delta t$$

3. ESTIMATION DES CRUES EXTREMES – METHODE SCHADEX

On se reportera au rapport de l'Action 7 pour une description méthodologique complète de la méthode SCHADEX. Seules les principales étapes de l'application de la méthode au cas du Tech sont présentées dans ce chapitre.

3.1. DONNEES DE L'ETUDE

La méthode SCHADEX a été appliquée au pas de temps 24h à partir des données suivantes :

Débit :

Série du Tech à Reynès (Saint-Paul-sur-Tech), issue de la Banque HYDRO (ref. Y0254040).

Les débits journaliers sont disponibles depuis 1967, les débits instantanés depuis 1971. En valeurs journalières, la série est continue de 1967 à 2005, mais présente près de 10% de données manquantes depuis.

Pluie :

Les stations pluviométriques suivantes ont été utilisées :

Station	Producteur	Code	Altitude	Début de la série
CERET	Météo-France	66049001	139 m	01/01/1948
PY	Météo-France	66155001	1040 m	01/10/1957
ST MARSAL	Météo-France	66183001	717 m	01/01/1948
LA LLAU	Météo-France	66206002	900 m	01/03/1953
LE TECH	EDF	4456	548 m	01/01/1948

Tableau 2 - Etude SCHADEX du Tech : pluie spatiale

Température :

Les températures minimum et maximum de chaque jour au niveau du point représentatif situé à l'altitude médiane du bassin versant du Tech à Reynès ($z_{50}=907\text{m}$) ont été établies de 1953 à 2005 par interpolation à partir des données issues des postes voisins dans le cadre de la thèse de F.GOTTARDI (températures dites « SPAZM »). La série a été prolongée de 2006 à 2009 au moyen de la station de température de Baillestavy (585m).

La localisation des stations de mesure est présentée dans la Figure 6.



Figure 6 - Localisation des stations de mesure

La courbe hypsométrique du bassin est présentée dans la Figure 7.

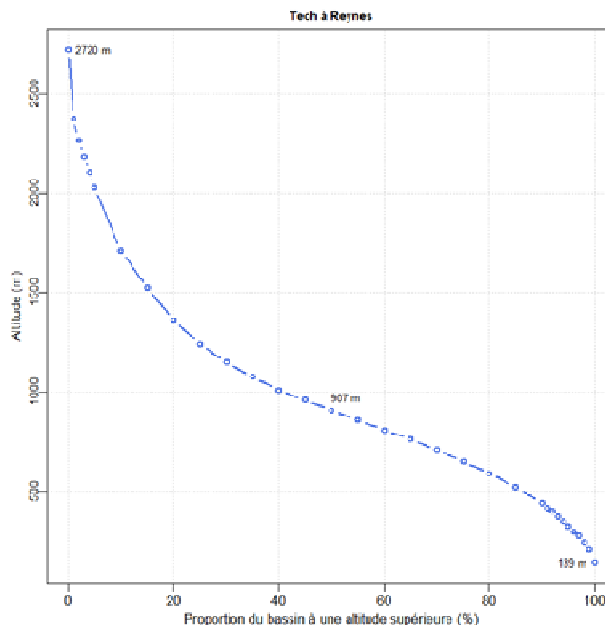


Figure 7 - Courbe hypsométrique du bassin du Tech

3.2. PLUIE DE BASSIN

3.2.1. Calcul de la pluie de bassin

Elle a été calculée par combinaison linéaire de valeurs aux postes sélectionnés, avec des pondérations issues de la méthode des polygones de Thiessen. La somme de ces pondérations, en théorie égale à 1, a été majorée de 25% pour que la pluie de bassin ainsi calculée permette d'établir un bilan hydrique (notamment la valeur de déficit) conforme aux valeurs issues de formules de la littérature (formule de Turc), et aux valeurs établies dans la région pour lors études d'EDF.

Les coefficients adoptés sont présentés dans le tableau suivant :

Stations	Altitudes	Poids
CERET	139 m	0.20
PY	1040 m	0.08
ST MARSAL	717 m	0.21
LA LLAU	900 m	0.34
LE TECH	548 m	0.42

Tableau 3 - Pondération des composantes de la pluie spatiale

L'altitude moyenne pondérée du panier ainsi constitué vaut 691 m. La pluie de bassin moyenne annuelle s'élève à 1030 mm/an, pour un écoulement de 515 mm/an, soit un déficit de l'ordre 515 mm/an.

3.2.2. Ajustement MEWP

Les ajustements ont été établis sur la période 1957-2005, pendant laquelle toutes les composantes sont disponibles (la série de LA LLAU, composante importante de la pluie de bassin, s'interrompt en 2005).

Les gradex(s) mensuels se répartissent comme suit :

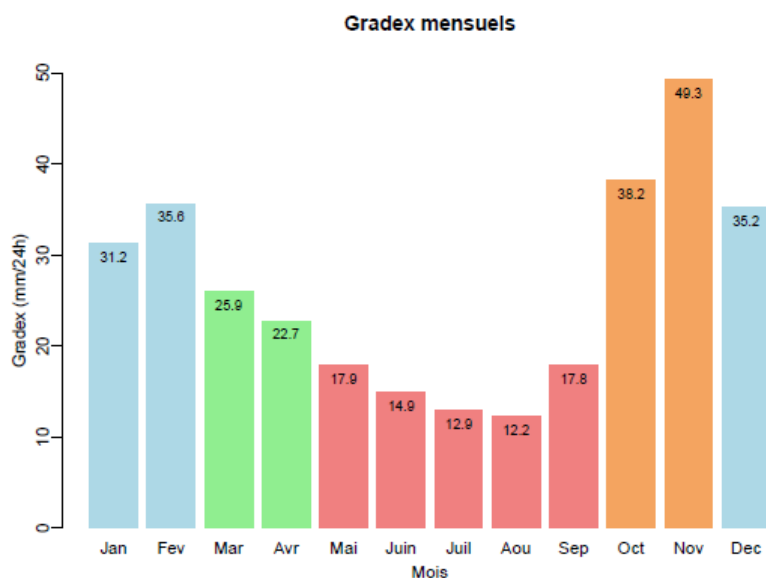


Figure 8 - Pluie spatiale du Tech à Reynès : Gradex mensuels

Quatre saisons ont été distinguées pour ajuster les distributions MEWP : Décembre-Février, Mars-Avril, Mai-Septembre et Octobre-Novembre. A noter que pour constituer des saisons plus homogènes, les jours postérieurs au 15 d'un mois sont affectés au mois suivant. Ainsi, les journées comprises entre le 15 Octobre et le 14 Novembre (compris) sont affectées au mois de Novembre. Pour ces quatre saisons, et au sein de chaque saison, pour chaque type de temps, un ajustement en loi exponentielle simple a été réalisé sur les pluies centrales d'épisode supérieures au quantile 70% (65 % pour la saison 4, Octobre-Novembre) de la sous-population considérée. Les distributions marginales de chaque type de temps ont ensuite été combinées en une distribution dite « composite » (ou MEWP) des pluies centrales pour chaque saison.

Saison	Mois	Pseudo/gradex (mm/24h)
1	Décembre-Février	36.9
2	Mars-Avril	37.0
3	Mai-Septembre	19.2
4	Octobre-Novembre	49.6

Tableau 4 - Pluie spatiale du Tech à Reynès : Pseudo-Gradex saisonniers

Le détail de ces ajustements est présenté dans l'annexe 1.

Pour la saison à risque Octobre-Novembre (donc du 15 Septembre au 14 Novembre), le type de temps 4 (Flux de Sud) est très nettement dominant en terme de risque pluviométrique, avec un gradex dépassant 50 mm/24h, valeur parmi les plus fortes en France métropolitaine pour un bassin de cette taille.

Les quantiles extrêmes de précipitations estimés avec MEWP sont les suivants :

Temps de retour (ans)	PS (mm/24h)
10	174
20	205
50	247
100	279
1 000	388
10 000	500

Tableau 5 - Pluie aux temps de retour remarquables

3.3. MODELE PLUIE-DEBIT

Le modèle pluie-débit MORDOR (dans sa version complète, comprenant les processus hydrologiques liés à la neige) a été calibré sur la période 1991-2005. Sur cette période, le critère de Nash et le coefficient de détermination des variations de débit $R^2(dQ)$ valent respectivement 0.82 et 0.55.

La figure suivante présente, pour les chroniques observées et modélisées, le régime interannuel et la distribution des débits classés :

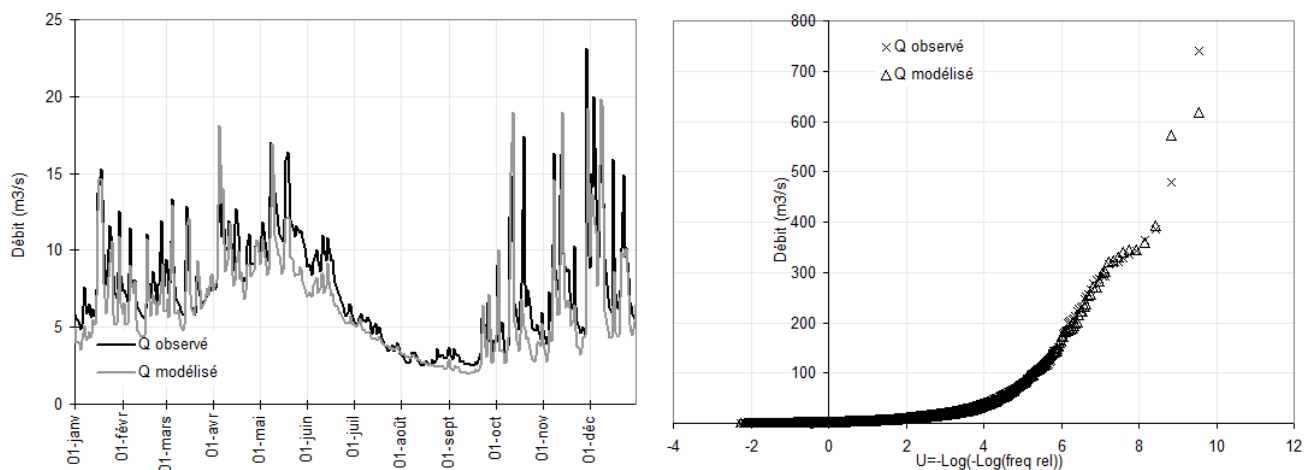


Figure 9 - Régime et distribution des débits observés et modélisés

Le modèle ainsi calibré permet de représenter de manière satisfaisante la saisonnalité des débits et la distribution des fortes valeurs.

3.4. SIMULATION SCHADEX – DISTRIBUTION DES DEBITS JOURNALIERS

Les pluies centrales d'épisode ont été tirées uniformément entre 1 et 620 mm (valeur supérieure à la pluie de temps de retour 100 000 ans, garantissant une bonne robustesse dans la simulation de débits décennaux). Les ratios entre les pluies adjacentes et la pluie centrale des épisodes ont été tirés uniformément parmi 10 valeurs comprises entre 0 et 0.9. L'historique pluie-température de 1968-2008 a été exploré continûment 935 fois, ce qui a permis de simuler près de 2 millions de crues. Chaque événement a été probabilisé à l'aide de la probabilité de la pluie centrale d'épisode de la saison concernée et des probabilités des pluies adjacentes.

La distribution des débits moyens journaliers simulés (non centrés) est présentée ci-dessous. Elle est confrontée aux débits observés entre 1967 et 2005, consécutifs à un épisode pluvieux centré (1623 observations). Aux quantiles observables, la distribution simulée est cohérente avec les observations. Les valeurs aux quantiles extrêmes (temps de retour 100, 1000 et 10 000 ans) sont soulignées sur le graphique.

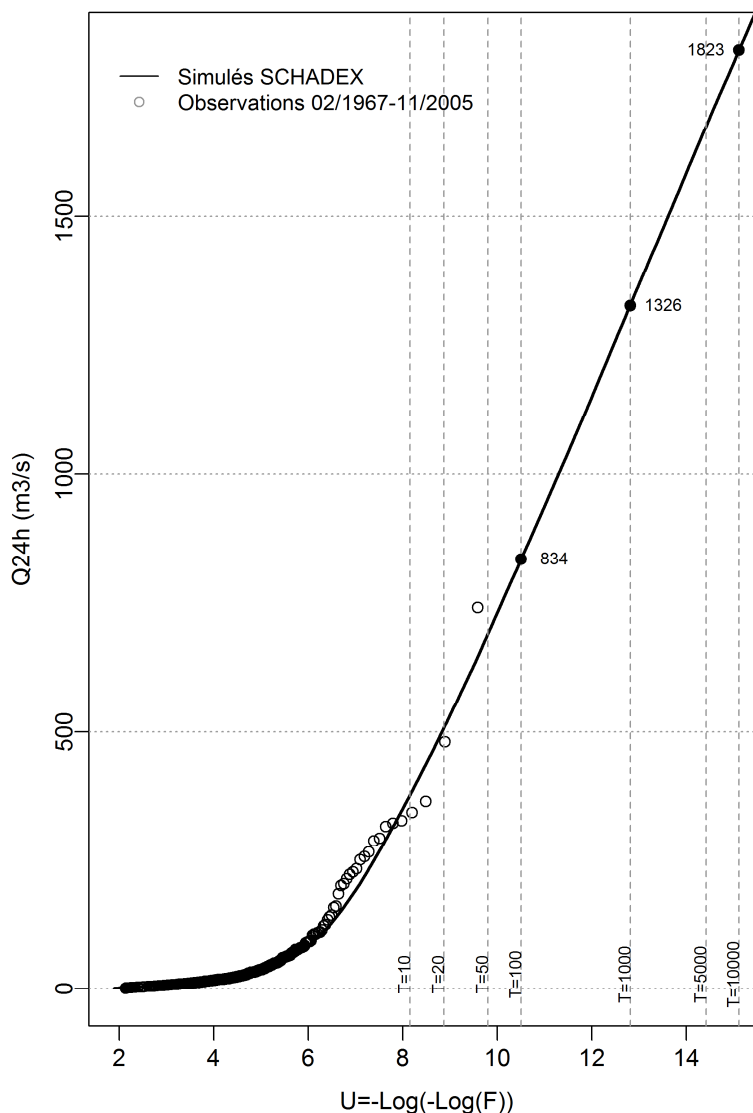


Figure 10 - Distribution SCHADEX des débits journaliers

3.5. COEFFICIENT DE FORME DES CRUES

A partir des données horaires disponibles sur la période 1971-2008, 60 hydrogrammes de crues du Tech à Reynès ont été sélectionnés par dépassement de seuil, de manière à ne retenir que des crues d'intensité significative (soit en moyenne deux crues par an). Parmi ces crues, 48 ont été retenues pour le calcul du coefficient de forme. Leurs caractéristiques sont présentées dans le tableau de l'annexe 2.

Dans ce qui suit, on distinguera souvent des valeurs dites « centrées » de valeurs dites « non centrées ». Par exemple, dans le cas des débits journaliers considérés pour une crue, la valeur centrée sera obtenue en déplaçant autour de la pointe de crue la fenêtre de calcul de 24h de manière à maximiser le débit journalier. Le coefficient de forme ainsi calculé (rapport débit de pointe de la crue / débit journalier) sera donc minimisé par ce procédé, et sera également qualifié de « centré ». D'une crue à l'autre, l'heure de la fenêtre de centrage sera donc variable. A l'inverse, les valeurs non centrées seront celles obtenues à partir d'une référence horaire fixe et arbitraire (typiquement 0h dans les séries de débits journaliers issues de la Banque HYDRO).

Pour l'expression des estimations de crues extrêmes, le débit journalier centré (i.e. maximisé) est donc celui sur lequel doit être évalué le laminage réalisé par la retenue. Pour les coefficients de forme, les valeurs centrées sont plus robustes que les valeurs non-centrées. On préférera donc établir des modèles et des comparaisons sur ce type de valeurs.

Le rapport entre les valeurs moyennes non-centrées et centrées sera désigné sous le terme « coefficient de centrage ».

3.5.1. Coefficient de forme constant

SCHADEX utilise, dans sa version industrielle, un coefficient de forme constant pour transférer la distribution des débits journaliers aux débits de pointe. On utilise alors le coefficient de forme moyen calculé sur les crues sélectionnées.

Dans le cas du Tech à Reynès, le coefficient de forme centré s'élève à 1.72, la valeur non centrée à 1.98, soit un coefficient de centrage de 1.15.

La figure suivante présente les hydrogrammes de la sélection (adimensionnalisés et centrés autour de leur débit de pointe), ainsi que l'hydrogramme moyen résultant. La deuxième partie de la figure présente (en échelle logarithmique), le débit de pointe des crues sélectionnées en fonction du débit journalier centré.

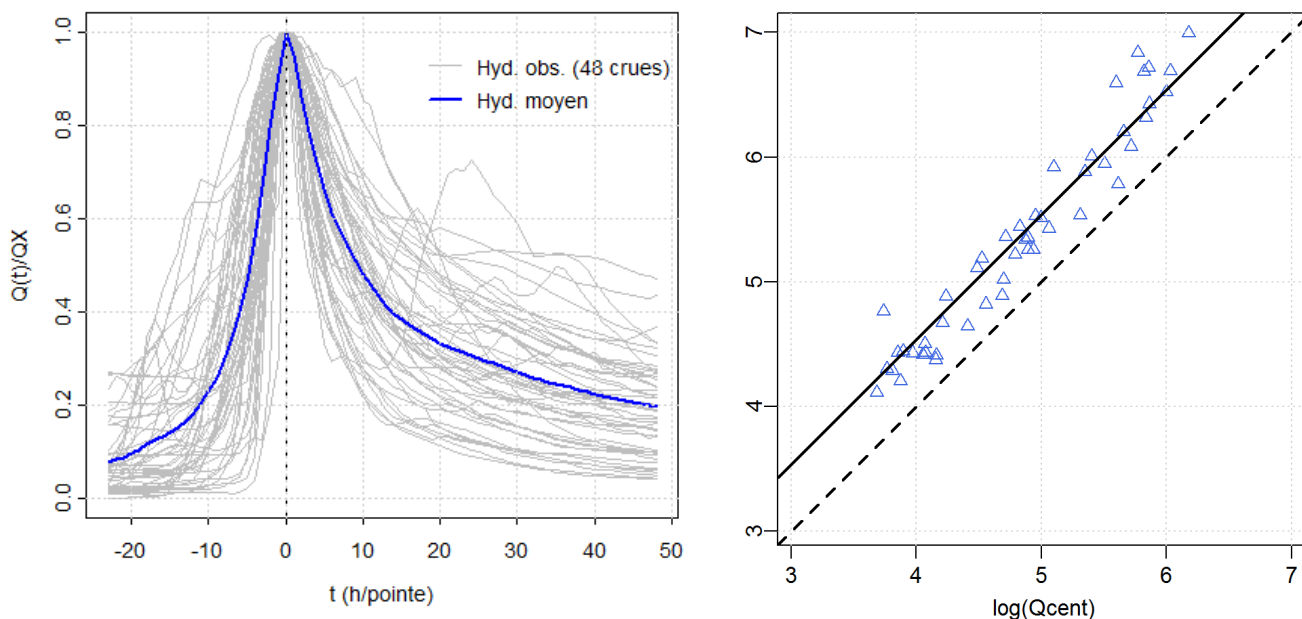


Figure 11 - Hydrogrammes et graphe Log-Log des débits de la sélection de crues

3.5.2. Coefficient de forme variant – modèle dit « Kv-Kc »

Ce modèle permet de lier la variabilité du coefficient de forme des crues à celles des volumes journaliers entourant la pointe.

