

La méthode ANETO : un outil pour la prédétermination des débits de crue des bassins versants torrentiels des Pyrénées françaises

Pour améliorer la prévention et la protection contre les risques générés par les crues torrentielles en montagne, les acteurs locaux ont besoin de connaissances sur les différents processus mis en jeu, notamment sur l'évaluation des débits de crue. Les auteurs présentent ici une méthode combinant l'exploitation statistique des mesures hydrométriques et pluviométriques et la prise en compte de données climatologiques et géomorphologiques pour déterminer de façon plus réaliste les débits de crues des bassins versants torrentiels des Pyrénées françaises.

E

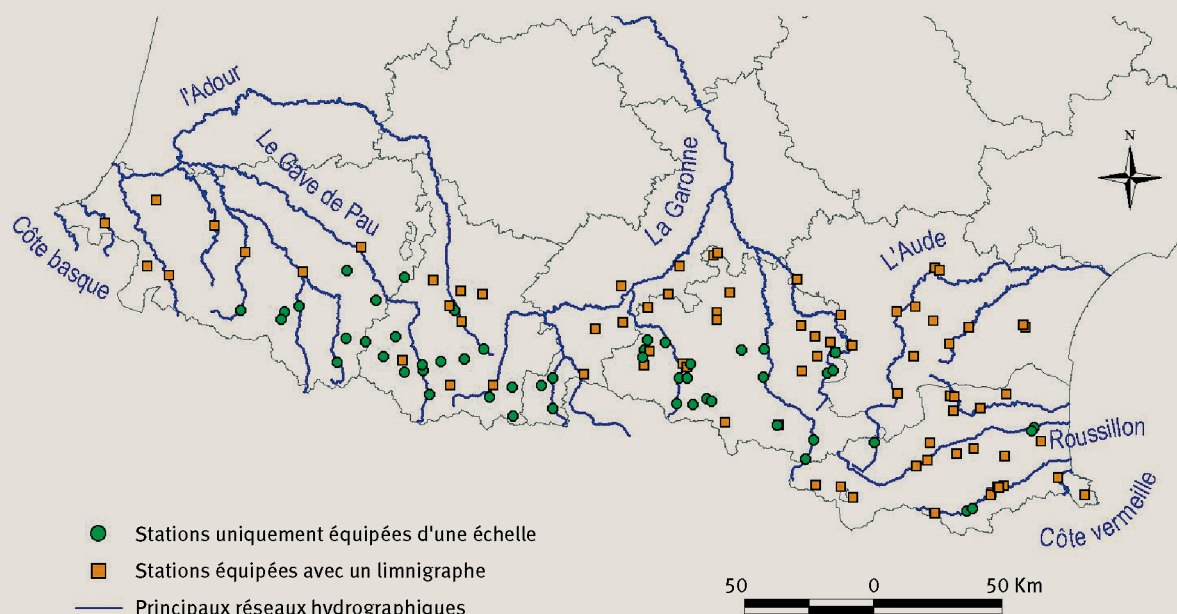
n montagne, les crues* des torrents* et des rivières torrentielles ont la capacité de causer des dommages considérables. Elles sont susceptibles de menacer gravement l'intégrité physique des personnes et des biens exposés, comme en témoigne la catastrophe

du 23 juin 1875 à Verdun sur Ariège (soixante et onze victimes), ou plus récemment l'événement du 14 juillet 1987 au Grand-Bornand (vingt-trois victimes).

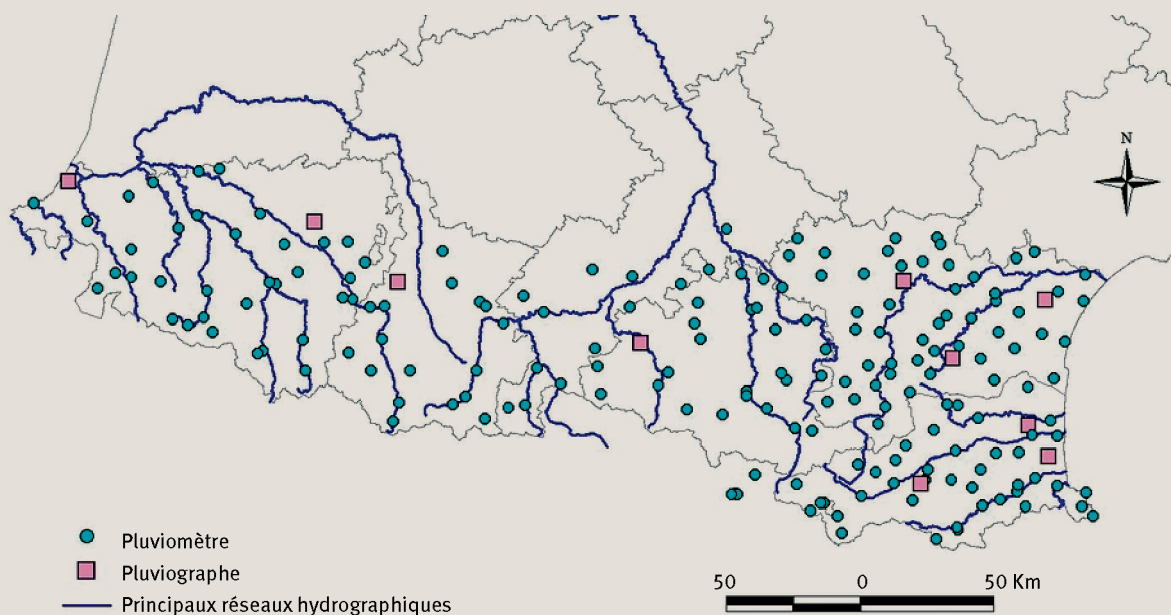
En France, environ quatre mille cinq cents communes sont concernées par le risque* torrentiel. La prévention et la protection contre ces phénomènes est par conséquent une problématique cruciale qui nécessite une amélioration constante des connaissances relatives aux différents processus en jeu.

