

## **Analyse statistique, multiscalaire et fractale des débits des phases de montée de crue d'épisodes cévenols (Gardon, France)**

### **Statistical, multiscalar and fractal analysis of the flow rates of the rising phases of the Cévennes episodes (Gardon, France)**

Philippe MARTIN \*

**Abstract:** The Gardon tributary of the right bank of the lower Rhône valley (1999 km<sup>2</sup>), is a river whose floods are particularly strong (6700 m<sup>3</sup>/s in Remoulins – confluence – in September 2002 (8 and 9), 3050 m<sup>3</sup>/s in 12 September 1976). These floods start with a very fast flood, often dangerous, but which is only rarely analyzed. They correspond to increases in flows whose rates can be calculated from day to day, or even with shorter time steps (10 minutes, 1 hour...). These series of rates can be transformed into probability distributions. These can be modeled with laws of simple power or having a curvature (parabolic model). All Gardon data available in the hydro bank (average daily flows) were thus modeled as well as those collected at high resolution (5 minutes) in a small experimental basin (Valescure: 4 km<sup>2</sup>). The statistical parameters obtained at different steps make it possible to highlight a fractal structure in this series of increments. All these models are then compared to the topographic and morphological characteristics of the Gardon basin. A relationship can then be demonstrated between the distance to the confluence with the Rhone (Remoulins) and the statistical characteristics of the distributions. Upstream they are more hierarchical, but include limiting factors that translate into curvature. Downstream the distributions are less hierarchical. The curvatures are generally lower.

Keywords: Hydrology, Cévenol flash flood, Pareto, rising flood, high resolution, fractal

**Résumé :** Le Gardon, affluent de rive droite de la basse vallée du Rhône (1999 km<sup>2</sup>), est une rivière dont les crues sont particulièrement fortes (6700 m<sup>3</sup>/s à la confluence avec le Rhône à Remoulins les 8 et 9 septembre 2002 ; 3050 m<sup>3</sup>/s le 12 septembre 1976). Ces crues débutent par une montée du débit très rapide, souvent dangereuse, mais qui n'est que très rarement analysée. Elles correspondent à des accroissements des débits dont les taux peuvent être calculés de jour en jour, voire avec des pas de temps plus court (10 min, 1 h...). Ces séries de taux peuvent être transformées en distributions de probabilité. Celles-ci peuvent être modélisées avec des lois de puissance simple ou présentant une courbure (modèle parabolique). Toutes les données du Gardon disponibles dans la Banque hydro (débits moyens journaliers) ont ainsi été modélisées tout comme celles collectées à haute résolution (5 min) dans un petit bassin expérimental (Valescure : 4 km<sup>2</sup>). Les paramètres statistiques obtenus à différents pas de temps permettent de mettre en évidence une structure fractale dans cette série d'accroissements. Toutes ces modélisations sont ensuite croisées avec les caractéristiques topographiques et morphologiques du bassin du Gardon. Une relation peut alors être mise en évidence entre la distance à la confluence avec le Rhône (Remoulins) et les caractéristiques statistiques des distributions. En amont, elles sont plus hiérarchisées, mais intègrent des facteurs limitants qui se traduisent par une courbure. À l'aval les distributions sont moins hiérarchisées. Les courbures sont globalement plus faibles.

Mots-clefs : Hydrologie, crue cévenole, Pareto, montée de crue, haute résolution, fractale

## **INTRODUCTION**

Les crues constituent un problème majeur de sécurité publique (ROCHE, 1985 ; OMM, 2012, 2014) en raison de deux risques principaux liés à la hauteur et à la vitesse de l'eau (RUIN & LUTOFF, 2007). Elles réalisent par ailleurs, lors des phases les plus énergétiques, un travail morphologique. Celui-ci conduit parfois à des destructions majeures de ponts, de digues, etc. lesquelles peuvent avoir des conséquences graves (rupture de réseaux, submersion très rapide...).

Afin de prévoir, à partir des précipitations et de l'état hydrique préalable des bassins versants (imbibition des sols et aquifères), généralement les valeurs successives des hauteurs de crue et les débits de pointe de crue, d'amont en aval, de nombreux modèles (GAUME, 2002, 2007 ; DARRAS, 2015 ;

\* Avignon Université – UMR ESPACE 7300 du CNRS, 74 rue L. Pasteur, 84029 Avignon cedex.  
[philippe.martin@univ-avignon.fr](mailto:philippe.martin@univ-avignon.fr)

ZIN, 2002 ; ESTUPINA BORRELL, 2004 ; MARCHANDISE, 2007 ; BESSIERE, 2008 ; ROUX, 2018) ont été développés sur des bases conceptuellement très variables (modèle à réservoirs, physique, à neurones, bayésien...).

De nombreuses études statistiques ont aussi été produites (GAUME & BORGA, 2013). Elles ont souvent visé à ajuster des distributions de mesures ( $Q_{max}$ ...) à des lois statistiques (Gumbel...). Il est habituel, dans ce but, d'extraire de  $n$  hydrogrammes différents indicateurs (pointe de crue, volume, temps de montée de crue, de décrue...) et de chercher ensuite à ajuster ces distributions spécifiques à des lois statistiques (MEYLAN *et al.*, 2008 ; ROCHE *et al.*, 2012).

Dans tous ces travaux, il apparaît qu'une phase relativement courte, pourtant essentielle (la montée de crue) puisque c'est à ce moment que beaucoup se joue du point de vue de la sécurité, mais aussi hydrologiquement (érosion), a été peu étudiée (COSANDEY, 1994 ; MARTIN *et al.*, 2003). Cette phase se situe sur un hydrogramme entre la fin d'une récession ou d'un tarissement et le pic de crue qui suit. Elle n'est pas totalement simple comme on pourrait le croire en première analyse (surtout avec des débits à haute résolution). Sa durée est généralement courte. Mais en comparant simplement des hydrogrammes, on voit que les montées de crue sont d'autant plus longues et lentes que les observations sont faites plus à l'aval du bassin.

Inversement, le débit monte d'autant plus vite que le bassin versant concerné est petit et situé dans des secteurs amont, en pente plus forte. Cette appréciation qualitative demande toutefois à être quantifiée. L'accroissement du débit est donc très rapide et plus important à l'amont qu'à l'aval. Ceci peut être caractérisé statistiquement et discuté.

Cependant, peu d'études, en particulier statistiques et sur différents points du réseau hydrographique, ont été réalisées sur cette brève période de montée de crue en rapport avec la convergence des écoulements (diffus ou concentrés) et les vitesses de transit. Il n'y a guère que pour les hydrosystèmes karstiques bien développés (cavernement important) que le transfert de pression peut jouer un rôle dans la formation des montées de crue, mais cela semble marginal pour un bassin comme celui du Gardon.

Nous faisons l'hypothèse que ces accroissements de débit sont statistiquement et spatialement organisés. Pour combler le manque d'étude de ces phases, nous nous proposons de montrer comment elles peuvent être étudiées de façon assez aisée et quelles informations peuvent être tirées de cette approche. Ces informations pourront contribuer ensuite à l'amélioration de certains modèles opérationnels.

## LES CRUES DU GARDON

### Les crues éclair dans le bassin du Gardon (Gard)

En Occitanie, dans le Gard on observe des cours d'eau, la Cèze et le Gardon (Fig. 1) qui, comme l'Hérault ou les petits fleuves côtiers des Bouches-du-Rhône (Huveaune...) ou du Var (Gapeau, Argens...), réagissent très vite à des précipitations parfois exceptionnelles (pouvant atteindre 600 à 800 mm en quelques heures (du 08/09/2002 10 h UTC au 09/09/2002 18 h) lors de la crue de référence du Gardon en 2002 (HUET *et al.*, 2003) au niveau du noyau pluviométrique situé au-dessus du piémont, vers Ners : <http://pluiesextremes.meteo.fr/france-metropole/Catastrophe-sur-le-Gard.html>).

Le Gardon (Fig. 1) qui est un affluent de rive droite de la basse vallée du Rhône est une rivière qui connaît des crues particulièrement fortes (6 700 m<sup>3</sup>/s à Remoulins en septembre 2002 (les 8 et 9) ; 3 050 m<sup>3</sup>/s le 12 septembre 1976) liées à des épisodes dits cévenols d'automne qui se produisent lors de la remontée vers le nord-ouest de masses d'air humide provenant de la Méditerranée qui s'élèvent le long du relief des Cévennes et parfois « se bloquent » et stagnent au-dessus du piémont, comme en 2002 (ou en 1988 au-dessus de Nîmes). Les débits de ces rivières sont donc très spécifiques, extrêmes à l'automne, indigents en été (assecs fréquents, largement d'origine karstique à l'aval).

Les crues en régions méditerranéennes débutent souvent par une phase de montée de crue très spécifique. La morphologie du bassin et la forme convergente (ou non) du réseau hydrographique (DAVY, 1956) a une influence certaine sur le temps de concentration des eaux, mais pas seulement. L'intensité des précipitations, la saturation des sols ou leur imperméabilité jouent aussi un rôle essentiel. Certains de ces facteurs sont structurels (forme du réseau), d'autres sont conjoncturels (pluie, coefficient

d'infiltration...). Il est assez difficile de les séparer et de leur donner un poids respectif lors de chaque phase de montée de crue. Il faut toutefois des précipitations importantes (50, 100, 150 mm ou plus) et intenses, et cela d'autant plus qu'elles arrivent sur des sols très secs (début d'automne) et au niveau du piémont sur des karsts largement ouverts (lapiés, canoles...). Le dernier épisode en date, du 19/09/2020, provoqué par de très fortes pluies sur le haut bassin du Gardon d'Anduze (le débit est passé à Anduze de 3 m<sup>3</sup>/s à 12 h à environ 1 800 m<sup>3</sup>/s à 16 h), est de cet ordre-là.

