

SYNTHESE ET ANALYSE DES DONNEES DE CRUES DES BASSINS VERSANTS DES ALPES FRANÇAISES

Nicolle Mathys¹ et Christophe Peteuil²

RESUME

Améliorer les méthodes de prédétermination des crues des bassins versants de montagne est une demande forte des praticiens en charge de la gestion des risques naturels. A cette fin une synthèse hydrologique a été réalisée sur les données de 159 bassins versants des Alpes françaises, de superficie inférieure à 500 km². Les variables étudiées sont les quantiles, les durées et volumes de crue. Différents paramètres climatologiques et morphométriques descriptifs des bassins ont été déterminés. Le croisement de différents critères a permis de découper la zone d'étude en 5 secteurs homogènes pour lesquels des relations permettant de prédire les débits de crues de périodes de retour 5, 10, 20 et 50 ans en fonction de la surface drainée de la pluie ont été élaborées. En revanche, la prise en compte de facteurs liés à l'environnement climatologique et à la géomorphologie des bassins n'a pas permis d'apporter un gain en précision significatif.

Mots-clés : Hydrologie de montagne, prédétermination des débits de crue, synthèse régionale

ABSTRACT

In order to improve the flood frequency estimation in torrential watershed by non-specialist practitioners in charge of mountain natural hazards, a regional study was conducted in the French Alps. A hydrological database on 159 torrential watersheds, below 500km² in area, has been documented, including peak flows for different return periods, duration and volume of flood flows. Variables related to watershed morphometry, climatological environment, drainage network, land use and geology were determined. Using several criteria related to the spatial distribution of relief and rainfall, the geology and the dominant weather prevailing for the major flood events, we define five homogeneous regions. We were able to calibrate several regionalized multivariate statistical models to predict flood peak discharge (for 5, 10, 20 and 50 years return periods) depending on variables such as drainage area and daily rainfall depth. However, taking into account climatology or geomorphology parameters did not improve the model.

Keywords: Torrent hydrology, Flood Peak Discharge Predetermination, Regional Synthesis.

INTRODUCTION

La prédétermination des débits de crues des bassins versants torrentiels est une problématique qui touche de nombreuses applications opérationnelles. Pour des praticiens non spécialistes, l'hydrologie torrentielle s'avère néanmoins difficile à appréhender en raison des nombreuses spécificités qui la caractérisent. Par ailleurs, dans un contexte de site non jaugé, les méthodes couramment mises en œuvre dans les zones de montagne diffèrent assez peu des approches utilisées en plaine. Sur les Pyrénées françaises, des travaux récents ont néanmoins permis une amélioration sensible de la performance des méthodes fondées sur des régressions multiples en introduisant dans la démarche

¹ Nicolle Mathys. Cemagref Grenoble, UR Erosion Torrentielle, Neige et Avalanches, Domaine Universitaire, 2 rue de la Papeterie, BP76, 38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex, France, (e-mail: nicolle.mathys@cemagref.fr)

² Christophe Peteuil. Office National des Forêts - service de Restauration des Terrains en Montagne de l'Isère, France (depuis à la Compagnie Nationale du Rhône, France)

d'analyse la prise en compte de facteurs liés à l'environnement climatologique et à la géomorphologie des bassins.

L'étude présentée ici avait pour principaux objectifs (1) de faire une synthèse des données hydrologiques relatives aux crues des bassins versants torrentiels du massif des Alpes françaises, (2) d'évaluer si l'existence de similitudes entre certaines entités géographiques de la zone d'étude permet de délimiter des secteurs hydrologiquement homogènes et (3) de proposer, un modèle représentatif de la zone d'étude et de ses éventuelles spécificités, qui puisse être mis en œuvre par des praticiens non spécialistes en hydrologie.

RECUEIL ET TRAITEMENT DES DONNEES HYDROLOGIQUES DISPONIBLES

- **Débits de crue**

Les données utilisées pour notre étude rassemblent des chroniques de débits instantanés extraites de la banque HYDRO, banque de données hydrologiques du ministère de l'Ecologie, et des chroniques au pas de temps horaire issues du réseau d'observation de la Division Technique Générale (DTG) d'Electricité de France (EDF) qui, pour les besoins de sa production a instrumenté un certain nombre de bassins versants de montagne. Initialement, 203 stations hydrométriques ont été recensées en retenant comme critères d'échantillonnage une durée minimale d'observation de 7 ans et une superficie de bassin versant inférieure à 500 km².