La méthode ANETO*, acronyme de « Approche naturaliste et statistique pour l'estimation des débits de crue des bassins versants torrentiels pyrénéens », a été éla-

1 Localisation des principales unités hydrographiques pyrénéennes et des stations hydrométriques retenues dans l'étude



2 Carte de localisation des pluviomètres et des pluviographes du réseau Météo France sur la chaîne des Pyrénées françaises, montrant la très faible densité de points de mesure des lames d'eau précipitées sur de faibles pas de temps



borée par le service RTM* (Restauration des terrains en montagne) de l'ONF* (Office national des forêts). Elle s'adresse plutôt à des praticiens non-spécialistes de l'hydrologie souhaitant disposer rapidement d'un ordre de grandeur réaliste des débits de crues caractéristiques des cours d'eau torrentiels drainant le massif pyrénéen et son piémont. Elle est applicable aux bassins versants* de la chaîne des Pyrénées françaises, dont la superficie est comprise entre quatre et cinq cents km² et dont les terrains présentent des transferts karstiques* négligeables. Après un rappel des principales caractéristiques hydrologiques de la chaîne et des approches usuellement appliquées en prédétermination, l'objet de cet article est de présenter le principe de la méthode ANETO. Cette méthode est fondée sur l'exploitation statistique de mesures hydrométriques et pluviométriques. Elle présente aussi la particularité de prendre en compte des facteurs liés à l'environnement climatologique et à la géomorphologie des bassins versants. Le niveau de performance satisfaisant de cette approche et l'intérêt qu'elle a suscité sur les Pyrénées incite maintenant à tester sa faisabilité sur les Alpes françaises. Ce massif constitue en effet un territoire où la densité des enjeux exposés à des aléas* torrentiels est très élevée.

Le contexte géographique des Pyrénées françaises

Le relief

D'une longueur de 435 km entre l'embouchure de la Bidassoa à l'ouest, et le Cap Creus à l'est, les Pyrénées culminent au pic d'Aneto à 3 404 m (Val d'Aran, Espagne). Sur les 270 km qui séparent le Pic d'Anie (Pyrénées Atlantiques) et le Canigou (Pyrénées Orientales), la crête

frontalière ne s'abaisse jamais à moins de 1 600 m. Cette situation renforce l'impression de barrière montagneuse qui caractérise les Pyrénées lorsqu'elles sont observées depuis la plaine du bassin d'Aquitaine. La distribution du relief pyrénéen montre une dissymétrie nord-sud très marquée. Le versant français contraste sensiblement avec le versant espagnol, en étant beaucoup plus court et raide que ce dernier. Une opposition semblable existe aussi entre les extrémités ouest et est du massif. Les Pyrénées occidentales s'abaissent ainsi plus progressivement vers l'Océan Atlantique que les Pyrénées Orientales vers la Mer Méditerranée.

L'hydrographie

La figure 1 montre que le massif pyrénéen est constitué de cinq unités hydrographiques principales :

- les fleuves côtiers du Pays Basque, qui comprennent notamment la Bidassoa et la Nivelle ;
- l'Adour et ses tributaires pyrénéens majeurs, dont la Nive, la Bidouze, le Saison, le Gave d'Aspe, le Gave d'Ossau ou le Gave de Pau ;
- la Garonne et ses affluents montagnards comme la Neste d'Aure, la Pique, le Salat, l'Ariège ou l'Hers Vif ;
- l'Aude et ses affluents issus des Corbières, le principal étant l'Orbieu ;
- les fleuves côtiers du Roussillon comme l'Agly, la Têt, le Tech ou la Baillaury sur la Côte Vermeille.

Dans la partie centrale du massif, la plupart des vallées suivent une orientation sud-nord définie par les principaux accidents géologiques secondaires. Aux extrémités de la chaîne, les vallées côtières sont au contraire orientées parallèlement à l'axe général du massif.

Avant les années soixante, le suivi hydrométrique de ces cours d'eau a généralement été assuré grâce à des observations quotidiennes réalisées sur des échelles limnimé-

1 Données issues de quelques stations des Pyrénées françaises montrant une situation pluviométrique très contrastée d'un bout à l'autre de la chaîne

Station pluviométrique	Altitude (m)	Pluie journalière décennale (mm)	Pluie moyenne annuelle (mm)
Port Vendres (66)	82	146	700
La Tour de France (66)	110	160	650
Ax les Thermes (09)	570	74	940
Lourdes (65)	410	82	1 170
Banca (64)	256	103	1 830

Source : Météo France.

► triques*. Au-delà de cette période, l'installation d'appareils d'enregistrement en continu est devenue quasi-systématique. En retenant comme critères d'échantillonnage une durée minimale d'observation de quinze ans et une superficie de bassin versant inférieure à 500 km², 77 stations équipées d'un limnigraphe* et 52 stations disposant uniquement d'une échelle limnimétrique pouvaient être comptabilisées en 2005 sur la banque **HYDRO** du MEEDDAT* (ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du Territoire). Le nombre de stations fournissant des mesures de débits instantanés sur la partie centrale de la haute chaîne s'avère réduit (figure 1).

