

Projet ANR-08-RISK-03-01

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

Programme RISKNAT 2008

Tâche V : Diagnostic sur les méthodes de prédétermination

Rapport V « *Domaines d'application des méthodes de
prédétermination des pluies et crues extrêmes* »

Date : Mars 2013

Rapport réalisé par :

⁽¹⁾ Irstea, Centre de Lyon HHLY

Avec la participation de :

- ⁽²⁾ Irstea, Centre d'Aix-en-Provence, OHAX
- ⁽³⁾ Météo-France, Direction de la Climatologie, Toulouse
- ⁽⁴⁾ EDF/DTG, Grenoble
- ⁽⁵⁾ EDF/LNHE Chatou
- ⁽⁶⁾ HydroSciences, Montpellier
- ⁽⁷⁾ GéoSciences, Montpellier
- ⁽⁸⁾ Cete Méditerranée, Aix-en-Provence
- ⁽⁹⁾ Dreal Midi-Pyrénées Toulouse
- ⁽¹⁰⁾ Artelia, Grenoble

Auteurs :

M. Lang ¹, P. Arnaud ², Y. Aubert ², B. Renard ¹, E. Sauquet ¹, K. Kochanek ¹, T. Cipriani ¹,
A. Latapie ¹, B. Terrier ¹, A. Paquier ¹, J.M. Soubeyroux ³, J.M. Veysseire ³, F. Borchini ³, R. Fantin ³, E.
Paquet ⁴, F. Garavaglia ⁴, P. Bernadara ⁵, L. Neppel ⁶, J. Carreau ⁶, Y. Trambly ⁶, L. Dezileau ⁷, J.L.
Delgado ⁸, D. Chambon ⁹, H. Doumenc ⁹, J.C. Carré ¹⁰



SOMMAIRE

1. Rappel sur les méthodes de prédétermination utilisées en France	3
2. Méthodologie retenue pour la comparaison et l'évaluation des différentes méthodes de prédétermination	7
2.1. Inter-comparaison des méthodes sur un large jeu de données	7
2.2. Comparaison de méthodes sur quelques bassins tests	8
3. Recommandations pour l'estimation des pluies et crues extrêmes	10
3.1. Estimation de pluies extrêmes sur un site mesuré	10
3.2. Estimation de pluies extrêmes sur un site non mesuré	12
3.3. Estimation de crues extrêmes sur un bassin jaugé	12
3.4. Estimation de crues extrêmes sur un bassin non jaugé	14
3.5. Estimation des incertitudes et intérêt de la distribution prédictive	15
3.6. Emprise de la zone inondée par une crue extrême	16
3.7. Recensement des crues extrêmes par étude paléo-hydrologique	17
4. Pistes de recherche pour l'estimation des pluies et crues extrêmes	19
4.1. Amélioration des méthodes d'estimation des pluies extrêmes	19
4.2. Amélioration des méthodes d'estimation des crues extrêmes	19
4.3. Adaptation des méthodes d'estimation à un contexte non stationnaire	21
4.4. Comment exploiter la connaissance des incertitudes dans la prise de décision ?	25
5. Références	28

1. Rappel sur les méthodes de prédétermination utilisées en France

Les études hydrologiques réalisées en France pour la prévention du risque d'inondation ou le dimensionnement d'ouvrages hydrauliques couvrent une large gamme de méthodologies (Lang et Lavabre, 2007). Elles visent à déterminer des valeurs de référence de pluie ou de crue extrême, associées à une période de retour T donnée ou à un maximum connu. Suivant la nature des enjeux, la cible d'étude sera relative à :

- une probabilité annuelle de dépassement $p = 1/T$, qui va de 10^{-1} (réseau routier secondaire, réseau d'assainissement), 10^{-2} (autoroute, zone habitée), 10^{-3} (aléa majeur pour la Directive Inondations, barrage rigide) jusqu'à 10^{-4} (barrage meuble, centrale nucléaire) ;
- la crue historique la plus forte connue ou la crue centennale si celle-ci est plus forte (PPR inondation) ;
- la limite du lit majeur susceptible de contenir l'enveloppe des plus grandes crues passées (étude hydro-géomorphologique).

On peut distinguer trois familles de méthodes de prédétermination des pluies et des débits, basées sur :

1) L'utilisation de la théorie des valeurs extrêmes

La théorie des valeurs extrêmes (Embrechts *et al.*, 1997, Coles, 2001, Beirlant *et al.*, 2004), fondée sur des résultats de la théorie des probabilités, offre un cadre mathématique rigoureux pour l'estimation des probabilités de valeurs rares à extrêmes de pluie et de débit. La loi GEV (loi généralisée des extrêmes, Generalized Extreme Value distribution) (Fisher et Tippett, 1928, Jenkinson, 1955) et la loi GP (loi de Pareto généralisée, Generalized Pareto distribution) (Pickands, 1975) permettent respectivement de caractériser le comportement en loi de maxima et de dépassements de seuils élevés. Une hypothèse forte de l'application directe qui est faite de cette théorie réside dans l'écart entre le comportement idéal et asymptotique d'une loi mathématique et le comportement réel d'un phénomène physique observé dans des gammes de fréquence, nécessairement éloignées de l'asymptote, où l'homogénéité des événements n'est pas vérifiée et où les processus – atmosphériques, hydrologiques et hydrauliques – sont perturbés par des seuils physiques.

Analyse locale

L'application de la théorie des valeurs extrêmes sur une série courte de quelques dizaines d'années conduit à de fortes incertitudes d'estimation des événements extrêmes, liées à la distribution d'échantillonnage (forte sensibilité à la présence de valeurs singulières), à la possible hétérogénéité des populations fondant l'ajustement, et au choix du modèle probabiliste. Or les événements courants ne sont que peu informatifs, au sens statistique, pour la prédétermination des valeurs fortes de pluie ou de débit. La genèse physique de ces valeurs extrêmes est en effet bien différente de celle des événements courants. Appliquées sur de longues séries, ces approches redeviennent pertinentes pour l'estimation des valeurs extrêmes, d'où la préoccupation des hydrologues de développer des méthodes permettant d'incorporer des informations complémentaires aux seules séries locales de données de quelques dizaines d'années.

Analyse régionale

Une première façon d'augmenter la taille de l'échantillon d'analyse consiste à élargir le domaine spatial d'observation et à analyser simultanément les observations de différents

postes de mesure d'une zone supposée homogène. La première application (Dalrymple, 1960) considérait que les distributions des sites d'une même région homogène étaient identiques, à un facteur multiplicatif près, appelé indice de crue. De nombreux raffinements ont été apportés depuis (Hosking et Wallis, 1997a, St-Hilaire *et al.*, 2003, Onibon *et al.*, 2004, Ribatet *et al.*, 2006, 2007), notamment sur la notion d'homogénéité hydrologique (découpage géographique, puis voisinage hydrologique) et sur le mode de traitement statistique qui permet de combiner information locale et régionale, avec un poids fonction du degré d'homogénéité-hétérogénéité du jeu régional de données. Une des limitations de ces approches est souvent de ne pas considérer l'impact de la dépendance spatiale entre données, ce qui peut conduire à sous-estimer l'incertitude finale sur l'estimation des quantiles de pluie et de débit de référence (Hosking et Wallis, 1997b). Ces méthodes de régionalisation peuvent par ailleurs être utilisées pour estimer les quantiles de pluie ou de débit en site non jaugé, en combinant une loi régionale adimensionnelle (issue du formalisme précédent) et une méthode d'estimation de l'indice de pluie ou débit (régression multiple à partir de paramètres climatiques ou physiographiques explicatifs).

Intégration de données historiques

Une seconde approche consiste à réunir des informations sur les crues anciennes à partir de sources documentaires. L'intérêt est évidemment d'élargir l'échelle temporelle d'analyse, en utilisant des événements exceptionnels, qui sont potentiellement les plus riches d'information pour l'estimation des quantiles extrêmes. Le cadre statistique d'analyse doit être adapté (Miquel, 1984 ; Parent et Bernier, 2003 ; Neppel *et al.*, 2010 ; Gaume *et al.*, 2010 ; Payrastra *et al.*, 2011) au fait que l'on ne dispose que de données incomplètes, en général principalement sur les crues ayant eu de forts impacts, et que la reconstitution du débit de pointe des crues historiques est entachée d'incertitudes beaucoup plus importantes qu'avec des données récentes (cf. transformation hauteur-débit). Une autre incertitude est liée à l'estimation du seuil de perception des crues historiques, fixé de façon empirique et susceptible d'évoluer dans le temps.

2) La connaissance des processus de transformation pluie-débit

Transformation d'un hyétogramme de projet en hydrogramme de projet

Cette approche consiste à transformer une pluie de référence en crue de référence, en utilisant un modèle hydrologique de transformation de la pluie en débit, adapté aux caractéristiques physiques du bassin versant. La pluie est représentée par un hyétogramme de projet. Le fonctionnement du bassin versant est déterminé par des paramètres synthétiques qui décrivent les processus d'infiltration, de ruissellement et éventuellement d'évaporation, d'écoulement souterrain et de fonte des neiges.

Un modèle hydrologique fréquemment utilisé dans le monde est l'hydrogramme unitaire du Soil Conservation Service (Ven Te Chow, 1964), qui décrit le fonctionnement du bassin versant par deux paramètres synthétiques : le temps de concentration et le coefficient *CN* (« curve number »), associés respectivement à la cinétique de ruissellement et à la capacité d'infiltration. Il existe de nombreux autres modèles déterministes, parmi lesquels GR4J (Perrin, 2000), MORDOR (Garcon, 1996 ; Paquet, 2004), Topmodel (Beven et Kirby, 1979) ... Certains modèles hydrologiques ont été développés et calés sur typologie particulière de bassins versants et d'événements, et ne sont donc pas nécessairement bien adaptés pour décrire toutes les situations. Il est important que le modèle hydrologique soit bien calé sur des événements significatifs de crue, pour calibrer correctement les paramètres.

L'intérêt de cette approche est de pouvoir spécifier dans le détail la forme de la pluie de projet et de décrire le processus de rétention en eau du bassin par un modèle hydrologique. La difficulté réside dans le choix adapté des conditions initiales de saturation du bassin qui permette d'attribuer une période de retour à la crue de référence. Une hypothèse forte de ces approches est la correspondance directe entre une pluie de projet de période de retour donnée avec une crue de projet de même période de retour.

Modèles probabilistes simplifiés pluie-débit

La méthode du Gradex, développée par EDF (Guillot et Duband, 1967) pour la sécurité des grands barrages, a beaucoup été utilisée en France depuis plus de 30 ans pour l'estimation des débits de fréquences rare et exceptionnelle (période de retour 1 000 à 10 000 ans). La méthode utilise l'information pluviométrique pour extrapoler la distribution de fréquence des débits. Son succès est en particulier lié à sa (relative) facilité de mise en oeuvre qui résulte de la simplification extrême du processus de transformation de la pluie en débit. La méthode Speed (Cayla, 1993) donne directement la distribution de la pointe de crue, à partir de la distribution des pluies journalières et d'une estimation de la capacité maximale d'infiltration du bassin versant (en mm). Le modèle Agregee (Margoum, 1992 ; Margoum *et al.*, 1994) assouplit les hypothèses de base de la méthode du Gradex, en autorisant pour la pluie des lois non strictement à décroissance exponentielle et en introduisant une fonction analytique pour raccorder progressivement le domaine des crues observées et celui des crues exceptionnelles (saturation progressive du bassin versant).

Couplage d'un simulateur d'averses et d'un modèle hydrologique

Une approche plus complète consiste à utiliser un générateur d'averses pour mieux apprécier l'aléa pluviométrique et un modèle pluie-débit pour mieux représenter la transformation pluie-débit. Le modèle Shypre (Cernesson *et al.*, 1996 ; Lavabre *et al.*, 1998 ; Arnaud et Lavabre, 2000 et 2002), acronyme de Simulation d'HYdrogrammes pour la PREdétermination des crues, permet de générer de très longues chroniques de pluies horaires (sur 100 000 ans, par exemple) à partir d'hypothèses sur la structuration des averses et les lois de probabilités sous-jacentes. On déduit ensuite les hydrogrammes de crue par application d'une modélisation de la pluie en débit. Le classement des pluies et des débits simulés permet d'en extraire les valeurs maximales, de tracer les distributions de fréquence « empirique » des pluies et des débits de toutes durées, et d'en déduire les quantiles pour une large gamme de périodes de retour, de 2 à 1 000 ans, sans supposer à ce stade une loi de probabilité particulière. Une version régionale de Shypre, dénommée Shyreg (Arnaud et Lavabre, 2010), permet d'estimer les quantiles de pluie et de débit en tout point du territoire français.