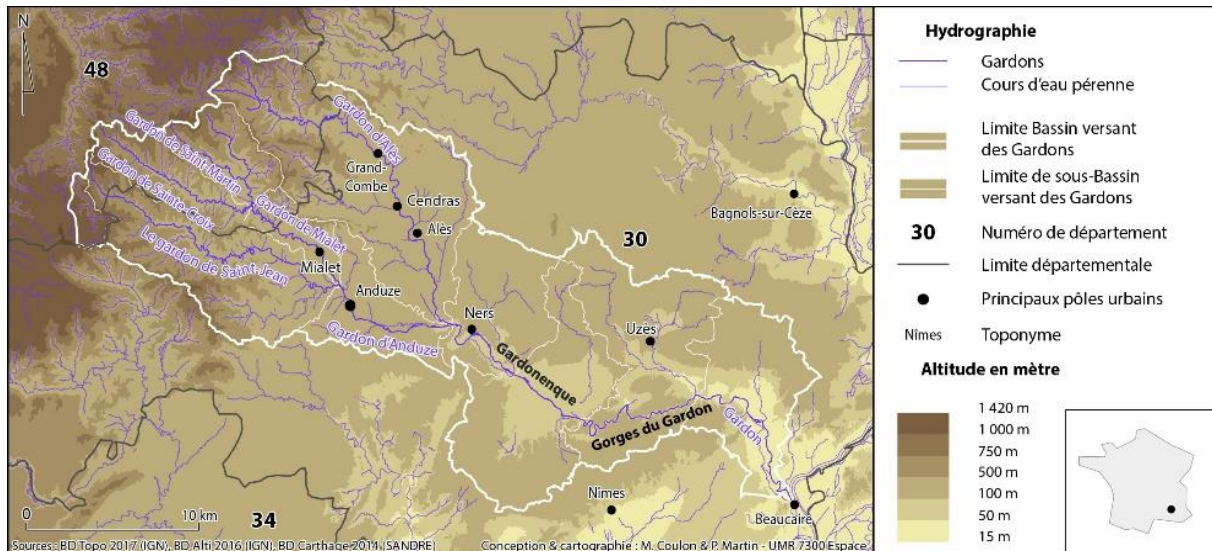


Figure 1 : Carte orohydrographique du bassin versant du Gardon (Gard, France).

## Les accroissements relatifs

Il est possible de faire l'hypothèse que si nous pouvons modéliser statistiquement les phases de montée de crue de  $x$  stations réparties sur le réseau hydrographique du Gardon, il sera possible de mettre en rapport les paramètres des modèles statistiques avec des indicateurs par exemple morphologiques, lithologiques, pédologiques ou autres. Par ailleurs, les chroniques utilisées étant relativement longues, il est possible de penser qu'elles contiennent des montées de crue qui résultent de très différentes situations climatiques et hydrologiques (état des aquifères...). L'approche statistique proposée devrait permettre d'en établir, station par station, la distribution de probabilité et donc d'en isoler, pour étude, les cas les plus spécifiques.

Dans cette optique, il convient de disposer d'un indicateur, calculable de mesure en mesure, qui rende compte de l'intensité relative de la montée de crue. Nous avons pour cela défini un accroissement relatif qui correspond au taux d'augmentation d'une variable d'un temps  $t$  à un temps  $t+1$  donc entre par exemple un débit moyen journalier au temps  $t$  et le débit moyen journalier suivant au temps  $t+1$ , mais ce pourrait être un débit horaire, déterminé sur 5 min ou calculé sur 3 h à condition de disposer d'une information avec un pas de temps suffisamment fin.

Soit une chronique temporelle à temps discret d'une variable  $V$ , la valeur de l'accroissement relatif  $A_R$  sera définie comme un indice calculé entre les dates  $t$  et  $t-1$  à partir de la formule suivante :  $A_R = (V_t - V_{t-1}) / V_{t-1}$ . Comme il s'agit d'un écart et pour pouvoir disposer de valeurs positives, le calcul est effectué entre la valeur au temps  $t$  et la valeur précédente au temps  $t-1$ . L'accroissement relatif  $A_R$  est donc un écart, rapporté à la valeur de la variable au temps  $t-1$ . C'est en cela qu'il est relatif. Il mesure ce qui se passe d'un instant à l'autre. Cet écart peut en théorie être positif lorsque  $V_t > V_{t-1}$  et négatif dans le cas inverse. Lorsque  $V_t > V_{t-1} \Rightarrow 0 < A_R < +\infty$ . Lorsque  $V_t < V_{t-1} \Rightarrow 0 > A_R > -1$ .

Cette approche peut être appliquée sans grande difficulté aux chroniques de débits :  $A_{RQ} = (Q_t - Q_{t-1}) / Q_{t-1}$ . L'indice  $A_{RQ}$  mesure donc l'accroissement relatif d'une mesure à l'autre, quel que soit le pas de mesure. Il pourrait être envisagé, tout comme lors du calcul d'un tarissement qui rend compte de la variation négative des débits en situation non influencée, de déterminer l'accroissement absolu des débits. Dans ce cas, chaque débit de la montée de crue devrait être rapporté à un débit initial,

celui de la fin de la récession précédant la crue. Dans les modélisations des tarissements, ce débit de référence est généralement nommé  $Q_0$ . Les valeurs calculées successivement correspondent donc à la fraction restant de ce débit  $Q_0$ . Dans le cas des montées de crue, procéder ainsi n'aurait guère de sens. Pour des raisons de sécurité, de gestion... il semble préférable de connaître quel peut être le débit (en relation avec les hauteurs d'eau, les vitesses...) qui sera observé dans l'instant suivant, quel que soit le pas de mesure. Et plus particulièrement, de savoir quelle peut être la probabilité d'observer tel ou tel débit à partir de tel ou tel débit au temps  $t_{-1}$  ?

Lorsque  $Q_t > Q_{t-1}$  cela implique que :  $0 < A_{RQ} < +\infty$ , et lorsque  $Q_t < Q_{t-1}$  cela implique que  $0 > A_{RQ} > -1$ . Il est donc possible de séparer les montées de crue des phases de décrue et de récession et d'étudier de cette façon les décrues, ou en utilisant un modèle plus sophistiqué (MARTIN, soumis). Par ailleurs, lorsque  $A_{RQ} > 1$ , le facteur multiplicatif entre les débits  $Q_{t-1}$  et  $Q_t$  est supérieur à deux (doublement du débit).

En nous limitant aux valeurs positives, nous obtenons une statistique des modalités d'augmentation des débits lors des phases de montée de crue. Pratiquement, dans l'étude ci-dessous les phases de montée de crue ont d'abord été extraites à la main, afin de bien identifier les données à utiliser dans la modélisation statistique. Avec des débits moyens journaliers, il n'y a guère de doute en raison du pas de temps lui-même qui implique de lisser les petites variations (moyenne sur  $n$  valeurs). Mais avec des débits à pas de temps très fins (5 min par exemple), il est possible par exemple d'avoir de petites rémissions dans la montée de crue et/ou des situations plus confuses au moment du pic de crue qui peut durer quelques heures. Par ailleurs, à ce niveau scalaire, il existe très souvent un bruit brownien lié aux capteurs eux-mêmes que l'on peut essayer de lisser sans trop jouer sur le pas, mais avec difficulté.

La statistique ainsi déterminée peut ensuite être reportée sur un diagramme bilogarithmique en fonction des densités de fréquences (cf. ci-dessous), puis faire l'objet d'une modélisation statistique, par ajustement, par régression, de modèles linéaires ou non.

## **Les données issues de la Banque hydro ou produites pour la recherche**

Les données utilisées sont d'abord celles de la Banque hydro (<http://hydro.eaufrance.fr>), de toutes les stations accessibles sur ce serveur qui présentent plusieurs années d'enregistrement. Nous avons ainsi retenu quinze stations qui n'ont pas toutes fonctionné au même moment (<http://www.hydro.eaufrance.fr/selection.php>). Parfois certaines ont été déplacées, mais tout en restant dans la même partie du réseau hydrographique. Au total, nous avons travaillé sur dix-huit chroniques pluriannuelles. Le pas de temps est journalier et la qualité des données parfois incertaine (cf. codification dans la base de la Banque Hydro). Certaines chroniques sont lacunaires et les tailles des lacunes sont variables.

Cet ensemble de données relativement hétérogène justifie donc pleinement une approche statistique qui permet d'arriver à des résultats, à condition de faire l'hypothèse que les données disponibles correspondent d'une part, à un échantillonnage acceptable de chroniques non lacunaires et que, d'autre part, les erreurs ou incertitudes que traduit la classification de la qualité des débits donnée par la Banque hydro se compensent, ou du moins n'ont pas un poids majeur sur la structure des modèles statistiques, qu'elles n'en changent pas fondamentalement la nature.

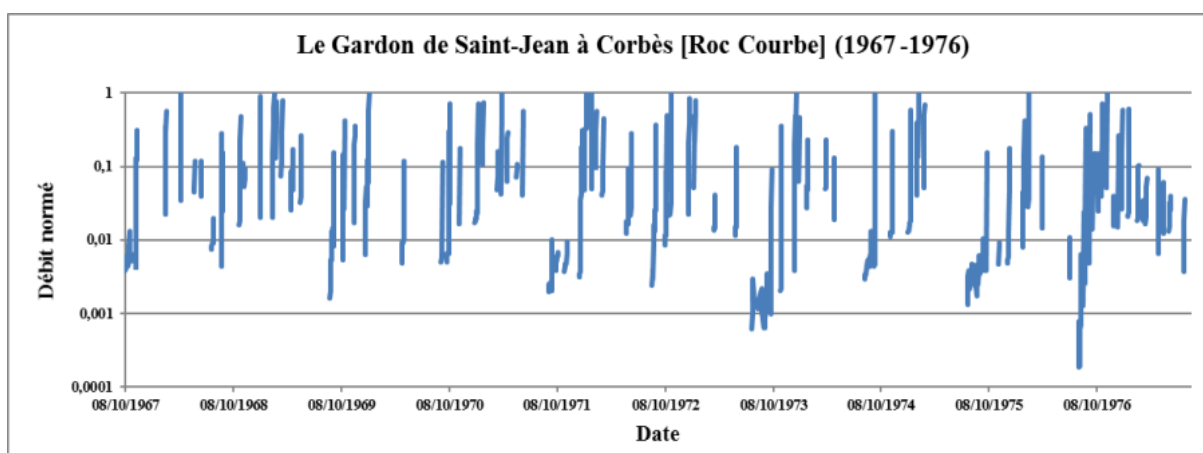
À côté de cela nous disposons de données produites par l'UMR ESPACE en particulier sur un site expérimental (Bassin Versant de Recherche Expérimental – BVRE) intégré dans l'Observatoire Hydrométéorologique Méditerranéen Cévennes – Vivarais : OHM-CV - <https://ohmcv.osug.fr>), dit de Valescure (depuis 2003) soit au niveau d'un petit affluent du Gardon d'Anduze. Ces données sont produites à haute résolution (5 min) pour la recherche. Elles permettent de développer une approche transscalaire en changeant le pas de la mesure par calcul, jusqu'à atteindre celui utilisé dans la bancarisation dans la Banque hydro (24 h).