La validation des données extraites s'est faite à partir de tests d'indépendance et de stationnarité, mais aussi en appréciant la qualité des ajustements statistiques obtenus. La méthode d'estimation des quantiles de crue caractéristiques (Qi5 , Qi10 , Qi20 , et Qi50) a été choisie au cas par cas en fonction de la nature des données disponibles à la station. Dans la mesure du possible, nous avons privilégié l'ajustement d'une loi exponentielle sur toutes les valeurs supérieures à un seuil. Nous avons pour cela utilisé une série de procédures mises au point par le Cemagref de Lyon (Sauquet, 2009), ce qui a présenté l'avantage de pouvoir étudier d'autres variables descriptives des crues, notamment les durées et volumes. Lorsque les chroniques de débits à pas de temps variable faisaient défaut, les quantiles ont été estimés par l'ajustement d'une loi de Gumbel sur des maximas annuels.

A l'issue de cette étape de validation et de traitement statistique, l'échantillon initial a été réduit à 159 stations, parmi lesquelles 16 seulement contrôlent des bassins versants de moins de 10 km². La superficie médiane des bassins recensés s'établit par ailleurs autour de 75 km². Les durées d'observation varient enfin dans une gamme allant de 7 à 60 ans.

- **Précipitations**

L'aléa pluviométrique auquel est exposé chacun des bassins versants recensés a été caractérisé à partir de cartes de synthèse établies pour l'ensemble des Alpes Françaises par Djerboua (2001). Nous avons travaillé à partir de grilles de maille 1 km fournies par le Service de Prévision des Crues de la Direction Départementale des Territoires de l'Isère (DDT38), qui a récemment remis en forme ces données dans un Système d'Information Géographique (SIG, Finet, 2007). Pour notre étude, seules les variables correspondant aux précipitations de périodes de retour de 5, 10, 20, 50 et 100 ans observées sur 24 heures ont été considérées. Pour une variable donnée, la valeur caractéristique de chaque station a été estimée en calculant la moyenne des valeurs attribuées à chaque pixel situé dans l'emprise des limites du bassin versant considéré.

A partir d'une cartographie récemment établie par EDF (Gottardi, 2009), une démarche comparable a été menée pour estimer les précipitations moyennes annuelles recueillies par les bassins versants concernés par l'étude.

Enfin, grâce au concours d'EDF, nous disposons également du type de temps observé pour chaque journée de la période allant de 1953 à 2008. La classification retenue distingue 8 types de champs barométriques moyens à l'échelle européenne.

- **Caractéristiques géographiques des bassins versants**

Les principaux paramètres morphométriques des bassins versants étudiés ont été calculés de manière semi-automatique avec l'aide d'outils SIG. Les données géographiques proviennent de l'Institut Géographique National IGN (Modèle Numérique de Terrain de la base de données BD Topo et réseau hydrographique de la base de données BD Carthage). Les variables calculées sont : la surface drainée ; le périmètre ; les altitudes moyenne, médiane, maximum et minimum ; la longueur totale des cours d'eau ; le nombre de drains principaux et secondaires. La base de données européenne Corine Land Cover a également permis de déterminer l'occupation des sols de chaque bassin versant en distinguant 7 classes différentes. Enfin, la part éventuelle de terrains karstiques a été évaluée « à dire d'expert » à partir des synthèses géologiques à notre disposition.

DEFINITION DES ZONES HYDROLOGIQUES HOMOGENES

Afin d'affiner les analyses statistiques des débits de crue dans la région, il est apparu nécessaire d'identifier les zones que l'on pourrait considérer comme homogènes du point de vue du fonctionnement hydrologique. Les aspects géographiques, morphologiques, géologiques, climatologiques ont été successivement détaillés. Les conditions de formation des crues ont également été analysées afin d'y détecter une éventuelle cohérence régionale (Peteuil et al., 2011).

La zone d'étude s'étend du lac Léman au nord à la mer Méditerranée au sud, de la vallée du Rhône à l'ouest et à la frontière avec la Suisse et l'Italie à l'est. A l'intérieur de ce vaste territoire, il est classique de distinguer trois **ensembles géographiques** majeurs : les Alpes du nord, les Alpes du sud et les bas-reliefs de la zone littorale. Ce découpage est essentiellement fondé sur des contrastes portant à la fois sur le climat, la végétation, le type de relief et son modelé.

De leur genèse, les Alpes françaises ont hérité une grande diversité lithologique. Au sein de la zone d'étude, plusieurs unités **morphostructurales** composent ainsi une mosaïque complexe :

- au nord-ouest, les dépôts molassiques de l'avant-pays savoyard et du bas Dauphiné
- sur un axe approximativement central, les moyennes montagnes des Préalpes du nord et des Préalpes du sud
- à l'est, les grandes Alpes qui rassemblent les sommets les plus élevés du massif
- au sud, les reliefs plus modestes du littoral de la Côte d'Azur

Caractérisées par des altitudes moyennes élevées, les Alpes françaises sont aussi structurées sur le plan **morphologique** par la pénétration de profondes vallées jusqu'au cœur du massif : au nord, le fleuve Rhône et son affluent l'Isère ; au sud, la Durance. La frange méridionale du massif est également drainée par de nombreux fleuves côtiers.