La méthode SCHADEX (Paquet *et al.*, 2006, 2013) estime l'aléa de crue en composant les aléas pluie et état hydrique du bassin. Pour une saison donnée, les pluies sont probabilisées au moyen de lois exponentielles calées sur les sous-populations correspondant à huit types de temps, recombinaisons avec la probabilité relative d'occurrence de ces types de temps (distribution MEWP, Garavaglia *et al.*, 2010, 2011). Une méthode simplifiée de génération d'averses permet de croiser quasi exhaustivement les aléas précipitations et état hydrique du bassin en exploitant une chronique climatologique continue enregistrée sur le bassin. La réponse de celui-ci aux pluies simulées est obtenue à l'aide d'un modèle hydrologique (modèle MORDOR pluie-température-débit, prenant en compte la composante nivale), et conduit à la probabilisation des écoulements simulés et la détermination de la distribution des débits de crue.

3) L'exploitation de données naturalistes sur les crues

Hydro-géomorphologie

L'approche hydrogéomorphologique (Garry *et al.*, 1996) permet, à partir d'une analyse des cartes topographiques au 1/25 000°, de stéréographies aériennes et de reconnaissances de terrain par un géomorphologue, de distinguer les différentes unités du lit d'écoulement de la rivière : le lit mineur correspond à la section usuelle d'écoulement, le lit moyen assure la transition entre le lit mineur et le lit majeur, et le lit majeur, qui fonctionne pour les crues importantes, correspond à la plaine alluviale. Les limites de ce dernier lit donnent une idée de l'extension maximale du champ d'inondation. Cette méthode a fait l'objet d'une application généralisée à l'ensemble de la région Midi-Pyrénées (Prunet, 1998 ; Vidal, 2000 ; Lambert *et al.*, 2001) et des principaux cours d'eau des régions Languedoc-Roussillon et Provence-Alpes-Côte-d'Azur (Delgado, 2006), dans le cadre de la mise en place d'une cartographie informative sur les zones inondables.

Paléo-hydrologie

Une approche complémentaire, appelée paléo-hydrologie, permet par ailleurs la reconstitution du niveau atteint par les plus fortes crues depuis plusieurs millénaires, en s'intéressant aux dépôts laissés par les crues, soit directement dans le champ d'inondation, soit dans des cavités surplombant le lit mineur. Des techniques d'analyse stratigraphique et de datation des dépôts (C14, thermoluminescence) sont alors utilisées pour positionner en altitude les plus forts événements, et proposer une chronologie de crues (House *et al.*, 2002 ; Benito *et al.*, 2004). Les résultats obtenus sur le bassin de l'Ardèche (Sheffer *et al.*, 2003a) ont montré que la crue de 1890, la plus forte connue sur une période historique de quatre siècles, n'avait pas été dépassée depuis plusieurs milliers d'années. Inversement, les analyses paléo-hydrologiques menées sur deux grottes situées dans les gorges du Gard (Sheffer *et al.*, 2003b) ont mis en évidence la trace de cinq crues ayant dépassé le niveau de la crue de septembre 2002, dont trois sur la période 1400-1800. Les données historiques sur les crues des derniers siècles peuvent servir pour contrôler les résultats des datations de crues récentes, et inversement les données paléo-hydrologiques peuvent élargir le cadre temporel issu d'une recherche dans les sources d'archives.

Les approches naturalistes sont intéressantes dans la mesure où elles donnent des éléments objectifs sur les crues majeures survenues sur le bassin versant. Elles soulèvent toutefois des difficultés d'interprétation pour déterminer si les niveaux de crues atteints dans les conditions climatiques et géomorphologiques du passé restent représentatifs du risque d'inondation futur (cf. variations climatiques à l'échelle pluriséculaire, divagation latérale du cours d'eau dans la plaine d'inondation, changement de l'occupation du sol sur le bassin).

2. Méthodologie retenue pour la comparaison et l'évaluation des différentes méthodes de prédétermination

L'état de l'art précédent montre la grande diversité de méthodes de prédétermination des pluies et crues extrêmes, à laquelle vient se rajouter un foisonnement de variantes à l'intérieur de chaque famille. Par la suite, pour éviter toute ambiguïté nous utiliserons le terme « implémentation » pour distinguer une variante particulière.

Par nature, l'évaluation de méthodes dédiées aux valeurs extrêmes est délicate, puisque l'on s'intéresse à des événements en général rarement observés voire jamais atteints localement. La théorie des valeurs extrêmes repose sur un cadre mathématique rigoureux et il existe de nombreux résultats théoriques ou obtenus par simulation pour apprécier et comparer la pertinence de telle distribution (Fréchet, Gumbel, Weibull) ou de telle méthode d'estimation (maximum de vraisemblance, moments, moments pondérés). Mais ces résultats ne sont valables que d'un point de vue asymptotique, pour des tailles d'échantillon bien plus larges que celles rencontrées en hydrologie. De plus, la théorie des valeurs extrêmes est basée sur l'hypothèse que les valeurs de l'échantillon sont indépendantes et identiquement distribuées, ce qui n'est pas la règle en hydrologie.

Il est possible de mettre en place des tests statistiques pour apprécier si la distribution théorique issue d'une méthode-implémentation donnée est cohérente ou pas avec les observations. Toutefois la puissance de ces tests reste faible pour les valeurs extrêmes, lorsque la période de retour cible est bien plus importante que la taille de l'échantillon analysé.

Deux types d'évaluations peuvent être distingués :

- Le premier type s'applique à toutes les méthodes pouvant faire l'objet d'une application automatisée. Elles ont l'avantage de produire des estimations répétitives et objectives, sur de vastes jeux de données, ouvrant la voie à une qualification statistique rigoureuse.
- Le deuxième type s'applique à des méthodes requérant de l'expertise humaine, ne pouvant être appliquées automatiquement sur de grands jeux de données. L'analyse s'appuie alors sur des applications détaillées à des cas tests emblématiques et bien documentées, et examine finement les processus hydrologiques et statistiques en jeu dans l'extrapolation.

2.1. Inter-comparaison des méthodes sur un large jeu de données

C'est ce qui nous a conduit dans le projet à constituer des jeux de données conséquents, sélectionnés sur des critères de qualité de mesure, de durée minimale d'observation et d'absence d'influence anthropique :

- Données pluviométriques : 1122 stations x 35 années (nombre moyen par station)= 39 270 années-stations ;
- Données hydrométriques : 1170 stations x 40 années (nombre moyen par station)= 46 800 années-stations ;

Avec un tel effectif, il devient possible de détecter pour une implémentation donnée si l'estimation qui est faite par exemple de la pluie centennale est effectivement dépassée en moyenne une fois sur 100 ans, ou au contraire « trop » ou « pas assez » souvent. Il faut évidemment raisonner en régions homogènes, et mettre au point des procédures permettant de « mélanger » les données à l'échelle d'un jeu de plusieurs centaines de stations. Le dépassement d'un seuil d'intensité pluviométrique de 100 mm/jour n'a pas la même

signification suivant le régime climatologique, de même qu'une crue de 1 000 m³/s peut être tout à fait courante sur un grand bassin et exceptionnelle voire impossible sur un petit bassin versant.

Le rapport II.1 a présenté le principe général retenu pour la démarche d'inter-comparaison, avec l'utilisation de critères relatifs à la justesse et à la stabilité ou robustesse. La justesse renseigne sur la capacité d'une implémentation à délivrer des estimations cohérentes avec les observations ; la stabilité sur la sensibilité des estimations à l'échantillon disponible.

Les différents rapports III.1 à III.6 ont permis de comparer une série d'implémentations qui pouvaient être appliquées à grande échelle, en découpant le jeu complet de données en un premier jeu dédié au calage des paramètres de chaque implémentation, et un second jeu utilisé pour tester et évaluer les différentes implémentations au regard des critères de justesse et de robustesse.

Pour les précipitations extrêmes, nous avons testé :

- les approches basées sur la théorie des valeurs extrêmes : lois GEV-Gumbel ou GP-Expo (à l'échelle locale, régionale, locale-régionale), distribution MEWP par type de temps ;
- l'approche SHYREG-pluie par simulation d'averses (à l'échelle locale, régionale, locale-régionale).

A noter que ce protocole ne traite que des pluies locales, et que les pluies spatiales (à l'échelle du bassin versant) et leurs méthodes associées (fonction d'abattement notamment) n'ont pas été évaluées dans le projet.

Pour les crues extrêmes, nous avons testé :

- les approches basées sur la théorie des valeurs extrêmes : lois GEV-Gumbel (à l'échelle locale, régionale, locale-régionale), lois LogNormale, Pearson III et Log Pearson III ;
- l'approche SHYREG-débit par simulation d'averses couplée à un modèle hydrologique (à l'échelle locale, régionale, locale-régionale).

2.2. Comparaison de méthodes sur quelques bassins tests

D'autres méthodes-implémentations ne pouvaient facilement être testées à si grande échelle sur plusieurs centaines de stations, du fait de leur complexité, du temps nécessaire ou disponible pour réaliser une expertise au cas par cas, de la difficulté à disposer des données nécessaires ... Il s'agit pour les crues extrêmes :

- des approches basées sur la théorie des valeurs extrêmes par analyse des crues historiques et de l'approche multi-fractales ;
- des approches basées sur l'information pluviométrique et une transformation simplifiée pluie-débit : méthodes du Gradex, Agregee, Speed ;
- l'approche SCHADEX par simulation de pluies couplée à un modèle hydrologique ;
- l'approche SHYREG-débit dans une application expertisée ;
- des approches naturalistes par étude hydro-géomorphologique ou paléo-hydrologique.

Nous avons ainsi réalisé une action de comparaison sur un nombre limité de bassins versants, sur l'Ardèche, le Gard, le Tech pour les méthodes probabilistes, et sur le Gard et la Garonne pour les approches naturalistes. Il n'est alors pas possible de conclure sur la justesse de ces approches, mais a minima de les positionner les unes par rapport aux autres, en termes de valeur centrale et de dispersion (cf. rapports III.7 et III.8), et de voir les complémentarités

entre cartographie hydro-géomorphologique et modélisation hydrologique et hydraulique (cf. rapports IV.1 et IV.2).

La comparaison sur cinq bassins d'un large panel de méthodes de prédétermination des crues extrêmes a permis de distinguer (cf. rapport III.7) les méthodes qui utilisent de l'information supplémentaire pour conditionner l'extrapolation des débits (approche historique, approche régionale et méthodes basées sur l'information pluviométrique), et les autres (analyse fréquentielle standard des débits de crue et approche multi-fractales).

La comparaison, sur un ouvrage virtuel situé sur le bassin du Tech, d'une approche classique par routage d'un seul hydrogramme de crue avec deux approches par simulation de cotes dans une retenue a montré (cf. rapport III.8) l'intérêt de mieux prendre en compte la diversité des formes de crue possibles. Les résultats obtenus par simulation de cotes avec les méthodes SHYREG et SCHADEX sont cohérents.