Les régimes pluviométriques

En 2005, le réseau de mesure des précipitations géré par Météo France totalisait 169 pluviomètres* et 10 pluviographes*. Dans les parties centrales et occidentales des Pyrénées, ces pluviographes sont généralement implantés sur le piémont et le long de la côte (figure 2).

Les données issues du réseau géré par Météo France montrent que les Pyrénées françaises se trouvent, exprimé de manière simple, sous l'influence de trois zones climatiques distinctes :

- climat océanique, doux et humide, à l'ouest ;
- climat de montagne, frais et assez arrosé, dans la partie centrale du massif ;
- climat méditerranéen, chaud et sec, à l'est.

La distribution des précipitations montre l'existence d'un gradient ouest-est pour les pluies moyennes annuelles de même qu'un contraste significatif entre la haute chaîne et les secteurs côtiers pour les pluies journalières décennales (tableau 1). Les situations météorologiques porteuses de pluies extrêmes s'avèrent par ailleurs très variables : flux océaniques à l'ouest, circulations méditerranéennes d'est et de sud-est de la côte est à la zone centrale, débordement des circulations de sud à proximité de la crête frontière, orages locaux...

Les averses à l'origine des principales crues remarquables

En empruntant la typologie établie par Pardé, il est possible de distinguer au moins cinq catégories d'averses à l'origine des crues remarquables sur les cours d'eau pyrénéens :

- les averses méditerranéennes, qui se produisent le plus souvent à l'automne et qui sont amenées par des vents chauds et humides provenant de la Méditerranée. Elles provoquent des crues très spectaculaires, notamment sur les cours d'eau des montagnes du Roussillon et les cours d'eau drainant de petits bassins versants côtiers ;
- les averses méditerranéennes « extensives », qui correspondent à des perturbations chaudes venant du sud-est et qui affectent, souvent après les premières neiges d'automne, les Pyrénées Orientales et toute la haute chaîne frontalière avec l'Espagne ;
- les averses océaniques classiques, plutôt fréquentes en automne et en hiver, qui sont provoquées par des perturbations axées autour d'un flux d'ouest ;
- les averses océaniques pyrénéennes, qui correspondent à une déclinaison typiquement pyrénéenne des averses océaniques et qui affectent préférentiellement la chaîne au printemps. Les perturbations à l'origine de ces averses suivent des flux de nord-ouest à nord-nord-ouest. Elles affectent les Pyrénées de la haute chaîne jusqu'au piémont et ont une extension qui va du Haut-Adour au bassin de l'Aude ;
- les averses orageuses localisées ou non, qui interviennent du printemps à l'automne et qui sont susceptibles d'affecter toutes les zones de la chaîne. Elles conduisent généralement à des intensités dépassant fréquemment 100 mm/h sur quelques minutes à quelques heures.

La prédétermination des débits de crues

Les enjeux

La prédétermination des débits de crues des bassins versants torrentiels a de nombreuses applications opérationnelles :

- définition des aléas liés aux crues des rivières torrentielles et des torrents dans les plans de prévention des risques (PPR*),
- appréciation de la rareté d'un événement torrentiel préalable à la déclaration d'un état de catastrophe naturelle ou dans le cadre d'un retour d'expérience,
- dimensionnement fonctionnel des ouvrages hydrauliques de franchissement et des ouvrages hydrauliques de protection ou de sécurité contre les crues torrentielles,

- établissement de plan de gestion des transports solides d'un bassin versant préalable à un contrat de rivière...

C'est par conséquent une problématique qui intéresse de très nombreux acteurs publics et privés susceptibles d'intervenir dans le domaine de la gestion des risques torrentiels : services de l'État (DDT* : directions départementales des territoires ; DREAL*, directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement...), conseils généraux, syndicats de bassins versants, service RTM de l'ONF, Météo France, EDF*(Électricité de France), bureaux d'études...

Les données hydrométriques relatives aux bassins versants de montagne sont toutefois assez rares, en particulier à cause de la forte mobilité des lits torrentiels et de la destruction fréquente des équipements en période de crue. De ce fait, le recours à des méthodes de prédétermination est quasi-systématique dans les études hydrologiques relatives aux crues des cours d'eau torrentiels.

Les limites d'application des méthodes usuelles dans le contexte torrentiel pyrénéen

À l'heure actuelle, les méthodes utilisées pour estimer les débits de crue des bassins non jaugés ne diffèrent pas véritablement entre les bassins versants de plaine et ceux de montagne. En se référant à une typologie proposée par Lang *et al.* (2007), les démarches auxquelles les hydrologues font le plus fréquemment appel consistent à exploiter les mesures de débits éventuellement disponibles à proximité du site d'étude, à mettre en œuvre des modèles hydrologiques pré-paramétrés (méthode rationnelle, SCS* : *Soil Conservation Service...*) ou à appliquer des formulations sommaires issues de régressions multiples (Crupeidix, Socose...).