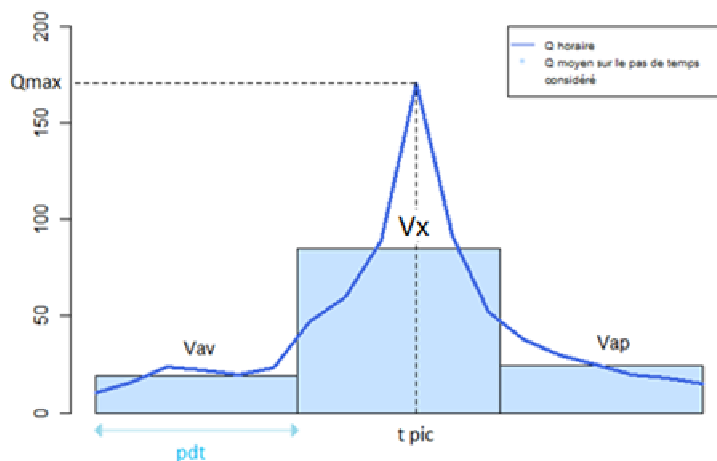


Figure 12- Descripteurs de forme d'un hydrogramme

Comme indiqué dans la figure précédente, on considère pour chaque crue les variables suivantes :

- QX le débit de pointe de la crue
- VX le débit moyen journalier centré autour de la pointe
- Vav et Vap les débits moyens journalier précédant et suivant VX

Le coefficient de forme centré se définit comme $K_c = \frac{QX}{VX}$,

et le coefficient de forme « volumique » comme $K_v = \frac{3.VX}{(V_{av} + VX + V_{ap})}$

A l'aide de la collection d'hydrogrammes sélectionnés, on peut établir une relation linéaire liant K_c et K_v de la forme :
 $(K_c - 1) = a.(K_v - 1)$

La figure suivante illustre cette relation dans le cas du Tech, où chacune des 48 crues sélectionnées correspond à un point de l'espace (K_v, K_c) .

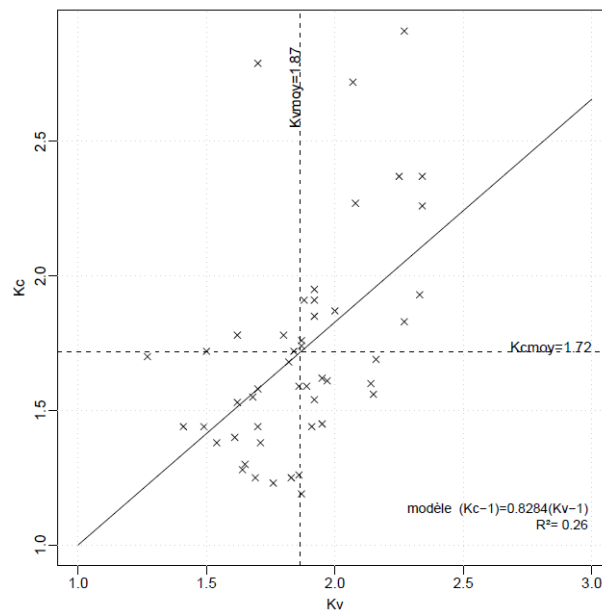


Figure 13 – Sélection des crues observées dans l'espace K_v - K_c

Dans ce cas, le modèle linéaire ainsi établi est loin d'être parfait ($R^2=0.26$). Pour son utilisation dans un processus de simulation stochastique, on peut le compléter avec un résidu multiplicatif :

$(K_c - 1) = a.(K_v - 1).\mathcal{E}$, où $\mathcal{E} \in N(1, \sigma_{\mathcal{E}})$ et $\sigma_{\mathcal{E}}$ est l'écart-type des résidus multiplicatifs pour l'échantillon des crues sélectionnées. Dans le cas du Tech, la pente a du modèle linéaire vaut 0.83, et l'écart-type des résidus $\sigma_{\mathcal{E}}$ vaut 0.20.

3.6. SIMULATION SCHADEX – DISTRIBUTION DES DEBITS DE POINTE

Le passage de la distribution des volumes journaliers à celle des débits de pointe peut être réalisé de trois manières :

- SIM1 : coefficient de forme constant :
On multiplie alors tous les quantiles de la distribution des débits journaliers par le coefficient de centrage 1.15 pour obtenir la distribution des débits journaliers *centrés*. Cette distribution est alors multipliée par le coefficient de forme centré 1.72.
- SIM2 : Modèle linéaire K_v - K_c :
Pour chaque crue simulée par SCHADEX, le coefficient de forme correspondant est calculé au moyen de la relation $(K_c - 1) = a.(K_v - 1)$ introduite au §3.5.2. Les débits de pointe sont ensuite calculés pour chaque événement, puis affecté de la même probabilité que le débit journalier de la crue. L'ensemble est ensuite trié de manière à constituer la distribution simulée des débits de pointe.
- SIM3 : Modèle linéaire K_v - K_c et résidu aléatoire :
Pour chaque crue simulée, le coefficient de forme est calculé à l'aide du modèle K_v - K_c comme précédemment, et par un résidu multiplicatif tiré aléatoirement dans une loi normale $N(1, \sigma_{\mathcal{E}})$. Les débits de pointe sont ensuite calculés pour chaque événement, puis la distribution simulée des débits de pointe est constituée de la même manière que précédemment.

Les trois distributions de débit de pointe sont présentées dans la figure suivante. Elles sont confrontées aux débits de pointe observés entre 1971 et 2005, consécutifs à un épisode pluvieux centré (1321 observations).

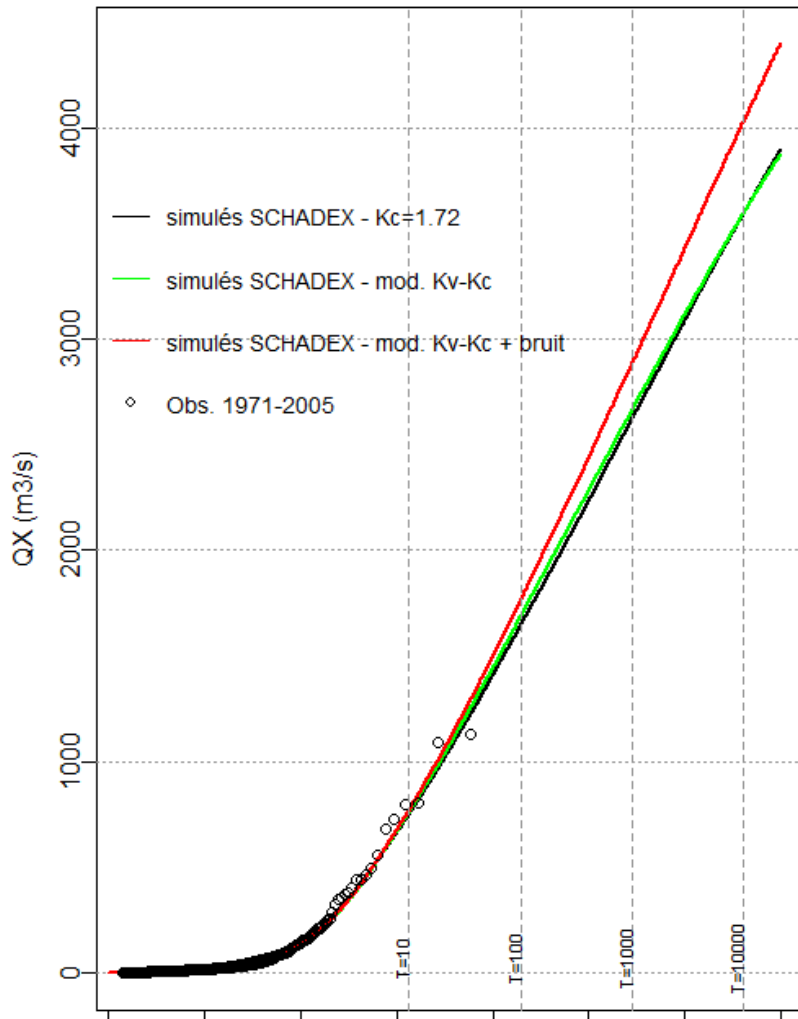


Figure 14 - Distributions SCHADEX des débits de pointe

Les résultats des estimations SCHADEX aux quantiles remarquables sont résumés dans le tableau suivant :

Temps de retour	QJsim (m ³ /s)	QXsim1 Kc=1.72 (m ³ /s)	QXsim2 mod. Kv-Kc (m ³ /s)	QXsim3 mod. Kv-Kc+résidu (m ³ /s)
10	377	747	758	766
100	834	1651	1695	1770
1000	1326	2625	2666	2885
10 000	1823	3609	3591	4025

Tableau 6 - Simulations SCHADEX - Débits journaliers et de pointe aux temps de retour remarquables

Remarque : les débits journaliers sont présentés ici en valeur « non-centrée » (i.e. référence calendaire) pour comparaison aux valeurs observées.

3.7. DYNAMIQUE DES CRUES SIMULEES PAR SCHADEX

L'utilisation d'un coefficient de forme variant (modèle linéaire Kv-Kc) a peu d'impact sur les débits de pointe extrêmes estimés (QXsim2). Par contre, si on complète le modèle Kv-Kc avec un résidu multiplicatif (QXsim3), les résultats diffèrent significativement, avec une estimation du débit millénal supérieure de 10% à la simulation « de référence » (QXsim1).

3.7.1. Distribution des rapports QX/QJ

Pour mieux comprendre les mécanismes en jeu, on peut calculer, le rapport entre les distributions de débits de pointe simulés QXsim et celle des débits journaliers simulés QJsim, pour chaque quantile de ces distributions. Pour les simulations 2 et 3, il ne s'agit pas à proprement parler d'un coefficient de forme puisque ce rapport QX/QJ n'est pas calculé événement par événement, mais quantile par quantile. Les trois distributions de ce rapport sont présentées dans la figure suivante :

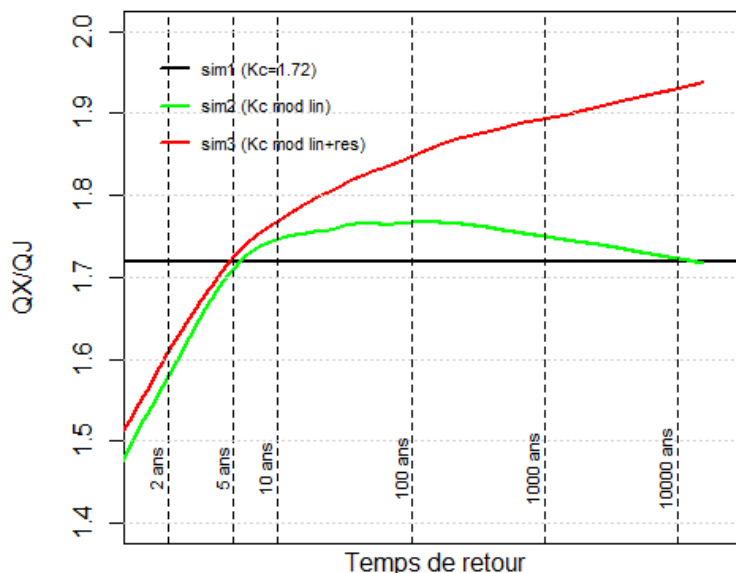


Figure 15 - Distribution des rapports QX/QJ

On constate que les trois distributions se rapprochent le plus autour du temps de retour 5 ans, avec un rapport QX/QJ voisin du coefficient de forme moyen $K_c=1.72$. Pour le modèle Kv-Kc sans résidu, le maximum du ratio QX/QJ, voisin de 1.77, correspond au temps de retour 100 ans. Il diminue pour les temps de retour les plus élevés, pour revenir autour de 1.72 au temps de retour 10 000 ans. Au temps de retour 1000 ans, les ratios QX/QJ des simulations 2 et 3 sont respectivement de 1.75 et 1.89. Pour la simulation 3, les ratios QX/QJ continuent de croître avec le temps de retour. Les dynamiques de crues proposées par les simulations 2 et 3 ont donc des comportements asymptotiques très différents.

3.7.2. Analyse des crues millénales simulées

Un autre regard peut être porté sur ces simulations en s'intéressant à 10 000 épisodes de crues simulées dont les débits de pointe atteignent la valeur de temps de retour 1000 ans (à $\pm 1\%$ près). Un premier aspect est le mois d'occurrence des crues simulées. Le graphe suivant présente les probabilités relatives des différents mois de l'année au sein des 10 000 crues analysées :

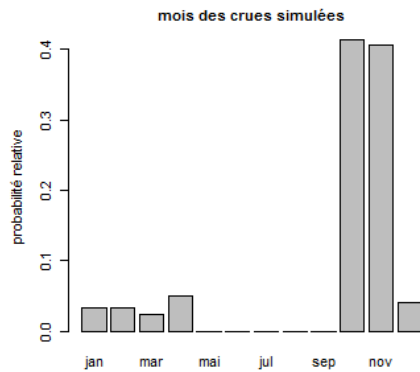


Figure 16 - Mois d'occurrence des crues millénales simulées (sim1)

Sans surprise, on constate que les crues millénales ont près de 80% de chances d'être simulées durant la période Octobre-Novembre (donc du 15 Septembre au 14 Novembre, selon la référence calendaire introduite au §3.2.2), avec un pic très net en Octobre, ce qui correspond bien à la saison à risque pluviométrique (cf. 3.2.2).

Pour les simulations 2 et 3, on présente, en plus des mois de simulations, la distribution des coefficients de forme et celle des débits moyens journaliers (non centrés) correspondants aux crues sélectionnées.

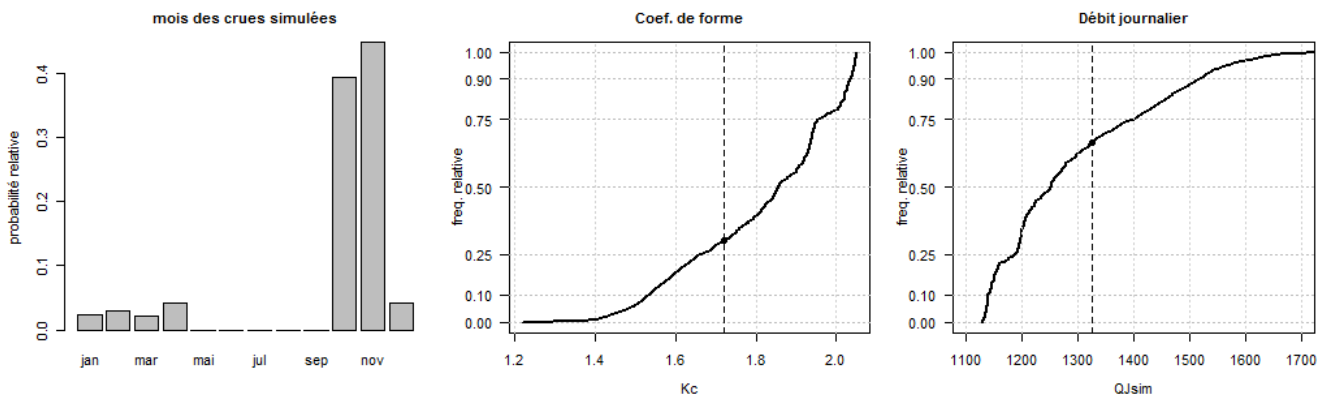


Figure 17 - Caractéristiques des crues millénales simulées (sim2)

Pour la simulation 2, la saisonnalité reste la même que précédemment. Le coefficient de forme moyen 1.72 est matérialisé par la ligne pointillée. Le coefficient de forme médian de ces crues vaut 1.86, et les coefficients de forme des crues millénales simulées ont 80% de chance d'être compris dans l'intervalle [1.53 ; 2.03]. Pour les débits moyens journaliers, ces valeurs sont respectivement 1252 m³/s, et [1139 ; 1517 m³/s]. Le débit moyen journalier millénal est également matérialisé par une ligne pointillée.

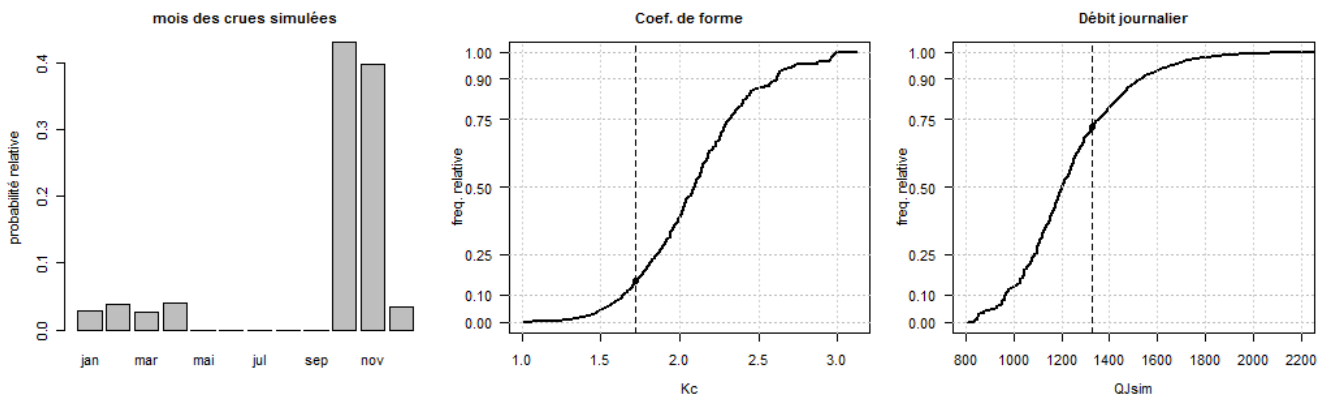


Figure 18 - Caractéristiques des crues millénales simulées (sim3)

Pour la simulation 3, la saisonnalité change peu. Le coefficient de forme médian vaut 2.09, et les coefficients de forme des crues millénales simulées ont 80% de chance d'être compris dans l'intervalle [1.64 ; 2.61]. Pour les débits moyens journaliers, ces valeurs sont respectivement 1203 m³/s, et [962 ; 1528 m³/s]. Les lignes pointillées correspondent aux mêmes valeurs « de référence » que précédemment.

3.7.3. Commentaires sur les différentes approches du coefficient de forme

Il est intéressant de constater que l'utilisation du modèle linéaire Kv-Kc (sans résidus) change peu les quantiles extrêmes estimés, mais introduit une variabilité importante dans les dynamiques de crues, et donc découple de manière significative les distributions de volumes et de pointes de crues simulées. Ainsi, pour la simulation 2, les temps de retour des débits journaliers de 80% des crues millénales (en pointe) sont distribués dans l'intervalle 400 ans - 2500 ans.

Ceci est encore plus vrai avec un modèle Kv-Kc complété par un résidu multiplicatif (simulation 3). Il a déjà été mentionné que le débit millénal de pointe est supérieur d'environ 10% à celui des simulations 1 et 2. Par ailleurs, la plage des coefficients de forme affectés à 80% des simulations millénales est double de celle de la simulation 3. Enfin les temps de retour des débits moyens journaliers correspondants sont dans ce cas compris entre 200 et 2600 ans. Le découplage des distributions de volumes journaliers et de pointes est donc encore plus important.

Ces trois approches du coefficient de forme sont ici comparées au titre d'une analyse de sensibilité, en particulier pour l'estimation des cotes extrêmes pour l'aménagement virtuel du Tech. On ne peut pas généraliser à tous les cas les écarts, présentés ici, sur l'estimation des quantiles extrêmes générés par l'introduction du modèle Kv-Kc, avec et sans tirage d'un résidu. Il semble ici que le modèle statistique adopté pour la prise en compte des résidus du modèle linéaire (résidu multiplicatif tiré dans une loi normale dont les paramètres sont identifiés sur l'échantillon de crues) soit relativement pénalisant : le ratio entre les distributions QX et QJ croît indéfiniment avec le temps de retour, et la gamme des coefficients de forme applicables à une crue millénale est extrêmement large. Des développements en cours permettront de proposer une prise en compte plus crédible des écarts au modèle linéaire Kv-Kc. Les trois modes de simulations seront néanmoins comparés dans la suite de l'étude Tech. Dans la comparaison avec le calcul SHYPRE, on privilégiera la simulation 2 (modèle linéaire Kv-Kc sans tirage de résidus).

4. SIMULATION DE COTES EXTREMES - SCHADEX

4.1. ESTIMATION DES COTES INITIALES

Une simulation du bilan de l'eau basée sur les relations exposées dans 2.3 est réalisée en continu d'Octobre 1967 à Octobre 2008. Elle se base sur les débits d'apports journaliers (Q_e dans l'équation du bilan de l'eau) calculé à partir des pluies et température observées et du modèle hydrologique MORDOR établi pour l'étude SCHADEX. On a préféré utiliser les débits modélisés pour ne pas être gêné par les périodes manquantes dans les débits observés. Le modèle hydrologique est de bonne qualité, ce qui inspire confiance dans ce procédé. Les débits journaliers sont désagrégés au pas de temps de la simulation hydrauliques. Les événements ainsi représentés (notamment les crues) auront donc une dynamique sensiblement atténuée par rapport à celle qu'on aurait mesuré à pas de temps fin (horaire par exemple), mais ce procédé semble suffisant pour produire une « climatologie » crédible de la cote de la retenue. La Figure 19 présente les 41 trajectoires annuelles (en couleur) ainsi que la médiane interannuelle (en trait noir plus épais) des cotes simulées. A noter que la cote de déversement n'est dépassée qu'une seule fois dans cette simulation.