3. Recommandations pour l'estimation des pluies et crues extrêmes

Dans le cadre d'une application opérationnelle sur un site quelconque, une étape préliminaire indispensable consiste à vérifier la qualité des données disponibles. On s'attachera ensuite à repérer des conditions particulières susceptibles de limiter la portée des recommandations ci-dessous établies dans un contexte général. Ces limitations sont les suivantes :

- Pluie en zone d'altitude : en excluant les tranches d'altitude les plus élevées qui représentent des fractions minimales du territoire, les pluies sont mal connues pour les Alpes entre 2 000 et 3 500 m, pour les Pyrénées entre 1 750 et 2 750 m, et pour la Corse entre 1 250 et 2 250 m (annexe rapport I). Sur le jeu de données des pluies journalières ExtraFlo, on recense respectivement 19%, 5% et 1% des stations à une altitude supérieure à 1 000, 1 500 et 2 000 m. La sous-représentation du réseau de mesure en altitude a des origines multiples : difficulté de gestion, influence du vent, ratio précipitation solide-liquide difficile à apprécier ... ;
- Crues sur de très petits ($S < 5-10 \text{ km}^2$) ou de grands bassins versants ($S > 5\,000-10\,000 \text{ km}^2$) : le jeu de données des débits journaliers ExtraFlo est relatif à des bassins de superficie comprise entre 10 et 2 000 km^2 . Sur les très petits bassins, peu de données sont disponibles pour appréhender correctement les processus. Sur les grands bassins, le signal hydrologique est complexe. A cette échelle, les processus hydrologiques tendent à perdre leur homogénéité spatiale et leurs conséquences sont souvent compliquées par des phénomènes hydrauliques d'origine naturelle ou anthropique (zones d'expansion des crues, concomitances de crue, gestion d'ouvrages hydrauliques...). Les approches basées sur la notion de pluie de bassin ne peuvent être appliquées en tant que telles, l'hypothèse d'homogénéité spatiale pouvant être prise en défaut. Il vaut mieux décomposer le problème en sous-unités hydrologiques ou climatiques homogènes, et gérer ensuite la question des concomitances et de la propagation des crues, ou exploiter les informations historiques sur les crues anciennes en reconstituant des longues séries hydrométriques ;
- Influence prépondérante dans le processus d'écoulement : karst, neige, zone urbaine, nappe, barrage, digue ... Un modèle hydrologique spécifique au bassin versant doit être utilisé de façon à représenter correctement la genèse des crues. Par exemple, les processus nivaux dans les bassins de montagne sont décrits par le modèle MORDOR dans la méthode SCHADEX. Cette modélisation a été éprouvée par des dizaines d'applications de SCHADEX pour des bassins de montagne en France, mais également en Norvège et au Canada. Plus généralement, les modélisations hydrologiques expertisées permettent la prise en compte de ces processus naturels ou anthropiques complexes.

3.1. Estimation de pluies extrêmes sur un site mesuré

Au-delà de la période de retour 100 ans, on se situe généralement dans le domaine de l'extrapolation des observations. Des recommandations peuvent être faites pour exploiter au mieux les informations d'une série locale, avec un échantillonnage approprié :

- **Mieux vaut utiliser un échantillon de valeurs supérieures à un seuil (avec une loi GP) qu'un échantillon de valeurs maximales annuelles (avec une loi GEV)**

La loi GEV sous-estime un peu les quantiles, et on obtient une meilleure estimation (plus juste et plus robuste) avec la loi GP. On choisira empiriquement un seuil permettant de

sélectionner entre $2N$ et $4N$ valeurs (N étant le nombre d'années d'observations), en s'assurant de l'indépendance des valeurs de l'échantillon.

- **Mieux vaut découper l'échantillon en sous-échantillons homogènes et recomposer ensuite chacune des distributions pour obtenir la distribution annuelle**

Cela permet de se rapprocher des conditions d'application de la théorie des valeurs extrêmes (valeurs de l'échantillon supposées indépendantes et identiquement distribuées). Il est intéressant d'utiliser un découpage saisonnier, qui induit une re-estimation de + 5 à 10% par rapport à un échantillonnage global. L'approche MEWP, par sous-échantillonnage par type de temps, permet d'avoir des échantillons plus homogènes et une meilleure qualité d'ajustement.

Les analyses menées dans le projet ExtraFlo ont montré que l'approche standard d'estimation des pluies extrêmes par ajustement des paramètres d'une loi GEV (max-annuel) ou GP (sup-seuil) à partir d'une série locale n'est pas recommandée : si l'on conserve trois paramètres, on ne dispose pas assez d'information pour caler correctement le paramètre de forme de la distribution. L'estimation est peu robuste, avec une forte sensibilité à la présence de valeurs singulières dans l'échantillon (c.a.d bien différentes du reste de la distribution). Si l'on utilise une loi à décroissance exponentielle (loi de Gumbel ou loi exponentielle) sur un échantillon global de précipitations journalières ou infra-journalières sans découpage préalable en sous-populations homogènes, on sous-estime la distribution des pluies fortes.

Trois méthodes peuvent être recommandées :

- **Estimation par une approche régionale de type index-flood avec une loi GEV**

Cette méthode a donné les meilleurs résultats en termes de justesse et de robustesse. Elle est simple d'application (une fois développée), avec d'une part une distribution régionale calée à partir des séries appartenant à la région d'étude, et d'autre part un index de pluie estimé à partir de la série locale. On dispose par ailleurs d'une estimation des intervalles de confiance. Elle nécessite par contre un développement spécifique pour chaque durée de pluie étudiée (pluie maximale journalière, horaire ...).

- **Estimation par le modèle de simulation SHYREG-Pluies**

Cette méthode a donné des résultats très proches en termes de justesse et de robustesse. Elle fournit une estimation pour une pluie locale à l'échelle d'un pixel de 1 km^2 . L'intérêt de la méthode est qu'elle fournit directement une estimation des quantiles de pluie, pour des cumuls entre 1 h et 72 h.

- **Estimation par le modèle par type de temps MEWP (Multi-Exponential Weather Pattern)**

Ce type de distribution a donné de bons résultats en terme de robustesse, et en second rang pour la justesse, bien qu'elle n'exploite qu'une série locale de précipitations. L'information sur les types de temps s'avère un moyen intéressant d'améliorer la qualité des estimations. La méthode est directement applicable pour une pluie de bassin. L'hypothèse exponentielle serait cependant à reconsidérer pour certains types de temps, dans certaines régions du pourtour méditerranéen, si l'on s'en tient à la classification actuelle, pour remédier à une sous-estimation des quantiles des pluies locales.

3.2. Estimation de pluies extrêmes sur un site non mesuré

Bien que très documentée dans la littérature, l'approche consistant à estimer les paramètres d'une loi GEV au droit de tous les postes voisins et à établir ensuite une régression expliquant ces paramètres en fonction de co-variables géographiques ne donne pas de bons résultats. **Il est préférable d'utiliser :**

- **Estimation par le modèle de simulation SHYREG-Pluies**

Cette méthode a donné les meilleurs résultats en termes de justesse et de robustesse. Une estimation des quantiles est disponible sur l'ensemble du territoire métropolitain, pour des cumuls de pluies entre 1 h et 72 h, et des périodes de retour de 2 à 1 000 ans.

- **Estimation par une approche régionale de type index-flood avec une loi GEV**

Cette méthode a donné de bons résultats en terme de justesse, et un peu moins robustes qu'avec le modèle SHYREG-Pluies.

La comparaison entre modèle local-régional et purement régional ne montre qu'une dégradation légère des performances en n'exploitant aucune information locale (site non jaugé). Ce constat plutôt rassurant vient de la relative bonne adéquation du réseau de mesure pluviométrique journalier à la variabilité spatiale des précipitations. Il est à nuancer pour les intensités de précipitation infra-journalière ou en zone d'altitude, avec une densité de réseau bien inférieure.

3.3. Estimation de crues extrêmes sur un bassin jaugé

La confiance que l'on peut accorder dans l'extrapolation d'une distribution est plus faible pour les crues que pour les pluies extrêmes. Au-delà de la période de retour 50 ans, on observe une forte variabilité de comportement asymptotique, suivant la diversité de régime hydrologique (crue pluviale, nivale, mixte) et de bassin versant (capacité de rétention, superficie).

Ceci a été bien illustré lors de la comparaison de l'ensemble des méthodes sur quelques bassins tests (cf. rapport III.7) : l'approche standard par ajustement d'une distribution sur les maximum de crue extrapole dans la continuité des observations, et peut conduire à de forts biais d'estimation en comparaison avec la distribution empirique des crues historiques disponibles sur une plus longue période. La figure suivante sur le Gardon à Corbès montre que les approches locales (loi Gumbel et GEV), qui n'exploitent que la série locale (1970-2012), donnent une estimation de la crue centennale un peu inférieure à 1 000 m³/s, alors que l'approche GEV régionale dépasse un peu 1 000 m³/s, et que les méthodes basées sur l'information pluviométrique (SHYREG, SCHADEX, GRADEX, AGREGEE, SPEED) sont bien au-dessus, entre 1 300 et 1 600 m³/s. L'exploitation de l'information historique, avec trois crues supérieures à 1 200 m³/s sur la période 1744-1970 est cohérente avec le dernier groupe de méthodes basées sur les pluies.

Gardon à Corbes (263 km²) - Estimation des débits de pointe Info historique

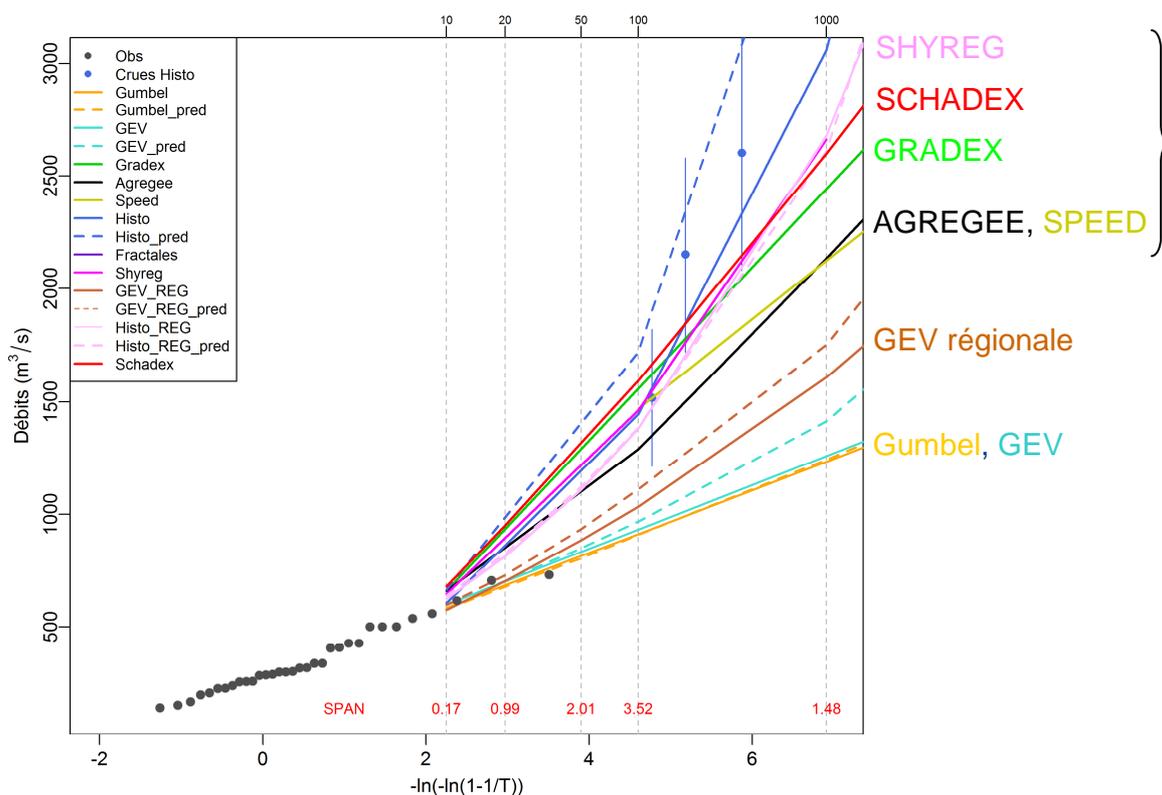


Figure 1. Comparaison des quantiles de crue en débit de pointe sur le Gardon à Corbès (cf. rapport III.7)

Comme pour les pluies, **l'approche standard par ajustement des paramètres d'une distribution à partir d'une série locale n'est pas recommandée pour l'estimation des crues extrêmes**. Il est important d'exploiter des informations complémentaires pour conforter l'extrapolation de la distribution des crues. Nous recommandons d'utiliser :

- **Les méthodes de simulation basées sur l'information pluviométrique**

La méthode SHYREG-débit a été testée sur un jeu étendu de données hydrométriques (519 stations en mode local, 1 076 stations en mode régional). Parmi les méthodes applicable en mode semi-automatique, elle a donné les meilleurs résultats en termes de justesse et de robustesse. Une tendance à la sur-estimation a toutefois été détectée sur le secteur méditerranéen, estimée autour de 5 à 10 % en moyenne.