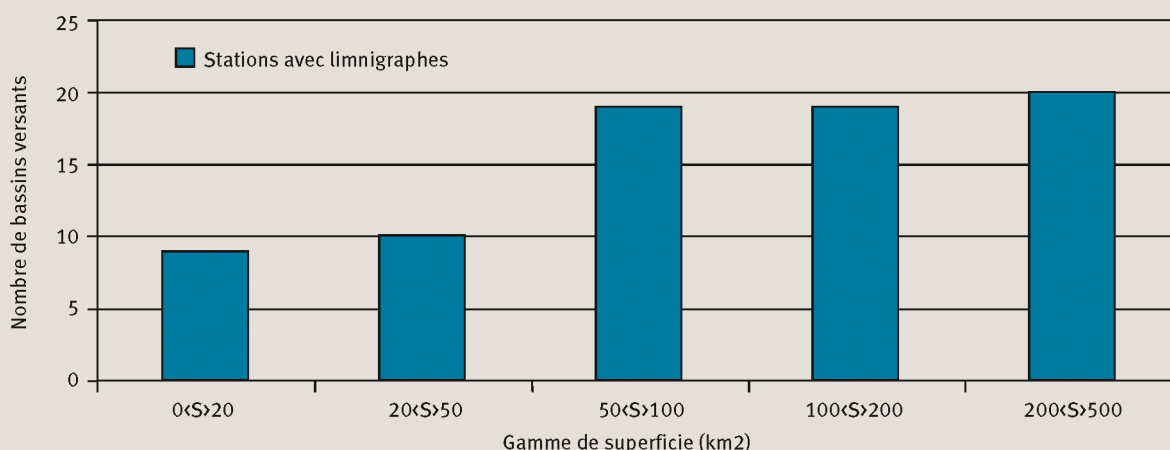
Toutes ces approches présentent néanmoins des incertitudes et des limites qui sont liées à de nombreux facteurs. Le premier, qui n'est d'ailleurs pas spécifique aux

Pyrénées, tient au fait que certaines particularités de l'hydrologie de montagne sont difficilement prises en compte alors qu'elles s'avèrent être cruciales dans la réponse d'un bassin versant torrentiel à un événement pluvieux. Sans être exhaustif, il s'agit par exemple de la faible superficie des impluviums*, de l'influence du relief sur la nature et sur l'intensité des précipitations, de la densité et de la structure du réseau hydrographique du bassin versant, de son orientation par rapport aux perturbations dominantes... Par ailleurs, dans les Pyrénées, le calage des modèles hydrologiques transformant une pluie de projet en débit de crue est généralement rendu très incertain par la faible densité des réseaux de mesures hydrométriques et surtout pluviographiques. En outre, les formulations issues de régressions multiples représentent mal le contexte des bassins versants torrentiels pyrénéens car leur calage est généralement intervenu à une échelle nationale et sur des bassins versants de superficie plus importante. Enfin, aucune régionalisation ni aucun raffinement de la population des bassins versants de calage n'ont jamais été réalisés sur le massif pyrénéen, contrairement au massif alpin.

Ce dernier point s'avère particulièrement préjudiciable, car même si les formulations issues de régressions multiples sont à première vue assez simplistes, elles se révèlent très utiles pour les praticiens dans les études de prédétermination. Par ailleurs, plus d'un quart de siècle de données supplémentaires ayant été capitalisées depuis la publication de ces travaux, il paraît légitime de soulever un certain nombre de questions, notamment :

- quelle confiance accorder aujourd'hui à ces relations compte tenu des données supplémentaires à notre disposition ?
- est-il utile d'envisager une actualisation et une régionalisation de ces approches ?
- comment tenir compte des spécificités des bassins versants torrentiels pour limiter la marge d'incertitude de ces méthodes d'estimation ?

3 Graphe de répartition des 77 bassins versants pyrénéens équipés d'une station de mesure hydrométrique avec limnigraphe par classe de surface



La méthode ANETO

Les fondements

Ces réflexions ont incité le service RTM de l'ONF à engager la réalisation d'une synthèse hydrologique relative aux bassins versants torrentiels des Pyrénées françaises (Adam, 2003 ; Carladous, 2005). Le principal objectif de ce travail a été de développer une méthode d'estimation des débits caractéristiques de crue des bassins versants non jaugés qui apporte un gain en précision significatif par rapport aux approches du même type élaborées antérieurement, en intégrant de nouvelles données et en s'adaptant au contexte spécifique des Pyrénées.

S'adressant plutôt à un public de praticiens des risques naturels ayant une pratique occasionnelle en hydrologie, la démarche se devait d'être simple et pragmatique. Par conséquent, elle devait de préférence s'appuyer sur des variables explicatives en nombre assez restreint et d'un accès aisé.

De par son côté pratique, l'élaboration d'une approche fondée sur le calage de formulations issues de régressions multiples, comme la méthode Crupedix, a semblé *a priori* adaptée à ces contraintes. La constitution d'un échantillon de calage, suffisamment étoffé et regroupant des données hydrologiques actualisées relatives aux bassins versants torrentiels pyrénéens, a confirmé la faisabilité d'une telle démarche.

Afin de tenir compte de l'influence de l'environnement climatique et de la géomorphologie des bassins versants sur l'hydrologie des crues, plusieurs facteurs déterminants ont été définis puis introduits dans la démarche d'analyse. La performance de cette approche a été évaluée pour apprécier son intérêt par rapport aux méthodes existantes.