L'examen de la **pluviométrie** montre que la zone étudiée est schématiquement caractérisée par :

- une augmentation graduelle des précipitations annuelles en allant du sud au nord
- une atténuation sensible de l'intensité des pluies extrêmes en s'éloignant du littoral méditerranéen et, dans une moindre mesure, de la vallée du Rhône
- une exposition singulière aux pluies intenses dues à des retours d'est pour les bassins versants jouxtant la zone frontalière avec l'Italie

Pour l'ensemble des stations de la zone d'étude, le **type de perturbations à l'origine des fortes crues** a été analysé. Station par station, les dates d'occurrence des crues de période de retour supérieure à 2 ans ont été relevées. Les types de temps prévalant lors de l'épisode pluvieux générateur ont été déterminés grâce au calendrier des types de temps fourni par EDF. On a ensuite recherché s'il existait une cohérence régionale dans cette répartition des types de temps. Par massif, on a ainsi fait le bilan de la fréquence de chaque type de temps lors des événements de crue. On a alors défini pour chaque bassin un degré d'exposition, en 4 classes, aux flux dominants dans sa région.

Ainsi, le croisement de ces critères, décrits ci-dessus, liés à la distribution du relief et des précipitations, à la géologie et au type de temps à l'origine des plus fortes crues, a conduit à définir 5 secteurs considérés comme homogènes sur le plan hydrologique (Figure 1).

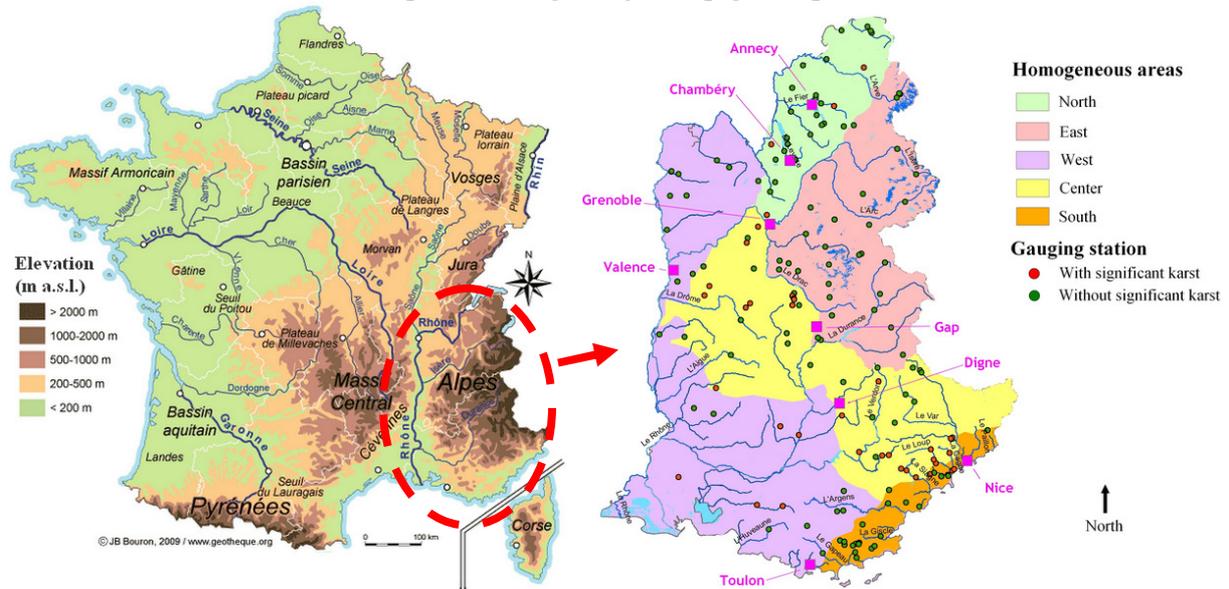


Fig. 1 Zone d'étude et délimitation des zones hydrologiques homogènes

Fig. 1 Location of the study area and delineation of the proposed homogeneous areas

On distingue ainsi :

- une zone « nord » rassemblant la majeure partie des Préalpes du Nord et l'Avant-pays savoyard
- une zone « centre » qui correspond aux Préalpes du Sud et aux Alpes maritimes
- une zone « est » qui regroupe les Alpes internes et externes
- une zone « ouest » qui inclut notamment le bas-Dauphiné, les monts du Vaucluse et la basse Provence calcaire
- une zone « sud » qui s'étend du massif des Maures aux Préalpes de Nice