Cette chronique, certes plus courte (11 cycles ont ici été utilisés : 2003 - 2014), a l'avantage d'être de bonne qualité et quasiment sans lacunes. Elle permet donc de développer une modélisation précise qui sera reprise et comparée avec celle obtenue avec des chroniques journalières plus classiques collectées très largement depuis des années pour suivre le développement des crues, pour des raisons principalement de sécurité publique.



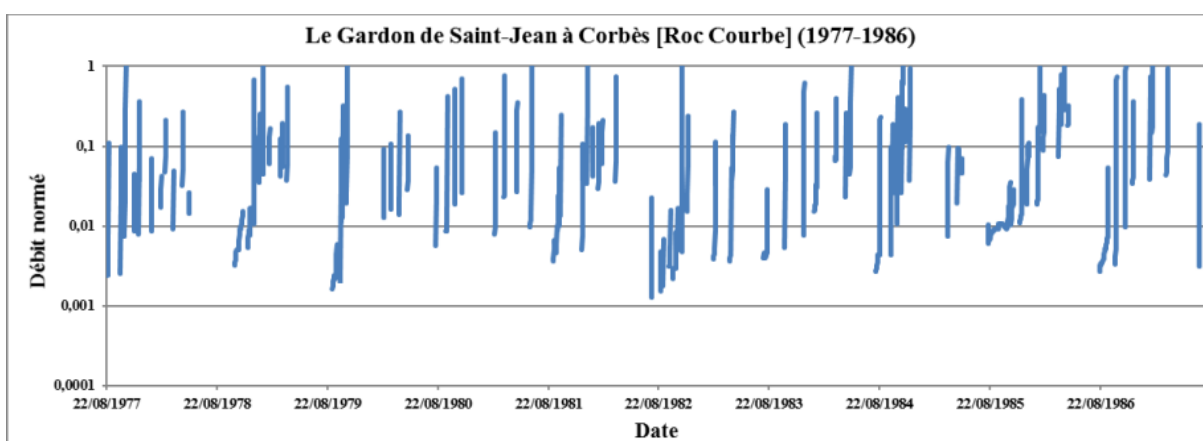
## Site de Corbès : traitement de données issues de la Banque hydro

La première démarche a consisté à extraire les données correspondant aux montées de crue telles que définies ci-dessus (LAHOUSNIA, 2015). Il est ensuite possible de les représenter en les normant en fonction de la pointe de crue la plus forte de chaque cycle, puis de les représenter avec une échelle logarithmique (Figs. 2 et 3). Ceci est d'autant plus significatif que le nombre de données est important. Sur la station de Corbès (<http://www.hydro.eaufrance.fr/stations/V7135010>) qui est située dans la partie aval d'une vallée cévenole (commune de Corbès juste à l'amont d'Anduze) et qui a été l'une des stations de référence du Gardon, la masse de données est assez conséquente.



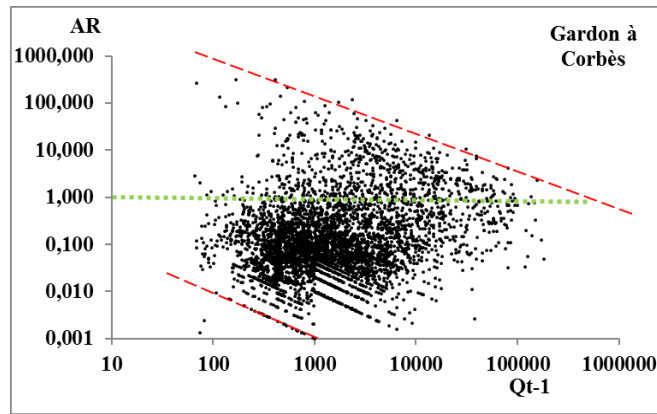
**Figure 2 :** Chronique des montées de crue normées du Gardon à la station de Corbès (1967–1976).

Chaque montée de crue se traduit par un trait irrégulier. Les espacements correspondent aux durées entre les montées de crue successives. Ces espaces renvoient en fait à la durée séparant deux épisodes pluvieux assez conséquents pour donner une crue. Ces périodes, sans pluies majeures, s'observent lors des phases pluvieuses (automne et printemps), mais dans ce cas elles sont courtes et les traits proches. Mais elles s'observent aussi à la fin des cycles clôturés par l'étiage *stricto sensu*. Dans ce cas, les durées sont globalement plus longues, ce qui permet d'isoler les cycles. Les figures 2 et 3 semblent montrer à partir de 1976 une plus grande variabilité dans les montées de crue.



**Figure 3 :** Chronique des montées de crue normées du Gardon à station de Corbès (1977–1986).

Ces chroniques de débits permettent de calculer des accroissements. Il devient donc possible de croiser les débits au temps  $t_1$  et les accroissements relatifs (Fig. 4). Il s'agit d'abord de visualiser ce que peut être la diversité des  $A_{RQ}$ . La question est donc de savoir en fonction de tel ou tel débit au temps  $t_1$  quel peut être le débit au temps  $t$  ? Il s'agit donc de savoir si un débit donné peut être multiplié par deux, par dix ou par cent et avec quelle probabilité ?

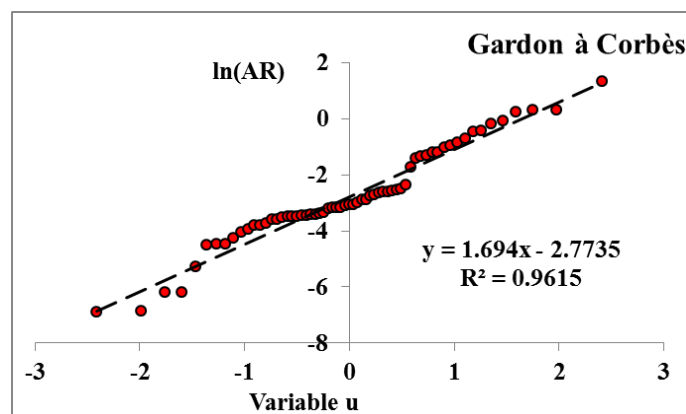


**Figure 4** : Relation entre les débits au temps  $t_1$  de la station de Corbès sur le Gardon et les accroissements relatifs ( $A_{RQ}$ ) calculés à partir des données de montées de crue. La ligne pointillée verte correspond au doublement des débits.

La figure 4 montre qu'à Corbès les débits s'échelonnent de 100 l/s à 500 000 l/s (soit 500 m<sup>3</sup>/s) et que les accroissements varient entre 0,001 et 500 environ. Nous avons donc dans les deux cas des gammes très étendues qui correspondent bien aux modalités de fonctionnement et de réaction sous forme presque d'oued de ce type de rivière et qui justifient les échelles logarithmiques. Les pointillés verts matérialisent un doublement du débit ( $A_{RQ} = 1$ ). Les points se distribuent globalement dans un nuage de façon presque aléatoire. Toutefois, on notera dans la partie inférieure du nuage une sorte de décrochement, une rupture dans le caractère aléatoire de la distribution verticale des points qui n'apparaît pas dans la série de Valescure (contrairement aux alignements limites en diagonale : Fig. 11). Cette perturbation peut très vraisemblablement être rapprochée de problèmes de mesure. Si tel est le cas, nous aurions les moyens d'identifier un type d'erreur et il faudrait faire une étude spécifique sur la (les) cause(s) de ce type de perturbation. Ceci conduirait peut-être à une méthode pour tester ces chroniques.

Le nuage de points est en outre incliné comme le soulignent les lignes rouges pointillées qui surlignent des situations limites, tant pour les faibles débits que pour les très grands accroissements. Cela signifie que les plus gros accroissements seront observés sur la base de débits modestes alors que les débits importants au temps  $t_1$  ne pourront guère être multipliés ( $A_{RQ}$  voisin de 1, soit un doublement). Ceci semble parfaitement logique ; la probabilité d'un fort accroissement sera d'autant plus faible que le débit à  $t_1$  est fort.

Les débits à  $t_1$  intermédiaires, par exemple 1 000 l/s donnent la plus large et la plus fournie gamme d'accroissements. Ceux-ci peuvent n'aller de presque rien (0,001) à environ 100. Il est dès lors tout à fait possible d'essayer de voir quelle est la probabilité d'accroissement avec tel ou tel  $Q_{t-1}$ . Pour que l'échantillon soit suffisant, nous avons sélectionné des débits entre 950 et 1 000 l/s. Cette statistique est log-normale, comme le montre la figure 5.



**Figure 5** : Distribution log normale des accroissements relatifs à Corbès correspondant à des débits ( $Q_{t-1}$ ) compris entre 950 l/s et 1 000 l/s.

Les accroissements les plus fréquents (une fois sur deux) sont de l'ordre de 0,047. Par contre, les très forts accroissements sont relativement rares (une fois sur cent vingt-cinq pour  $A_{RQ} = 3,8$ , ce qui correspond à un quasi quadruplement du débit  $Q_{t-1}$ ). Il est dès lors possible de répéter cette modélisation pour différentes gammes de débits et d'étudier la variation des paramètres des lois statistiquement ainsi obtenues.