La méthode SCHADEX relève de la même famille de méthode. Dans son application industrielle, elle s'appuie sur l'expertise hydrologique du chargé d'étude. Elle n'a pas donc pu faire l'objet d'une application semi-automatique sur le jeu de données hydrométriques du projet, et donc n'a pas pu être évaluée selon le protocole de l'action III. Cependant, son application sur cinq bassins tests en secteur méditerranéen (cf. rapport III.7) a montré que l'extrapolation vers les valeurs extrêmes qu'elle propose est dans la même famille que celles des évaluations GRADEX et SHYREG-débit. Une étude basée sur 60 études industrielles expertisées d'EDF et publiée en 2012 aboutit à un constat similaire sur l'estimation des valeurs extrêmes par SCHADEX et GRADEX (Paquet *et al.*, 2012)

- **L'approche locale-régionale de l'index-flood avec une loi GEV**

La méthode a donné de bons résultats, assez proches de ceux de SHYREG-débit, et de meilleure qualité en secteur méditerranéen. Lors de la comparaison sur bassins tests en secteur méditerranéen (cf. rapport III.7) cette approche a donné des estimations légèrement inférieures à ceux obtenus à partir d'une information pluviométrique. En secteur océanique, l'utilisation d'une loi de Gumbel semble acceptable avec une approche locale-régionale. Insistons ici sur l'importance des données locales : une approche purement régionale donne des résultats très médiocres.

- **L'information historique sur les crues**

La méthode n'a pas été testée à grande échelle (cf. nombre limité de bassins où une information de ce type est immédiatement accessible), mais elle a donné sur quelques bassins tests (cf. rapport III.7) des résultats voisins de ceux obtenus à partir d'une information pluviométrique.

L'obtention d'hydrogrammes de crue de référence passe généralement par la détermination du débit de pointe $Q_p(T)$ relatif à une période de retour T cible et par l'utilisation d'une forme moyenne de crue. Un contrôle de cohérence peut être fait sur le volume de la crue, à partir de quantiles de crue $Qd(T)$ pour un débit moyen maximal calculé sur différentes durées d . **Les méthodes par simulation SHYREG et SCHADDEX offrent une alternative intéressante à l'hypothèse d'une forme moyenne de crue, avec l'introduction d'une variabilité des formes de crue.** Une application a été réalisée pour la simulation de cotes extrêmes dans une retenue (cf. rapport III.8).

3.4. Estimation de crues extrêmes sur un bassin non jaugé

La qualité des estimations est bien dégradée lorsque l'on ne dispose pas de mesure hydrométrique au droit du site cible. L'interpolation spatiale est plus difficile à réaliser que pour les précipitations extrêmes, car le réseau hydrographique introduit des discontinuités bien plus fortes. En l'état toutes les méthodes testées ont une justesse qui reste assez médiocre. Comme pour les précipitations, l'approche consistant à estimer les paramètres d'une loi GEV au droit de tous les postes voisins et à établir ensuite une régression expliquant ces paramètres en fonction de co-variables géographiques ne donne pas de bons résultats. **Il est préférable d'utiliser :**

- **Estimation par le modèle de simulation SHYREG-Débit**

Cette méthode est de loin la plus robuste, et un peu plus juste que les autres. Une tendance à la sur-estimation des quantiles a été détectée en secteur méditerranéen. Les quantiles de crue sont disponibles sur l'ensemble du territoire métropolitain, pour le débit de pointe Q_p et les débits moyens Qd (d entre 1 h et 72 h), et des périodes de retour de 2 à 1 000 ans. Un certain nombre de limitations sont rappelées aux usagers (cf. collège d'experts, 11 décembre 2012) : l'approche n'a pas été validée hors de la gamme usuelle de superficie des bassins jaugés [10 ; 2 000 km²] et le cas de bassins à fonctionnement spécifique (influence nivale, karst, barrages, zone urbaine) mérite un complément d'étude.

- **Estimation par une approche régionale de type index-flood**

Cette méthode a donné des résultats corrects, un peu moins robustes qu'avec le modèle SHYREG-Pluies. Les résultats sont meilleurs en secteur méditerranéen avec une loi GEV régionale.

3.5. Estimation des incertitudes et intérêt de la distribution prédictive

Comme expliqué dans le rapport sur la méthodologie de comparaison (rapport II.1), la distribution prédictive a été utilisée dans ce projet comme un moyen indirect de comparer les incertitudes quantifiées par les diverses implémentations. En d'autres termes, l'objectif était de comparer les distributions prédictives de deux méthodes entre elles. Parallèlement à cet objectif, nous avons également cherché à évaluer qui, de la distribution centrale ou de la distribution prédictive, présentait les meilleures performances en termes de justesse et stabilité. En d'autres termes, ce second objectif consiste à comparer, pour une implémentation donnée, les distributions centrales et prédictives.

D'une façon générale, comme l'intervalle de confiance des quantiles de pluie ou crue est asymétrique, avec la borne supérieure plus éloignée de l'estimation centrale que la borne inférieure, la distribution prédictive donnera des quantiles plus forts que la distribution centrale. On s'attend à ce qu'une méthode qui sous-estime avec la distribution centrale soit en général améliorée avec la distribution prédictive (sauf si la ré-évaluation à la hausse est trop forte).

Dans les résultats des actions, l'intérêt d'utiliser la distribution prédictive à la place de la distribution centrale s'est avéré très variable d'une implémentation à l'autre :

- **Estimation locale de lois des valeurs extrêmes (pluie et débit)**

Pour les lois GEV ou GP, l'estimation du paramètre de forme reste entachée d'incertitudes considérables. Il n'est ainsi pas rare d'effectuer des erreurs d'estimation importantes pour ce paramètre, ce qui peut conduire à une distribution bornée. Dans une fraction non négligeable de cas, la distribution centrale estimée sur l'échantillon de calage possède ainsi une borne supérieure, qui est dépassée par une des valeurs de l'échantillon de validation. En d'autres termes, on observe des événements jugés strictement impossibles par le modèle GEV/GP ! La distribution prédictive permet de contourner ce problème, puisqu'elle n'est en général pas bornée, du fait de l'intégration des incertitudes sur le paramètre de forme. Néanmoins, l'utilisation de la distribution prédictive peut avoir tendance à créer des sur-estimations pour une fraction importante des stations. De plus, sa stabilité reste médiocre comparée à des approches qui utilisent une information supplémentaire (information régionale ou sur les pluies).

- **Approche MEWP**

L'estimation prédictive semble globalement améliorer la justesse, sans détériorer la robustesse (qui était déjà acceptable en estimation centrale, grâce à l'utilisation d'échantillons homogènes par type de temps et de lois exponentielles). Une explication possible est qu'asymptotiquement, la loi MEWP se comporte comme une distribution exponentielle (celle associée au type de temps le plus « à risque »), ce qui peut entraîner une sous-estimation dans certains secteurs Méditerranéens notamment. Le passage à la distribution prédictive permet de revoir à la hausse ce comportement asymptotique.

- **Approches régionales pour les pluies**

On observe peu de différence entre estimation centrale et estimation prédictive. Ceci peut s'expliquer par le fait que les incertitudes d'estimation sont relativement faibles, et que ces approches sont déjà plutôt fiables et stables en estimation centrale.

- **Approches régionales pour les crues**

On observe des différences plus marquées entre estimation centrale et estimation prédictive, sans qu'il soit possible de déclarer quelle estimation est plus juste ou plus stable. En particulier, les diagnostics de justesse restent dans tous les cas médiocres.

En résumé, bien que l'intégration des incertitudes via la distribution prédictive permette d'améliorer certaines implémentations (notamment le problème des bornes supérieures pour les lois GEV/GP estimées localement), elle ne constitue pas une solution miracle : elle ne permet pas de rattraper une régression (indice de crue – propriétés des bassins) peu performante (cf. implémentation purement régionales pour les débits), et ne règle pas le problème du manque de stabilité causé par l'incertitude d'échantillonnage. L'utilisation d'une distribution prédictive ne remet donc pas en cause les grandes lignes des recommandations énoncées en section 2, en particulier l'intérêt d'utiliser des informations complémentaires aux données locales (information régionale, données historiques, type de temps, transformation pluie-débit).

3.6. Emprise de la zone inondée par une crue extrême

La comparaison sur la Garonne et sur le Gardon (cf. rapports IV.1 et IV.2) des différents lits définis par approche géomorphologique et des zones inondées calculées avec les modèles hydrauliques montre une continuité dans les valeurs de débits de remplissage sur des linéaires relativement homogènes. Des différences ont été relevées en secteur anthropisé où la forme du lit n'est plus directement interprétable.

Le choix d'une approche (modélisation hydraulique ou géomorphologie) dépend principalement des données disponibles (topographie de la rivière, fonctionnement des ouvrages, hydrologie) et du temps imparti à l'étude. En fonction des particularités des différents tronçons identifiés, les avantages et les limites des différentes approches sont détaillés dans le tableau suivant.

Secteur	Géomorphologie		Modèle hydraulique 1D		Modèle hydraulique 2D	
	+	-	+	-	+	-
Zone urbaine endiguée	Rapide à mettre en œuvre et coût limité	Impact ouvrage non pris en compte	Quantification des phénomènes et rapidité du calcul	Topographie du lit majeur	Accès au champ des vitesses et adapté aux écoulements complexes	Détails ouvrages
Ile		Aucun		Topographie bifurcation		Topographie bifurcation
Confluence		Limites Z.I confondues		Concomitance et effets 2D		Concomitance ; topographie zone confluence
Encaissant peu marqué		Limite du lit majeur erronée		Aucun		Aucun

En zone urbaine, l'approche géomorphologique donne simplement les limites « naturelles » de l'encaissant : la modélisation hydraulique est indispensable pour apprécier correctement l'impact des digues éventuelles et les conditions d'écoulement dans les rues. La présence d'îles ne pose pas de problème particulier en géomorphologie, alors qu'il est nécessaire de disposer de levés détaillés de la topographie pour alimenter les modèles hydrauliques. En

zone de confluence, l'approche géomorphologique donne directement l'enveloppe des zones inondées par la crue soit du cours d'eau principal soit de l'affluent, sans information spécifique sur l'origine de la crue. L'approche hydraulique nécessite une hypothèse sur le risque de crues simultanées sur les deux branches et l'emploi d'une modélisation 2D lorsque des recirculations existent. En zone rurale, l'interprétation géomorphologique de l'encaissant est délicate lorsque celui-ci est peu marqué, alors que le modèle hydraulique donne correctement l'extension des zones inondées.

La modélisation hydraulique 1D est prise en défaut lorsque les écoulements sont complexes : fonctionnement en casiers multiples, recirculations latérales, ligne d'eau non horizontale sur un profil en travers situé en courbe. Dans ce type de configuration, la modélisation hydraulique 2D permet de mieux simuler les écoulements, sous réserve de disposer d'une topographie bien détaillée. Des progrès récents ont été obtenus sur la topographie en lit majeur via les campagnes Lidar. Pour la topographie du lit mineur, des levés de terrain restent nécessaires et représentent un coût d'acquisition non négligeable.

A noter que pour les deux approches, il est très intéressant d'exploiter l'information sur les crues historiques : elles permettent de recouper les limites obtenues par l'approche géomorphologique, et d'aider au calage du modèle hydraulique quand des laisses de crue sont disponibles. La géomorphologie peut apporter des informations utiles à un modèle hydraulique, notamment lors de la constitution de la topologie du modèle et de ses différents chenaux d'écoulement. L'hydraulique peut permettre de recouper des anomalies dans les limites de l'approche géomorphologique (discontinuités dans le débit de l'encaissant) et également d'interpoler en secteur aménagé.

3.7. Recensement des crues extrêmes par étude paléo-hydrologique

L'étude paléo-hydrologique menée dans les gorges du Gardon pendant le projet ExtraFlo a montré la possibilité de retrouver la trace de crues anciennes sur plusieurs siècles. Le principe est de rechercher des sites de dépôt préservés de tout remaniement : il peut s'agir de plages de dépôt situées dans le lit majeur ou dans des cavités situées en surélévation par rapport au lit mineur. La réalisation de coupes permet par analyse stratigraphique de mettre en évidence une alternance de couches de dépôts de crue avec une granulométrie plus importante, et de couches végétales. La datation de chaque sédiment de crue est alors généralement réalisée à l'aide de la teneur en isotope ^{14}C .