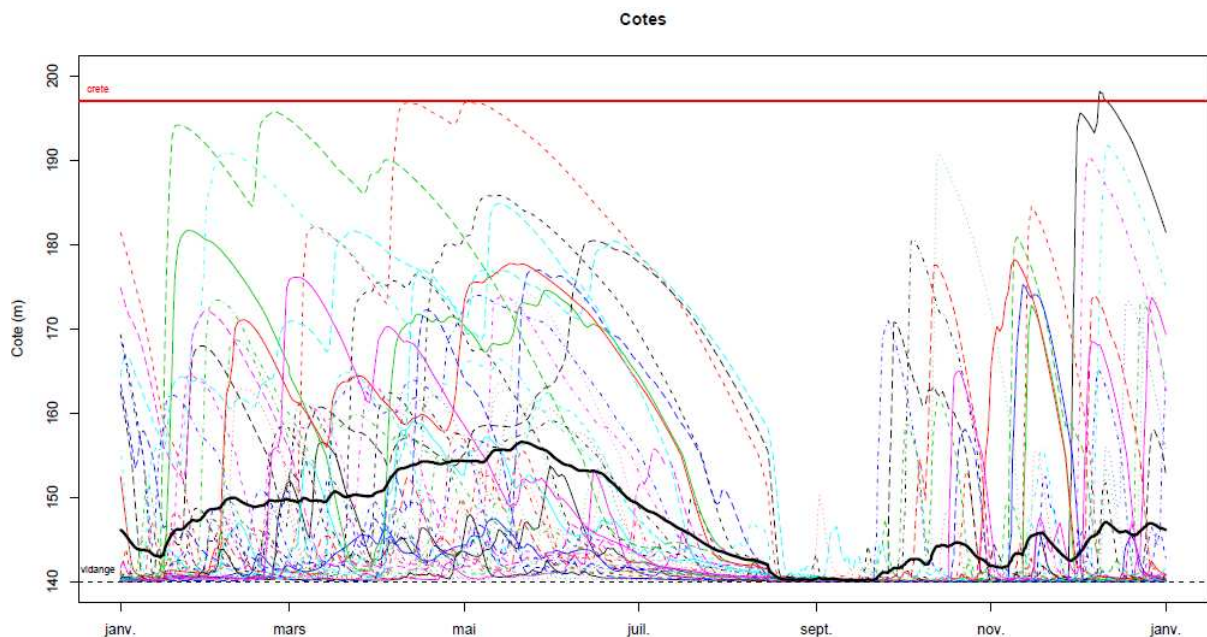


Figure 19 - "Chevelu" des cotes de la retenue virtuelle du Tech (simulation 1968-2008)

On dispose désormais d'une loi de vidange saisonnalisée et d'une chronologie de cote basée sur la climatologie qui nous permettra de définir la hauteur initiale de la retenue pour chaque crue simulée par SCHADEX. Dans la suite de l'étude, ces cotes seront qualifiées de cotes « pseudo-observées » pour les distinguer des cotes issues des simulations de crues de SCHADEX. Dans la suite du rapport, les simulations de cotes SCHADEX et SHYPRE seront comparées à la série des maxima annuels issue de la chronique de cette chronique de cotes « pseudo-observées ».

4.2. SIMULATION DES COTES EXTREMES

4.2.1. Mécanisme de simulation

Dans ce qui suit, on distinguera deux mécanismes de simulation :

1. La simulation stochastique des crues au pas de temps journalier, dite « simulation SCHADEX ». Elle est décrite en détail dans le rapport de l'Action 7.
2. La simulation hydraulique des crues, réalisée au pas de temps 30 minutes, détaillée au paragraphe 2.3 de ce rapport.

Pour obtenir la distribution des cotes extrêmes issues des paramètres de l'aménagement et de la distribution des volumes et pointes de crues proposées par SCHADEX, le calcul hydraulique est réalisé indépendamment pour chacune des crues simulées par SCHADEX (soit environ 2.10^6 événements, et donc autant de simulations hydrauliques). La cote maximale atteinte lors de chaque événement est probabilisée de la même manière que la crue SCHADEX correspondante.

Les crues simulées par SCHADEX sont issues d'épisodes pluvieux de trois jours, tirés aléatoirement, et appliqués sur une date donnée de la chronique de simulation. Avant une crue, la cote initiale de la retenue sera la cote « pseudo-observée » de cette date, issue de la simulation hydraulique continue sur la période 1967-2008 présentée dans le paragraphe précédent. Un hydrogramme est affecté à la crue de la simulation SCHADEX.

Pour un coefficient de forme constant (tel que celui du mode de simulation 1 présenté au § 3.6), l'hydrogramme affecté sera un hydrogramme dit « de référence » correspondant à ce coefficient de forme. Il pourra s'agir par exemple de l'hydrogramme moyen (présenté au § 3.5.1).

Pour un coefficient de forme variant (tel que ceux des modes de simulation 2 et 3 présentés en 3.6), une méthode de génération d'hydrogrammes « sur mesure » a été élaborée. Elle utilise la collection d'hydrogrammes utilisée pour le calcul du coefficient de forme, et s'appuie sur trois scalaires descripteurs d'une crue (cf. § 3.5.2) :

- Le coefficient de forme volumique $K_v = \frac{3.V_x}{V_{av} + V_x + V_{ap}}$,
- Le coefficient de forme K_c issu du modèle linéaire $(K_c - 1) = a.(K_v - 1)$, éventuellement affecté d'un résidu aléatoire,
- La répartition des volumes de part et d'autre du volume central $VAP = \frac{V_{ap}}{V_{av}}$

Au sein de la collection d'hydrogrammes observés, on sélectionne environ 20% des hydrogrammes les plus « proches » de l'hydrogramme à générer dans l'espace (K_v, K_c, VAP) . On réalise ensuite une combinaison linéaire de ces hydrogrammes candidats (adimensionalisés et centrés sur leurs pointes respectives), en utilisant pour chacun une pondération d'autant plus élevée que l'hydrogramme candidat est proche, dans l'espace (K_v, K_c, VAP) , de l'hydrogramme cible (i.e. celui de la crue SCHADEX). Ainsi, plus une crue observée est proche de la crue simulée par SCHADEX (du point de vue des trois descripteurs introduits), plus l'hydrogramme de la crue simulée ressemblera à celui de cette crue. Cette méthode de génération est détaillée dans (Penot, 2011), elle a été qualifiée et paramétrée sur un important jeu de données.

Dans les deux cas, l'hydrogramme généré est défini sur les 72h de la crue simulée par SCHADEX (forme constante, ou générée grâce aux descripteurs K_v, K_c, VAP , puis mise à l'échelle de la crue simulée), puis le calcul hydraulique est réalisé à partir de la cote initiale de la date de simulation.

4.2.2. Résultats de la simulation

Le graphique de la Figure 20 présente les distributions de cotes extrêmes réalisées dans les conditions de référence suivantes :

- Caractéristiques de l'aménagement (débitance du seuil et de la vidange notamment) présentée au § 2.2.
- Cotes initiales issues de la simulation hydraulique continue de la période 1967-2008.
- Simulation SCHADEX avec coefficient de forme constant (sim1, courbe noire), et avec coefficient de forme variant (modèle linéaire Kv-Kc, sim2, courbe verte - modèle linéaire Kv-Kc et résidus multiplicatif aléatoire, sim3, courbe rouge)
- Utilisation d'un hydrogramme unique (hydrogramme moyen) dans le cas de sim1, génération d'hydrogrammes « sur mesures » pour chaque crue de sim2 et sim3.

Les distributions de cotes simulées sont comparées à la distribution des valeurs maximales annuelles pseudo-observées de la période 1967-2008 (nommées HXa).

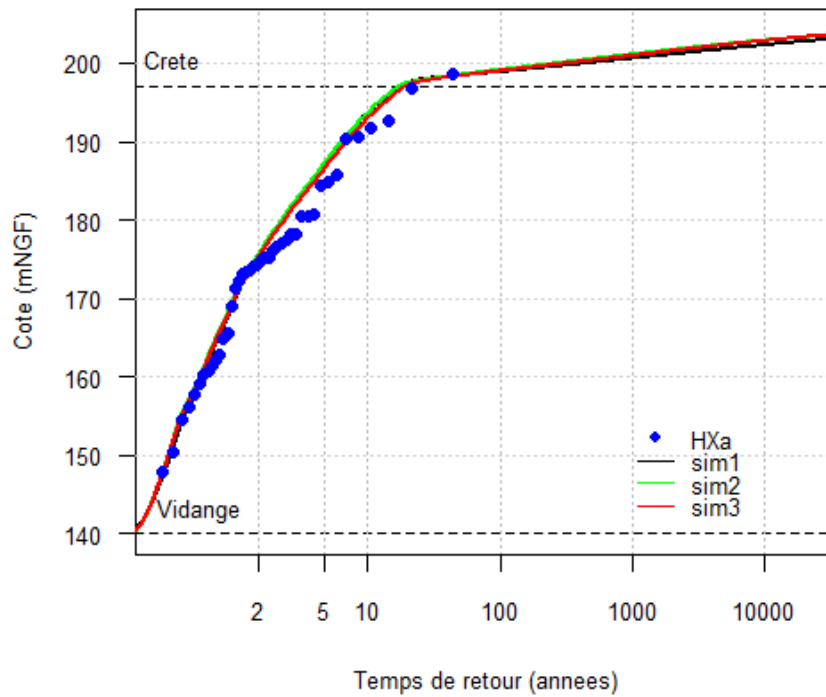


Figure 20 - Distribution des cotes extrêmes simulées

La concordance avec la série des maxima annuels « pseudo-observés » est bonne sur toute la plage de temps de retour observés, ce qui rassure sur le procédé de simulation implémenté.

La figure suivante est un zoom sur les cotes les plus élevées :

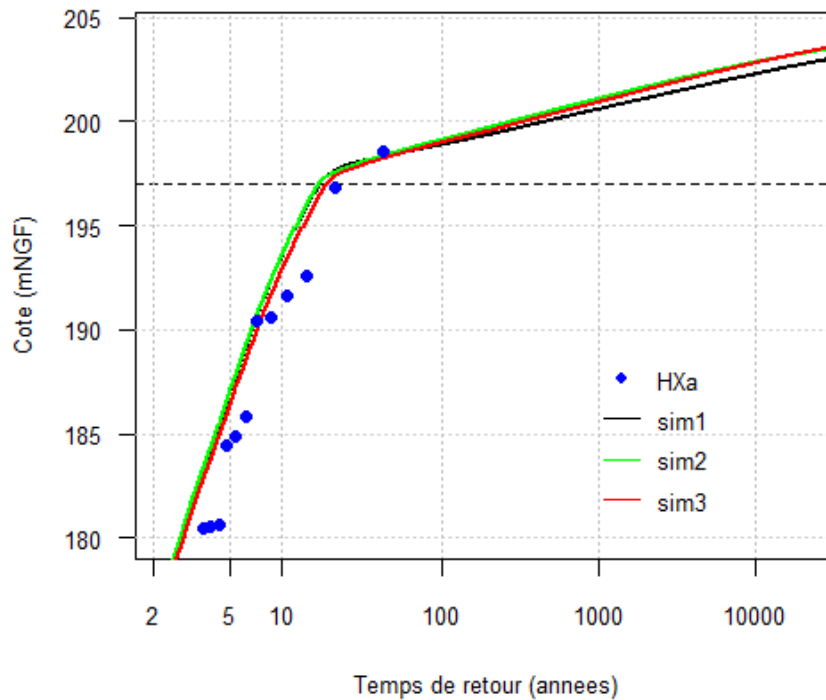


Figure 21 - Distribution des cotes extrêmes simulées (zoom)

Les valeurs aux quantiles remarquables sont présentées dans le tableau suivant :

Temps de retour (ans)	2	5	10	100	1000	10 000
Cote atteinte - sim1 (m NGF)	175.35	187.05	193.42	198.88	200.59	202.28
Cote atteinte - sim2 (m NGF)	175.62	187.08	193.49	199.13	201.10	202.86
Cote atteinte - sim3 (m NGF)	175.28	186.35	192.80	199.99	200.94	202.82

Tableau 7 - Cotes extrêmes simulées aux temps de retour remarquables

Par ailleurs, les temps de retour correspondants au déversement (cote atteinte de 197 mNGF) sont respectivement de 17, 17 et 19 ans pour les simulations 1, 2 et 3.

Les cotes extrêmes simulées ont donc des valeurs relativement proches entre les différentes simulations. Au temps de retour 10 000 ans, ces cotes ne diffèrent que de 54 cm au maximum.

Pour mieux comprendre les mécanismes en jeu, on s'intéresse maintenant, pour chaque simulation, à 10 000 événements ayant produit une cote proche (à $\pm 1\text{cm}$ près) de la cote millénaire. De manière similaire à l'analyse des crues millénales simulées présentée au 3.7.2, on présente dans les figures qui suivent les distributions des mois, du remplissage initial de la retenue, des débits journaliers et de pointe, et du coefficient de forme (sauf pour la simulation 1 où il est constant) des événements dont la cote maximale atteint la valeur millénaire. La valeur moyenne du coefficient de forme, ainsi que les débits millénaux, sont matérialisés par une ligne pointillée.

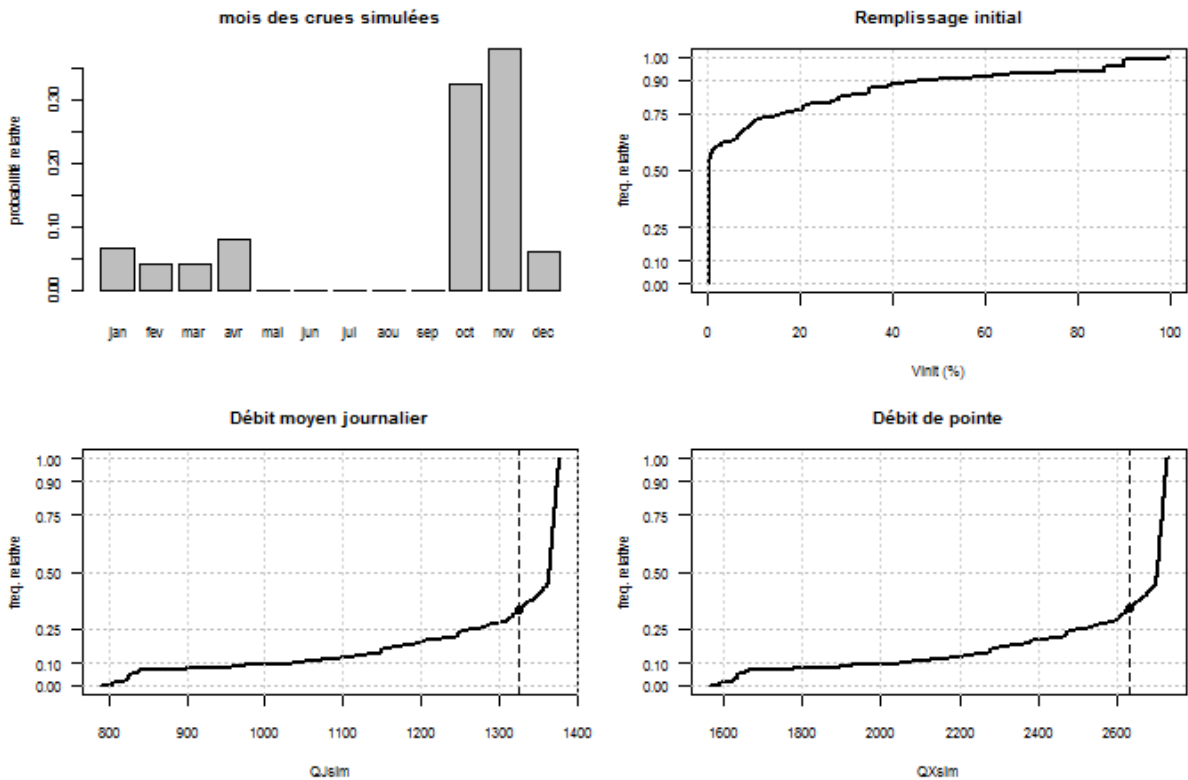


Figure 22 - Simulation 1 : statistiques sur 10 000 événements atteignant la cote millénaire

Pour la simulation 1, les événements conduisant à des cotes millénales surviennent essentiellement sur la période 15 Septembre-14 Novembre (en lien étroit avec les saisons à risque pluviométriques et hydrologiques). Dans près de 60% des cas, la retenue est vide avant l'épisode. A l'inverse, dans près de 10% des cas, le remplissage est supérieur ou égal à 40%. Du fait du coefficient de forme constant, les distributions des débits journaliers et des pointes sont homothétiques. Dans un peu plus de 25% des cas, les débits des crues produisant une cote millénaire sont inférieurs à leur valeur de temps de retour 1000 ans (la valeur minimale est voisine de celle de temps de retour 100 ans). C'est la conséquence d'événements de moindre intensité survenant sur une retenue déjà bien remplie par un événement antérieur. En effet, les crues simulées par SCHADEX sont indépendantes (et donc « oubliées » après leur simulation), mais elles surviennent sur les conditions issues de la simulation hydraulique continue sur la période 1968-2008, qui comprend des crues significatives. Des cotes extrêmes peuvent donc être générées par la simulation d'un événement pas forcément extrême mais simulé peu de temps après un événement fort de l'historique.

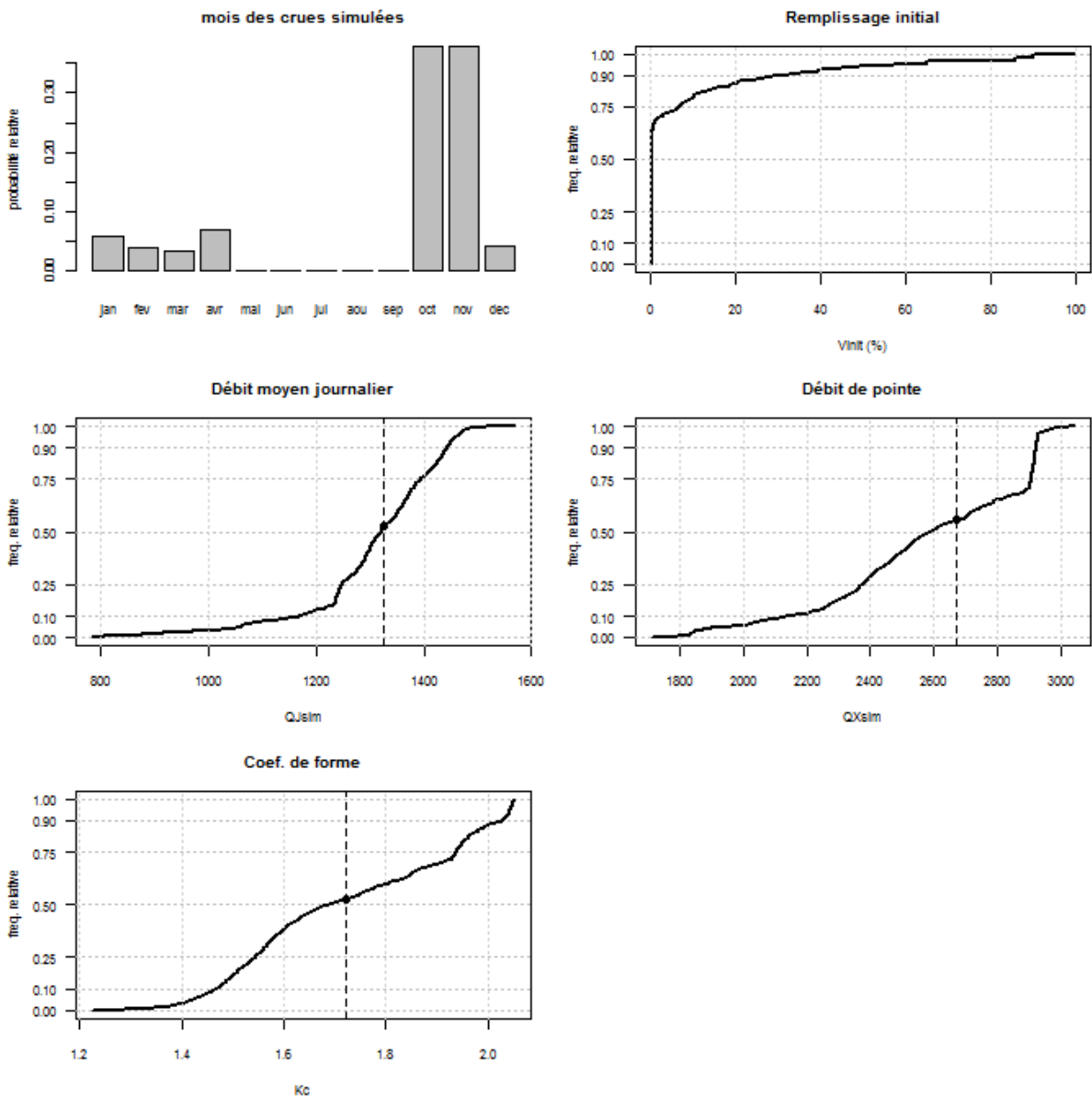


Figure 23 - Simulation 2 : statistiques sur 10 000 événements atteignant la cote millénaire

Les remarques sur la simulation 1 s'appliquent également à la simulation 2. La saisonnalité des cotes millénales est identique. La part des événements survenant avec une retenue initialement vide est ici voisine de 70%. Les valeurs médianes des distributions de débit sont proches des valeurs de temps de retour 1000 ans. Les coefficients de forme de 80% des crues sont compris dans la plage [1.5 – 2], avec une valeur médiane voisine de la valeur de référence (1.72). Pour le débit de pointe, la valeur médiane est proche de la valeur de temps de retour 1000 ans, avec pour près de 10% des cas des valeurs très élevées (de temps de retour supérieur à 10 000 ans). La variété des scénarios hydrologiques produisant des cotes de temps de retour 1000 ans est donc importante.