Cette première approche conduit à un autre type de caractérisation à partir cette fois de la totalité de la distribution des accroissements.

Celle-ci montre de nombreux petits accroissements et quelques très importants qui se fondent nécessairement sur des montées de crue rapides, très rapides, voire violentes. Il s'agit de cas particulièrement intéressants, comme les tremblements de terre de très fortes magnitudes. Ces événements sont rares, mais peuvent avoir des conséquences majeures. Ces statistiques expriment donc une très forte hiérarchie qui est la marque des structures parétiennes. Ainsi en portant le logarithme népérien des densités de fréquence normées ( $\ln(D_{FrNorm})$ ) en fonction du logarithme népérien de la valeur normée des  $A_{RQ}$  ( $\ln(A_{RQ})$ ), – afin de rendre les modélisations encore plus comparables – il apparaît une relation de puissance assez classique.

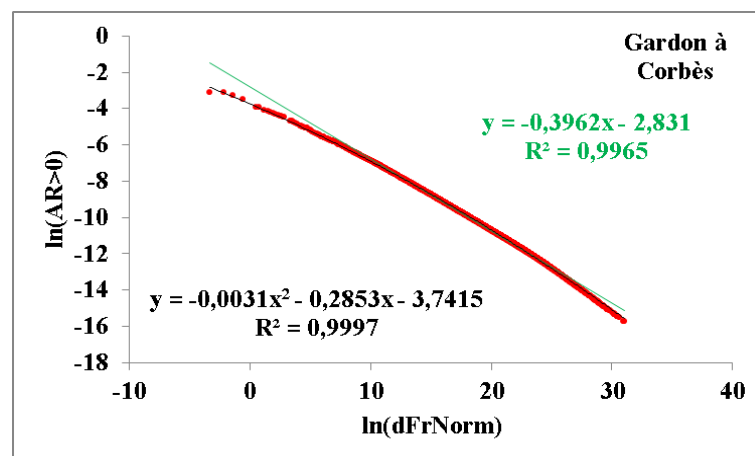
$$\ln(D_{FrNorm}) = \ln\left(\frac{A_{RQ}^{(R-0,5)}}{\sum A_{RQ}}\right)$$

- $R$  est le rang des accroissements classés du plus important au plus petit
- $A_{RQ}$  est la valeur de chaque accroissement au rang  $R$
- $\sum A_{RQ}$  est la somme des accroissements

$$\ln(A_{RQ}) = \ln\left(\frac{A_{RQ}}{\sum A_{RQ}}\right)$$

La relation obtenue (Fig. 6) ne correspond pas tout à fait à une fonction de puissance simple (à 2 paramètres : exposant et constante), mais à une fonction de puissance à trois paramètres (coefficient de courbure :  $C_c$ , paramètres  $b$  et  $c$ ) dans la mesure où apparaît une légère courbure.

Cette statistique est donc d'essence parétienne avec en outre un facteur limitant qui correspond à la courbure qui traduit le fait que les forts accroissements ne sont pas globalement aussi forts qu'une modélisation parétienne stricte le laisserait penser et permettrait de le calculer. Pour rendre compte de cette courbure, il est possible dans un premier temps d'ajuster un modèle parabolique sur le logarithme des densités de fréquences et sur le logarithme des accroissements relatifs. Le coefficient de détermination est alors excellent ( $r^2 = 0,999$  ; alors qu'il était déjà très bon avec un modèle de puissance simple ( $r^2 = 0,996$ )).

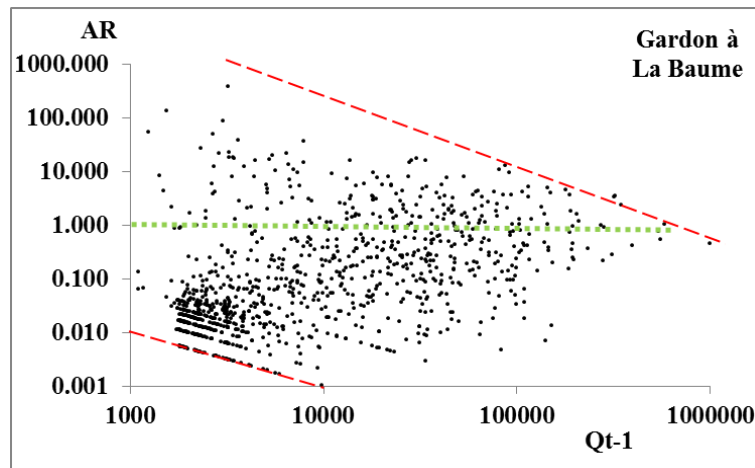


**Figure 6** : Statistique parétienne des accroissements relatifs des montées de crue de la station de Corbès sur le Gardon, avec  $\ln(A_{R>0})$  le logarithme népérien des  $A_{RQ}$  normés supérieurs à 0.

## Le site de La Baume

Il est possible avec la même méthodologie de tester d'autres stations. À titre d'exemple de station fort différente, nous présenterons celle qui a été installée dans les gorges du Gardon au lieu-dit de La Baume (<http://www.hydro.eaufrance.fr/stations/V7184010>) et qui a été détruite par la crue de 2002 et non remise en état depuis lors.

Elle est située au nord du village de Poulx et est représentative d'une station installée très à l'aval du bassin, au niveau du piémont sédimentaire et sous l'influence, en particulier en basses eaux, du karst (BRUNET & BOUVIER, 2017), de sources karstiques dites, elles aussi, de La Baume.



**Figure 7** : Relation entre les débits au temps  $t_{-1}$  de la station de La Baume sur le Gardon et les accroissements relatifs calculés à partir des données des montées de crue. La ligne pointillée verte correspond au doublement des débits.

En hautes eaux, cette station a vu passer des débits extrêmement importants avec des hauteurs d'eau de plusieurs dizaines de mètres (DELRIEU *et al.*, 2005). À ces niveaux extrêmes, les pics de crues sont plus grossièrement estimés.

La gamme des  $Q_{t-1}$  est comparable à celle de Corbès, mais la chronique est plus courte. Elle ne semble pas avoir enregistré des débits inférieurs à  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ , ce qui correspond certainement aux débits les plus bas (minimorum) des sources de La Baume. Cela s'explique par le fait que ces débits sont soutenus par les écoulements qui descendent en tout temps des Cévennes et qui se perdent, au plus fort des saisons sèches, au niveau du village de Ners (MARTIN, 2020). Ces pertes ressortent, par un trajet encore assez discuté, alors que la relation a été plusieurs fois vérifiée par traçage (FABRE, 1980, FENART, 2018, 2019), aux sources de La Baume et très probablement plus bas dans les gorges (sous écoulements en lit vif de la grotte de Pâques).

Dans le nuage de la figure 7, on retrouve la même inclinaison des points inférieurs bien que le nuage soit bien moins fourni que celui de Corbès. Dans la partie inférieure apparaissent les accroissements pour de faibles débits qui correspondent globalement aux débits des sources. Comme logiquement attendues, en fonction des conditions d'émergence (multiples griffons en lit vif) et de la taille de cet aquifère urgonien majeur, les variations à la hausse des débits d'étiage sont très limitées.

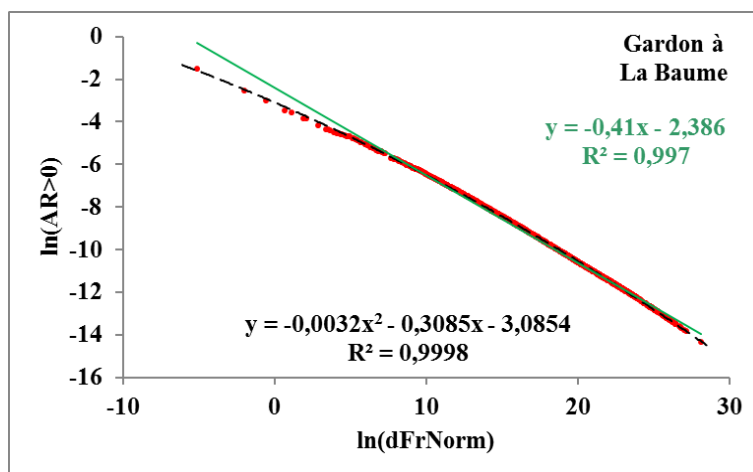
La ligne pointillée verte correspond au doublement des débits. Elle recoupe la ligne en pointillés rouges supérieure pour un débit de l'ordre de  $1\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ . À un tel niveau, seul un accroissement inférieur ou égal à un doublement par unité de temps est envisageable (ici par jour). Toutefois, les données de 2002 ayant été perdues, il est peut-être possible que, lors de cette phase très exceptionnelle, un accroissement plus important ait pu être enregistré avant la ruine de la station.

Ces données d'accroissement elles aussi peuvent être reprises dans une analyse d'essence parétienne (Fig. 8). Comme pour Corbès, en portant le logarithme des densités de fréquence en fonction du logarithme des accroissements relatifs nous obtenons un modèle de puissance, lequel est presque strictement parétien comme le montre l'ajustement d'un modèle de puissance simple ( $r^2 = 0,997$ ). Cet ajustement peut toutefois être amélioré si on prend en compte la légère courbure (le coefficient de courbure étant égal à  $-0,0032$ ). Dans ce cas la modélisation est quasiment parfaite ( $r^2 = 0,999$ ).



Il est donc à noter que dans les deux cas, Corbès sur un affluent du Gardon d'Anduze et La Baume sur le chenal aval du Gardon, on obtient un ajustement parétien et une courbure sur l'ensemble de la distribution qui indique que les accroissements ne sont pas totalement aussi forts qu'attendu, en particulier pour les débits les plus élevés (écart entre la parabole et la droite sur les figures 6 et 8). Il y a donc un facteur (ou un ensemble de facteurs ?) qui limite ces accroissements et cela d'autant plus que le débit au temps  $t_1$  est important.