Dans une cavité située à 15 m au-dessus du lit mineur, 23 dépôts de crue ont pu être identifiés, dont le débit est supérieur au débit de submersion du site, à savoir $4500 \text{ m}^3/\text{s}$. Les datations ont permis de repérer une dizaine de crues pendant le XVe et XVIe siècle et une dizaine du XVIIe au XXe siècle.

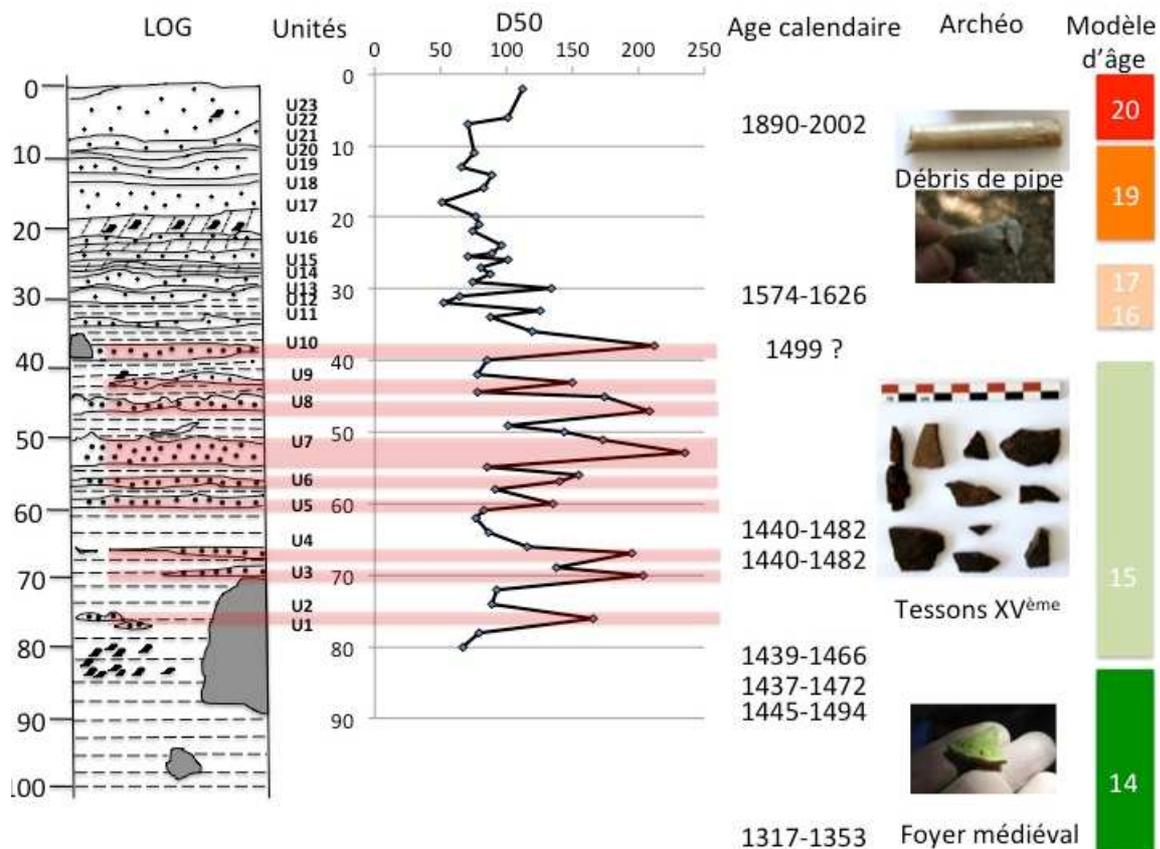


Figure 2. Log de la coupe GG dans les gorges du Gardon : unités de dépôts de crue, granulométrie (D50), âges ¹⁴C, objets archéologiques et modèle d'âge (cf. rapport IV.3)

L'analyse de dépôts plus anciens n'a pas pu être poursuivie, l'autorisation de continuer à creuser dans ce site ayant été suspendue, au profit de fouilles archéologiques. En l'état, il semble bien que l'entrée dans le petit âge glaciaire a induit une augmentation d'évènements intenses de crues dans les Cévennes. Ces résultats rejoignent les conclusions de Thorndycraft et Benito (2006) sur des sites espagnols, qui suggéraient un impact large échelle des changements climatiques au XV^e siècle sur l'Europe occidentale concernant les évènements de crue extrême. Cette conclusion est à confirmer par l'étude d'autres sites dans le sud de la France.

L'étude a montré par ailleurs que la datation au radiocarbone, généralement sur des charbons de bois préservés dans les sédiments, n'est pas très précise et susceptible d'erreurs importantes liées à la remobilisation de sédiments anciens. Des charbons de bois anciens peuvent se retrouver dans des dépôts plus récents. Même si les datations au radiocarbone sur graines ont donné de meilleurs résultats, il est préférable de recouper les datations de plusieurs marqueurs, avec l'utilisation combinée du plomb-210, du césium-137, de l'analyse géochimique des sédiments contaminés par les mines et de la présence d'objets archéologiques.

Les résultats antérieurs de Sheffer *et al.* (2008), qui ont identifié dans les gorges du Gardon sur deux sites plus élevés (19 et 21 m au-dessus du Gardon) la trace de deux crues qui auraient dépassé le débit de 8 000 m³/s, nous semblent erronés. L'analyse de la composition en quartz, chlorite, micas, calcite et feldspath des différentes unités de ces deux sites a montré qu'elles contiennent de la calcite et ne sont pas issues d'un transport de matériaux en crue, mais plutôt de l'érosion des dépôts de sol présent au dessus de la cavité.

4. Pistes de recherche pour l'estimation des pluies et crues extrêmes

4.1. Amélioration des méthodes d'estimation des pluies extrêmes

Trois approches ont été recommandées. Pour chacune, nous indiquons les pistes possibles d'amélioration.

- **Estimation par une approche régionale de type index-flood avec une loi GEV**

Pour les quantiles de période de retour inférieure à 100 ans, l'erreur d'estimation provient surtout de l'estimation de l'indice de pluie, alors que les erreurs sur les quantiles de pluie extrême viennent de l'estimation du paramètre de forme, qui dépend de la définition du voisinage. Les pistes de recherche concernent l'amélioration de l'estimation de l'indice de pluie, en exploitant au mieux les informations complémentaires sur le relief, la distance à la mer ..., et aussi la définition du voisinage dont il est difficile actuellement de juger de l'homogénéité à partir de tests d'homogénéité, à cause de la variabilité des estimateurs de la loi régionale. Par ailleurs, une généralisation du cadre d'analyse aux courbes intensité-durée-fréquence voire intensité-surface-durée-fréquence a été initiée et devrait faire l'objet de recherches complémentaires. Les techniques d'interpolation spatiale en zone de montagne intégrant l'analyse en type de temps et les données nivométriques de haute altitude constituent une autre marge de progression (cf. pluies SPAZM, thèse Gottardi, 2009).

- **Estimation par le modèle de simulation SHYREG-Pluies**

L'approche fournit une estimation des quantiles de pluie sur l'ensemble de la France, à l'échelle d'un pixel de 1 km². Si l'utilisateur désire avoir l'estimation d'une pluie de bassin, il est nécessaire de progresser sur la fonction d'abattement spatial.

- **Estimation par le modèle par type de temps MEWP**

Le travail de thèse en cours de Penot (2011-2014) permettra de disposer d'une estimation de pluies extrêmes basée sur les types de temps, en site non mesuré. Par ailleurs, une étude est en cours sur l'assouplissement de l'hypothèse de loi exponentielle pour certains types de temps, en zone méditerranéenne, avec une estimation du paramètre de forme via une approche régionale.

A noter enfin que les mesures spatiales de pluie par lame radar ont fait l'objet par Météo-France d'un travail de ré-analyse sur la période 1997-2006. On disposera ainsi prochainement d'une quinzaine d'années d'observations qui pourront être mises à profit pour effectuer des estimations de quantiles de lame spatiale et mieux estimer les phénomènes d'abattement spatial (décroissance de la pluie en fonction de la superficie) et d'épicentrage (sous-estimation des pluies localisées vues par le réseau de pluviomètres).

L'étude des pluies infra-journalières est aussi à mener, car les conclusions tirées de l'étude des pluies journalières ne sont peut être pas extrapolable aux pluies de pluies courtes durées. A noter que la faible densité des réseaux d'observation peut être plus ou moins pénalisante suivant les méthodes.

4.2. Amélioration des méthodes d'estimation des crues extrêmes

Trois approches ont été recommandées. Pour chacune, nous indiquons les pistes possibles d'amélioration.

- **Les méthodes de simulation basées sur l'information pluviométrique**

La méthode SHYREG-débit, testée sur un large jeu de données et comparée aux implémentations locales, purement régionales ou mixtes locales-régionales avec une distribution de Gumbel ou GEV (cf. rapport III.6), a donné les meilleurs résultats en termes de justesse et de robustesse, sauf sur le secteur méditerranéen, avec une tendance à la sur-estimation des quantiles de crue. Ce point fera l'objet d'une analyse plus détaillée et de correctifs spécifiques à cette zone. Cependant, c'est dans l'amélioration des procédures de régionalisation que les gains les plus importants sont attendus.

Un prolongement de l'action III de ce projet pourrait être envisagé sur un jeu de données hydrométriques d'une centaine de stations où des estimations SCHADEX ont été établies dans le cadre d'études industrielles d'EDF, de manière à compléter les résultats en justesse et robustesse évoqués plus haut.

Dans sa version la plus couramment appliquée, la méthode SCHADEX comporte une hypothèse d'invariance de forme de crue, pour le passage du débit journalier au débit de pointe. L'introduction dans la simulation d'une variabilité des formes de crue via un modèle simple liant la dynamique des volumes au coefficient de forme permet dans certains cas une représentation plus crédible de ce processus. Cette approche a notamment été utilisée dans l'étude de la Tâche III du projet (rapport III.8). Une autre piste pour une prise en compte plus explicite des dynamiques de crues est l'utilisation de SCHADEX à pas de temps très fin (horaire).

- **L'approche locale-régionale de l'index-flood avec une loi GEV**

La marge de progression réside principalement dans la partie « régionale » de la méthode. En effet, les mauvaises performances de l'approche régionale pure sont dues à la régression liant l'indice de crue avec les propriétés des bassins versants. L'utilisation de données locales permet de corriger les erreurs effectuées par cette régression, ce qui explique les bonnes performances de l'approche mixte locale-régionale. Une piste prometteuse pour progresser consisterait à utiliser explicitement la structure du réseau hydrographique dans la régression, en essayant de « transmettre » les estimations de façon cohérente le long du réseau. Ceci réclamera des développements géostatistiques complémentaires.

- **L'information historique sur les crues**

Le cadre de collecte de données et de traitement statistique est bien établi. Il est nécessaire d'investir dans des actions de reconstitution de débit de crues anciennes sur un à deux siècles, afin de recouper les résultats obtenus avec les deux premières approches. De plus le traitement des données paléo-hydrologiques réclame des développements complémentaires pour intégrer l'incertitude des datations, qui peuvent être importantes.

- **Combinaison d'approches**

Les différentes approches ci-dessus ne sont pas exclusives les unes des autres, et une piste intéressante consisterait à les combiner. Par exemple, il est tout à fait possible d'utiliser à la fois une information historique et une information régionale (cf. bassins tests, rapport III.7). L'intégration d'information pluviométrique est plus complexe du fait de l'utilisation d'un modèle pluie-débit, mais une première approche consisterait à intégrer une contrainte simplifiée de type Gradex.