PREDETERMINATION DES CRUES A PARTIR D'UNE APPROCHE REGIONALE

• Durées caractéristiques de crue

Pour chaque crue échantillonnée, on dispose de l'hydrogramme de crue et de diverses variables, notamment le débit de pointe et la durée caractéristique. Pour chaque station, la médiane des différentes valeurs de durée caractéristique est également déterminée. La figure 2 montre qu'on ne peut mettre en évidence de relation entre la durée caractéristique médiane des stations et la superficie des bassins versants. La dispersion des points est très grande et des bassins de taille modeste montrent des durées de crue qui peuvent être très longues. La figure 3 montre une relation également très dispersée entre durée caractéristique et débit de pointe décennal.

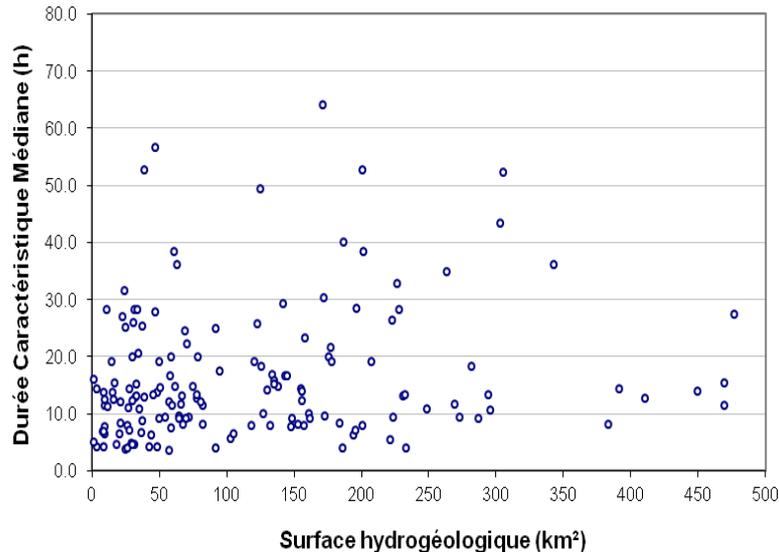


Fig. 2 Relation entre la durée caractéristique médiane et la superficie des bassins versants
Fig. 2 Relationship between median flood duration and catchment area

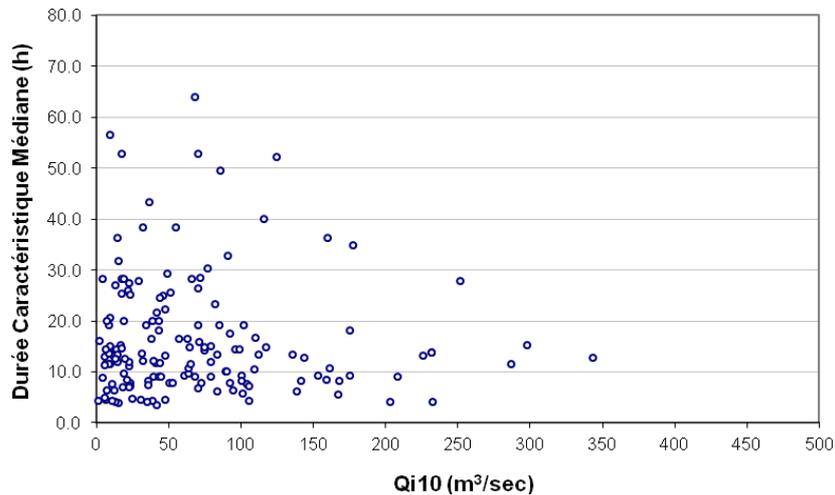


Fig. 3 Relation entre la durée caractéristique médiane et le débit de pointe décennal (Qi10)
Fig. 3 Relationship between median flood duration and ten years return period flood discharge (Qi10)

L'analyse détaillée de la forme des hydrogrammes réalisée station par station montre parfois une décroissance des durées caractéristiques médianes pour les forts débits de pointe. Dans ce cas, on peut estimer que les crues les plus fortes sont aussi les plus rapides. Mais, pour un grand nombre de stations, cette tendance ne s'observe pas.

En zone de montagne, l'influence de la fonte de la neige sur les durées et volumes de crue peut être importante. Une analyse saisonnière a donc été tentée. Dans certains cas, on note un comportement différent avec les saisons, les crues les plus fortes sont des crues d'été et d'automne de durées globalement plus courtes. Les crues d'hiver et de printemps sont beaucoup plus longues mais produisent des pointes plus faibles. A l'inverse dans d'autres cas, on n'identifie pas de tendance saisonnière.