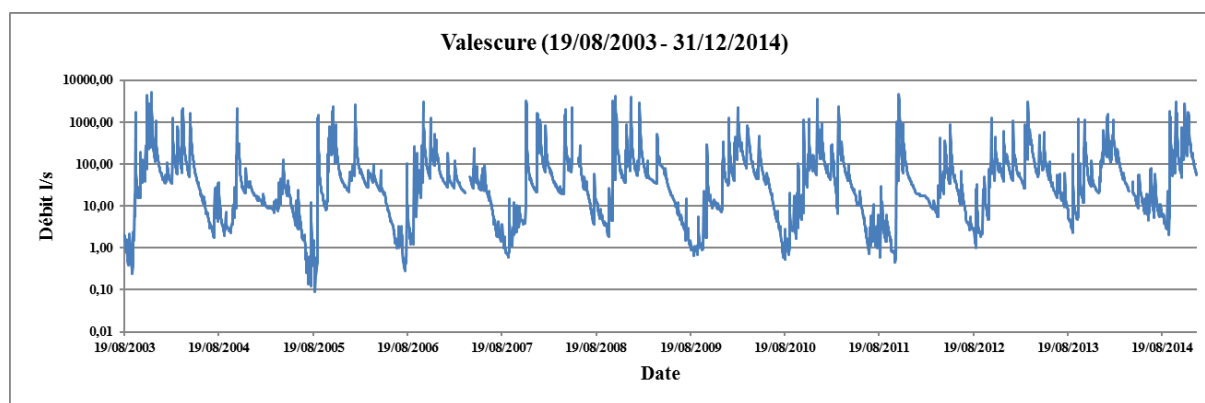
À partir de ces remarques, il est donc logique de se demander si cette structuration parétienne « amortie » est un élément structurel ou si elle est liée à ces deux stations qui drainent toutefois des bassins, certes emboîtés, mais de taille très différente (Corbès : 263 km<sup>2</sup> ; La Baume : 1580 km<sup>2</sup>).



**Figure 8** : Statistique parétienne des accroissements relatifs des montées de crue de la station de La Baume sur le Gardon, avec  $\ln(A_R > 0)$  le logarithme népérien des  $A_{RQ}$  normés supérieurs à 0.

## Chroniques de Valescure

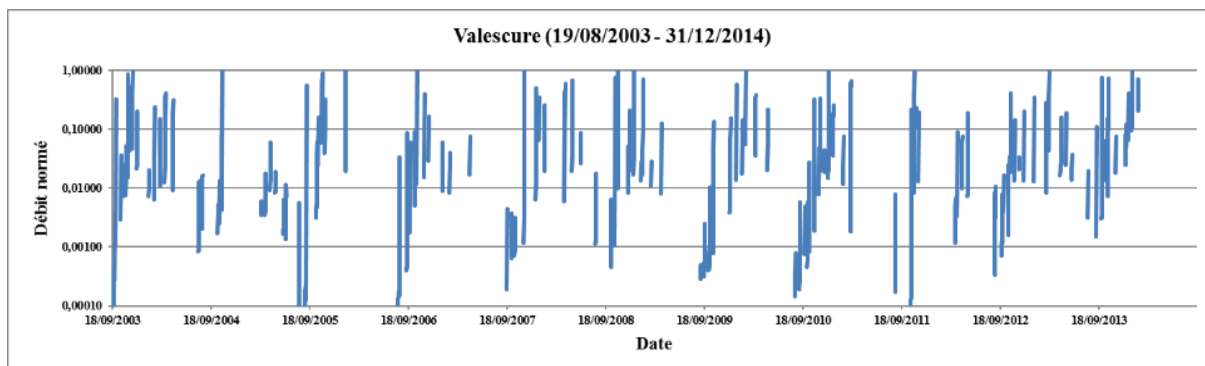
Pour cela, nous allons analyser la chronique obtenue par l'UMR ESPACE (MARTIN *et al.*, 2008) sur le site de Valescure (commune de Peyrolles), station des Abrits où un limnigraphe (sonde de pression ; Fig. 9) évalue les débits d'un tout petit sous-bassin du Gardon de Saint-Jean du Gard en amont d'Anduze ( $S = 3,93 \text{ km}^2$ ). (<https://bdoh.irstea.fr/OHM-CV/nos-donnees?site=Valescure>)



**Figure 9** : Hydrogramme du ruisseau de Valescure à la station des Abrits.

La figure 10 présente la suite des montées de crue pendant onze cycles complets. L'information transmise par ce graphique est totalement comparable (amplitude des variations et rythme) à celle obtenue à Corbès (Figs. 2 et 3) et à d'autres stations sur le Gardon. Ceci est dû au fait que la pluie, avec ses variations spatiales et d'intensité, est globalement, pour chaque épisode, un phénomène zonal, comme le montrent maintenant bien les balayages rendus par les cartes animées des échos radar.

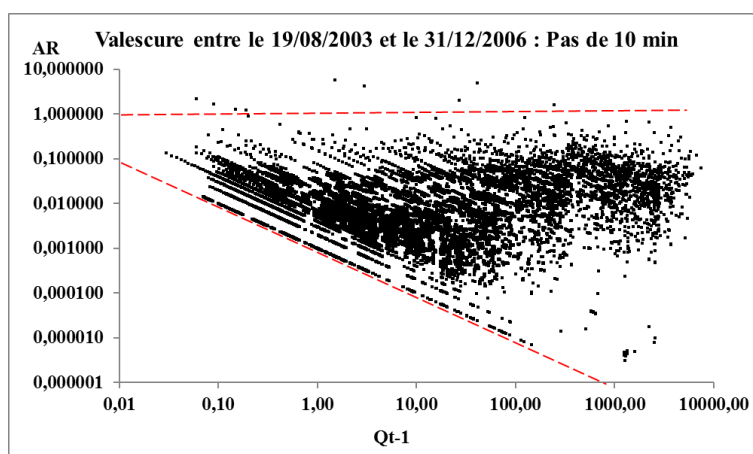
La figure 10 présente la suite des montées de crue pendant onze cycles complets. L'information transmise par ce graphique est totalement comparable (amplitude des variations et rythme) à celle obtenue à Corbès (Figs. 2 et 3) et à d'autres stations sur le Gardon. Ceci est dû au fait que la pluie, avec ses variations spatiales et d'intensité, est globalement, pour chaque épisode, un phénomène zonal, comme le montrent maintenant bien les balayages rendus par les cartes animées des échos radar.



**Figure 10** : Chronique des montées de crue normées du ruisseau de Valescure à la station des Abrits.

Par ailleurs, de l'amont (Valescure) à l'aval (La Baume) nonobstant toutes les différences (topographique, climatique...) la variation des débits est un phénomène cumulatif (somme des ondes de crues) corrigé par des facteurs multiplicatifs (convergence des sous-réseaux...) ou produisant un amortissement des débits (inondation, prélèvement karstique...) plus ou moins importants. C'est cette alchimie peu maîtrisée qui donne les valeurs des pointes de crue et les hauteurs d'eau en différents points des fonds de vallée. Un ordre spatial peut aussi être mis en évidence.

La figure 11 montre la relation, à Valescure, entre les  $AR_Q$  et les  $Q_{t-1}$ . Certaines différences et similitudes apparaissent si on compare ce nuage de points à ceux ci-dessus présentés (Corbès et La Baume). Dans ce cas pour des raisons de lisibilité, nous avons limité la chronique projetée à une période plus courte que celle disponible. Si les chroniques à des pas de temps fins (5 min, 10 min...) contiennent évidemment des informations précieuses, elles sont par contre beaucoup plus lourdes à manipuler. Il y a ainsi 288 valeurs à 5 min dans un débit moyen journalier.



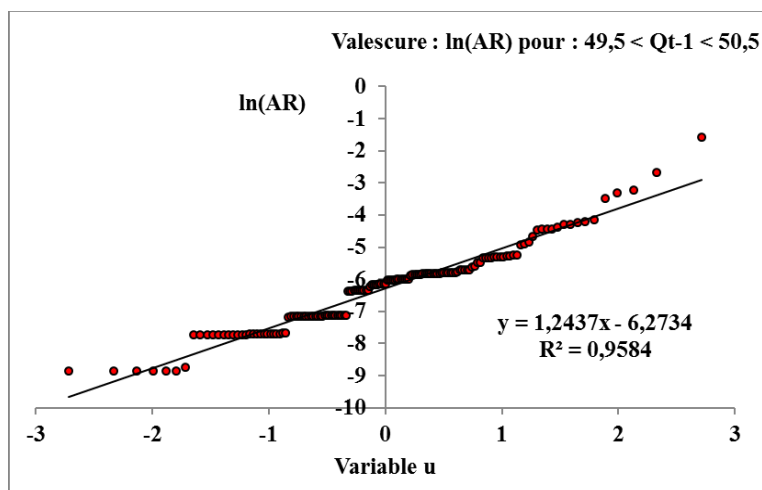
**Figure 11** : Relation entre les débits au temps  $t-1$  de la station de Valescure et les accroissements relatifs calculés à partir des données des montées de crue.

Ce qui est semblable, c'est la limite inférieure oblique (pointillés rouges inférieurs). On a donc là une information de nature structurelle qui établit une situation limite de l'accroissement et qui s'affirme avec les pas de mesure courts. Il ne semble pas possible qu'à un débit très faible d'un litre par seconde puisse correspondre un accroissement inférieur à 0,001 du débit. Cette relation puissance particulièrement bien définie devrait être étudiée plus avant. À quoi correspond-elle vraiment ? Plus les débits sont faibles plus « l'explosivité relative » est forte, mais selon une loi stricte. Lorsque les débits

sont faibles ou très faibles, la variété des situations observée est très limitée. Au contraire quand les débits sont déjà conséquents (partie centrale ou droite du nuage) la variété des possibilités d'accroissement est forte, autrement dit l'incertitude est importante quant à la valeur de  $Q_t$ .