Par ailleurs, il reste encore à progresser sur les cas « atypiques » mentionnés en début de section 2 :

- Crues sur de très petits bassins versant ($S < 5-10 \text{ km}^2$) : en reprenant-testant les différentes approches de prédétermination sur les quelques bassins instrumentés disponibles ;
- Crues sur de très grands bassins versant ($S > 5\,000-10\,000 \text{ km}^2$) : les approches basées sur l'information pluviométrique sont difficilement applicables globalement du fait de la non pertinence d'une pluie de bassin supposée homogène et l'influence d'ouvrages et de zones de laminage. La décomposition du problème en zones hydrologiquement plus homogènes suivie de la combinaison des estimations (par simulation stochastique ou couplage statistique) semble la voie à suivre. Une application de ce type avec la méthode SCHADDEX est en cours sur le bassin de l'Isère. Par ailleurs la combinaison d'approches hydrologiques et hydrauliques et d'approches hydro-géomorphologiques, et l'exploitation des informations historiques souvent disponibles sur de grands bassins versants peut apporter des informations utiles sur les crues extrêmes.
- Influence prépondérante dans le processus d'écoulement du karst, neige, zone urbaine, nappe ... Des modèles hydrologiques intégrant ces différentes composantes sont à retenir, voire à développer et à tester.
-

4.3. Adaptation des méthodes d'estimation à un contexte non stationnaire

Le cadre standard d'analyse de toutes les approches de prédétermination des pluies et crues est basé sur l'hypothèse de stationnarité qui peut être définie comme suit. Les observations du passé peuvent être utilisées pour modéliser le comportement probabiliste des pluies ou des crues via la théorie des valeurs extrêmes, le comportement hydrologique du bassin en crue, ou définir l'emprise maximale de la zone inondable. Les observations sont supposées interchangeables dans le temps et le modèle reste pertinent pour apprécier le risque de pluies ou de crues extrêmes dans le futur. Dans un contexte évolutif où le climat a pu changer et où le bassin versant a fait l'objet d'aménagements susceptibles de modifier sa réponse aux précipitations, il devient difficile d'appliquer telles quelles les approches de prédétermination en contexte stationnaire.

Dans son rapport de 2007, le GIEC soulignait le risque d'augmentation de la fréquence des précipitations extrêmes au cours du XXIème siècle. A l'échelle planétaire, les modèles de climat simulent une intensification du cycle hydrologique en climat futur, plus chaud que le climat actuel mais son impact sur les événements extrêmes de précipitation reste difficile à évaluer, tant les résultats dépendent des méthodologies employées (descente d'échelle) mais surtout des modèles de climat eux-mêmes (Planton *et al.*, 2005). Les hydro-climatologues se sont tournés en priorité vers l'analyse des longues séries pour rechercher d'éventuelles tendances en lien avec le changement climatique. A l'échelle globale, le nombre de jours où les pluies ont dépassé 10 mm a augmenté significativement depuis les années 1950 (source Met Office Hadley Centre). Cette évolution a été mise en rapport avec l'augmentation du CO₂ (Min *et al.*, 2011). Mais les études locales ont parfois plus de mal à confirmer ou préciser ce diagnostic qui dépend aussi des méthodologies mises en œuvre. Les analyses de détection de tendance sur les séries pluviométriques du sud de la France ont montré aussi une hausse faible sur les 40 dernières années (Pujol *et al.*, 2007) mais cette tendance n'est pas visible sur la fréquence des événements Méditerranéens (source Météo-France, site ONERC). L'évolution des phénomènes extrêmes a aussi été analysée avec le générateur stochastique SHYPRE (Cantet, 2009) qui a montré une tendance à la hausse de l'intensité des événements extrêmes sur l'ensemble de la France sauf les régions méditerranéennes.

Dans le cadre du projet ExtraFlo, le jeu de données de 693 longues séries de pluie journalière de plus de 50 ans, répondant à des critères sévères de qualité, constitué pour l'inter-comparaison des méthodes d'estimation des pluies extrêmes (cf. rapport I.1), a été éprouvé sur la détection locale de tendances (Soubeyroux *et al.*, 2012). On observe sur les valeurs extrêmes annuelles une tendance à la hausse sur près de 75% des séries (risque d'erreur de 5%), mais ces tendances ne s'avèrent significatives selon le test de Mann Kendall que sur 15% d'entre elles.

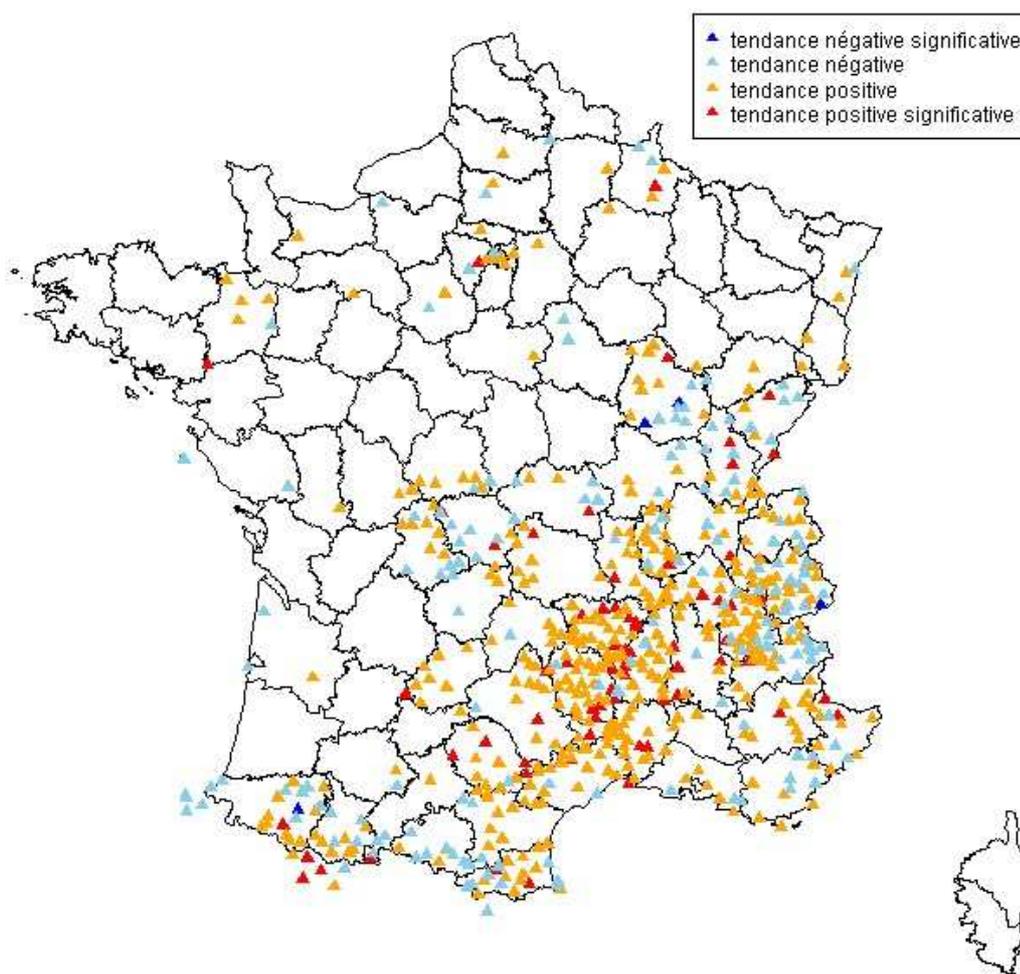


Figure 3. Analyse des tendances linéaires pour les valeurs maximales annuelles sur les 693 longues séries de pluie (plus de 50 ans) : en rouge les séries présentant une tendance positive significative, en orange les tendances positives non significatives, en bleu clair les tendances négatives non significatives et bleu foncé les tendances négatives significatives (risque d'erreur de 5%)

Cette tendance est plus marquée sur la zone Méditerranéenne (80 % de tendance positive). L'évolution des quantiles estimés par une loi GEV classique entre la période 1950-1980 et 1980-2010 a également été étudiée. Ainsi, deux tiers des séries présentent une évolution à la hausse du quantile décennal. L'analyse de la tendance sur les paramètres de la loi GEV

montre une évolution préférentielle du paramètre d'échelle dans la majorité des séries, voire du paramètre de forme pour les régions méditerranéennes. Ces évolutions restent toutefois encore peu nombreuses si l'on ne considère que les résultats de tendance significatifs (risque d'erreur de 5%), et pas toujours cohérentes avec les résultats d'autres études (Pujol *et al.*, 2007 ; Cantet *et al.*, 2010).

Plusieurs travaux de recherche sont en cours pour adapter les méthodes d'estimation des pluies et crues extrêmes à un contexte non stationnaire.

- **Travaux menés par Hydro-Science Montpellier**

L'objectif est d'analyser les évolutions possibles des distributions des pluies extrêmes en liaison avec les scénarii d'évolutions du climat. La démarche générale consiste :

- à sélectionner des facteurs climatiques explicatifs des pluies extrêmes et qui soient bien reproduits par les modèles de climat ;
- à inclure ces facteurs en tant que co-variables dans les distributions des pluies extrêmes en climat présent ;
- à calculer la distribution des extrêmes dans le futur à différents horizons, à partir des scénarii d'évolution de ces co-variables issus des modèles de climat.

Deux échantillonnages régionalisés de pluies extrêmes ont été réalisés à partir des données pluviométriques disponibles dans le projet ExtraFlo entre 1958 et 2008 :

- par approche locale ou ponctuelle : les précipitations d'automne dépassant 100 mm dans les stations des départements limitrophes à la Méditerranée du jeu ExtraFlo ;
- par approche spatiale : les lames d'eau journalières dépassant un seuil sur les BV de l'Orb, de l'Hérault, du Vidourle, du Gard de la Cèze et de l'Ardèche. Le seuil est choisi comme le 95ème percentile des lames journalières sur chaque bassin.

Pour chacun d'eux, deux modèles fréquentiels de type Peak-Over-Threshold ont été testés :

- le modèle stationnaire dans lequel on modélise les dépassements de seuil par une loi GP et l'occurrence des dépassements par une loi de Poisson, tous les paramètres étant constants ;
- le modèle non stationnaire où le paramètre d'échelle de la loi GP et l'intensité de la loi de Poisson sont des fonctions des co-variables climatiques sélectionnées.

Le choix entre les deux modèles et la sélection des co-variables les plus pertinentes sont réalisés par un test de vraisemblance.

La recherche de covariables explicatives n'a montré aucune liaison significative entre les pluies extrêmes et les indices climatiques NAO, MO et WEMO. Les co-variables retenues sont le type de temps 4 (flux de Sud) parmi les huit types de temps d'EDF et la température moyenne mensuelle pour l'approche locale et une variable baptisée flux d'humidité (FHUM), produit de l'humidité spécifique à 925 hPa et de la vitesse des vents de secteur SE, pour l'approche spatiale.

Dans l'approche locale, si l'on se base sur les projections d'augmentation de température et de la fréquence des types de temps 4, les quantiles journaliers centennaux augmenteraient de +9 à +16% entre 2070 et 2099 par rapport à la période de référence 1958-2008. Mais si l'on tient compte des intervalles de confiance à 95% des modèles statistiques cette augmentation n'est pas significative.

Dans l'approche spatiale, cinq GCMs ont produit des scénarii d'évolution de la variable FHUM entre la période de référence 1960-1990 et l'horizon 2070-2099, sous le scénario A1B. Ils montrent une augmentation en moyenne de 22% de FHUM, ce qui est semblable aux projections du projet CYPRIM (Météo France) et indiquerait une augmentation de la fréquence des événements extrêmes mais cela ne se traduit que par une augmentation modérée, +5%, du quantile centennal médian.

Ces travaux (Tramblay *et al.*, 2011, 2012 et 2013) ont permis de proposer une méthode d'estimation de l'évolution des distributions des pluies extrêmes à partir de co-variables climatiques. Ils ont aussi mis en avant plusieurs points qui restent à analyser comme la sélection optimale des co-variables en fonction de l'échelle spatiale et la prise en compte de la variabilité des scénarii produits en fonction des modèles de climats utilisés.

- **Travail de thèse de Philippe Cantet (2009), Irstea Aix-en-Provence**

La thèse a consisté à modéliser l'impact du changement climatique sur les pluies extrêmes par l'utilisation du générateur stochastique SHYREG de pluies horaires. Les trois paramètres du générateur étant directement liés à des valeurs climatiques moyennes (nombre moyen d'événements pluvieux par an, valeur moyenne de la pluie journalière maximale, durée moyenne d'un événements pluvieux), celles-ci sont plus facilement interprétables en terme de tendance qu'une paramétrisation directement liée aux valeurs extrêmes. Cantet *et al.* (2010) ont présenté une application sur 139 postes pluviométriques de la métropole française, avec la prise en compte des tendances observées sur la période 1960-2003. Sous réserve de la stationnarité de la structure du modèle SHYREG, ils ne montrent pas d'évolution importante dans l'estimation des quantiles de pluie. Les pluies extrêmes semblent tout de même être de plus en plus fréquentes sur l'ensemble de la France, hormis le pourtour méditerranéen.