Aucune tendance marquée ne se dégageant de ces analyses préliminaires, nous avons donc été dans l'impossibilité de caler une relation prédictive donnant des résultats avec un bon niveau confiance.

- **Débits de pointe de référence**

1. Relations simplifiées entre débit décennal et surface drainée

Dans un premier temps, l'analyse a porté sur la relation entre le débit décennal et la surface du bassin versant seule. Cette analyse a été menée en considérant l'ensemble de la zone d'étude. Deux relations ont été calées, l'une intégrant les données issues des bassins versants karstiques et l'autre pas. La performance de ces modèles très simples a été évaluée à partir des indicateurs suivants : le coefficient directeur de la droite de régression (Q_{calc}/Q_{est}), le coefficient de corrélation (r^2) entre les valeurs calculées par le modèle (Q_{calc}) et les valeurs estimées selon les ajustements statistiques (Q_{est}) ; deux intervalles susceptibles d'encadrer les valeurs calculées par le modèle, soit $[2Q_{est}/3 ; 3Q_{est}/2]$ et $[Q_{est}/2 ; 2Q_{est}]$.

Cette démarche montre que la qualité des résultats n'est finalement pas dégradée si l'échantillon prend en compte l'ensemble des données disponibles (Tableau 1). Ce constat nous a incité par la suite à conserver les 159 bassins versants retenus dans le recensement initial.

Tab. 1 Evolution de la performance des relations entre le débit décennal de pointe (Q_{i10} en m^3/s) et la surface (S en km^2) en tenant compte ou non des données issues de bassins versants karstiques

Tab. 1 Performance of the relationships between the ten years return period peak discharge (Q_{i10} in m^3/s) and the catchment area (S in km^2) regarding the presence or not of karsts within the basin

Echantillon incluant des bassins karstiques	Nombre de bassins	Relation	$\frac{Q_{calc}}{Q_{est}}$	r^2	Proportion de valeurs calculées comprises dans l'intervalle (%)		Ecart quadratique moyen	Critère de Nash
					$[2Q/3; 3Q/2]$	$[Q/2; 2Q]$		
Oui	159	$Q_{i10} = 1,05.S^{0,84}$	0.72	0.52	48	74	0.61	0.61
Non	123	$Q_{i10} = 1,15.S^{0,82}$	0.69	0.46	48	72	0.67	0.57

Une relation entre le débit décennal et la surface a ensuite été calée pour chaque zone homogène définie précédemment. La performance de ces modèles a été évaluée selon la même démarche. La régionalisation de cette approche très simplifiée conduit ainsi à une nette amélioration des résultats obtenus (Tableau 2). Les résultats les moins satisfaisants sont observés au niveau de la zone « ouest », qui rassemble la plupart des bassins versants du piémont alpin. Ceci peut éventuellement s'expliquer par la grande diversité des terrains rencontrés dans cette zone.

2. Approche globale tenant compte de l'aléa pluviométrique

Une analyse multivariée a été menée afin de rechercher les liens statistiques éventuels entre le débit décennal et un grand nombre de paramètres caractérisant le bassin versant. Une série de tests itératifs a ensuite permis d'établir plusieurs relations statistiques dont la performance a été évaluée.

Cette démarche nous a permis de constater que la prise en compte de variables autres que la surface et la pluie journalière décennale n'améliorait pas la qualité de l'estimation. Une relation valable pour l'ensemble de la zone d'étude a pu être calée, mais sa performance s'est finalement révélée moins bonne que les relations régionalisées ne tenant compte que de la surface (Tableau 3).

Tab. 2 Relations simples entre le débit décennal de pointe (Qi10 en m3/s) et la surface (S en km²) applicables dans chaque zone homogène

Tab. 2 Relationships between the ten years return period peak discharge (Qi10 in m3/s) and the catchment area (S en km²) for each homogeneous region

Secteur	Nombre bassins versants	Relation	$\frac{Q_{calc}}{Q_{est}}$	r ²	Pourcentage de valeurs calculées comprises dans l'intervalle		Ecart quadratique moyen	Critère de Nash
					[2Q/3;3Q/2]	[Q/2;2Q]		
Nord	29	$Q_{i10} = 1,05.S^{0,84}$	0.56	0.75	59	79	0.65	0.52
Centre	56	$Q_{i10} = 0,56.S^{0,97}$	0.84	0.81	61	84	0.36	0.81
Est	31	$Q_{i10} = 0,55.S^{0,90}$	0.92	0.80	68	97	0.38	0.79
Ouest	23	$Q_{i10} = 1,58.S^{0,65}$	0.67	0.09	43	61	0.57	0.43
Sud	20	$Q_{i10} = 1,26.S^{1,02}$	0.86	0.78	70	80	0.42	0.78
Total	159	-	0.73	0.72	60	82	0.53	0.71