Le parallélisme entre la relation puissance minimale (pointillés rouges) et celle qui lui est immédiatement supérieure, un peu moins marquée, mais clairement visible est difficile à interpréter. Soit on imagine que pour un même débit au temps  $t_{-1}$  les accroissements ne peuvent que « sauter » d'un niveau à un autre d'accroissement. Soit on envisage qu'un même accroissement peut être fondé sur des valeurs de débit à  $t_{-1}$  différentes, mais discrètes. Toutefois, ces espacements réguliers correspondant à des logarithmes, la croissance des valeurs arithmétiques correspondantes n'est évidemment pas identique, mais exponentielle. Cela étant, il semble bien que l'ensemble du nuage soit structuré ainsi (diagonale de points). Cette structure disparaissant en raison du nombre de points dans le cœur du nuage (mais elle est visible sur ses bords) et en raison d'un nombre de points insuffisant dans la partie haute du nuage.

Il est dès lors tout à fait possible de rechercher d'une part quels peuvent être les débits à  $t_{-1}$  correspondants par exemple à un tel accroissement et/ou d'autre part de sélectionner les accroissements qui correspondent à une petite gamme particulière de débits (Fig. 12). Ceci conduit à un traitement statistique qui montre que dans ce cas aussi, avec un pas de 10 min, et pour une gamme très étroite de débits ( $49,5 < Q_{t-1} < 50,5$ ), la distribution est log-normale. On peut donc comme pour Corbès calculer des taux d'accroissement en fonction de probabilités.



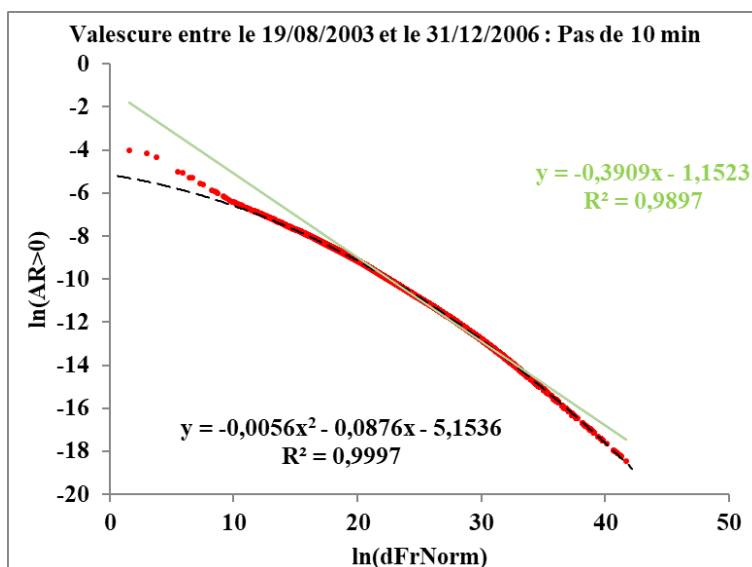
**Figure 12** : Distribution log normale des accroissements relatifs à Valescure correspondant à des débits ( $Q_{t-1}$ ) compris entre 49,5 l/s et 50,5 l/s.

Contrairement aux cas de Corbès et de La Baume, nous n'avons pas ici de ligne oblique supérieure, mais plutôt une sorte de plafonnement (ligne pointillée horizontale). En d'autres termes, l'accroissement enregistré (quel que soit le débit) pourrait ne pas dépasser une certaine valeur qui doit être plus ou moins voisine d'un (doublement). Il y a toutefois une grande dispersion à ces niveaux et il faudrait traiter ensemble l'ensemble des onze cycles pour préciser les choses. Cela conduirait toutefois à manipuler plus de cinq cent mille valeurs au pas de 10 min et plus d'un million au pas de 5 min, ce qui demande une programmation spéciale.

Ces situations limites doivent, compte tenu des éléments structurels du bassin (pente, lithologie, altération, morphologie du réseau de drainage...), correspondre aux moments où les conditions dynamiques sont les plus favorables en termes d'accroissement (intensité de la pluie, niveau d'imbibition des sols et altérites superficielles...) ou les plus défavorables en termes de risque. On notera aussi que pour les plus forts débits, les faibles accroissements sont quasi inexistantes. Il conviendra donc dans la poursuite de ce travail d'isoler les accroissements les plus spectaculaires pour remonter aux épisodes correspondants dont les conditions doivent être analysées avec précision.

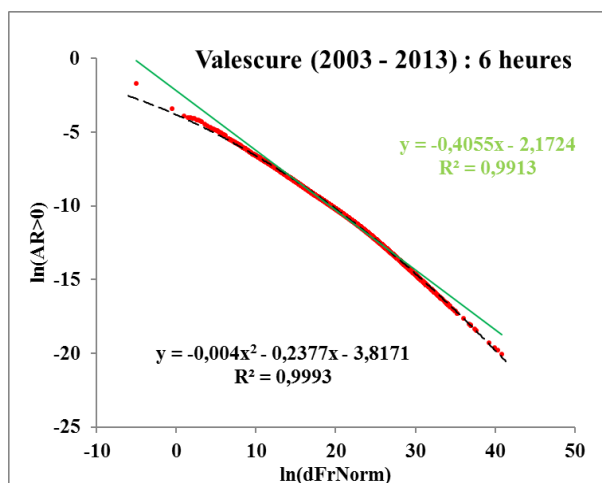
Cette approche permet donc de rechercher et d'isoler des situations très spécifiques, rares, mais hautement informatives dans le sens où elles correspondent à des états limites du bassin versant.

Comme pour les accroissements calculés avec des débits moyens journaliers à Corbès et à La Baume, il est possible de rechercher une modélisation d'essence parétienne (modèle de puissance simple ou parabolique) à partir des données à haute résolution de Valescure. La figure 13 montre que sur des données à dix minutes nous obtenons exactement le même modèle qu'à Corbès et La Baume. La courbure est seulement un peu plus forte ( $Cc = -0,0056$ ). On observe aussi moins d'une dizaine de points correspondant à de très forts accroissements qui ne sont pas positionnés sur la parabole, mais au-dessus. Soit il s'agit d'un problème d'échantillonnage, soit il se pourrait qu'en ces situations exceptionnelles quelque chose d'un peu différent se réalise. Il semble bien que ces points soient alignés eux aussi avec une courbure, mais décalés et spécifiques. Là encore la méthode permet de mettre en évidence des situations remarquables qu'il faudra expliquer, mais qui peuvent tout simplement être dues à un problème de mesure. Avec un pas de 5 min, voire de 10 min, il est possible en outre d'analyser cycle après cycle et d'en comparer la modélisation, donc de faire des statistiques sur les paramètres des modèles et leurs évolutions chronologiques.



**Figure 13** : Statistique parétienne des accroissements relatifs des montées de crue de la station de Valescure (période du 19/08/2003 au 31/12/2006 ; pas de 10 min) ; avec  $\ln(A_{R>0})$  le logarithme népérien des  $A_{RQ}$  normés supérieurs à 0.

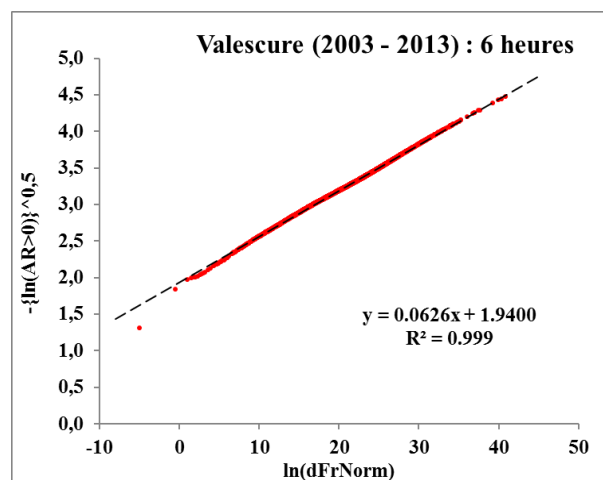
Il est ensuite possible de considérer la distribution de Valescure obtenue avec des pas de temps plus importants. À titre d'exemple, nous donnerons le graphique issu de calculs avec un pas de 6 h (Fig. 14).



**Figure 14** : Statistique parétienne des accroissements relatifs des montées de crue de la station de Valescure (cycles 2003 à 2013 ; pas de 6 h) ; avec  $\ln(A_{R>0})$  le logarithme népérien des  $A_{RQ}$  normés supérieurs à 0.

Sans surprise, nous retrouvons la même structure parétienne parabolique. Le changement de pas produit toutefois un lissage du problème identifié pour les densités de fréquence les plus exceptionnelles. L'ajustement parabolique n'étant pas totalement satisfaisant il est possible d'essayer de l'améliorer, sans toutefois introduire un nouveau paramètre. La solution consiste à prendre la racine carrée du logarithme des  $A_{RQ}$  préalablement multiplié par -1. Lorsque l'on porte :  $-\ln(A_{RQ})^{0,5}$  en fonction de la densité de fréquence (Fig. 15), on obtient une relation linéique (du latin *linea* : ligne) qui peut être modélisée par une fonction de puissance simple (à 2 paramètres). L'ajustement du modèle de puissance est alors très bon, mais rien ne dit à ce stade que ce soit le meilleur possible. Il est donc envisageable de rechercher quel serait le meilleur ajustement possible en comparant les valeurs de  $r^2$  obtenues en faisant légèrement varier l'exposant.

$$-\ln(A_{RQ})^{0,5} = -1 * \ln\left(\frac{A_{RQ}}{\sum A_{RQ}}\right)^{0,5}$$



**Figure 15** : Linéarisation de la distribution parétienne des accroissements relatifs des montées de crue de la station de Valescure (cycles 2003 à 2013 ; pas de 6 h) ; avec  $-\ln(A_{R>0})^{0,5}$  la racine carrée du logarithme népérien des  $A_{RQ}$  normés supérieurs à 0 multiplié par -1.

Si nous revenons à notre question initiale qui de savoir si les distributions des accroissements relatifs peuvent être modélisées avec des fonctions de puissance, la réponse est oui. Et à la question de savoir si la courbure observée est structurelle, et non spécifique à telle ou telle station, la réponse est encore oui. La courbure est toujours présente, mais plus ou moins forte.