Les critères d'échantillonnage utilisés

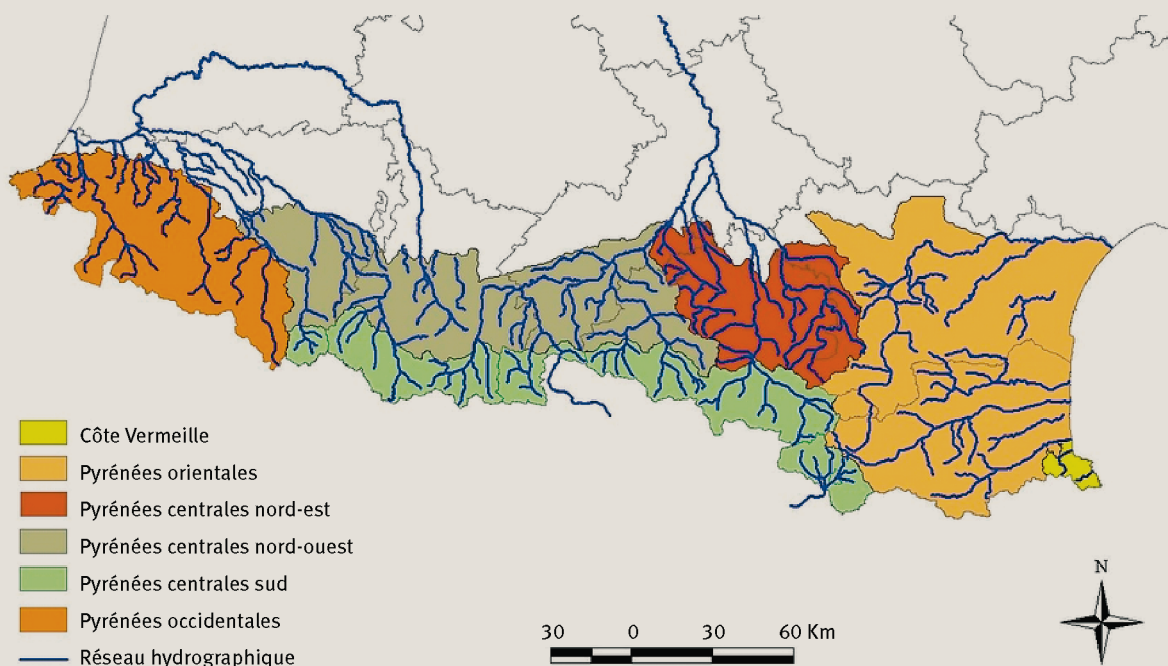
L'échantillonnage des données hydrométriques utiles à l'établissement de cette synthèse s'est appuyé principalement sur quatre critères :

- stations hydrométriques disposant de mesures de débits instantanés,
- élimination des stations dont les mesures sont susceptibles d'être significativement perturbées en période de crue par des ouvrages hydrauliques situés plus en amont,
- durée d'observation minimale de quinze ans qui autorise une estimation fiable du débit décennal Q10,
- superficie de bassin versant inférieure à 500 km².

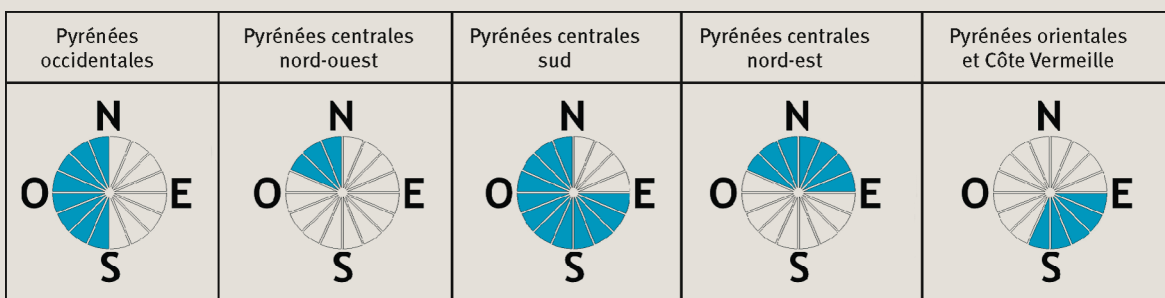
À partir des données publiées en 2005 sur la banque HYDRO du MEEDDAT, ces critères ont permis de constituer un échantillon de 77 stations équipées d'un limnigraphe (figure 3). Seuls neuf bassins versants de moins de 20 km² étaient équipés d'un limnigraphe. Le plus petit des bassins versants présente une superficie d'environ 4 km². Les très petits bassins versants jaugés sont donc faiblement représentés dans l'échantillon.

Une cartographie des pluies journalières de durée de retour* décennale a été établie par Météo France. Elle s'appuie sur les données des stations disposant d'au moins dix années d'observations correctes (figure 2) et est établie sur une maille régulière de 2 km, à partir d'une méthode d'interpolation par krigeage*. Il est possible que cette méthode d'interpolation sous-estime les pluies d'altitude car les postes sont peu nombreux dans les zones à fort relief.

4 Découpage des Pyrénées françaises en six zones hydrologiques homogènes



2 Orientation (en couleur) des flux perturbés à l'origine des plus fortes crues généralisées sur les différentes zones hydrologiques homogènes des Pyrénées françaises



Les principales unités hydrologiques retenues sur les Pyrénées

Sur le versant français des Pyrénées, six zones considérées comme homogènes sur le plan hydrologique ont été identifiées. Le découpage proposé sur la figure 4 tient compte, entre autres, de la répartition géographique des précipitations extrêmes, de l'intensité maximale des débits spécifiques en différents points de la chaîne et de l'extension spatiale des averses remarquables et des crues résultantes. Par contre, aucun critère lié à la géologie n'a été retenu. Ce facteur ne s'est pas révélé discriminant (Adam, 2003), exception faite des bassins versants à dominante karstique bien entendu.