Tab. 3 Relation entre le débit décennal de pointe (Qi10 en m3/s), la surface (S en km²) et la pluie journalière décennale (Pj_10 en mm) applicable à l'ensemble de la zone d'étude

Tab. 3 Relationships between the ten years return period peak discharge (Qi10 in m3/s), the catchment area (S en km²) and the ten years return period daily rainfall depth (Pj_10 in mm) for the whole study area

Relation	$\frac{Q_{calc}}{Q_{est}}$	r ²	Proportion de valeurs calculées comprises dans l'intervalle (%)		Ecart quadratique moyen	Critère de Nash
			[2Q/3;3Q/2]	[Q/2;2Q]		
$Q_{i10} = S^{0,85} * \left(\frac{P_{j10}}{87.5}\right)^{0,9}$	0.71	0.52	52	79	0.63	0.59

3. Améliorations apportées par la régionalisation

Une cartographie du rapport entre les débits décennaux estimés et les débits calculés par la relation présentée dans le tableau 3 a été établie (Figure 4). On observe une bonne cohérence spatiale avec les limites de zones définies sur la Figure 1. C'est dans les zones « nord » et « sud » que les écarts observés entre les valeurs extrêmes sont les plus importants, avec une majorité de valeurs comprises entre 1,2 et 2,3. Au niveau de la zone « est », les résidus montrent des valeurs assez peu dispersées et l'intervalle allant de 0,6 à 1,1 rassemble une grande partie des valeurs calculées. Dans la zone « centre », on observe des valeurs allant majoritairement de 0,8 à 1,3 et une certaine dispersion au niveau des résidus. Au niveau de la zone « ouest », un assez grand nombre de valeurs sont comprises entre 0,4 et 1,0.

Pour chaque zone homogène, le modèle a ensuite été optimisé en calant un coefficient régional qui minimise l'écart quadratique moyen entre les valeurs estimées et les valeurs calculées. Par rapport à tous les résultats obtenus précédemment, cette démarche conduit à une nette amélioration de la performance du modèle (tableau 4).