Il devient donc possible, sur la chronique de Valescure, en changeant le pas de temps, de voir comment cette courbure évolue, si jamais ce facteur d'échelle la fait évoluer. C'est l'objet de la figure 16 qui montre très clairement qu'il y a une relation entre la valeur de la courbure ( $Cc$ ) et la valeur du pas de temps de la mesure. Plus le pas de temps est important, plus la courbure est faible et donc plus le modèle de la distribution correspond à celui d'une loi de puissance simple, et inversement. Les forts coefficients de courbure sont observés pour des pas de temps très courts. Donc lors de ces phases joue un facteur (qui peut être composite) qui limite plus fortement les accroissements, ou du moins qui fait en sorte qu'ils ne soient pas aussi forts que ce à quoi on aurait pu s'attendre en fonction de lois de puissance simples. Ceci est contre-intuitif et demande des explorations supplémentaires.

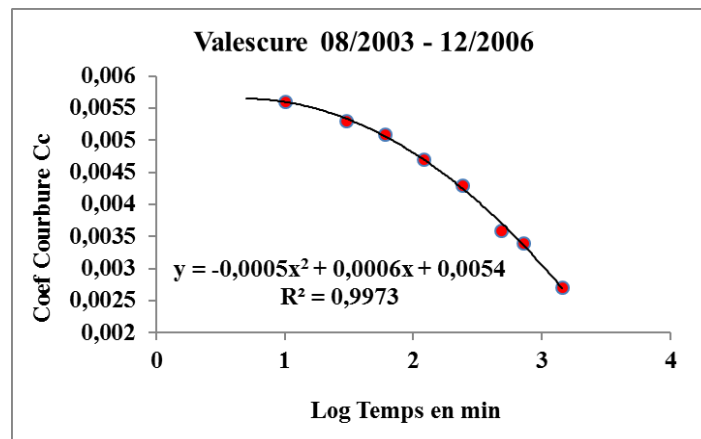
Si on compare le  $Cc$  calculé pour un pas de 24 h à celui obtenu avec un pas à 10 min, nous avons un facteur deux. Dans la mesure où elle apparaît structurée en échelle, cette distribution des valeurs d'accroissement relatif de Valescure doit être considérée comme fractale. On peut faire l'hypothèse qu'il en est de même pour toutes les séries de débits bien que cela ne puisse être formellement établi puisque nous ne disposons pas de mesures à haute résolution temporelle pour les stations de la Banque hydro. On rappellera pour mémoire qu'une fractale est une structure explicitement structurée en échelle.

Il vient, mais comme avec toutes les séries fractales, que les comparaisons ne peuvent être faites que si les pas de mesure sont les mêmes. Quand on ne disposait que de valeur de débits moyens journaliers, la question ne se posait pas. Par défaut les comparaisons étaient valides. Depuis que l'on a

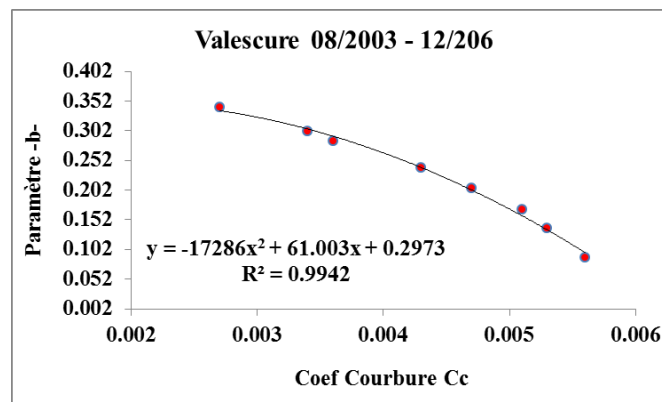


des mesures à haute résolution, et donc à différentes résolutions, il faut faire attention dans les comparaisons ou modélisations à ce que l'échelle soit la même.

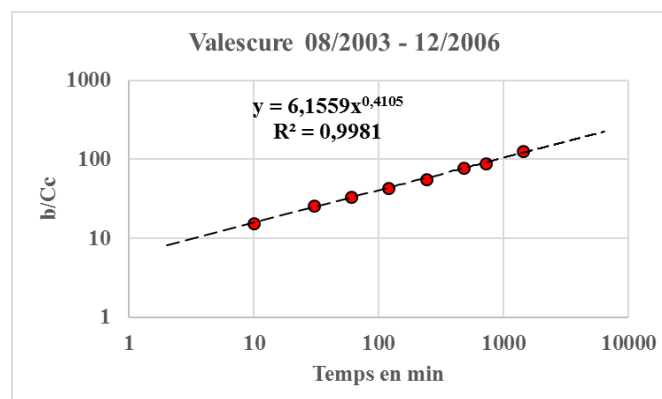
Cette structuration scalaire permet de montrer en outre que  $C_c$  varie de concert avec le paramètre  $b$  des polynômes (Fig. 17). Ces relations conduisent à définir un indice qui est le rapport de  $b$  sur  $C_c$  ( $b/C_c$ ) et de mettre en relation ce rapport avec le pas de mesure. Il apparaît alors une relation parfaitement linéique (Fig. 18) dans la mesure où elle correspond à une relation de puissance. L'exposant (0,41) ayant le sens d'une dimension fractale. Il s'agit ici d'un exposant qui traduit une variation de l'information dans l'ordre des échelles (caractérisé par la variation du pas de mesure) portée, ou rendue, par des distributions de probabilité modélisées statistiquement grâce à des lois de puissance.



**Figure 16** : Relation entre les valeurs du coefficient de courbure ( $C_c$ ) et le logarithme du pas de mesure à la station de Valescure.



**Figure 17** : Relation entre les valeurs du coefficient de courbure ( $C_c$ ) et du paramètre  $b$  du modèle parabolique de la station de Valescure pour différents pas de mesure.



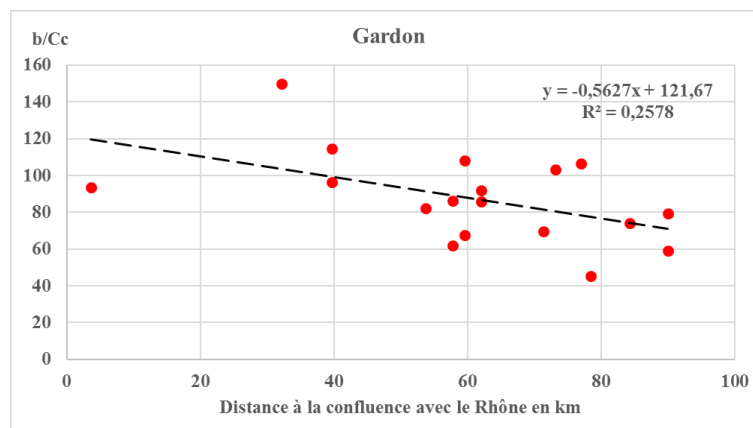
**Figure 18** : Relation entre les valeurs du rapport  $b/C_c$  calculé à partir du modèle parabolique de la station de Valescure et différents pas de mesure.

Contrairement aux calculs assez classiques de dimension fractale d'objets morphologiques self similaires (comme les courbes de niveau de reliefs) ou de variables auto affines (comme des débits) qui peuvent, les uns être décrits en utilisant la méthode des boîtes (box counting) et les autres en mettant en œuvre la statistique de Hurst, mais en ayant dans les deux cas comme informations traitées une information de base dissociée (pixels des courbes de niveau, valeur du débit), il s'agit ici de proposer une méthode qui s'appuie sur les distributions statistiques d'une même variable aléatoire déterminées avec différents pas de mesure, donc, correspondant chacune à l'ensemble de l'information disponible, et non pas à une information locale ou partielle, dépend de la taille des fenêtres et de leur positionnement ce qui conduit, dans les méthodes classiques, à faire des moyennes pour obtenir une dimension fractale. Alors que dans les cas classiques on calcule à partir d'informations fragmentées, dissociées, dans le cas présent les calculs sont effectués à partir des paramètres des modèles statistiques ajustés sur les distributions obtenues à différents pas.

On peut ensuite rechercher s'il n'existe pas de relations significatives, mais qui intègrent cette fois des éléments topographiques ou morphologiques et plus largement qui caractérisent la configuration du bassin versant.

Le coefficient de courbure et le paramètre  $b$  varient chacun avec la distance à la confluence. Le paramètre  $b$  croît lorsque la distance diminue alors que le coefficient de courbure baisse lorsque la distance diminue. Le paramètre  $b$  est plus faible à l'amont et plus fort à l'aval. Cela signifie que la hiérarchie est plus forte à l'amont qu'à l'aval. Le coefficient de courbure décroît de l'amont à l'aval. Cela signifie que les causes produisant la courbure sont moins importantes à l'aval qu'à l'amont.

Ainsi lorsque l'on porte la valeur de  $b/Cc$  en fonction de la distance des différentes stations à la confluence avec le Rhône qui correspond globalement à la borne inférieure de l'énergie potentielle du bassin versant — la borne supérieure est fournie par les crêtes amont qui limitent le bassin (ligne de partage des eaux à environ 1 000 m) — on trouve une relation linéaire certes bruitée, mais qui fait sens (Fig. 19).



**Figure 19** : Relation entre  $b/Cc$  et la distance à la confluence avec le Rhône.

Cette relation montre qu'au droit du Rhône la valeur de  $b/Cc$  est relativement importante alors qu'elle est plus faible à l'amont où l'on observe une hiérarchie plus forte et des limitations dans les valeurs des fréquences les plus rares (courbure). Au contraire à l'aval la hiérarchie des  $A_{RQ}$  est globalement plus faible, mais il y a moins de limitation pour des fréquences rares.

En d'autres termes, à l'amont les montées de crues sont rapides et fortes, mais elles intègrent aussi des facteurs limitants qui sont très visibles pour les fréquences les plus rares, tandis qu'à l'aval les montées de crues sont plus lentes, moins fortes, mais les facteurs limitatifs se font moins sentir.

## CONCLUSION

Quand les chroniques hydrologiques disponibles sont lacunaires, problématiques quant à leur précision, variables en différents points du réseau hydrographique, collectées à plusieurs moments... il

est nécessaire de les aborder de façon statistique au travers de distributions bien plus que de façon chronologique, voire fonctionnelle.