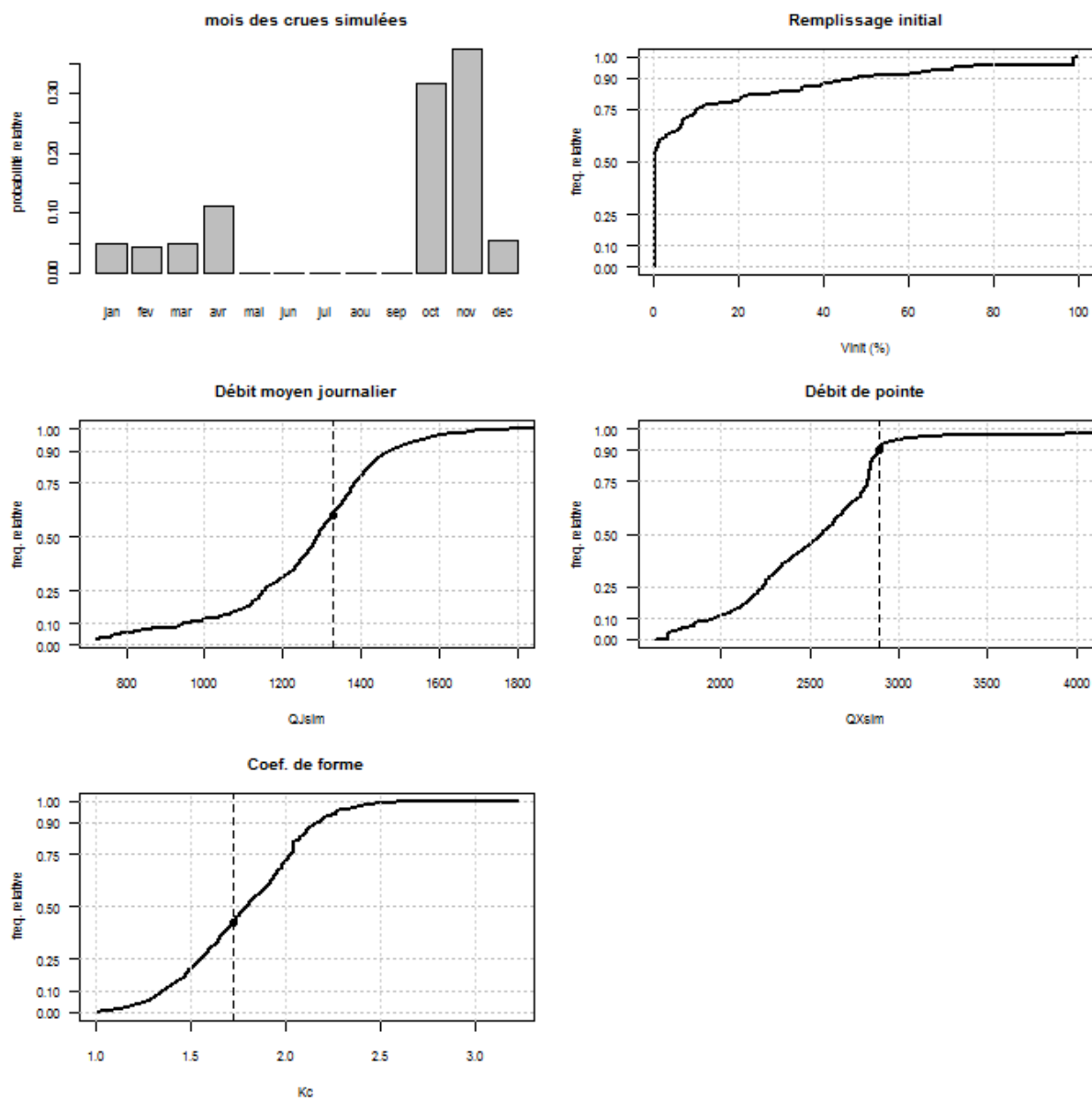


Figure 24 - Simulation 3 : statistiques sur 10 000 événements atteignant la cote millénale

La variabilité des événements de la simulation 2 est encore plus forte dans la simulation 3, notamment du fait du « tirage » d'une grande plage de coefficient de forme (80% des valeurs dans la plage [1.3-2.2]). Le débit de pointe millénal est supérieur à 90% des valeurs des événements étudiés, ce qui indique que dans cette simulation les cotes extrêmes sont le fait d'événements « volumineux » plutôt que « pointus ».

4.2.3. Étude de sensibilité

Un premier test simple a été réalisé pour illustrer, à coefficient de forme constant équivalent, l'impact de la forme de l'hydrogramme sur les cotes extrêmes. Deux simulations ont été réalisées avec deux hydrogrammes réels de la collection de crue, dont le coefficient de forme est proche de celui de l'hydrogramme moyen (1.72). La Figure 25 présente les trois hydrogrammes en question (l'hydrogramme moyen et ceux des crues du 08/12/1996 et du 18/05/1977).

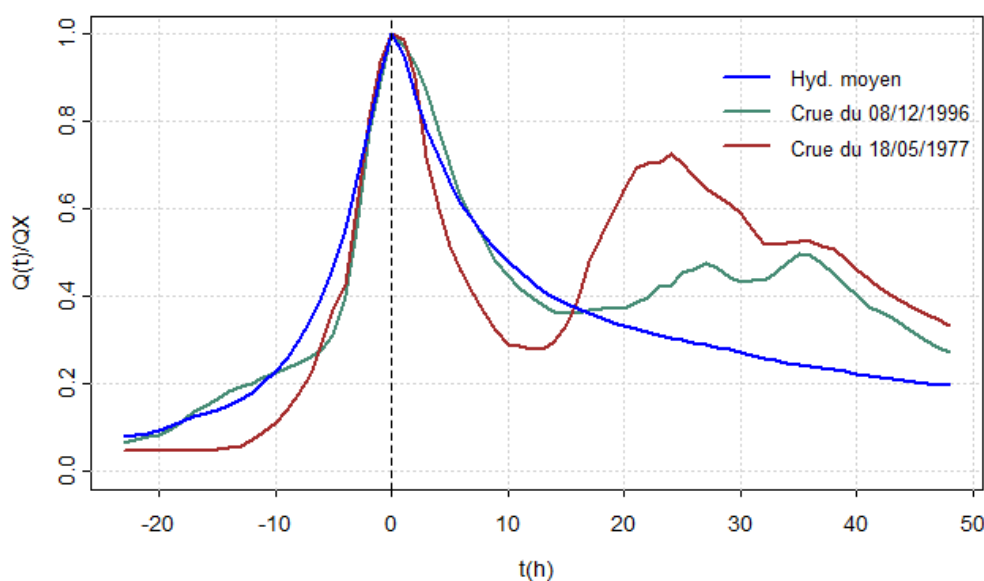


Figure 25 - Hydrogrammes utilisés pour étude de sensibilité

Le tableau suivant présente les différences entre les valeurs des cotes extrêmes simulées aux temps de retour remarquables, entre la simulation de référence avec l'hydrogramme moyen (simulation 1 du Tableau 7) et celle menée avec les hydrogrammes des crues de 1996 et 1977.

Hydrogramme	Kc	Kv	Écarts à la simulation 1 (m)			
			10 ans	100 ans	1000 ans	10 000 ans
Crue du 08/12/1996	1.72	1.50	0.16	0.54	-0.06	0.06
Crue du 19/05/1977	1.70	1.27	0.27	1.03	0.72	0.11

Tableau 8 - Ecarts à la simulation de référence deux hydrogrammes différents

On constate donc que, à coefficient de forme équivalent, la forme de l'hydrogramme de référence influe très significativement les résultats.

Un autre test a donc été mené pour comprendre l'impact de la génération d'hydrogrammes variables. Pour bien approcher les effets de la forme des hydrogrammes, indépendamment de l'impact des coefficients de forme sur les débits de pointe, on corrige les simulations 2 et 3 présentées au paragraphe précédent pour que les trois distributions de débits de pointe (simulation 1, simulation 2 et 3 corrigées) coïncident au mieux (on a choisi de les uniformiser pour le temps de retour 1000 ans).

Le tableau suivant présente les écarts à la simulation 1 des simulations 2 et 3, modifiées ou non :

Simulation	Écarts à la simulation 1 (m)			
	10 ans	100 ans	1000 ans	10 000 ans
Sim 2	0.07	0.25	0.51	0.58
Sim2 corrigée	0.02	0.21	0.45	0.46
Sim 3	-0.62	1.11	0.35	0.54
Sim3 corrigée	-0.57	-0.16	-0.11	-0.05

Tableau 9 - Ecarts à la simulation 1 (simulation 2 et 3 modifiées)

L'effet de la forme des hydrogrammes est donc notable, mais peut parfois jouer de manière antagoniste avec celui de l'échelle des crues simulées. Dans le cas de la simulation 2, l'introduction de coefficients de forme variables basés sur le modèle Kv-Kc a peu d'effet sur les quantiles élevés des débits de pointe, ainsi l'impact sur les cotes semble être du fait de l'introduction de formes d'hydrogrammes variables. Pour la simulation 3, l'impact sur les cotes est voisin de celle de la simulation 2, mais avec un effet d'échelle sur les hydrogrammes antagoniste de celui des formes.

Une dernière étude de sensibilité a été réalisée en changeant radicalement la débitance de la crête déversante : celle-ci a été divisée par 2. Les écarts aux simulations de référence sont présentés dans le tableau suivant :

Simulation	Écarts aux simulations de référence (m)			
	10 ans	100 ans	1000 ans	10 000 ans
Sim 1	-0.65	1.11	2.06	3.06
Sim 2	-0.58	1.31	2.08	3.51
Sim3	-0.46	0.99	2.10	3.42

Tableau 10 - Impact d'une débitance diminuée

La sensibilité des cotes extrêmes à une telle modification de la débitance de la crête déversante est importante. On relève pour les trois simulations une baisse de la cote décennale plutôt contre-intuitive.

4.2.4. Conclusions sur les simulations de cotes basées sur SCHADEX

La sensibilité des cotes extrêmes à l'approche choisie pour le coefficient de forme est importante. Les trois simulations sont basées sur la même distribution de débits journaliers issue de SCHADEX, mais le passage à la pointe a été réalisé par trois méthodes différentes. A ce stade du développement, l'introduction du modèle linéaire Kv-Kc pour « accrocher » la valeur du coefficient de forme à la dynamique des débits journaliers de la crue simulée est une piste intéressante. L'introduction d'un bruit multiplicatif issu d'une loi normale, (paramétrée avec les résidus au modèle linéaire), semble produire dans le cas du Tech des dynamiques trop extrêmes (à la fois sur les basses et hautes valeurs du coefficient de forme).

Ces conclusions ne sont pas forcément généralisables à tous les bassins versants, d'autant que le potentiel explicatif (i.e. le R^2 de la régression linéaire) des modèles Kv-Kc varie beaucoup suivant les régimes hydrologiques. Le modèle Kv-Kc, très pertinent dans certains cas, est dans d'autres cas peu informatif sur la variabilité des coefficients de forme.

L'introduction de coefficients de forme variables découple de manière importante les distributions de débits journaliers et de débits de pointe. Le dimensionnement des évacuateurs de crue d'un barrage doit prendre en compte des scénarios les plus diversifiés possible pour couvrir toutes les modalités du risque hydrologique. La simulation hydraulique de cotes extrêmes, adossée à la simulation hydrologique stochastique, est à cet égard un outil intéressant.

5. SIMULATION DE COTES EXTREMES – SHYPRE

5.1. LA METHODE SHYREG

La méthode SHYREG est la version régionalisée de la méthode SHYPRE (Cernesson *et al.*, 1996; Arnaud, 1997; Arnaud *et al.*, 1999; Arnaud *et al.*, 2002). SHYPRE est l'acronyme de Simulation d'Hydrogrammes pour la PREdetermination des crues.

La méthode SHYREG combine un générateur stochastique de pluie horaire fonctionnant en événementiel avec un modèle pluie-débit (Arnaud *et al.*, 2008; Aubert, 2012; Aubert *et al.*, 2012). Tous les paramètres du générateur de pluie et du modèle hydrologique sont régionalisés au km². Le générateur permet de simuler de très longues chroniques de pluies et les transforme en débit obtenant ainsi différents scénarii, d'où se déduisent les distributions de fréquences de quantile de pluie et débit de différentes durées. Le modèle hydrologique utilisé dans cette approche a été simplifié et toute la variabilité du comportement hydrologique des bassins versants repose sur un seul paramètre : l'état initial du réservoir de production.

Sur chacun des pixels de 1 km² de la France métropolitaine, des quantiles de débit de crue sont à disposition. Le passage du quantile de débit pixélisé à l'exutoire de bassin est réalisé à l'aide d'une fonction d'agglomération et d'abattement des quantiles de débit. Le problème de l'abattement des pluies et du routage hydrologique est pris en compte dans cette fonction.

La méthode SHYREG est mise en oeuvre sur le bassin du Tech à Reynès. La description de la méthode et du calage du modèle hydrologique sont expliqués dans le cadre de l'action 7 du projet Extraflo. Les distributions de fréquence de débit de pointe et journalier sont résumées dans le Tableau 11:

Quantiles Shyreg	T=2 ans	T=5 ans	T=10 ans	T=100 ans	T=500 ans	T=1000 ans	T=10 000 ans
QP	314 m3/s	496 m3/s	682 m3/s	1550 m3/s	2330 m3/s	2700 m3/s	3614 m3/s
Qj	201 m3/s	305 m3/s	412 m3/s	846 m3/s	1170 m3/s	1315 m3/s	2145 m3/s

Tableau 11- Distribution de fréquence des quantiles de débit SHYREG annuel à Reynès

5.2. LA METHODE SHYPRE

5.2.1. Passage de SHYREG à SHYPRE

La mise en oeuvre de la méthode SHYREG ne permet pas de travailler avec des hydrogrammes de crue à l'exutoire de bassin mais uniquement sur des bassins virtuels de 1 km² sur la zone d'étude. C'est pour cela que la méthode SHYPRE est mise en oeuvre.

Afin d'obtenir des hydrogrammes de crue à l'exutoire du bassin versant, on procède de la manière suivante (Aubert, 2008) :

- estimation des moyennes des 3 paramètres saisonniers au sein du bassin versant, de taille S, servant à caler le générateur de pluie (NE, PJMAX et DTOT)
- estimation de la moyenne des valeurs de la taille du réservoir de production (A) sur le bassin versant de taille S
- conservation du calage du niveau initial du réservoir de production (So/A) issu de la méthode SHYREG
- optimisation de la durée des hydrogrammes unitaires (HU) et la taille du réservoir de transfert (B) afin de retrouver les distributions de quantiles de débit de pointe et journaliers SHYREG.

Le Tableau 12 résume les différences entre les modélisations SHYREG et SHYPRE.

Modèles/Paramètres	SHYREG	SHYPRE
Paramètres du générateur stochastique de pluie horaire	NE _i	$\overline{NE} = \sum_{i=1}^{i=S} NE_i$
	PJMAX _i	$\overline{PJMAX} = \sum_{i=1}^{i=S} PJMAX_i$
	DTOT _i	$\overline{DTOT} = \sum_{i=1}^{i=S} DTOT_i$
Paramètres du modèle hydrologique	So/A est à optimiser	So/A SHYREG
	A _i	$\overline{A} = \sum_{i=1}^{i=S} A_i$
	B	B est à optimiser
	HU	HU est à optimiser
Abattement des quantiles de débit	Fonction d'abattement	Abattement réalisé avec les HU et B

Tableau 12- Résumé ente les paramétrages des approches SHYREG et SHYPRE

5.2.2. Résultats du calage du modèle hydrologique de SHYPRE

Plusieurs simulations avec des jeux de paramètres différents entre la taille du réservoir de transfert (B) et la durée des hydrogrammes unitaires (HU) ont été nécessaires pour caler le modèle hydrologique de la méthode SHYPRE. Le couple de paramètres saisonnier qui permet d'avoir un critère d'écart (la moyenne des écarts relatifs) le plus faible entre les distributions de quantile de débit de pointe, journaliers SHYREG, pour les deux saisons et SHYPRE correspond à :

$$B_{\text{hiver}} = 290\text{mm} \text{ et } B_{\text{été}} = 155\text{mm}$$

$$HU = 18\text{h} \text{ avec } 0.1P(i) + \sum_{i=1}^{i=18} 0.05(P-i)$$

La Figure 26 représente les distributions de fréquences de quantile de débits de pointe et journaliers pour les approches SHYREG et SHYPRE.

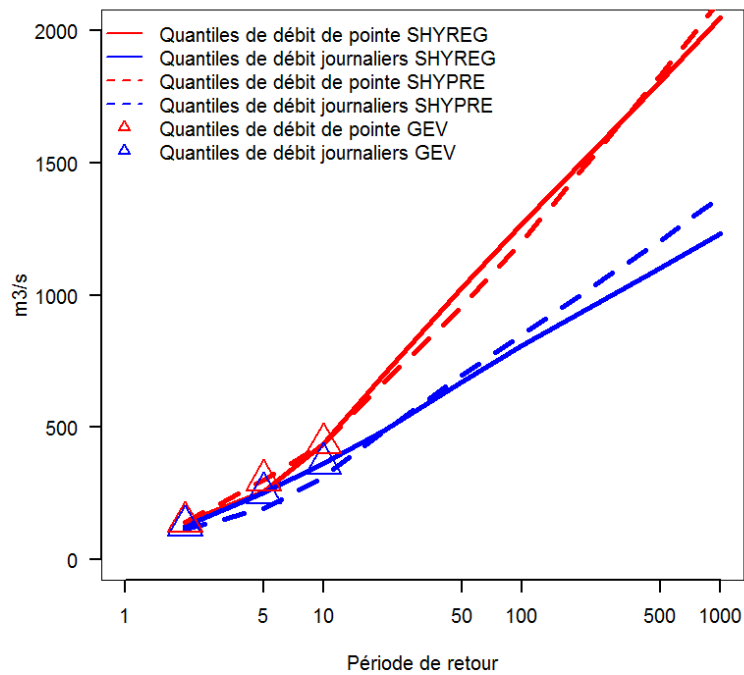


Figure 26 - Distribution de fréquence des quantiles de débits SHYREG et SHYPRE pour la saison hiver

L'examen de la Figure 26 montre que pour les faibles périodes de retour (c.à.d. $T < 10$ ans) les quantiles de débit de pointe (SHYPRE) sont supérieurs aux quantiles SHYREG. A l'inverse, pour les durées journalières, les quantiles SHYPRE sous estiment à la fois les quantiles « observés » (c.à.d. ajustés à une loi GEV) et les quantiles SHYREG.