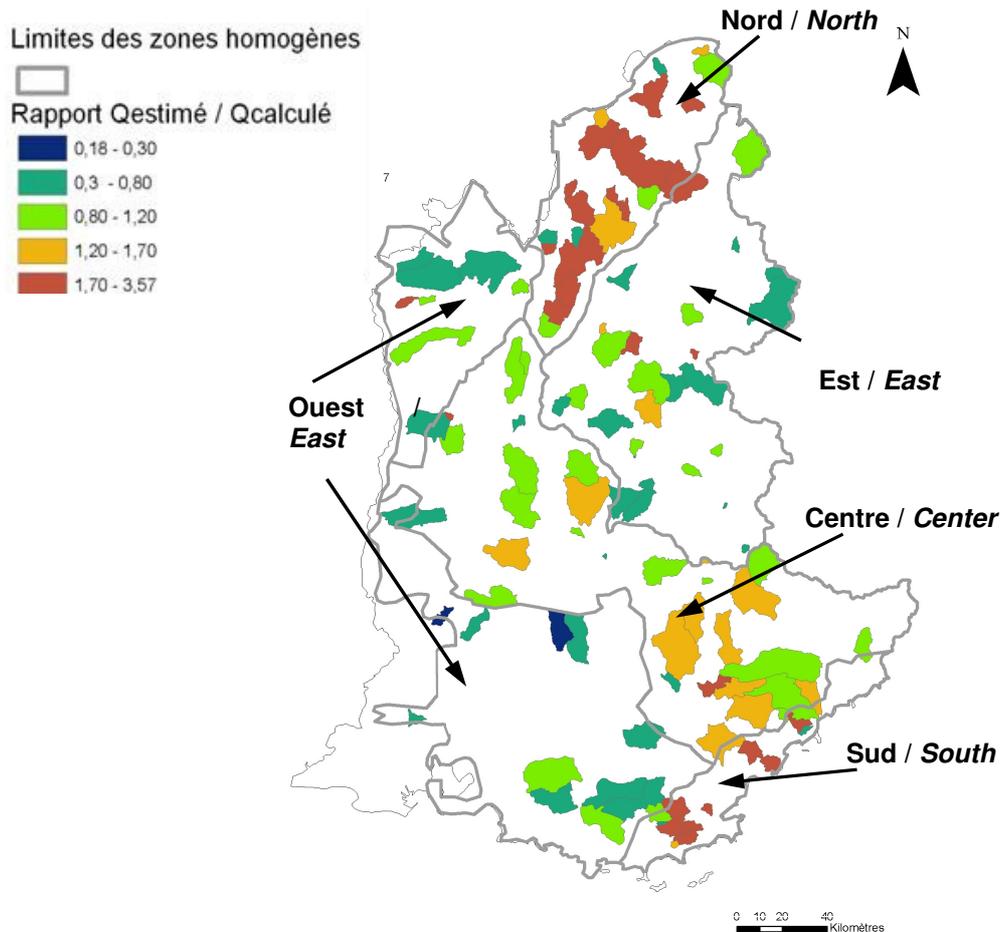


Fig. 4 Cartographie du rapport entre les débits décennaux estimés et les débits calculés par la relation donnée dans le tableau 3

Fig. 4 Map of the relationship between the estimated and calculated (with the equation given in Table 3) ten year return period discharges

Tab. 4 Relation entre le débit décennal de pointe (Q_{i10} en m^3/s), la surface (S en km^2) et la pluie journalière décennale (P_{j_10} en mm) applicable dans chaque zone homogène. Le coefficient régional Cr_{10} pour une période de retour décennale est égal à 2,0 pour la zone « nord » et la zone « sud », 1,1 pour la zone « centre », 0,86 pour la zone « est », 0,67 pour la zone « ouest ».

Tab. 4 Relationships between the ten years return period peak discharge (Q_{i10} in m^3/s), the catchment area (S in km^2) and the ten years return period daily rainfall depth (P_{j_10} in mm) for the whole study area. The regional coefficient Cr_{10} for the ten years return period is 2,0 for the « North » and « South » zones, 1,1 for the « Centre » zone, 0,86 for the « East », 0,67 for the « West » zone

Nombre de bassins versants	Relation	Q_{calc}		r^2	Proportion de valeurs calculées comprises dans l'intervalle (%)	
		Q_{est}			[2Q/3;3Q/2]	[Q/2;2Q]
159	$Q_{i10} = S^{0,85} \times \left(\frac{P_{j10}}{87,5} \right)^{0,9} \times Cr_{10}$	0.92		0.81	65	86

Ce constat nous a conduit à extrapoler cette démarche à d'autres périodes de retour de manière à couvrir toute la gamme des crues fréquentes à rares (5, 20 et 50 ans). Les relations obtenues sont données dans le tableau 5. Il paraît important de préciser que la variable relative au débit de crue centennale n'a pas fait l'objet d'une analyse particulière dans le cadre de cette étude compte tenu de la taille trop réduite des échantillons à notre disposition et de l'existence de méthodes d'extrapolation mieux adaptées.

Tab. 5 Relations régionales proposées pour les durées de retour 5, 20 et 50 ans

Tab. 5 Regional formulas for different return periods: 5, 20 and 50 years

Relation	Valeurs du Coefficient Régional pour la zone :				
	Nord	Centre	Est	Ouest	Sud
$Qi_5 = S^{0.85} \times \left(\frac{P_{j5}}{87.5} \right)^{0.87} \times Cr_5$	1.97	1.06	0.86	0.63	1.96
$Qi_{20} = S^{0.86} \times \left(\frac{P_{j20}}{87.5} \right)^{0.84} \times Cr_{20}$	1.79	1.03	0.87	0.63	1.94
$Qi_{50} = S^{0.86} \times \left(\frac{P_{j50}}{86} \right)^{0.87} \times Cr_{50}$	1.94	1.08	0.95	0.67	2.01

TENTATIVE D'AMELIORATION DE L'APPROCHE EN TENANT COMPTE DE FACTEURS GEOGRAPHIQUES LOCAUX

Sur les Pyrénées françaises, des travaux d'actualisation et de régionalisation des méthodes fondées sur des régressions multiples ont conduit à une amélioration sensible de la performance des méthodes fondées sur des régressions multiples grâce à la prise en compte de facteurs liés à l'environnement climatologique et à la géomorphologie des bassins (Peteuil et al., 2010).

Une démarche similaire a été entreprise sur la zone étudiée. Elle a consisté à faire une analyse naturaliste des sites constituant l'échantillon de calage afin de déterminer les éventuels traits géographiques communs à 3 catégories de bassins versants définies telles que le débit calculé est soit surestimé, soit conforme, soit sous-estimé par rapport à la valeur estimée par ajustement.