- **Travail de thèse en cours de Xun Sun (2010-2013), Irstea Lyon**

La thèse vise à développer un modèle probabiliste régional et non stationnaire pour l'estimation des pluies extrêmes. Un cadre d'analyse bayésien a été retenu, avec l'introduction de fonctions permettant d'expliquer la variabilité des paramètres d'une loi GEV avec le temps ou des co-variables climatiques. Le modèle peut être décliné à l'échelle locale, sur une série de valeurs maximales, et à l'échelle régionale sur un ensemble de postes en prenant en compte la dépendance spatiale. Une première application a été réalisée à l'échelle locale à partir de sorties désagrégées de modèles climatiques sur le bassin de la Durance (projet R2D2, <https://r2d2-2050.cemagref.fr/>). Une seconde application a porté sur l'analyse des pluies maximales de la région du Queensland en Australie (Sun *et al.*, 2013). Elle a permis de montrer la forte variabilité des pluies en lien avec l'oscillation climatique El Nino – La Nina et de proposer un modèle de prédétermination des pluies extrêmes conditionné à l'appartenance à une de ces deux phases.

- **Travail de thèse en cours de Pierre Brigode (2010-2013), EDF/LNHE**

L'objectif de la thèse est d'évaluer la capacité du modèle SCHADEX à prendre en compte les possibles évolutions du climat simulées par les modèles climatiques. Une première partie a consisté à tester le caractère opérationnel de la méthode sur des climatologies différentes de celle de la France (Autriche, Canada, Pologne, Norvège). Une seconde partie a montré que, parmi les éléments susceptibles de changer dans le futur, ce sont le modèle probabiliste de pluies et le modèle hydrologique qui influent le plus sur l'estimation des crues extrêmes. Une dernière partie a consisté à tester différentes approches permettant d'inclure les sorties de modèles climatiques (expérience CMIP5).

L'incertitude liée aux données de pluies sorties des modèles climatiques étant connue comme étant très grande, la majeure partie des tests entrepris vise à éviter d'utiliser telle quelle la variable « pluie sortie de modèle ».

Une première question portant sur l'évolution des fréquences d'occurrences des types de temps français a été abordée via un stage de Master 2 (Gérardin, 2012). Des champs de géopotentiels simulés par les modèles ont été débiaisés au moyen de différentes méthodes afin d'attribuer un type de temps à chaque journée du futur (de 2006 à 2100). La conclusion générale de ces tests montre que les tendances simulées sont faibles devant la dispersion des résultats.

La méthode des analogues est actuellement testée pour générer des chroniques de pluies et de températures journalières du futur en se basant uniquement sur des comparaisons de champs de géopotentiels entre les journées observées et les journées simulées par les modèles climatiques. Cette méthode semble très robuste en ce qui concerne la genèse de chroniques de température, et fournit également des résultats intéressants en terme de chroniques de pluie. Elle permet donc de construire des chroniques de pluie et de température du futur sans utiliser les variables directement sorties des modèles. Ces chroniques seront ensuite transformées via le modèle hydrologique en chronique de « saturation de bassins versants ». Pour cela, un choix de paramètres du modèle hydrologique devra être fait pour estimer les débits extrêmes du futur. Plusieurs questions méthodologiques se posent alors :

- Faut-il utiliser un modèle hydrologique calé sur les années ressemblant le plus aux années simulées par les modèles ?
- Faut-il utiliser un modèle hydrologique calé sur les années observées où l'enneigement était minimal ?

Différents tests seront menés pour illustrer ces différentes possibilités et la dispersion engendrée par ces différents paramètres possibles.

4.4. Comment exploiter la connaissance des incertitudes dans la prise de décision ?

La répartition habituelle des rôles entre maître d'ouvrage et hydrologue repose d'une part sur le choix d'une probabilité annuelle de défaillance comme référence du dimensionnement, et d'autre part sur un calcul hydrologique donnant la « meilleure » estimation possible de cet aléa de référence, avec une information sur les incertitudes associées à cette estimation (Le Delliou *et al.*, 2013).

La probabilité de référence est fonction des enjeux liés à la submersion ou à la défaillance de l'ouvrage ou de l'aménagement sous la responsabilité du maître d'ouvrage. Nous avons rappelé en introduction (section 1) différentes valeurs en usage. La question du mode de prise en compte de l'incertitude d'estimation de l'aléa hydrologique dans le choix du débit de référence est complexe. Dans l'absolu, la meilleure approche résulte d'un calcul économique visant à minimiser le coût global : coût de l'ouvrage + coût des dommages résiduels (en cas de dépassement de la crue de projet). Le second coût est obtenu en pondérant les dommages de toutes les crues q supérieures à la crue de référence Q_{ref} avec leur densité de probabilité :

$$CDR(Q_{ref}) = \int_{Q_{ref}}^{+\infty} Dommages(q) \cdot f(q) \cdot dq$$

Il est possible de raffiner le calcul en considérant l'incertitude hydrologique (distribution sur le vecteur ρ des paramètres de la distribution des crues) :

$$CDR(Q_{ref}) = \int_{Q_{ref}}^{+\infty} \int_{\rho} Dommage(q) \cdot f(q|\rho) \cdot f(\rho) dq d\rho$$

En pratique, on est vite confronté au problème d'attribution d'un coût aux pertes en vies humaines. Une première approche consiste à retenir la crue maximale possible pour justement ne pas avoir à se prononcer sur une acceptation d'un risque résiduel en terme de décès. En réalité, ce choix conduirait à des valeurs de référence extrêmement élevées, très incertaines et disproportionnées par rapport aux valeurs de référence pratiquées pour d'autres risques (naturels ou industriels). Dans la pratique, les approches de type PMP/PMF par maximisation de l'aléa reposent sur un passage implicite de la crue maximale possible à la crue maximale probable, en introduisant une part de subjectivité dans le choix de l'état initial de saturation du bassin versant et du rendement des pluies en débit. Cette crue maximale probable résulte de choix non clairement affichés et l'absence de normalisation de la méthode PMP/PMF a conduit en France à ne pas utiliser cette méthode.

Une seconde réponse consiste à combiner de façon forfaitaire aléa de référence et incertitude associée, en raisonnant par exemple sur la borne supérieure de l'intervalle de confiance (à 70, 90, 95% ...) de la crue de référence (probabilité annuelle de dépassement 10^{-3} ou 10^{-4}). Cette approche retenue aujourd'hui pour la sûreté des installations nucléaires vis-à-vis du risque hydrologique repose sur une grande part de subjectivité dans le choix de la largeur de l'intervalle de confiance. Elle suppose par ailleurs une certaine homogénéité dans le calcul des incertitudes. À ce jour, les incertitudes d'échantillonnage sont assez bien connues, à l'inverse de celles liées à la modélisation hydrologique qui ne sont révélées – en partie seulement – que par les écarts produits par des modèles différents.

Une troisième réponse consiste à raisonner sur la distribution prédictive :

$$F(Q_{ref}) = \int_0^{Q_{ref}} \int_{\rho} f(q|\rho) f(\rho) \cdot dq \cdot d\rho$$

au lieu de la distribution centrale obtenue avec le jeu de paramètres estimé $\hat{\rho}$:

$$\hat{F}(Q_{ref}) = \int_0^{Q_{ref}} f(q|\hat{\rho}) \cdot dq$$

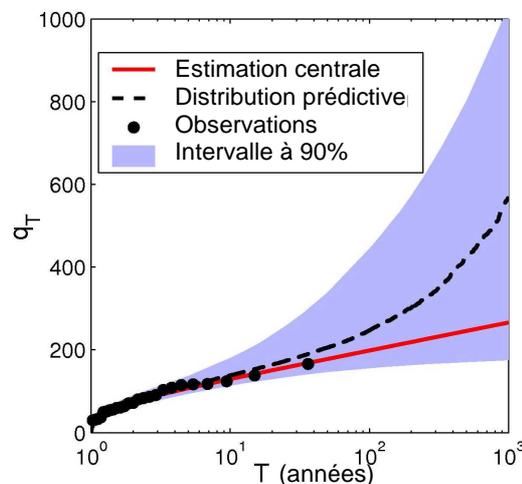


Figure 4. Différence entre distribution centrale et distribution prédictive

Les différences entre les distributions sont faibles pour les quantiles courants pour lesquels les incertitudes sont réduites, mais elles deviennent significatives pour les crues rares. La distribution prédictive intègre les incertitudes. Son calcul suppose la connaissance de ces incertitudes. Des applications simplifiées d'« ingénierie » de cette approche ont été proposées et utilisées (Deroo et de Bonviller, 2006). Des applications hydrologiques ont été menées pendant le projet ExtraFlo pour montrer l'intérêt et le caractère applicable de la distribution prédictive (cf. section suivante).

Une dernière réponse consiste à raisonner par analyse de sensibilité et à tester l'impact d'une surestimation (ou d'une sous-estimation) de l'aléa hydrologique sur le coût de l'ouvrage et les conséquences en cas de défaillance (crue supérieure à la crue de référence) en terme de dommages et pertes de vies humaines. On raisonne ici en valeurs relatives, de façon à évaluer l'intérêt d'un dimensionnement plus sécuritaire en rapport avec les avantages attendus. Aux États-Unis, Bowles (2008) a introduit la notion de coût disproportionné pour la réduction des conséquences.

5. Références

- Arnaud P., Lavabre J., 2000.** La modélisation stochastique des pluies horaires et leur transformation en débits pour la prédétermination des crues. *Revue des Sciences de l'Eau* 13/4(2000). p. 441-462.
- Arnaud P., Lavabre J., 2002.** Coupled rainfall model and discharge model for flood frequency estimation. *Water Resources Research.*, vol. 38, n° 6, pp 11-1,11-11 .
- Arnaud P., Lavabre J., 2010.** *Estimation de l'aléa pluvial en France métropolitaine.* Eq. Quae, 158p.
- Beirlant J., Goegebeur Y., Teugels J. and Segers J., 2004.** *Statistics of extremes. Theory and applications.* Wiley Series in Probability and Statistics. Wiley.
- Benito, G. , Lang, M., Barriendos, M., Llasat, M.C., Frances, F., Ouarda, T., Thorndycraft, V., Enzel Y., Bardossy A., Coeur, D., Bobee, B., 2004.** Use of Systematic, Palaeoflood and Historical data for the improvement of flood risk estimation. Review of scientific methods. *Natural Hazard. Special number "Strategies and Applications in Natural Hazard Research using Historical Data"*. Edited by T. Glade & M. Lang, Kluwer Academic Publishers, 31 (3), March, 623-643.
- Beven, K J and Kirkby, M J. 1979** A physically based variable contributing area model of basin hydrology *Hydrol. Sci. Bull.*, 24(1),43-69.
- Bowles D. S., 2008.** Risk perception and acceptance criteria : with applications to dams – *Risk Management In Civil Engineering Advanced Course – 17-21 Novembre 2008*
- Brigode P., 2013.** *Changement climatique et risque hydrologique : Évaluation de la méthode SCHADDEX en contexte non-stationnaire.* Thèse Univ. Paris VI, soutenance prévue en juillet.
- Brigode, P., P. Bernardara, E. Paquet, J. Gailhard, P. Ribstein, et R. Merz. 2011.** Complete Application of the SCHADDEX Method on an Austrian Catchment: Extreme Flood Estimation on the Kamp River. *EGU, Geophysical Research Abstracts.*
- Brigode, P., P. Bernardara, J. Gailhard, F. Garavaglia, P. Ribstein, et R. Merz. 2012.** Optimization of the Geopotential Heights Information Used in a Rainfall-based Weather Patterns Classification over Austria. *International Journal of Climatology*, doi:10.1002/joc.3535.
- Brigode, P., Z. Micovic, P. Bernardara, J. Gailhard, E. Paquet, F. Garavaglia, et P. Ribstein. 2012.** Link Between Rainfall-based Weather Patterns Classification over British-Columbia and El Niño Southern Oscillations. *Submitted to HESS.*
- Cantet P, 2009.** *Impacts du changement climatique sur les pluies extrêmes par l'utilisation d'un générateur stochastique de pluies.* Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier 2, 218p.
- Cantet P, Bacro, J.N. ; Arnaud, P., 2010.** Using a Rainfall Stochastic Generator to Detect Trends in Extreme Rainfall. *SERRA*, vol. 25, n° 3, p. 429-441
- Cayla O., 1993.** Probabilistic calculation of design floods : SPEED. *Internat. Symposium on Engineering Hydrology, American Society of Civil Engineers.* San Francisco, July.
- Cernesson F., Lavabre J., Masson J.M., 1996.** Stochastic model for generating hourly hyetographs. *Atmospheric Research*, vol. 42, n°1-4
- Coles, S., 2001.** *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values.* Springer Series in Statistics, ed. Springer-Verlag. London: Springer-Verlag. 210 p.
- Dalrymple T., 1960.** Flood frequency analysis. *U.S. Geol. Surv. Water Supply Pap.*, 1543A.
- Deroo L., de Bonviller A., 2006.** Prise en compte de l'incertitude pour le calcul des crues extrêmes. *22ème congrès de la CIGB, Barcelone, juin 2006.*
- Delgado J.L., 2006,** Estimation des crues de référence par approche géomorphologique. *La Houille Blanche*, N°5 (Octobre-Novembre 2006), pp. 97-101
- Embrechts, P., C. Klüppelberg, and T. Mikosch, 1997.** Modelling extremal events for insurance and finance. *Stochastic modelling and applied probability.* Springer. 648.
- Fisher, R.A. and L.H. Tippett, 1928.** Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample. *Cambridge Phil. Soc.*, 24.
- Garcon R., 1996.** Prévision opérationnelle des apports de la Durance à Serre-Ponçon à l'aide du modèle MORDOR. Bilan de l'année 1994-1995. *La Houille Blanche*, 5, 71-76
- Garavaglia F., Gailhard J., Paquet E., Lang M., Garcon R., Bernardara, P., 2010.** Introducing a rainfall compound distribution model based on weather patterns sub-sampling. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 951–964, 2010.
- Garavaglia F., Lang M., Paquet E., Gailhard J., Garcon R., Renard B., 2011.** Reliability and robustness of rainfall compound distribution model based on weather pattern sub-sampling. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 519–532, 2011.
- Garry G., Masson M., Ballais J.L., 1996.** *Cartographie des zones inondables : approche hydrogéomorphologique.* Minist. de l'Équipement, Minist. de l'Environnement, Les Editions Ville et Territoires, Paris La Défense, 100p.