L'écart moyen entre les 2 distributions (SHYPRE et SHYREG) soit pour 12 valeurs de quantiles de débit et pour les deux saisons est de moins de 10%.

Le paramétrage de SHYPRE permet de respecter les quantiles SHYREG. Maintenant, la méthode SHYPRE sera mise en œuvre et permettra de simuler des hydrogrammes de crue au droit du barrage.

5.3. PAS DE TEMPS DE L'ETUDE POUR LA GESTION DU BARRAGE

Il a été défini dans le cas de cette étude de travailler avec un pas de temps mensuel. Les coefficients de débitance du puits de demi-fond sont fonction du mois étudié (voir). Les cotes d'exploitation sont différentes selon le mois étudié : en période estivale on a tendance à diminuer le débit issu du puits de demi-fond alors qu'en hiver c'est l'inverse (voir Figure 5). Ainsi le mois étudié doit être intégré dans les simulations de SHYPRE.

5.3.1. Prise en compte de l'occurrence des événements par mois

Dans les approches SHYREG-SHYPRE, les paramètres servant à caler le modèle sont saisonniers. L'occurrence des événements dans ces deux approches est estimée au travers du paramètre NE (Tableau 12). NE représente le nombre d'épisodes moyen par saison été (juin à novembre) et hiver (décembre à mai).

L'occurrence des événements par mois est analysée sur le pluviomètre de Céret. Les autres paramètres (PJMAX et DTOT) seront considérés comme constants pour les mois de la saison étudiée. Le poste de Céret (situé au droit du futur barrage) dispose d'une chronique de pluie journalière de 57 ans (entre 1948 et 2005). Le Tableau 13 représente le nombre des événements observés par mois.

Saison	Mois	Nombre d'événements	Probabilité d'apparition	Probabilité cumulée
Hiver	Janvier	34	0.15	0.15
	Février	33	0.15	0.30
	Mars	32	0.14	0.44
	Avril	33	0.15	0.59
	Mai	44	0.20	0.78
	Décembre	49	0.22	1.00
	Total pour la saison hiver	225		
Eté	Juin	38	0.16	0.16
	Juillet	16	0.07	0.22
	Aout	36	0.15	0.37
	Septembre	50	0.20	0.57
	Octobre	55	0.23	0.80
	Novembre	49	0.20	1.00
	Total pour la saison été	244		

Tableau 13 - Analyse de l'occurrence des événements par mois et par saison sur le poste pluviométrique de Céret entre 1948 et 2005

Les mois où l'occurrence des événements est le plus important se situe, pour la saison estivale, entre septembre et novembre (en moyenne 50 événements), et pour la saison hivernale, entre mai et décembre (en moyenne 46.5 événements).

Afin de considérer l'occurrence des événements par mois dans la simulation, on procède de la manière suivante :

- choix de la saison
- tirage aléatoirement d'une valeur entre 0 et 1
- détermination du mois étudié¹

¹ Si la probabilité est de 0.5, pour la saison hiver, le mois étudié sera le mois d'avril. Le mois d'avril est compris entre une probabilité cumulée de 0.44 et 0.59 (Tableau 13)

5.3.2. Estimation de la cote du plan d'eau initiale et du débit de base avant chaque événement simulé

Dans les simulations, la variabilité du niveau de la retenue du barrage est intégrée. Cette variation des cotes de barrages est d'origine (Carvajal, 2009) :

- naturelle : des événements aléatoires se succèdent (pluies, fonte de neige, etc...)
- anthropique : l'exploitant a des consignes de gestion

Des statistiques sur les cotes moyennes mensuelles ont été effectuées. 40 ans de données est à disposition (entre 1967 et 2008). Pour chaque année et pour chaque mois, on a estimé la valeur moyenne de la cote d'exploitation. La Figure 27 présente la distribution empirique des cotes moyennes pour le mois de décembre et un ajustement de polynôme de degré 7 sur les cotes moyennes observées pour ce mois.

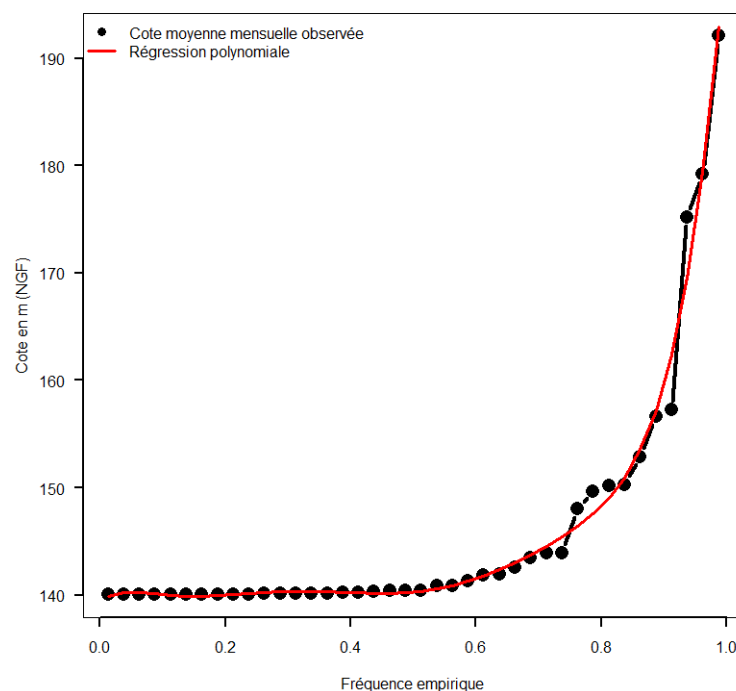


Figure 27 - Distribution de fréquence des cotes moyennes de décembre entre 1967 et 2008 et ajustement d'une loi polynomiale

Sur chacun des mois, un polynôme de degré 7 est ajusté aux cotes moyennes mensuelles observées (Figure 28).

.En simulation, afin de déterminer la cote du plan d'eau initial avant chaque événement, on tire aléatoirement dans la fonction analytique (polynôme de degré 7). Le domaine d'application du polynôme de degrés 7 est bornée entre les fréquences : 0.0125 et 0.9875². Ces fréquences correspondent aux bornes des fréquences des cotes moyennes mensuelles observées.

La procédure de simulation de la cote initiale du plan d'eau avant chaque événement est :

- tirage d'un nombre aléatoire lors d'un événement pluvieux
- estimation de la cote initiale du plan d'eau à l'aide de la fonction analytique

Le modèle fonctionnant en événementiel, ce dernier a besoin d'un débit de base avant chaque événement simulé. Le débit initial avant chaque événement simulé est imposé au débit moyen mensuel estimé à l'aide des chroniques de débits fournis.

Débits moyens mensuels	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Qm	9.05 m3/s	7.75 m3/s	7.3 m3/s	10.2 m3/s	12.2 m3/s	8.84 m3/s	5.47 m3/s	3.74 m3/s	3.9 m3/s	6.5 m3/s	7.3 m3/s	7.6 m3/s

Tableau 14-Débits initiaux mensuels avant chaque événement pluvieux simulé

² Si la fréquence est supérieure à 0.9875, on borne cette valeur à 0.9875, de même, si la fréquence est inférieure à 0.0125, on borne cette valeur à 0.0125

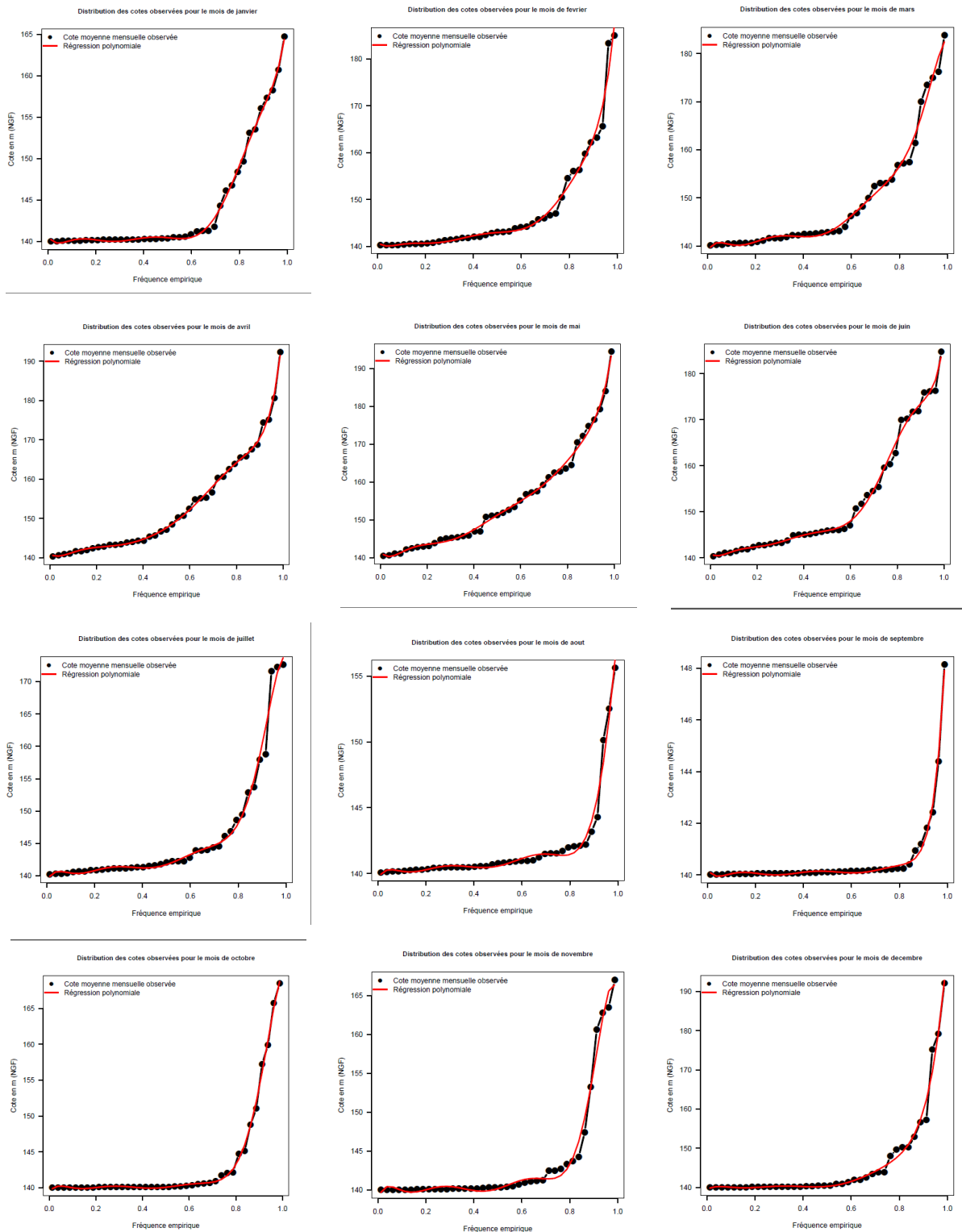


Figure 28 - Distribution de fréquence des cotes moyennes mensuelles de chaque mois entre 1967 et 2008

5.4. SIMULATION DES COTES EXTREMES

5.4.1. Hydrogrammes simulés par SHYPRE

100 simulations de 5000 ans sont réalisées afin d'obtenir une stabilité des cotes simulées pour des fréquences d'apparition de 10^{-3} à 10^{-4} . Pour chaque évènement simulé la procédure suivante est appliquée:

- tirage aléatoire du mois étudié
- détermination du débit initial pour le mois considéré
- tirage aléatoire de la cote du plan d'eau initiale pour le mois considéré
- détermination du coefficient de débitance imposé pour le mois étudié
- simulation d'un évènement pluvieux et d'un hydrogramme de crue
- laminage hydraulique de l'hydrogramme dans la retenue
- conservation de la cote maximale horaire de la retenue lors de l'évènement

Les cotes maximales horaires simulées sont conservées, triées empiriquement et comparées aux cotes maximales horaires « pseudo-observées » (cf Figure 29).

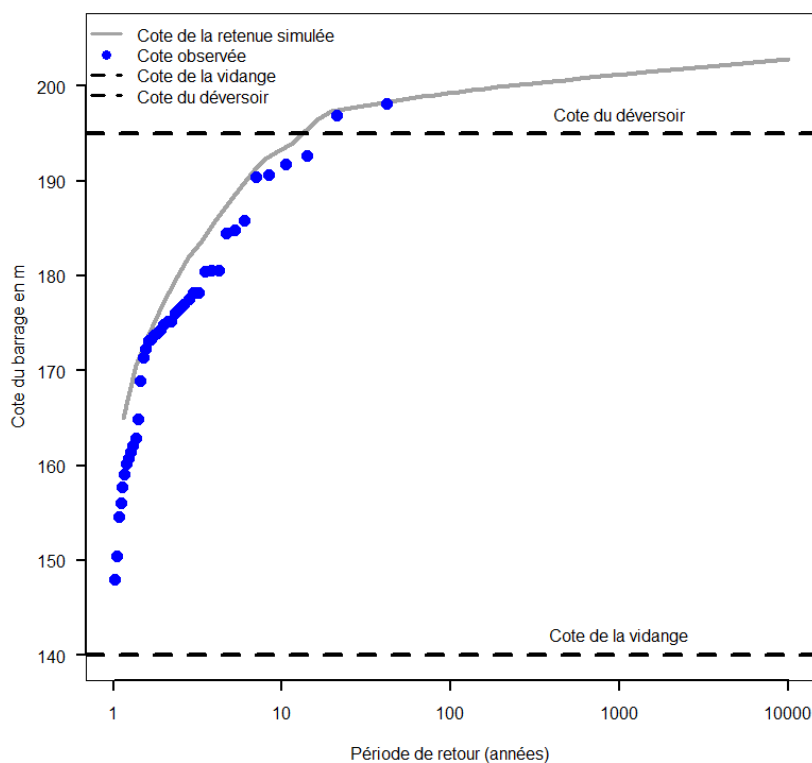


Figure 29 - Distribution de fréquence des cotes moyennes horaires simulées par SHYPRE

Une légère surestimation des cotes horaires simulées est observée entre les périodes de retour 2 ans et 10 ans. Mais dans l'ensemble la distribution des cotes moyennes horaires maximales simulées par SHYPRE est équivalente statistiquement aux observations.

À T=20ans, la cote du plan d'eau arrive à la cote 197 m soit au niveau de l'évacuateur de crue. Pour la période de retour 10 000 ans, la cote maximale du plan d'eau est de 202.8 m. Pour cette hauteur le débit évacuable est de 2722 m³/s soit un débit de pointe d'occurrence millénaire.

Quantiles Shyreg	T=2 ans	T=5 ans	T=10 ans	T=100 ans	T=500 ans	T=1000 ans	T=10 000 ans
Cote NGF en m	177.0 m	188.0 m	193.5 m	199.0 m	200.7 m	201.2 m	202.8 m

Tableau 15 - Distribution de fréquence des cotes horaires simulées avec la méthode SHYPRE

5.4.2. Analyse des hydrogrammes simulés par SHYPRE

L'analyse des hydrogrammes simulés est réalisée au travers du coefficient Rapport qui compare les volumes avant et après la pointe. Si Rapport est supérieur à 1, le volume avant la pointe est supérieur au volume après la pointe. Réciproquement si Rapport est inférieur à 1, le volume après la pointe est supérieur au volume avant la crue. Pour le calcul de ce coefficient on utilise la durée totale des hydrogrammes avec j_p la position de la pointe :

$$\text{Rapport} = \frac{\sum_{i=1}^{i=j_p} q(i)}{\sum_{i=j_p}^{i=\text{fin événement}} q(i)} \quad (1)$$

Sur chaque hydrogramme simulé, on procède au calcul de Rapport et dans le classement empirique de cette variable on lui attribue la même fréquence que le débit de pointe. On ne cherche pas à obtenir la distribution du coefficient Rapport mais la distribution conditionnée par les débits de pointe.

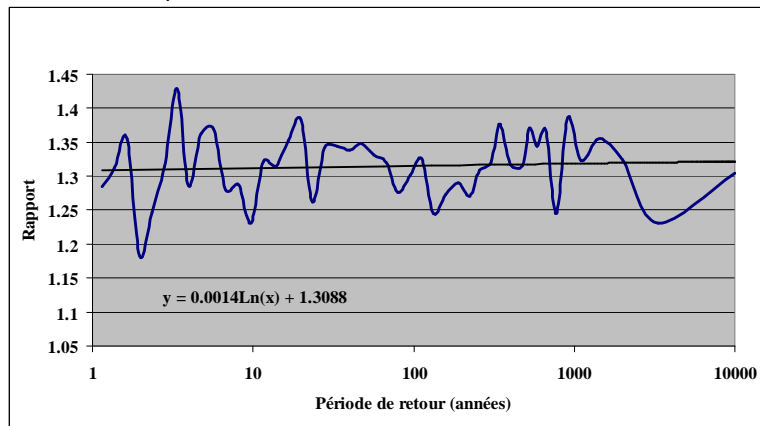


Figure 30 - Distribution de fréquence du coefficient Rapport en fonction des quantiles de débit de pointe

La Figure 30 ne montre pas d'évolution en fonction de la période de retour du coefficient Rapport. Cependant, le coefficient est en moyenne de 1.3, signifiant que les volumes sont en moyenne 30% plus forts avant la pointe qu'après. Ce constat montre aussi que les hydrogrammes sont plus défavorables pour les ouvrages hydrauliques. En effet, un volume plus fort avant la pointe engendre un laminage de la crue moins important et des cotes de la retenue plus hautes.

5.4.3. Analyse des événements supérieures à la cote millénaire (201 m NGF)

La Figure 31 montre la distribution de fréquence des cotes initiales simulées lorsque les cotes atteignent la cote millénaire.

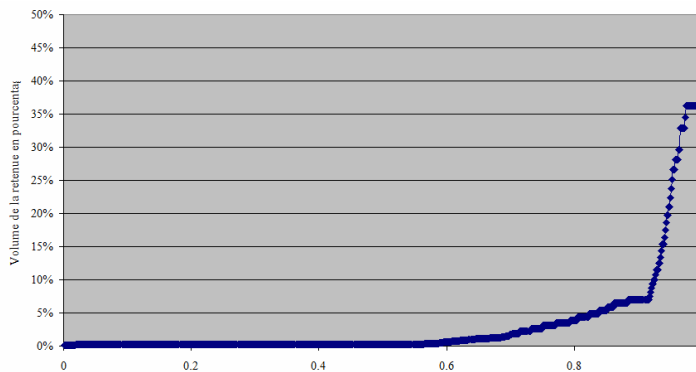


Figure 31 – Volume initial de la retenue en pourcentage avant chaque événement simulé

La Figure 31 montre que 90% des crues dont les cotes dépassent 201 m NGF, arrivent sur une retenue remplie à seulement 7%. La distribution du volume de la retenue de la Figure 31 se situe en dessous de celle de la Figure 23. L'approche SCHADEX fonctionnant au pas de temps journalier, permet d'avoir le cas où la retenue du barrage peut être remplie à 100% lorsqu'une crue arrive. Alors que le pas temps mensuel, avec l'approche SHYPRE, empêche d'avoir le cas où, lorsque la crue débute, la retenue est déjà pleine.

5.4.4. Simulation des cotes avec un hydrogramme de forme constante

On a cherché à quantifier l'apport de l'hétérogénéité des hydrogrammes fournis par SHPRE sur la distribution de cote. Pour cela, EDF a fourni un hydrogramme adimensionnel correspondant à la forme moyenne des hydrogrammes de crue sur le bassin versant du Tech (Figure 11).