Afin d'apprécier le degré d'exposition des bassins versants aux flux perturbés, une vingtaine d'événements correspondant à des crues généralisées a été analysée à partir de la base de données « Événements » du service RTM, de la banque HYDRO du MEEDDAT et de cartes de synthèse publiées par Météo France (2001), relatives aux épisodes de pluies extrêmes observés entre 1958 et 2000 sur le Sud de la France. Le tableau 2 montre les princi-

pales orientations des flux perturbés à l'origine des crues les plus fortes sur chacune des six zones définies à l'issue de cette analyse géographique et historique. Les situations apparaissent relativement contrastées, notamment dans les différents secteurs constituant la partie centrale des Pyrénées. Elles sont nettement moins contrastées sur toute la partie est. Cette analyse a également permis de repérer, parmi les fortes valeurs, les événements dus à des orages locaux. Sur certains petits bassins versants, les crues semblent ainsi intervenir systématiquement à la suite de ce type d'averses. N'ayant en général aucune origine géographique particulière, ces pluies remarquables n'ont donc pas été répertoriées dans le tableau 2. Par contre, cette information a été prise en compte pour discriminer les bassins versants affectés par ces phénomènes.

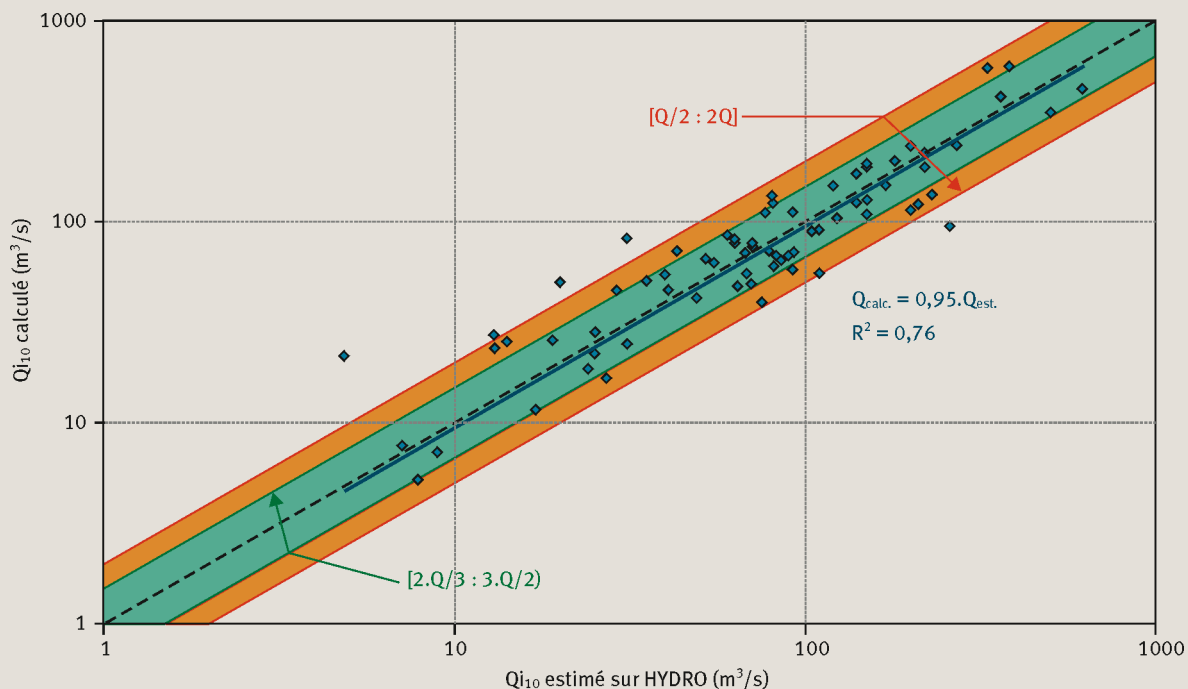
Le principe de la méthode

Des régressions statistiques multi-variables entre le débit de pointe décennal (Q10) et différentes variables ont été réalisées pour caler des formules régionales sur chacune des zones homogènes.

3 Formules régionales issues de régressions statistiques, mettant en relation le débit décennal de pointe (Qi₁₀ en m³/s), la superficie du bassin versant (S en km²) et la pluie journalière décennale (Pj₁₀ en mm). R² est le coefficient de détermination de la régression

N°	Zone hydrologique	Relation	R ²	Taille de l'échantillon
1	Pyrénées orientales	$Q_{i_{10}} = 0,64 \cdot S^{0,93} \cdot \left(\frac{P_{j_{10}}}{85}\right)^{1,97}$	0,75	29
2	Côte Vermeille	$Q_{i_{10}} = 1,28 \cdot S^{0,93} \cdot \left(\frac{P_{j_{10}}}{85}\right)^{1,97}$		2
3	Pyrénées centrales Sud	$Q_{i_{10}} = 1,62 \cdot S^{0,72} \cdot \left(\frac{P_{j_{10}}}{85}\right)^{0,37}$	0,80	11
4	Pyrénées centrales nord-est et nord-ouest	$Q_{i_{10}} = 1,82 \cdot S^{0,78} \cdot \left(\frac{P_{j_{10}}}{85}\right)^{0,56}$	0,61	29
5	Pyrénées occidentales	$Q_{i_{10}} = 1,22 \cdot S^{0,95}$	0,82	6

5 Reconstitution des débits de pointe décennaux à partir des équations 1 à 5



► Plusieurs caractéristiques physiques et pluviométriques des bassins versants ont été quantifiées à partir d'un système d'information géographique. Elles concernent notamment :

- la superficie drainée au droit de la station hydrométrique,
- le périmètre du bassin versant,
- la pluie journalière décennale moyennée sur la surface du bassin.