- Gaume E., Gaal L., Viglione A., Szolgay J., Kohnova S., Bloschl G., 2010.** Bayesian MCMC approach to regional flood frequency analyses involving extraordinary flood events on ungauged sites, *J. Hydrol.*, 394, 101–117, doi:10.1016/j.jhydrol.2010.01.008.
- Gérardin, M. 2012.** *Comment incorporer à la méthode SCHADEX l'information contenue dans les simulations du climat futur ? Une étude exploratoire.* Rapport de M2, Université Pierre et Marie Curie.
- Gottardi F., 2009.** *Estimation statistique et réanalyse des précipitations en montagne : utilisation d'ébauches par types de temps et assimilation de données d'enneigement, application aux grands massifs montagneux français.* Thèse INP Grenoble.
- Guillot, P., Duband, D., 1967.** La méthode du Gradex pour le calcul de la probabilité des crues à partir des pluies. *Colloque International sur les crues et leur évaluation, Leningrad, 15-22 Août, IASH*
- Hosking J.R.M. and J.R. Wallis, 1997a.** *Regional Frequency Analysis*, Cambridge University Press, 224p.
- Hosking, J.R.M. and J.R. Wallis, 1997b.** *Regional Frequency Analysis: an approach based on L-Moments.* Cambridge, UK: Cambridge University Press. 226p.
- House, K.P., Webb, R.H., Baker, V.R. and Levish, D.R., 2002.** *Ancient Floods, Modern Hazards: Principles and Applications of Paleoflood Hydrology.* Water science and Application, v. 5. AGU.
- Jenkinson, A.F., 1955.** The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.* 81: p. 158-171.
- Lambert R., Gazelle M., Gholami M., Prunet C., 2001.** La cartographie informative des zones inondables. L'exemple de Midi-Pyrenees. *Actes du colloque "Au chevet d'une catastrophe"*, Presses Universitaires de Perpignan, Perpignan, p. 147-164.
- Lang M., Lavabre J., 2007.** *Estimation de la crue centennale pour les plans de prévention des risques d'inondations.* Éditions Quae, Collection Update Sciences & Technologies, 232p.
- Lavabre J., Arnaud P., Masson J.M., Folton N., 1998.** Apport de la modélisation de la pluie en débit pour la connaissance de la ressource en eau et la prédétermination des crues. *Congrès de la Société Hydrotechnique de France. 25èmes journées de l'hydraulique, Chambéry, 15-18/09/98.* Publications S.H.F. Tome 2. pp. 349-358.
- Le Delliou P., Aigouy S., Albert C., Degoutte G., Deroo L., Doms E., Frossard E., Fruchart F., Lang M., Lemperière F., Loudière D., Reverchon B., Royet P., Ulrich T., 2013.** *Recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crues de barrages.* Groupe de Travail « Dimensionnement des évacuateurs de crues de barrages », CFBR, 165p.
- Margoum M., 1992.** *Estimation des crues rares et extrêmes : le modèle Agréee. Conceptions et premières validations* - Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, Cemagref Lyon, GIS Hydrologie Friend-Amhy, 252p.
- Margoum M., Oberlin G., Lang M., Weingartner R., 1994.** Estimation des crues rares et extrêmes : principes du modèle Agréee. *Hydrologie Continentale*, vol.9 (1), 85-100.
- Min, S.-K., Zhang, X., Zwiers, F.W., Hegeri G.-C., 2011.** Human contribution to more intense precipitation extremes, *Nature* 470, 378-381, doi: 10.1038/nature09763
- Miquel J., 1984.** *Guide pratique d'estimation des probabilités de crues.* Ed. Eyrolles, 160p.
- Neppel L., Renard B., Lang M., Ayrat P.A., Coeur D., Gaume E., Jacob N., Payrastre O., Pobanz K., Vinet F., 2010.** Flood frequency analysis using historical data: accounting for random and systematic errors. *Hydrological Science Journal*, 55(2), 192-208.
- Onibon H., Ouarda T.B.M.J., Barbet M., St-Hilaire A., Bobée B., Bruneau P., 2004.** Analyse fréquentielle régionale des précipitations journalières maximales annuelles au Québec. *Hydrol. Sci. J.* 49 (4), 717-735.
- Osuch, M., R.J. Romanowicz, E. Paquet, et F. Garavaglia. 2012.** Estimation of Flood Frequency by SCHADEX Method in NysaKłodzkaCatchment. *EGU, Geophysical Research Abstracts.*
- Paquet E., 2004.** Evolution du modèle hydrologique MORDOR : modélisation du stock nival à différentes altitudes. *La Houille Blanche*, 2, 75-82.
- 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, p. 80-90.
- Paquet, E., Lang, M., Carré, J.C., 2012.** **SCHADEX method for extreme flood estimation: overview, applications and perspectives.** *24th ICOLD Congress - Q.94. ICOLD-CIGB, Kyoto.*
- Paquet E., Garavaglia F., Garçon R., Gailhard J., 2013.** The SCHADEX method: a semi-continuous rainfall-runoff simulation for extreme flood estimation. *J. Hydrology*, à paraître.
- Parent E., Bernier J., 2003.** Bayesian POT modelling for historical data, *J. Hydrol.*, 274:95-108
- Payrastre O., Gaume E., Andrieu H., 2011.** Usefulness of historical information for flood frequency analyses: developments based on a case study. *WRR*, 47, W08511, doi:10.1029/2010WR009812, 2011
- Penot D., 2011-2014.** *Cartographie de pluies extrêmes et application de la méthode SCHADEX en sites non jaugés.* Thèse en cours INP Grenoble
- Perrin, C., 2000.** *Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative.* Thèse de Doctorat, INP Grenoble, Cemagref Antony, 530 pp.

- Pickands, J., 1975.** Statistical inference using extreme order statistics. *Annals of Statistics*. 3: p. 119-131.
- Planton, S, Deque M, Douville H, Spagnoli B, 2005.** Impact du réchauffement climatique sur le cycle hydrologique, *CR Geoscience*, 337, 193-202
- Prunet C., 1998.** *Géographie des zones inondables de la Dordogne Moyenne* – Thèse doctorat de Géographie – Aménagement Université Toulouse le Mirail.
- Pujol N, Neppel L, Sabatier R, 2007.** Approche régionale pour la détection de tendance dans les séries de précipitation de la région méditerranéenne française, *CR Geoscience*, 339, 651-658
- Ribatet M., Sauquet E., Grésillon J.M., Ouarda T.B.M.J, 2006.** A regional Bayesian POT model for flood frequency analysis. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 21(4): p. 327-339 doi:10.1007/s00477-006-0068-z.
- Ribatet M., Sauquet E., Grésillon J.M., Ouarda T.B.M.J, 2007.** Usefulness of the reversible jump Markov chain Monte Carlo model in regional flood frequency analysis. *Water Resources Research*. 43(8) doi:10.1029/2006WR005525.
- Sheffer N. A., Enzel Y., Benito G., Grodek T., Poart N., Lang M., Naulet R., Coeur D., 2003a.** Paleofloods and historical floods of the Ardèche river, France. *Water Resources Research* , 39 (12), 1376, 13p.
- Sheffer N. A., Enzel Y., Waldmann N., Grodek T., 2003b.** Claim on largest flood on record proves false. *EOS Transactions, American Geophysical session*, (84), 12, 25 March 2003.
- Sheffer NA, Rico M, Enzel Y, Benito G and Grodek T., 2008.** The palaeoflood record of the Gardon River, France: A comparison with the extreme 2002 flood event. *Geomorphology* 98, 71–83.
- Soubeyroux J-M, Fantin R, Veysseire J-M, Borchhi F, Garavaglia F, Arnaud P, 2012.** Comparaison des méthodes locales d'estimation des pluies extrêmes en France en contexte de changement climatique, *25e colloque de l'AIC, Grenoble 2012*, 715-720
- St-Hilaire A., Ouarda T.B.M.J., Lachance M., Bobee, B., Barbet M., Bruneau P., 2003.** La régionalisation des précipitations: une revue bibliographique des développements récents. *Rev. Sci. Eau* 16 (1) : 27-54.
- Sun X., 2013.** *Quantification de l'aléa pluviométrique et des incertitudes associées à l'échelle régionale*. Thèse INPG, soutenance prévue en novembre.
- Sun X., Thyer M., Renard B., Lang M., 2013.** A generalised spatial temporal regional frequency analysis framework for quantifying the impact of climate on hydrological events: Case Study on the impact of ENSO on summer rainfall in Southeast Queensland. *Soumis à WRRR*.
- Thorndycraft et Benito (2006).** The Holocene fluvial chronology of Spain: evidence from a newly compiled radiocarbon database. *Quaternary Science Reviews*, Vol. 25, (3–4), Feb., 223–234.
- Tramblay Y., Neppel L., Carreau J., 2011.** Climatic covariates for the frequency analysis of heavy rainfall events in the Mediterranean region. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11, 2463-2468
- Tramblay Y., Neppel L., Carreau J., Najib K. 2013.** Non-stationary frequency analysis of heavy rainfall events in Southern France. *Hydrological Sciences Journal*, 58(2), 280-294
- Tramblay Y., Neppel L., Carreau J., Sanchez-Gomez E., 2012.** Extreme value modelling of daily areal rainfall over Mediterranean catchments in a changing climate. *Hydrol. Process*, 26, 3934-3944.
- Ven Te Chow, 1964.** *Handbook of applied hydrology* –Section 20 – Hydrology of Agricultural Lands – MacGraw-Hill – 1964
- Vidal JJ, 2000.** Cartographie informative des zones inondables en Midi-Pyrénées. Une démarche à l'échelle de la région. *Colloque national sur les risques naturels, au Cemagref de Grenoble*, 28 et 29 septembre 2000