Nous avons montré qu'il était possible par des modélisations statistiques d'accroissements relatifs de débits, de rendre compte d'une phase particulière des crues éclair, ou du moins Cévenoles, à savoir la montée de crue qui est peu étudiée. Celle-ci est toutefois en rapport avec les risques courus par la population en raison de l'accroissement très rapide possible du débit (et donc de l'augmentation plus ou moins soudaine des hauteurs d'eau et de la vitesse d'écoulement). L'application de telles caractéristiques est donc immédiate. Elles permettent aussi de mieux comprendre et décrire le fonctionnement du bassin versant.

En sélectionnant les accroissements relatifs à un débit ( $Q_{t-1}$ ), ou à une petite gamme de débits, il est possible de déterminer la probabilité, plus ou moins rare, d'accroissements que l'on peut obtenir avec tel ou tel débit au temps  $t_1$ . Ces distributions s'avèrent log normales.

L'étude de cette phase peut se faire aussi plus globalement en déterminant des accroissements relatifs de débit (relatif au débit au temps  $t-1$ ), dont les distributions s'avèrent de nature parétienne tout en intégrant un facteur limitatif qui s'exprime par une courbure dont rend compte un coefficient de courbure.

Si l'on dispose de chronique à haute résolution (à des pas de 5 min, 10 min...), il est possible d'étudier la transformation des modèles statistiques — donc la variation de leurs paramètres — lorsque l'on change de résolution. Cette transformation qui est parfaitement déterminée conduit à recommander de ne raisonner que sur des mesures au même pas, sans quoi le raisonnement peut conduire à prendre pour des causes physiques ce qui ne relève que d'une variation du pas de mesure.

L'excellente relation existant entre un indice ( $b/Cc$ ) caractérisant ces distributions parétiennes d'accroissements relatifs et la valeur du pas met en évidence une structure fractale à partir de la variation de l'information contenue dans les distributions, donc de toute l'information.

Il est ensuite possible de regarder comment se transforment ces distributions ou les modèles qui en rendent compte d'amont en aval. On retrouve alors le fait qu'à l'amont on a des distributions très hiérarchiques, mais qui intègrent des facteurs limitants traduits par la valeur de la courbure et à l'aval des distributions moins hiérarchisées, mais qui sont moins sujettes à des facteurs limitants, en particulier pour les fréquences rares.

À partir de ce premier travail manipulant des distributions, il devient possible, après avoir étudié plus avant certaines questions ou problèmes signalés au cours du texte, d'envisager de développer une modélisation bayésienne des accroissements relatifs des débits (voire des débits et/ou des hauteurs d'eau) en différents points du réseau hydrographique. D'une certaine façon les accroissements relatifs montrent comment l'énergie concentrée au niveau des talwegs et déterminée essentiellement par l'ampleur des précipitations et la hauteur de chute, dont rend compte indirectement l'éloignement à la confluence avec le Rhône, commence à se dissiper. Les bassins versants étant des fractales, cette distance est statistiquement liée à la taille de la surface drainée d'amont en aval.

## REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié d'un financement (stage) dans le cadre du programme HyMex et de l'ANR FloodScale. Il a été soutenu par l'OHM-CV (données) intégré dans OZCAR et par la ZABR qui gère un site atelier dit des Rivières cévenoles (Gardon, Cèze, Ardèche).

## BIBLIOGRAPHIE

- BESSIERE, H., 2008. *Assimilation de données variationnelles pour la modélisation hydrologique distribuée des crues à cinétiques rapides*. Thèse, Université de Toulouse, 154 p.
- BRUNET, P., & BOUVIER, C., 2017. Retour d'expérience sur la crue du 12 septembre 2015 à Lodève (Hérault, France) : influence du karst sur les débits de pointe de crue. *La Houille Blanche*, 3: 39-46.
- COSANDEY, C., 1994. Formation des crues cévenole dans les bassins élémentaires du mont Lozère. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 7: 377-393.
- DARRAS, T., 2015. *Prévision de crues rapides par apprentissage statistiques*. Thèse, hydrologie, Université de Montpellier, 203 p.

- DAVY, L., 1956. Les Gardons. Étude hydrologique. *Bulletin de la Société Languedocienne de Géographie*, 27: 99-233.
- DELRIEU, G., DUCROCQ, V., GAUME, E., NICOL, J., PAYRASTRE, O., YATES, E., KIRSTETTER, P.E., ANDRIEU, H., AYRAL, P.A., BOUVIER, C., CREUTIN, J.D., LIVET, M., ANQUETIN, S., LANG, M., NEPPEL, L., OBLED, C., PARENT-DU-CHATELET, J., SAULNIER, G.M., WALPERSDORF, A., & WOBROCK, W., 2005. The catastrophic flash-flood event of 8–9 September 2002 in the Gard region, France: A first case study for the Cevennes-Vivarais Mediterranean Hydrometeorological Observatory. *Journal of Hydrometeorology*, 6: 34-52.
- ESTUPINA BORRELL, V., 2004. *Vers une modélisation hydrologique adaptée à la prévision opérationnelle des crues éclair. Application à de petits bassins versants du Sud de la France*. Thèse, Institut national polytechnique de Toulouse, 254 p.
- FABRE, G., 1980. *Les karsts du Languedoc oriental. Recherches hydrogéomorphologiques*. Thèse d'État, mémoire Association Française de Karstologie n° 2, 446 p.
- FENART, P., 2018. *Étude complémentaire sur le karst urgonien*. Rapport d'étape n° 3 sur le karst urgonien. Étude sur la gestion quantitative de la ressource en eau du bassin versant des Gardons — Étude hydrogéologique des karsts hettangien et urgonien. EPTB Gardons maître d'ouvrage, 107 p.
- FENART, P., 2019. *Étude complémentaire sur le karst urgonien*. Rapport d'étape n° 4 sur le karst urgonien. Étude sur la gestion quantitative de la ressource en eau du bassin versant des Gardons — Étude hydrogéologique des karsts hettangien et urgonien. EPTB Gardons maître d'ouvrage, 114 p.
- GAUME, É., & BORGA, M., 2013. État des connaissances récentes acquises sur les crues éclair en Europe : bilan du projet de recherches européen HYDRATE (2006-2010). *La Houille Blanche*, 2: 24-30.
- GAUME, É., 2002. *Éléments d'analyse sur les crues éclair*. Thèse, École nationale du génie rural des eaux et forêts (ENGREF – AgroParisTech), 360 p.
- GAUME, É., 2007. *Un parcours dans l'étude des phénomènes extrêmes en hydrologie*. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, AgroParisTech-ENGREF, 269 p.
- HUET, P., MARTIN, X., PRIME, J.L., FOIN, P., LAURAIN, C., & CANNARD, P., 2003. *Retour d'expérience des crues de septembre 2002 dans les départements du Gard, de l'Hérault, du Vaucluse, des Bouches-du-Rhône, de l'Ardèche et de la Drome*. Rapport consolidé après phase contradictoire. Inspection générale de l'administration, 130 p. <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/034000547/index.shtml>
- LAHOUSNIA, N., 2015. *Évaluations multiscalaires des phases de montée de crue de rivières cévenoles*. Rapport de stage, Université de Lorraine, 35 p.
- MARCHANDISE, A., 2007. *Modélisation hydrologique distribuée sur le Gardon d'Anduze ; étude comparative de différents modèles pluies – débits, extrapolation de la normale à l'extrême et tests d'hypothèses sur les processus hydrologiques*. Thèse, Université de Montpellier II, 214 p.
- MARTIN, P., 2020. Modélisation de pertes en lit vif alimentant un karst binaire : Exemple du Gardon entre Ners et Russan (Gard, France). *Physio-Géo*, 15: 1-62. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.10784>
- MARTIN, P., soumis. Le Modèle Hydrologique Différentiel (MHD). Application d'une nouvelle méthode d'analyse aux cycles et récessions : exemple de ceux de la Fontaine de Vaucluse mesurés entre 1966 et 2014. *Physio-Géo*.
- MARTIN, C., DIDON-LESCOT, J.F., & COSANDEY, C., 2003. Le fonctionnement hydrologique des petits bassins versants granitiques du mont Lozère : influence du couvert végétal sur les crues et les étiages, *Études de Géographie Physique*, XXX: 3-25, <hal-00312824>
- MARTIN, C., DIDON-LESCOT, J.F., DOMERGUE, J.M., JOLIVET, J., & RAY, D., 2008. *Suivis hydrologiques dans la Vallée Obscure (commune de Peyrolles, Gard)*. Rapport UMR ESPACE 7 300 du CNRS et Université de Nice éditeurs. fihal-00392671f, 50 p
- MEYLAN, P., FAVRE, A.C., & MUSY, A., 2008. *Hydrologie fréquentielle. Une science prédictive*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, Suisse, 173 p.
- OMM, 2012. *Guide des pratiques hydrologiques, Volume I, Hydrologie – De la mesure à l'information hydrologique*, OMM, n°168, 322 p.
- OMM, 2014. *Guide des pratiques hydrologiques, Volume II, Gestion des ressources en eau et application des pratiques hydrologiques*, OMM, n°168, 328 p.
- ROCHE, P.A., 1985. *Guide de prévision des crues*. Tome 1 : texte principal, 350 p, Tome 2 : annexes, 470 p, Ministère chargé de l'environnement, Société hydrotechnique de France.
- ROCHE, P.A., MIQUEL, J., & GAUME, E., 2012. *Hydrologie quantitative. Processus, modèle et aide à la décision*. Springer éditeur, Paris, 590 p.

- ROUX, H., 2018. *De l'amont vers l'aval : à la poursuite de l'eau qui court*. HDR, Université de Toulouse, 203 p.
- RUIN, I., & LUTOFF, C., 2007. Vulnérabilité face aux crues rapides et mobilités des populations en temps de crise. *La Houille Blanche*, 6: 114-119.
- ZIN, I., 2002. *Incertitudes et ambiguïté dans la modélisation hydrologique*, Thèse INPG, Grenoble, 197 p.