Le choix de la pluie journalière décennale doit être justifié. Certes, une crue décennale n'est pas forcément produite par une pluie décennale et le pas de temps journalier n'est pas le plus approprié pour les bassins de petite taille. Cependant, la pluie journalière décennale est un paramètre régionalisable approprié, plus aisé à obtenir et manier que les quantiles* de pluie sur des pas de temps plus courts.

Les débits maximaux instantanés correspondant à des durées de retour de 2, 5, 10 et 20 ans ont également été extraits de la banque HYDRO. Pour mémoire, ces quantiles sont calculés par l'ajustement d'une loi de Gumbel sur les maximums annuels. La qualité des ajustements publiés pour chacun des bassins versants du périmètre d'étude a fait l'objet d'une critique préalable, essentiellement en vérifiant le niveau de dispersion des données traitées autour de la droite de régression.

Pour rester en cohérence avec l'approche Crupedix, l'application de méthodes de régression multiple a permis d'établir des formules mettant en relation le débit décennal de pointe ($Q_{i_{10}}$ en m³/s), la superficie du bassin versant (S en km²) et la pluie journalière décennale ($P_{j_{10}}$ en mm). Plusieurs relations peuvent alors être proposées pour chacune des régions homogènes préalablement définies (tableau 3).

Il est à noter dans le tableau 3 que :

- l'équation 1 est calée sur un jeu de données qui rassemble les bassins versants des Pyrénées orientales et de la Côte Vermeille ;
- l'équation 2 n'est pas issue d'un calage réalisé à partir de données spécifiques à la Côte Vermeille mais résulte de la majoration de l'équation 1 par un facteur 2 afin de tenir compte, à surface drainée égale, de débits spécifiques notablement plus élevés en comparaison des autres bassins versants de l'Est des Pyrénées ;
- un niveau de corrélation plus satisfaisant a été obtenu en agglomérant les données issues des parties nord-est et nord-ouest des Pyrénées centrales, plutôt qu'en traitant ces deux échantillons de manière séparée (équation 4) ;
- sur les Pyrénées occidentales, une relation simple entre le débit décennal de pointe et la surface drainée a finalement été retenue (équation 5). L'introduction de la variable « pluie journalière décennale » n'a pas amené un niveau de précision sensiblement plus élevé.

Le poids plus grand affecté à la pluie dans les équations 1 et 2 pourrait traduire la prédominance des crues essentiellement pluviales dans la région des Pyrénées orientales et de la côte Vermeille. Le rôle de la fusion nivale dans une forte proportion des crues des autres régions pourrait expliquer le faible exposant affecté à la pluie.

La performance de ces équations a été évaluée en comparant, pour l'ensemble des stations, les valeurs estimées dans la banque HYDRO ($Q_{\text{Est.}}$) et les valeurs calculées ($Q_{\text{Calc.}}$) à partir de ces formules. Les résultats sont

dans l'ensemble d'une qualité assez satisfaisante, avec un coefficient de corrélation (R^2) de 0,76 et un coefficient directeur de la droite indiquant une sous-estimation de 5 % en moyenne (figure 5). L'intervalle $[Q/2 ; 2Q]$ contient 93 % des valeurs estimées et l'intervalle $[2Q/3 ; 3Q/2]$ en encadre 71 %.

Trois catégories de bassins versants ont été identifiées selon que le débit calculé par les équations 1 à 5 est sous-estimé, surestimé ou conforme à la valeur issue de la banque HYDRO. Une analyse naturaliste des sites a ensuite été menée afin de déterminer les traits géographiques communs susceptibles d'expliquer l'appartenance d'un bassin versant à l'une ou l'autre de ces trois classes.

Dans un premier temps, une comparaison qualitative des bassins versants permet d'identifier les facteurs semblant aggraver ou limiter la valeur du débit décennal. Le tableau 4 synthétise les résultats de cette analyse préalable en précisant la liste de ces facteurs et en donnant une appréciation de leur niveau d'influence respectif.

En fonction des différentes combinaisons de facteurs observées sur les 77 bassins versants préalablement échantillonnés, cette analyse a également permis de définir le sens et l'importance de la correction à apporter à la valeur standard du débit décennal de pointe calculée à partir des équations 1 à 5, pour approcher la valeur estimée à partir de la banque HYDRO. Ce travail comparatif a porté sur des bassins rattachés à une même zone géographique et appartenant à une même gamme de superficie.