Dans les simulations, on conserve la valeur du débit de pointe de l'hydrogramme fourni par SHYPRE. Puis on remplace l'hydrogramme de crue par la forme de l'hydrogramme EDF (Figure 11). On reconstitue un hydrogramme en le multipliant par la valeur du débit de pointe. L'hydrogramme est ensuite laminé dans la retenue et on détermine la cote maximale horaire du plan d'eau. Sur la Figure 32 les distributions de fréquence des cotes maximales horaires du plan d'eau sont tracées :

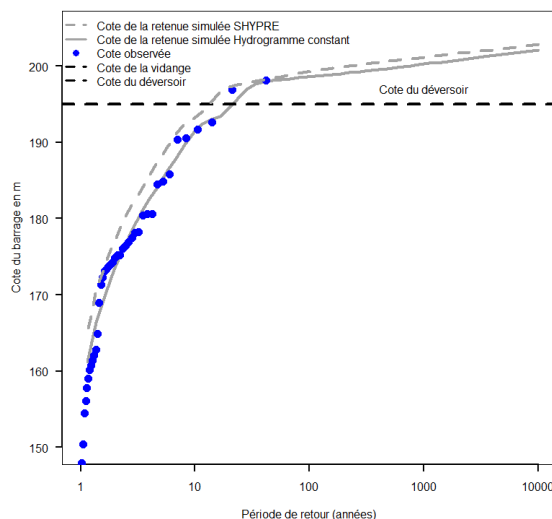


Figure 32 - Distributions des cotes avec des hydrogrammes SHYPRE et des hydrogrammes de forme constante

La distribution des cotes issue de l'utilisation d'un hydrogramme de forme unique se rapproche mieux des maximums annuels observés. Pour les fréquences extrêmes, pour la période de retour 10 000 ans la cote simulée avec des hydrogrammes variés est de 202.8 m et la cote simulée avec un hydrogramme de forme unique est de 202.1 m. Soit une différence de 70 cm.

Quantiles Shyreg	T=2 ans	T=5 ans	T=10 ans	T=100 ans	T=500 ans	T=1000 ans	T=10 000 ans
Cote NGF en m	173.6 m	184.7 m	191.4 m	198.6 m	199.7 m	200.2 m	202.1 m

Tableau 16 - Distribution de fréquence des cotes avec la méthode SHYREG avec un hydrogramme de forme unique

5.4.5. Conclusions sur les simulations des cotes basées sur SHYPRE

La méthode SHYREG permet d'estimer des quantiles de débit de crue en tout point du territoire français. Dans le cadre de cette étude, un recalage du modèle hydrologique de la méthode SHYREG a été effectuée pour se rapprocher au mieux des débits observés (voir l'action 7). Le passage de SHYREG à SHYPRE se fait par l'optimisation de deux paramètres du modèle pluie-débit afin de retrouver les distributions de fréquence de débit de pointe et journalier saisonnier des quantiles SHYREG. Grâce à ces deux approches, des quantiles de débit multi-durée-fréquence ainsi que des hydrogrammes de crue sont à disposition de l'opérateur.

Cette action expose comment à partir des quantiles SHYREG, SHYPRE est mise en œuvre. Les résultats montrent que les distributions de cote maxima annuels observés et simulés par SHYPRE sont cohérentes. Il faut souligner que la méthode ne se cale à aucun moment sur les cotes observées mais uniquement sur les distributions de débit SHYREG.

L'utilisation d'un hydrogramme de même forme, dans les simulations, montre des cotes moins importantes de l'ordre de 70 cm pour les périodes de retour 1000 ans et 10 000 ans. Ce point est important et souligne le fait qu'il est nécessaire de prendre en compte l'hétérogénéité des hydrogrammes de crue en simulation pour dimensionner un ouvrage hydraulique.

L'analyse des formes des hydrogrammes en simulation issus de SHYPRE (le critère Rapport) montre des volumes plus importants avant la pointe qu'après. Par conséquent le laminage des crues, dans le barrage, est moins important et entraîne des cotes du plan d'eau plus fortes. Le pas de temps utilisé pour la gestion du barrage (pas de temps mensuel) empêche le cas où la retenue initiale est quasi-pleine. Ce pas de temps ne permet pas le cas le plus pénalisant : une crue dont la pointe est centrée à la fin de l'hydrogramme et une retenue en début d'événement quasi-pleine.

Malgré son calage saisonnier et son fonctionnement événementiel, la méthode SHYPRE peut tenir compte d'une variabilité du plan d'eau initial mensuel, d'un débit de base mensuel avant chaque événement simulé et d'un fonctionnement mensuel des vannes de fond.

6. COMPARAISON DES RESULTATS

Les méthodes SCHADEX et SHYPRE, bien que s'appuyant sur les mêmes données pour ce cas test, reposent sur des principes très différents. Au-delà de la simple comparaison des quantiles extrêmes, il est intéressant de détailler les différentes composantes des simulations et la dynamique des crues générées.

6.1. DISTRIBUTIONS DES DEBITS EXTREMES

La Figure 33 présente les distributions de fréquence issues de SCHADEX et SHYPRE pour les débits moyens 72h et 24h, et les débits de pointe. Les débits en 24 et 72h sont les débits « centrés », i.e. maximisés autour de la pointe. La simulation de référence pour SCHADEX est la simulation 2 (cf. paragraphe 3.6).

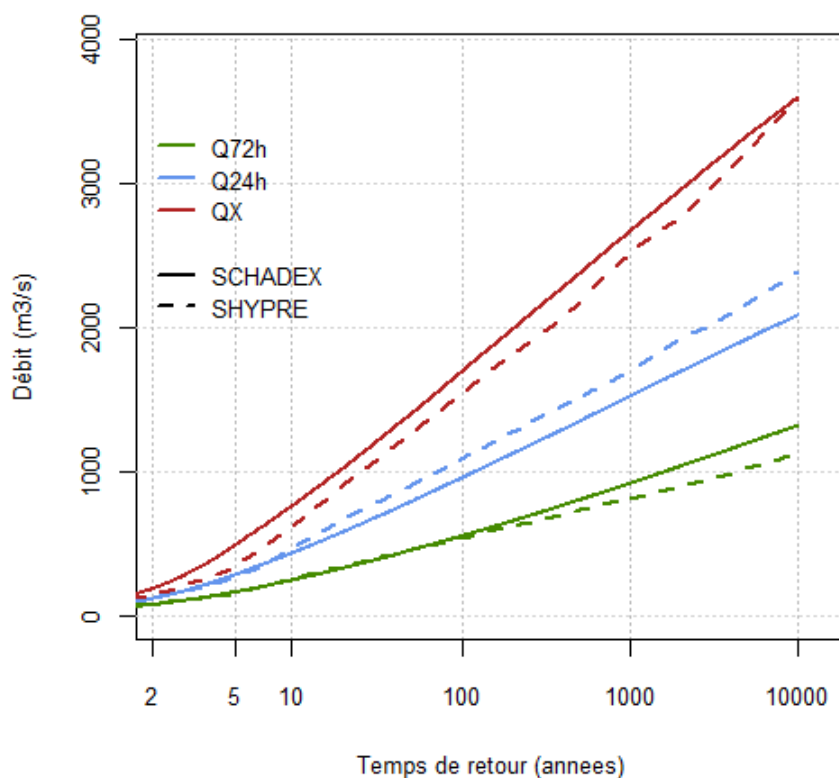


Figure 33 - Courbes QDF comparées SCHADEX-SHYPRE

Les résultats et écarts aux quantiles remarquables sont présentés dans le Tableau 17. Un écart positif signifie que les quantiles SHYPRE sont plus forts que les quantiles SCHADEX et réciproquement un écart négatif signifie que les quantiles SHYPRE sont inférieurs aux quantiles SCHADEX.

	Temps de retour	10 ans	100 ans	1000 ans	10 000 ans
Q72h	SCHADEX	247 m ³ /s	555 m ³ /s	920 m ³ /s	1319 m ³ /s
	SHYPRE	253 m ³ /s	546 m ³ /s	815 m ³ /s	1130 m ³ /s
	Écart	+3%	-2%	-11%	-14%
Q24h	SCHADEX	434 m ³ /s	959 m ³ /s	1524 m ³ /s	2085 m ³ /s
	SHYPRE	466 m ³ /s	1090 m ³ /s	1698 m ³ /s	2387 m ³ /s
	Écart	+7%	+14%	+11%	+14%
QX	SCHADEX	758 m ³ /s	1695 m ³ /s	2666 m ³ /s	3951 m ³ /s
	SHYPRE	618 m ³ /s	1541 m ³ /s	2515 m ³ /s	3590 m ³ /s
	Écart	-18%	-10%	-6%	-9%

Tableau 17 - Débits SCHADEX et SHYPRE aux quantiles remarquables

Aux temps de retour élevés, les résultats en pointe sont proches avec un écart de seulement 9% pour la valeur décennale (résultat en soi remarquable au vu des différences méthodologiques). Les volumes des crues (i.e. les Q72h) sont identiques jusqu'au temps de retour 100 ans, supérieurs par SCHADEX au-delà. A l'inverse, les volumes en 24h de SHYPRE sont supérieurs à ceux de SCHADEX à partir du temps de retour 10 ans. Ces écarts, différents d'une durée à l'autre, indiquent que les dynamiques des crues simulées diffèrent notablement entre les deux méthodes.

6.2. DYNAMIQUE DES CRUES SIMULEES

Les grandeurs caractérisant les hydrogrammes de crue diffèrent d'une méthode à l'autre (cf. paragraphe 3.5 et 5.4), ce qui ne facilite pas les comparaisons.

Dans un deuxième temps, on peut s'intéresser, comme dans le § 3.7.1, à la distribution du rapport QX/QJ. La figure suivante présente ces distributions pour les deux méthodes :

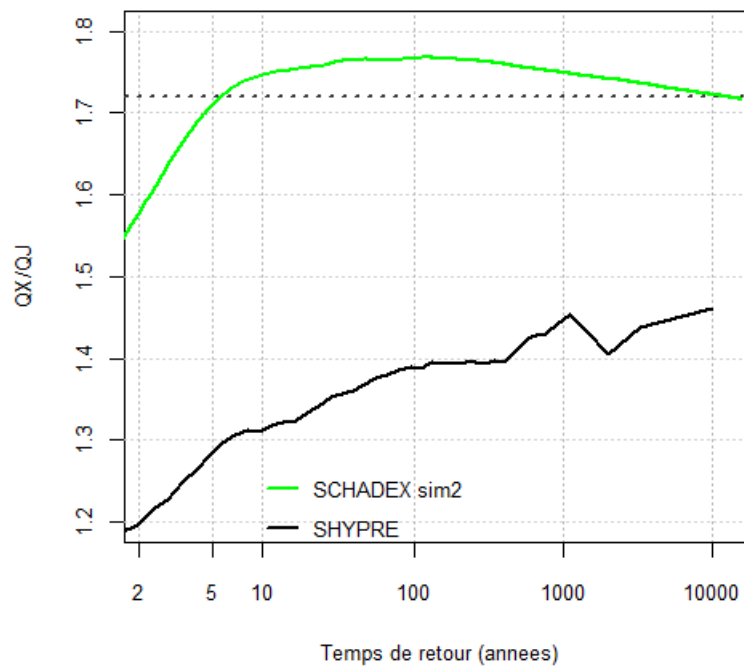


Figure 34 - Distribution des rapports QX/QJ

Logiquement (du fait des écarts contraires entre les distributions de débits de pointe et journaliers), les ratios QX/QJ calculables sur les distributions simulées sont plus faibles pour SHYPRE (compris entre 1.4 et 1.5 au dessus de 100 ans) que pour SCHADEX (entre 1.75 et 1.7).

Pour illustrer cette différence, on s'intéresse à 232 hydrogrammes simulés par SHYPRE, dont pointes et volumes journaliers sont supérieurs à leurs valeurs millénales respectives. De la même manière que pour les hydrogrammes observés utilisés pour le calcul SCHADEX, on présente dans la Figure 35 le « chevelu » de ces 232 hydrogrammes (adimensionnalisés par leur valeur de pointe), ainsi que l'hydrogramme moyen et la distribution des coefficients de forme correspondants.

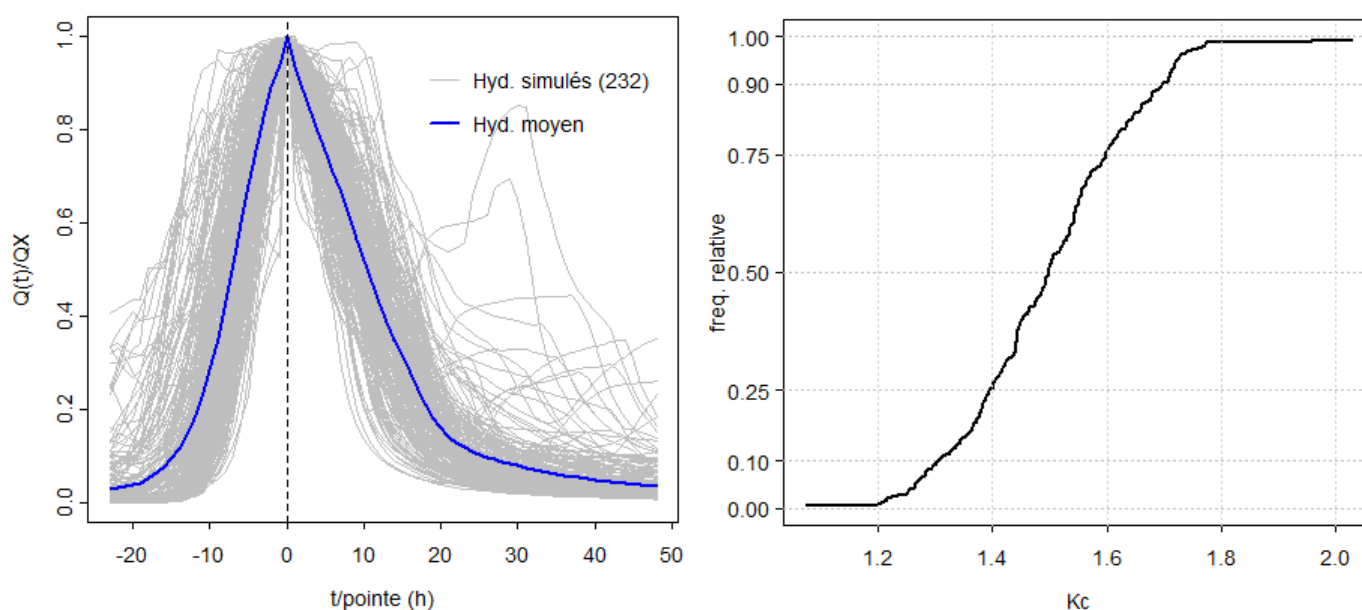


Figure 35 - Hydrogrammes et coefficients de forme de 232 crues SHYPRE

Pour cette collection, le coefficient de forme médian (et moyen) est voisin de 1.50 , et 80% des valeurs sont comprises dans l'intervalle [1.3 ; 1.7]. Globalement, ces crues sont moins « pointues » que les crues millénales simulées par SCHADEX (cf. 3.7.2).

Les mécanismes de génération des hydrogrammes sont très différents entre les deux méthodes, et conduisent à des représentations assez différentes des dynamiques asymptotiques des crues. L'analyse à pas temps fixe (ici 72h) n'est pas adaptée avec les hydrogrammes SHYPRE car leurs durées varient pour chaque événement. Les événements peuvent avoir une durée plus longue. Ainsi, si les hydrogrammes ont une durée plus importante, ils peuvent remplir la retenue avant la pointe de l'hydrogramme. Le laminage sera moins important et la cote maximale de la retenue sera plus forte. Malgré cela, il faut redire que les valeurs des quantiles élevés des débits de pointe restent assez proches.

6.3. COTES EXTREMES

Le Tableau 18 présente les quantiles remarquables des cotes extrêmes pour les deux simulations de référence de SCHADEX et SHYPRE.

Temps de retour (ans)	2	5	10	100	1000	10 000
Cote SCHADEX (m NGF)	175.6	187.1	193.5	199.1	201.1	202.9
Cote SHYPRE (m NGF)	177.0	188.0	193.5	199.0	201.2	202.8
Écart (m)	+1.4	+0.9	0	-0.1	+0.1	-0.1

Tableau 18 - Comparaison des cotes extrêmes SCHADEX et SHYPRE

Les résultats sont très proches, sur toute la gamme de temps de retour exploré. Les écarts sur les cotes extrêmes peuvent être considérés comme faibles en regard des différents tests de sensibilité présentés plus hauts pour les deux méthodes.

On peut compléter ces valeurs avec le temps de retour correspondant à la cote de la crête déversante (197 m), respectivement autour de 20 ans et 17 ans.

On peut mettre en regard, pour les deux méthodes et pour le temps de retour 1000 ans, les quantiles des différentes variables hydrologiques produites par les deux méthodes :

Variable	Q72h (m ³ /s)	Volume 72h (10 ⁶ m ³)	Q24h (m ³ /s)	QX (m ³ /s)	QX/Q24h	Cotes (m)	Q déversé (m ³ /s)
SCHADEX	920	238	1524	2666	1.75	201.1	1617
SHYPRE	815	211	1698	2515	1.48	201.2	1677
Écart	-11%	-11%	+11%	-6%	-15%	+0.1 m	-3%

Tableau 19 - Comparaison des variables hydrologiques de temps de retour 1000 ans

Ainsi, les écarts sur les conditions de déversement millénales (cote et débit déversé correspondant) résultent d'une composition des écarts constatés sur les différentes variables intermédiaires.

Une deuxième comparaison peut-être proposée entre la simulation SCHADEX réalisée avec un coefficient de forme constant (et donc un hydrogramme de référence unique, simulation 1) et la simulation SHYPRE réalisée avec ce même hydrogramme unique (cf. 5.4.4).

Temps de retour (ans)	2	5	10	100	1000	10 000
Cote SCHADEX (m NGF)	175.3	187.0	193.4	198.9	200.6	202.3
Cote SHYPRE (m NGF)	173.6	184.7	191.4	198.6	200.2	202.1
Écart (m)	-1.7	-2.3	-2.0	-0.3	-0.4	-0.2

Tableau 20 - Comparaison des cotes extrêmes SCHADEX et SHYPRE (hydrogramme constant)

Les écarts pour les temps de retour extrêmes sont faibles au-delà de 100 ans, du même ordre que précédemment. Les cotes sont moins importantes (de 60 cm pour SCHADEX et 70 cm pour SHYPRE, pour la valeur décamillénaire) dans les simulations où les hydrogrammes ont une forme unique.

Au final, les deux approches fournissent des résultats très cohérents, malgré des mécanismes hydrologiques parfois sensiblement différents (coefficient de forme de crues simulées par exemple). Les temps de retour voisins de la crête déversante indiquent que les volumes des crues simulées (remplissant donc le barrage) sont proches.

Enfin il convient de comparer ces résultats avec une approche d'ingénierie « classique », i.e. la simulation de la cote atteinte dans la retenue avec un hydrogramme de référence (ici l'hydrogramme moyen présenté au § 3.5.1) mis à l'échelle de manière à ce que sa valeur de pointe atteigne la valeur de référence millénaire (2666 m³/s, cf 3.6). Cette simulation peut être réalisée à partir de deux hypothèses de cote initiale : retenue vide (cote 140 m) et retenue pleine (cote 197 m). Les résultats de cette approche sont désignés sous le terme « approche standard » dans le tableau qui suit :

Méthode	Cote T=1000 (m NGF)
Approche classique – retenue initiale vide	200.5
Approche classique – retenue initiale pleine	202.2
SCHADEX – simulation 1 (coef. de forme fixe)	200.6
SCHADEX – simulation 2 (coef. de forme variant)	201.1
SHYPRE	201.2

Tableau 21 – Comparaison de l'estimation de cote millénaire avec l'approche classique

Il n'est pas surprenant de constater que les deux hypothèses de l'approche classique encadrent les valeurs issues des méthodes de simulation,

7. CONCLUSION – PERSPECTIVES

Les résultats sur les différentes variables (débits et cotes) montrent des convergences entre les méthodes pour les quantiles extrêmes. A la période de retour 10 000 ans, les quantiles de débit de pointe des deux méthodes ont un écart de 9%, et 30 cm pour les cotes.