Les critères d'analyse retenus ont porté entre autres sur le nombre d'affluents principaux et secondaires, l'orientation des bassins par rapport aux perturbations à l'origine des fortes crues, la forme du bassin versant, la densité de drainage, la présence éventuelle de glaciers, l'altitude moyenne... Pour chaque catégorie de bassin versants, une classification des sites a été tentée à partir des critères précédents en suivant une démarche itérative. Aucune clé de détermination suffisamment robuste n'ayant toutefois pu être définie à l'issue de cette analyse, nous ne sommes pas en mesure de proposer une approche complémentaire apportant un gain en précision significatif.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude a permis l'élaboration d'une base de données hydrologiques actualisées et très complètes sur 159 bassins versants torrentiels des Alpes françaises. Élaborée après une longue phase de recueil, de traitement et de critique des données hydrologiques disponibles dans la région, elle rassemble des variables relatives :

- à la morphométrie des bassins versants (surface drainée, périmètre, altitudes caractéristiques, compacité...)
- à l'environnement climatologique (pluies annuelles, pluies extrêmes de différentes périodes de retour, types de temps à l'origine des plus fortes crues,...)
- au réseau hydrographique (nombre d'affluents principaux et secondaires, longueur des cours d'eau, densité de drainage,...)
- à l'orientation des bassins par rapport aux perturbations à l'origine des fortes crues
- à l'occupation des sols
- à la géologie (présence éventuelle de terrains concernés par des transferts karstiques)
- aux débits de pointe de différentes périodes de retour (2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans) et aux durées caractéristiques de crue

L'analyse détaillée de la durée caractéristique de crue de chaque bassin versant en fonction de la surface, du débit et de la saison n'a pas permis de mettre en évidence des relations fiables à l'échelle de la zone d'étude. Il n'est donc à ce stade pas possible de proposer une formule pour estimer cette durée sur un bassin versant non jaugé.

Néanmoins plusieurs relations statistiques multivariées ont été établies permettant de prédire les débits de crues de périodes de retour 5, 10, 20 et 50 ans en fonction de variables comme la surface drainée et la pluie. Des relations ne tenant compte que de la surface ont également été établies pour les praticiens souhaitant disposer très rapidement d'un ordre de grandeur des débits de différentes fréquences susceptibles de s'écouler en un point donné d'un bassin. La performance des modèles les plus élaborés, notamment dans leur version régionalisée, s'avère globalement satisfaisante comparativement au niveau de confiance accordé à d'autres approches du même type. L'intérêt de ces modèles est aussi de couvrir toute la gamme des crues fréquentes à rares. Cependant, compte-tenu de la taille relativement réduite des échantillons disponibles, aucune formulation n'est proposée pour les débits de crue de période de retour 100 ans. Contrairement à l'objectif initial de l'étude et aux résultats récents obtenus sur les Pyrénées françaises, il n'a pas non plus été possible d'améliorer les formules proposées par la prise en compte des facteurs liés à l'environnement climatique et à la géomorphologie des bassins.

Néanmoins, la base de données ainsi élaborée semble pouvoir encore être exploitée, soit pour faire des synthèses plus locales, soit pour engager des analyses plus détaillées sur les stations disposant des plus longues durées d'observation. Elle est disponible pour des travaux de recherche complémentaires mettant par exemple en œuvre d'autres démarches de régionalisation. Enfin, il serait nécessaire d'approfondir l'analyse réalisée sur les volumes s'écoulant à l'exutoire des bassins, compte tenu de l'influence directe de cette variable sur les volumes solides charriés en période de crue par les cours d'eau de montagne.

REFERENCES

- Djrboua, A., 2001. Prédétermination des pluies et crues extrêmes dans les alpes franco-italiennes. Préviation quantitative des pluies journalières par la méthode des analogues. Thèse de Docteur de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, France, LTHE-INPG, 422 p.
- Finet, T., 2007. Atlas des précipitations extrêmes sur les Alpes françaises. Mémoire de stage réalisé au service de prévision des crues des Alpes du nord de la DDE38. 11 pages.
- 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 de Docteur de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, France, LTHE-INPG, 261 p.
- Peteuil, C., Carlados, S. et Mathys, N., 2010. La méthode ANETO : un outil pour la prédétermination des débits de crue des bassins versants torrentiels des Pyrénées françaises. SET, n°02, 116-127.
- Peteuil, C, Mathys, N., Martin, A.L., Zegrar, R., Porcheron, D., Riess, A., Cipriani, T., 2011. Prédétermination des crues sur les bassins versants torrentiels : faisabilité d'une synthèse hydrologique régionale fondée sur la prise en compte de facteurs géographiques locaux. Rapport PGRN, 67 pages.
- Sauquet, E., 2009. Analyse statistique des crues : éléments techniques. Cemagref, Note Technique, 16 pages.