Pour les deux approches, les distributions de cote simulées montrent une bonne cohérence avec les maxima annuels des cotes « pseudo-observées ». Ce point est important car les deux méthodes ne se calent à aucun moment sur ces valeurs.

Un point important est à noter que l'utilisation d'un hydrogramme de forme unique sous-estime les cotes extrêmes de 60 à 70 cm selon la méthode.

Deux remarques sont à souligner :

- SHYPRE a été mise en œuvre de façon à prendre en compte les variations mensuelles du débit de base, du débit de la restitution et de la cote initiale du plan d'eau.
- SCHADEX a été calé journalièrement et peut fournir des hydrogrammes de crue de formes multiples.

Les formes des hydrogrammes simulés par SCHADEX sont plus « pointues » et définis sur 72h, alors que SHYPRE propose des hydrogrammes dont le volume est en moyenne plus fort avant la pointe et avec des durées variables.

Les hydrogrammes issus des simulations des modèles SHYPRE et SCHADEX ont des caractéristiques différentes mais au final, ces différences n'ont que peu d'impact sur les résultats des distributions des cotes.

La comparaison avec l'approche classique souligne l'intérêt qu'il y a de ne pas faire dépendre le résultat d'une hypothèse sur l'état initial de la retenue, mais de probabiliser celui-ci au même titre que les autres variables conditionnant le risque hydrologique.

Une des perspectives serait de prendre en compte dans les simulations une défaillance probabilisée de tout ou partie de l'évacuateur de crue (obstruction par un arbre ou mise en charge de l'évacuateur de crue dans le cas d'une tulipe) et d'en examiner l'influence sur les quantiles extrêmes de cotes simulées.

8. REFERENCES

- Arnaud, P. Modèle de prédétermination de crues basé sur la simulation - Extension de sa zone de validité, paramétrisation horaire par l'information journalière et couplage des deux pas de temps. (1997) *Thèse de Doctorat* Université Montpellier II, 286 p.
- Arnaud, P. & J. Lavabre (1999) Using a stochastic model for generating hourly hyetographs to study extreme rainfalls. *Hydrological Sciences Journal* 44(3): 443-445.
- Arnaud, P. & J. Lavabre (2002) Coupled rainfall model and discharge model for flood frequency estimation. *Water Resources Research* 38(6): 1075-1085.
- Arnaud, P., J. Lavabre, B. Sol & C. Desouches (2008) Regionalization of an hourly rainfall generating model over metropolitan France for flood hazard estimation. *Hydrological Sciences Journal* 53(1): 34-47.
- Aubert, Y. (2008). Recherche d'une modélisation équivalente pour générer des hydrogrammes de crue pour le dimensionnement d'ouvrage. Mémoire de Master Systèmes Aquatiques et Gestion de l'Eau (SAGE). Ecole Nationale des Ponts et Chaussées: 69 p.
- Aubert, Y. Estimation des valeurs extrêmes de débit par la méthode Shyreg: réflexions sur l'équifinalité dans la modélisation de la transformation pluie-débit (2012) *Thèse de Doctorat* Université Pierre et Marie Curie (UPMC), 318 p.
- Aubert, Y., P. Arnaud, P. Ribstein & J. A. Fine (2012) La méthode SHYREG débit, application sur 1605 bassins versants en France Métropolitaine. *Journal des Sciences Hydrologiques* Article soumis.
- Carvajal, C. Modélisation probabiliste des actions hydrauliques (2009) *Thèse de Doctorat* Université Blaise Pascal 191
- Cernesson, F., J. Lavabre & J.-M. Masson (1996) Stochastic model for generating hourly hyetographs. *Atmospheric Research* 42(1-4): 149-161.
- Farvacque, E. (2012) Simulation de cotes de retenue dans un barrage à partir des résultats de la méthode SCHADEX. Rapport de projet de fin d'études, Grenoble INP-ENS3
- Garavaglia, F. (2011) Méthode SCHADEX de prédétermination des crues extrêmes. *Ph.D. thesis*, Université de Grenoble.
- Garavaglia, F. et al (2011) Reliability and robustness of rainfall compound distribution model based on weather pattern sub-sampling, *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 519-532.
- Garavaglia, F., et al (2011). Reliability and robustness of rainfall compound distribution model based on weather pattern sub-sampling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15 (2), 519-532.
- Paquet E. et al (2012), The SCHADEX method: a semi-continuous rainfall-runoff simulation for extreme flood estimation, *Journal of Hydrology*. Article en révision.
- Paquet, E., Gailhard J. & Garçon R. (2006) Evolution de la méthode du gradex : approche par type de temps et modélisation hydrologique. *La Houille Blanche*, N°5 (Octobre-Novembre 2006), pp. 80-90

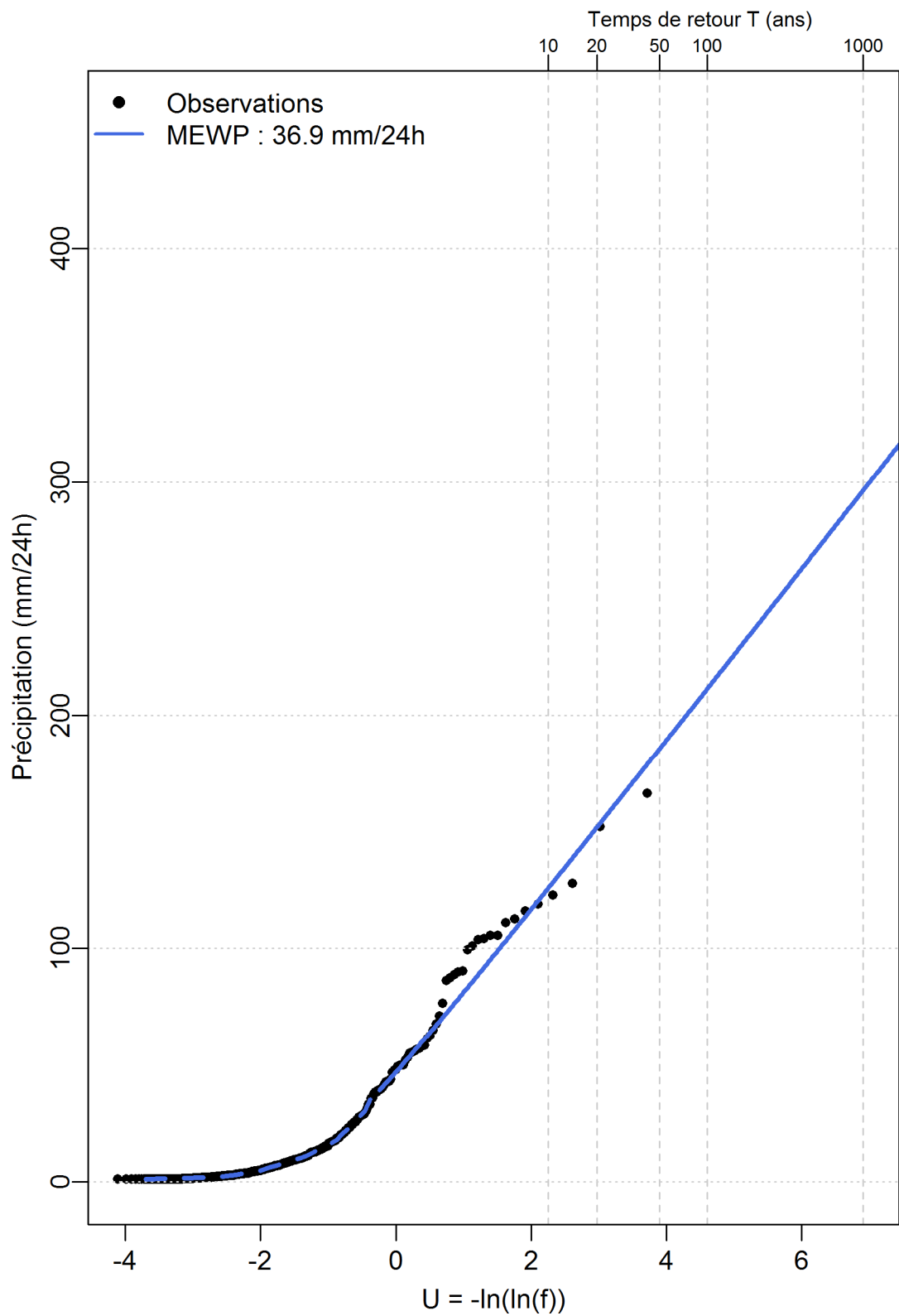
Penot, D. (2011) Génération de scénarios hydrologiques de référence pour les crues de projet calculées par la méthode SCHADEX. Rapport de projet de fin d'études, Grenoble INP-ENS3

SIEE (2006) Atlas des zones inondables du bassin versant du Tech par la méthode hydrogéomorphologique, pour le compte de la DIREN Languedoc-Roussillon

ANNEXE 1 – METHODE SCHADEX – AJUSTEMENTS MEWP SAISONNIERS

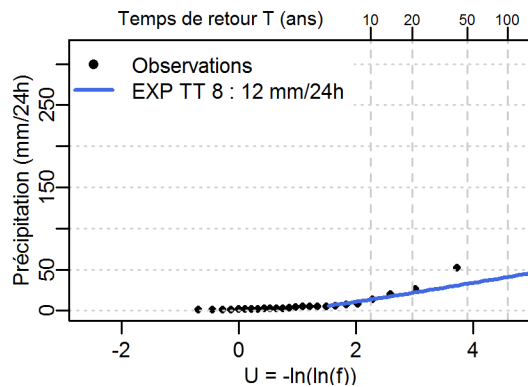
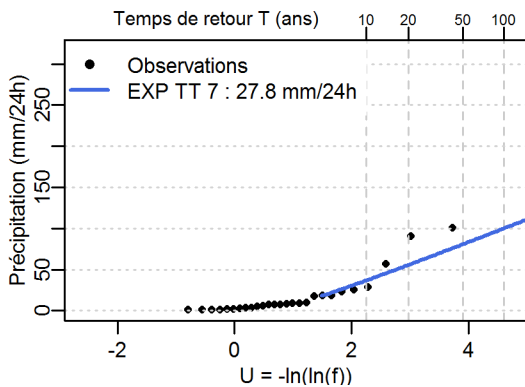
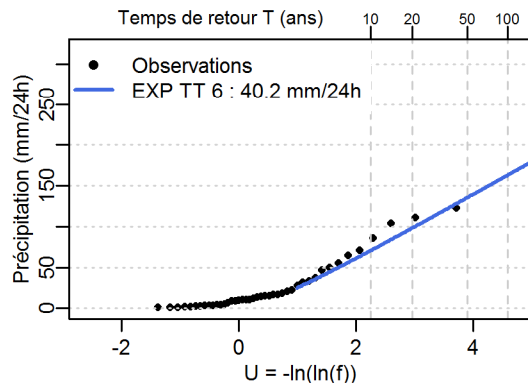
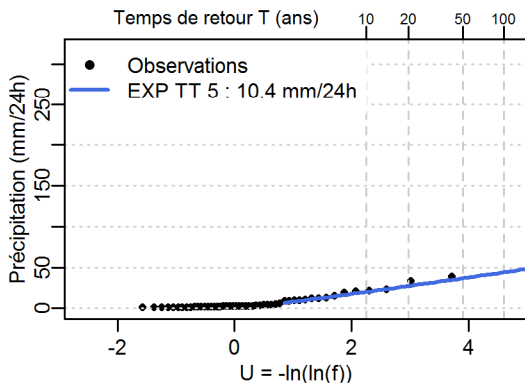
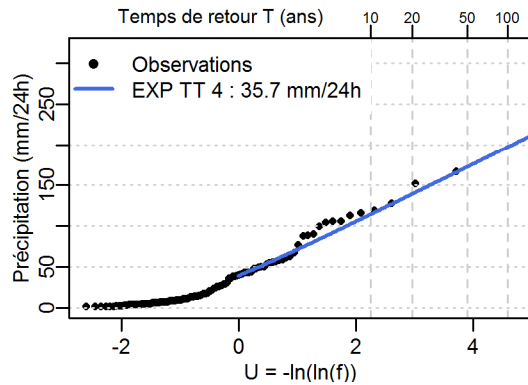
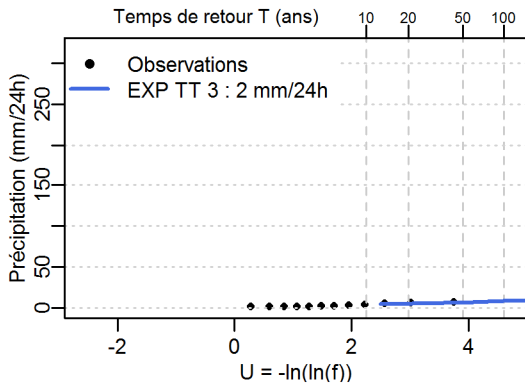
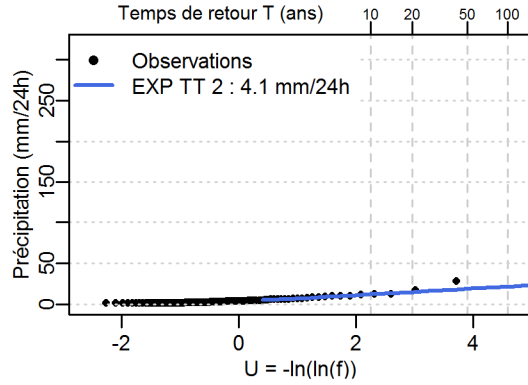
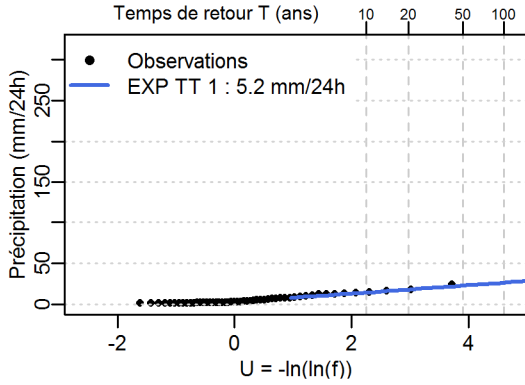
Tech-Reynes

Pluies centrales d'épisodes 1957-2005 - Saison 1 (Jan,Fev,Dec)



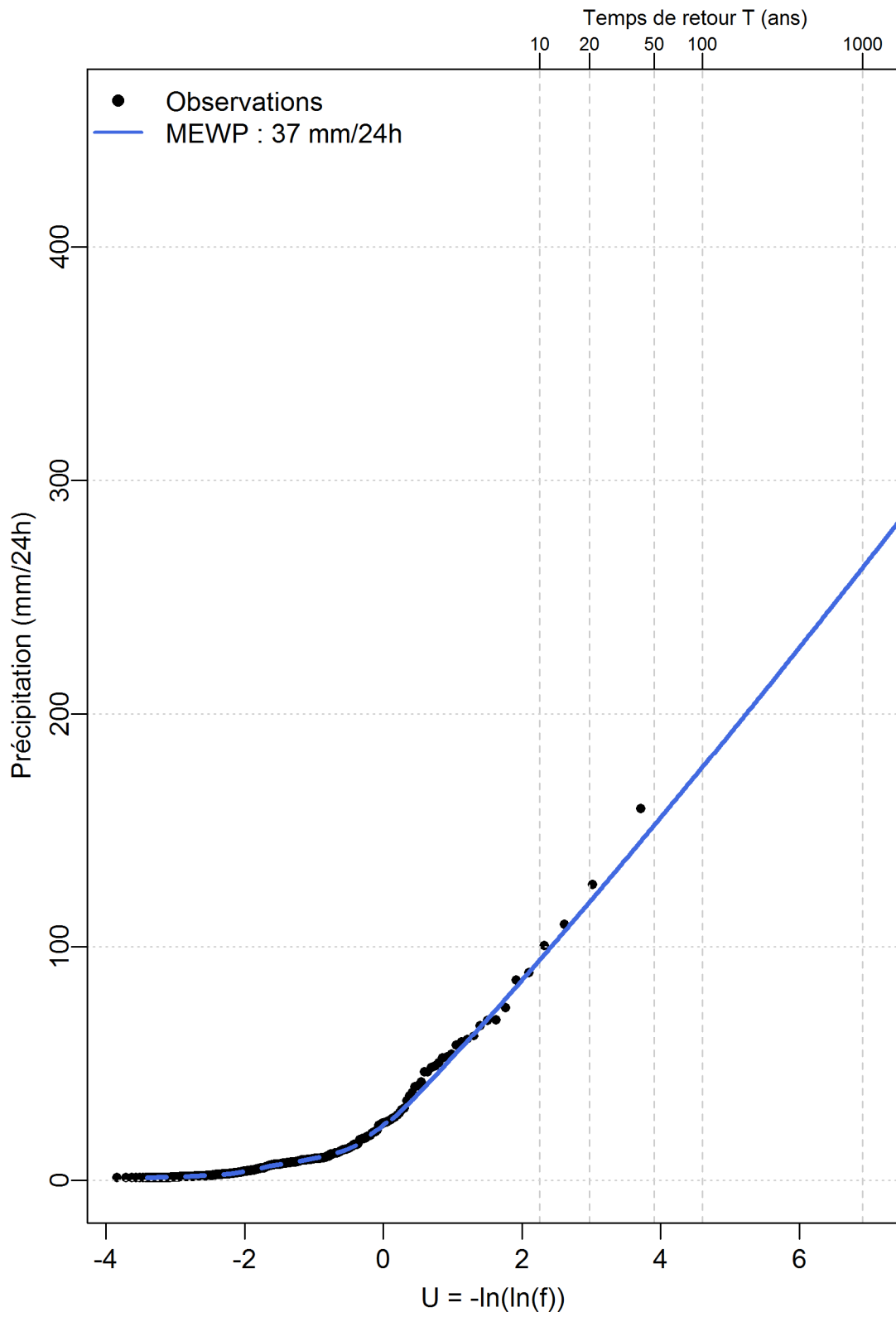
Tech-Reynes

Pluies centrales d'épisodes 1957-2005 - Saison 1 (Jan,Fev,Dec)



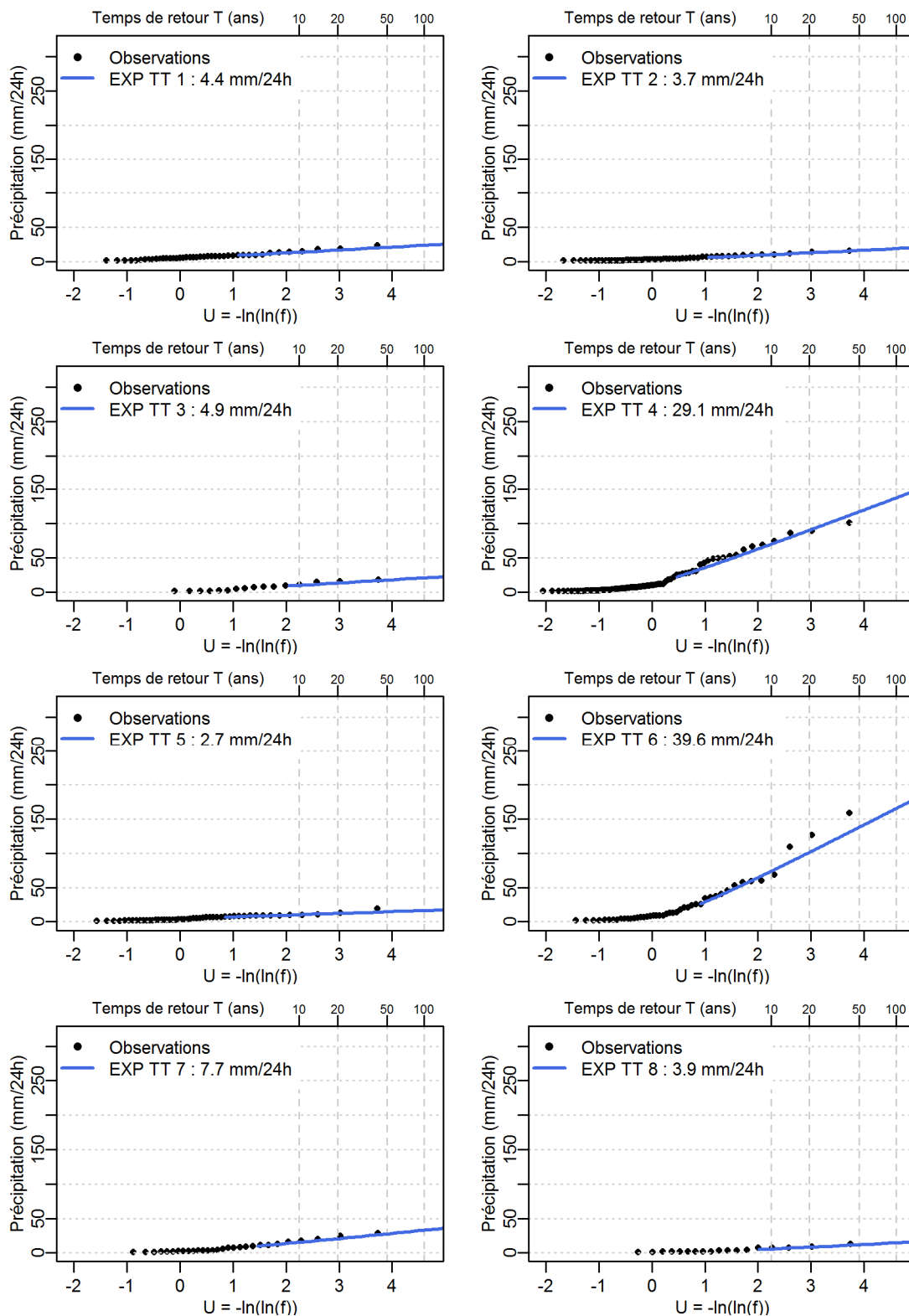
Tech-Reynes

Pluies centrales d'épisodes 1957-2005 - Saison 2 (Mar,Avr)



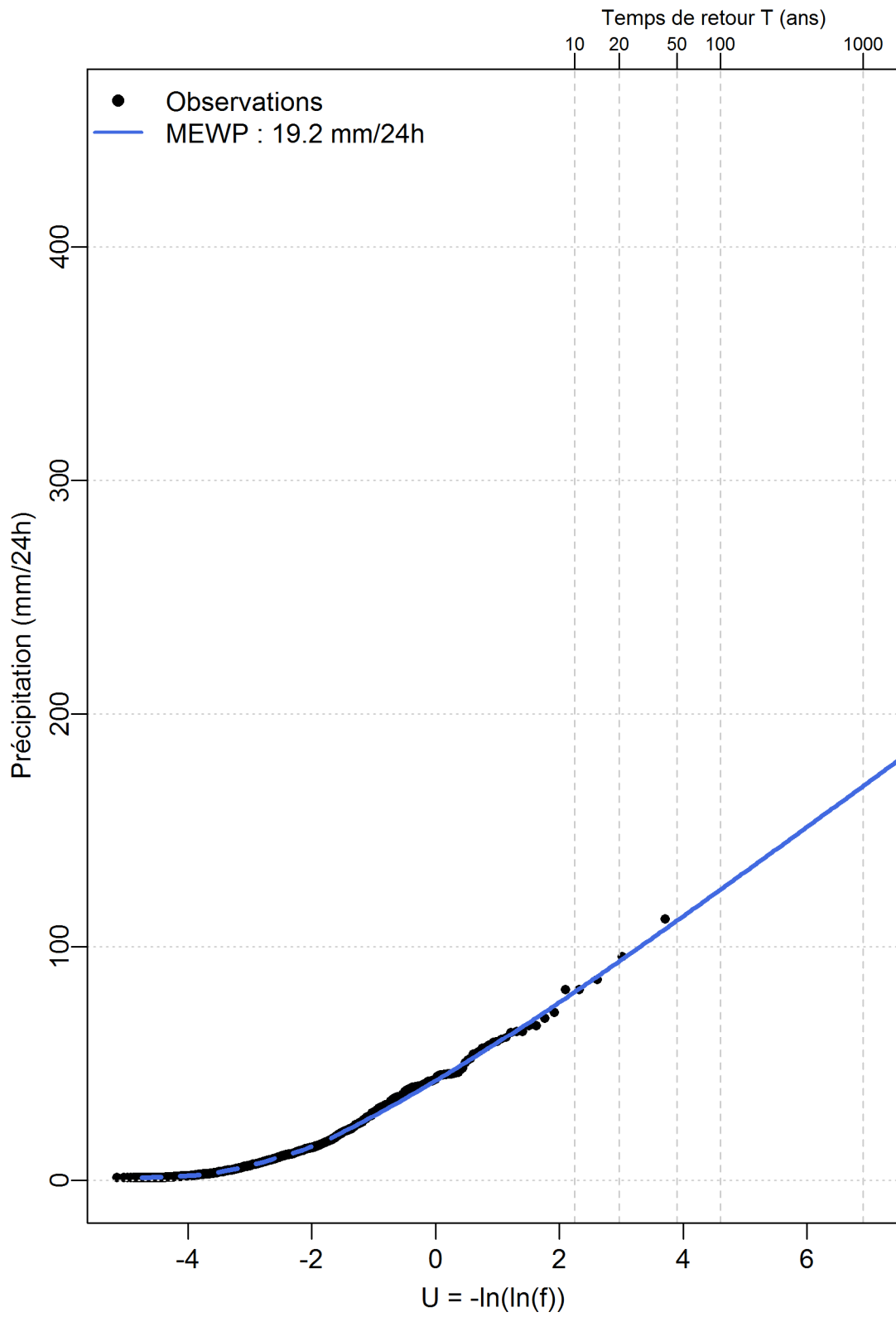
Tech-Reynes

Pluies centrales d'épisodes 1957-2005 - Saison 2 (Mar,Avr)



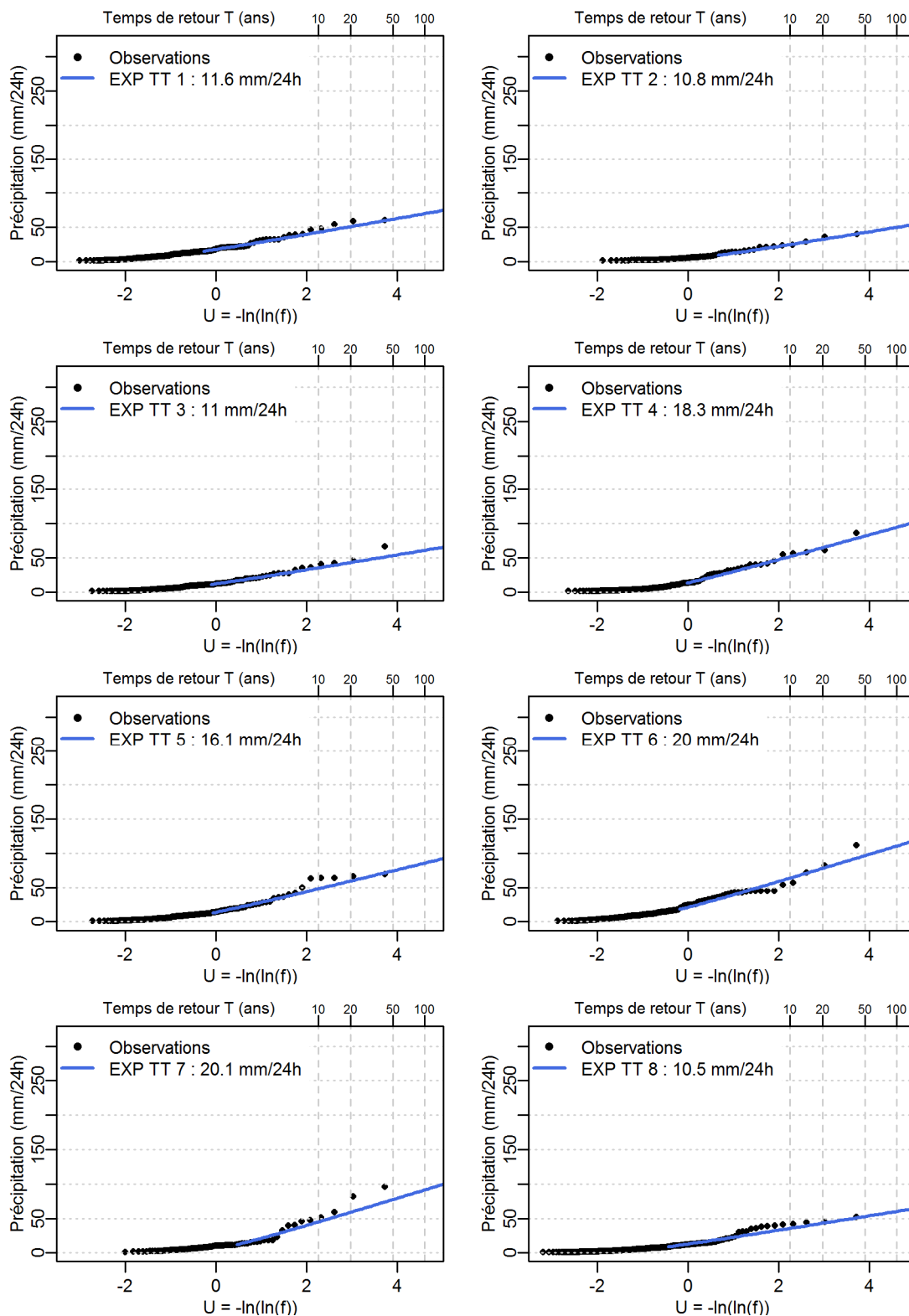
Tech-Reynes

Pluies centrales d'épisodes 1957-2005 - Saison 3 (Mai, Juin, Juil, Aou, Sep)



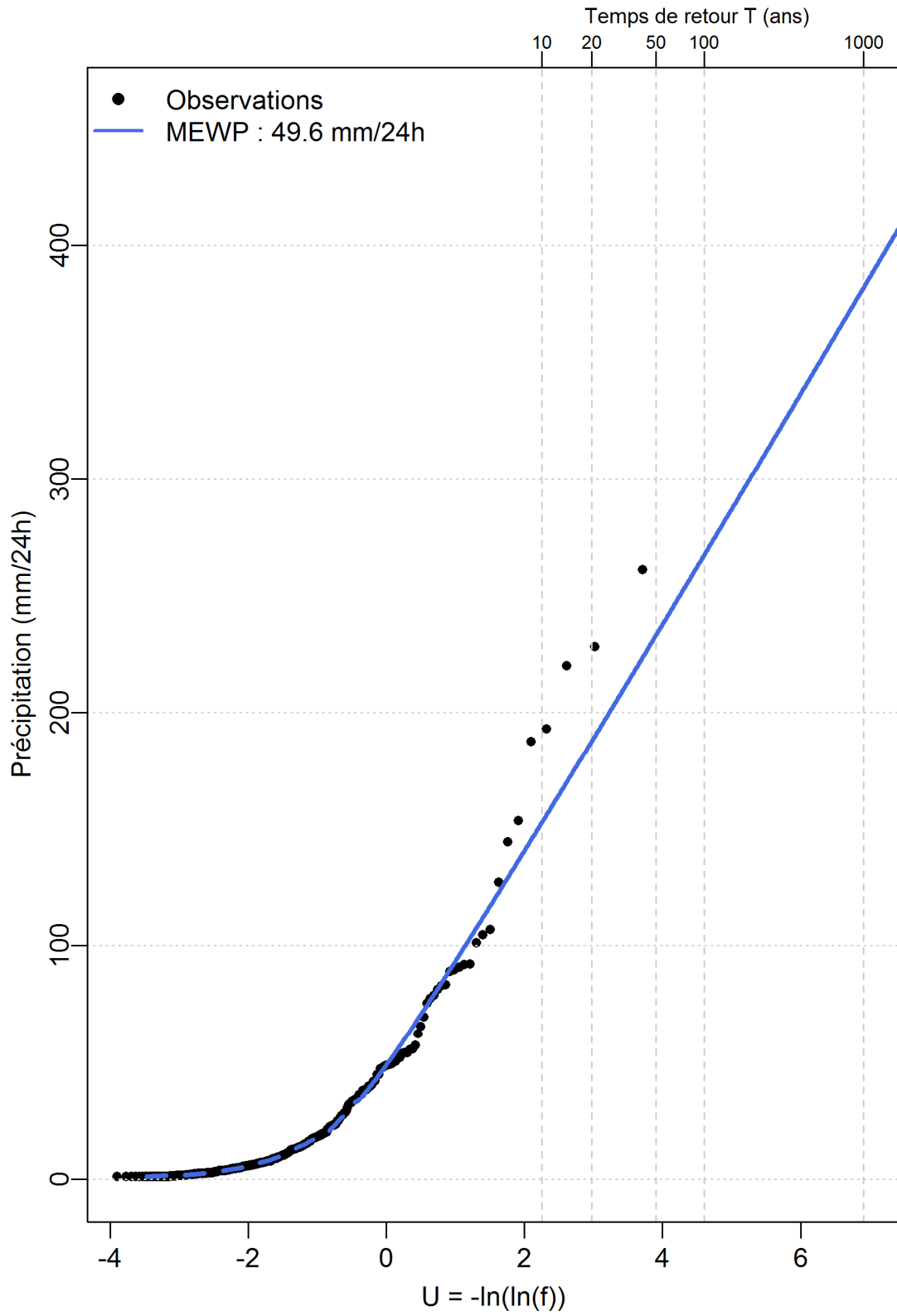
Tech-Reynes

Pluies centrales d'épisodes 1957-2005 - Saison 3 (Mai, Juin, Juil, Aou, Sep)



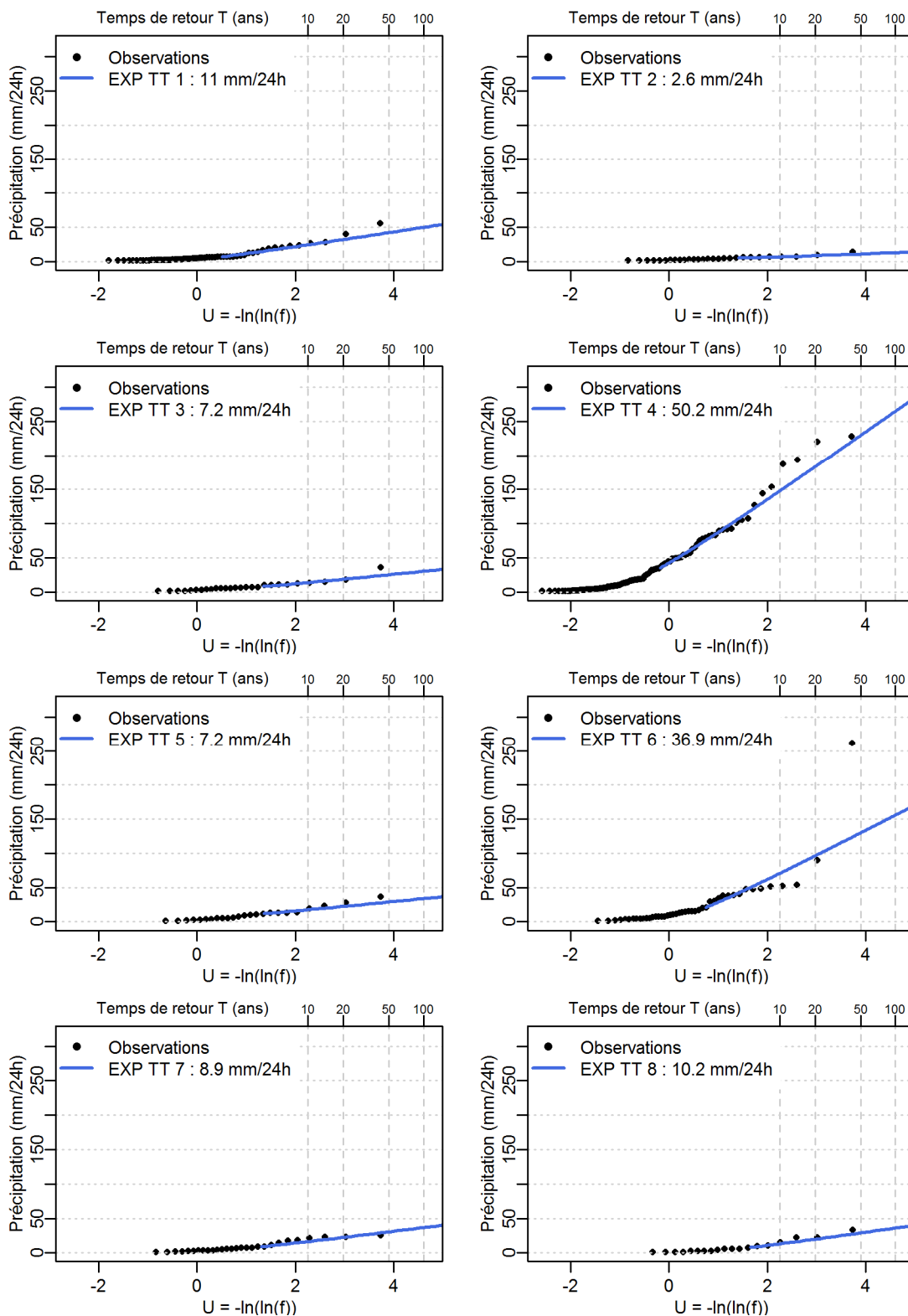
Tech-Reynes

Pluies centrales d'épisodes 1957-2005 - Saison 4 (Oct,Nov)



Tech-Reynes

Pluies centrales d'épisodes 1957-2005 - Saison 4 (Oct,Nov)



ANNEXE 2 – CALCUL DU COEFFICIENT DE FORME DES CRUES

Caractéristiques de 48 crues du Tech à Reynès sélectionnées pour le calcul du coefficient de forme

Date	QX (m3/s)	QJ (m3/s)	Kc	Kv
19/10/1977	1090.0	482.5	2.26	2.34
10/10/1987	931.0	320.1	2.91	2.27
12/11/1988	826.0	349.1	2.37	2.25
16/12/1995	803.0	415.7	1.93	2.33
13/11/1999	799.0	337.1	2.37	2.34
02/10/1986	731.0	269.2	2.72	2.07
08/11/1982	681.0	402.2	1.69	2.16
04/12/1987	618.0	350.6	1.76	1.87
23/12/2000	554.0	343.0	1.61	1.97
08/12/1996	493.0	286.4	1.72	1.50
08/05/2002	439.0	303.0	1.45	1.95
16/04/2004	406.0	221.5	1.83	2.27
26/02/2003	383.0	245.9	1.56	2.15
04/12/2003	372.0	163.7	2.27	2.08
18/05/1977	358.0	210.2	1.70	1.27
30/01/1996	325.0	273.8	1.19	1.87
17/02/1982	253.0	202.5	1.25	1.83
08/11/1983	252.0	141.4	1.78	1.62
21/03/1974	248.0	147.6	1.68	1.82
15/03/1972	231.0	124.9	1.85	1.92
06/02/1976	228.0	157.9	1.44	1.91
10/10/1994	213.0	111.6	1.91	1.88
01/03/1986	212.0	133.4	1.59	1.86
15/04/1980	208.0	130.2	1.60	2.14
22/12/1976	192.0	133.1	1.44	1.70
09/05/1991	192.0	139.4	1.38	1.71
24/01/1997	185.0	120.0	1.54	1.92
04/04/1988	179.0	91.9	1.95	1.92
19/01/1979	166.0	88.6	1.87	2.00
14/06/1972	151.0	109.6	1.38	1.54
07/01/1977	133.0	108.3	1.23	1.76
15/03/1984	132.0	69.2	1.91	1.92
07/12/1971	124.0	95.3	1.30	1.65
14/07/1977	117.0	42.0	2.79	1.70
25/05/2008	107.0	67.2	1.59	1.89
14/03/1971	104.0	82.4	1.26	1.86

27/03/1982	90.3	58.4	1.55	1.68
10/01/1996	85.0	49.0	1.74	1.87
05/03/1978	84.3	58.6	1.44	1.49
22/10/1982	84.1	47.1	1.78	1.80
17/11/1989	84.0	53.1	1.58	1.70
01/04/1982	82.7	57.4	1.44	1.41
24/01/1992	82.4	64.2	1.28	1.64
24/04/1981	79.5	63.8	1.25	1.69
04/09/1972	74.0	43.1	1.72	1.84
16/12/1975	72.9	45.1	1.62	1.95
14/11/1984	67.0	48.0	1.40	1.61
13/11/1996	61.1	39.8	1.53	1.62