Il a conduit à l'établissement d'une clé de classification naturaliste des bassins versants en fonction de leur géomorphologie et de leur environnement climatique. Une clé de détermination du facteur de correction (Fc) associée à cette classification préliminaire a également été évaluée. Les figures 6, 7 et 8 montrent qu'en fonction

4 Principaux facteurs aggravant ou limitant la valeur du débit décennal. La convention suivante a été adoptée : ++ facteur fortement aggravant ; + facteur aggravant ; - facteur limitant

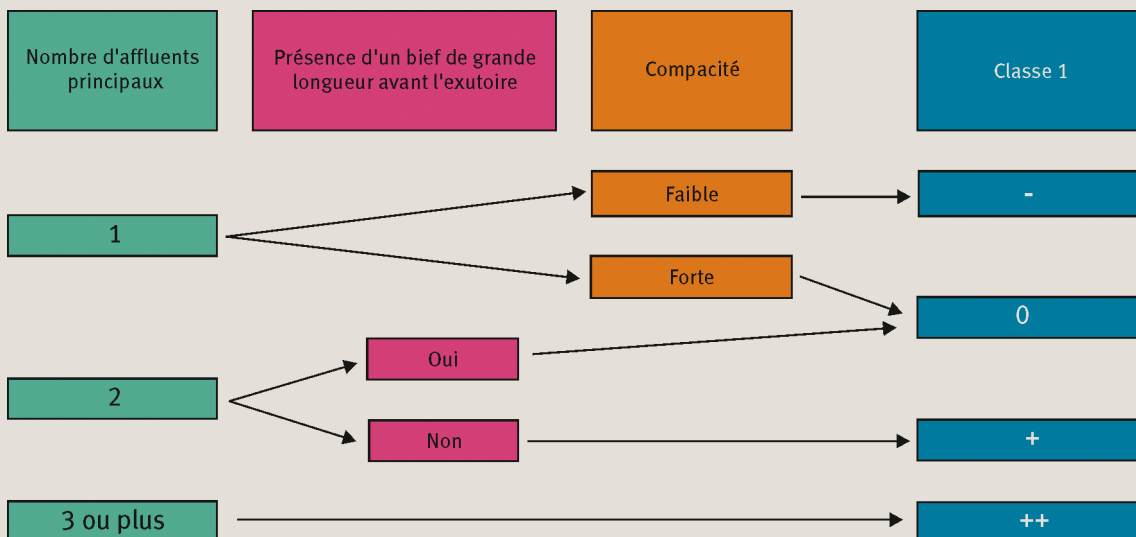
Facteur		Influence
Nombre d'affluents principaux *	3 affluents ou plus	++
	2 affluents	+
	1 seul affluent	-
Compacité du bassin **	Faible	-
	Élevée	+
Présence d'un bief de grande longueur avant l'exutoire		-
Crues majoritairement provoquées par des orages localisés ***		+
Orientation des bassins par rapport aux perturbations à l'origine des crues	Au vent	+
	Sous le vent	-

* Un affluent peut être considéré comme étant principal si le rapport entre la superficie de son bassin versant et la superficie totale drainée à l'exutoire est d'au moins 30 % si 2 affluents principaux sont comptés, 20 % si 3 affluents principaux sont comptés et 15 % si 4 affluents principaux sont comptés.

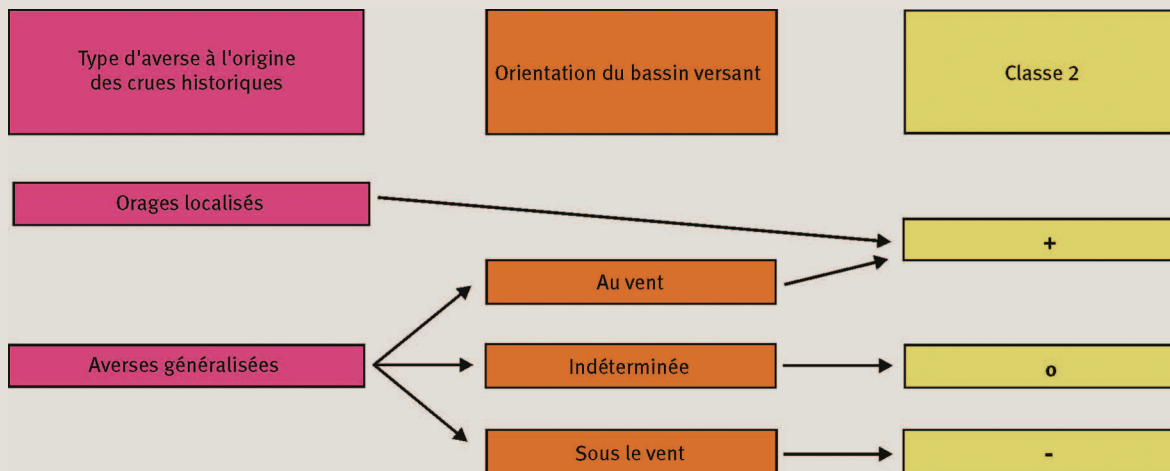
** La compacité d'un bassin versant peut être qualifiée d'élevée si la valeur de l'indice de Gravelius (Kg) est inférieur à 1,55. Pour mémoire, Kg est égal à $0,28 \cdot \frac{S}{P}$, où S est la surface drainée en km² et P le périmètre du bassin versant en km.

*** La nature des averses à l'origine des crues historiques connues sur un bassin versant donné peut être identifiée à l'aide de la base de données « Événements » du service RTM, en vérifiant leur concomitance éventuelle avec des crues observées sur des cours d'eau voisins. Un événement isolé aura ainsi de grande chance d'avoir été provoqué par un orage localisé.

6 Première clé de classification naturaliste des bassins en fonction de leur géomorphologie



7 Deuxième clé de classification naturaliste des bassins relative à leur environnement climatique



des éléments caractéristiques du bassin versant considéré, ce coefficient évolue dans une gamme de valeurs allant de 0,35 à 1,65. Ces valeurs ont été choisies à partir du calcul, pour chaque sous-échantillon discriminé par le classement naturaliste, de la moyenne des résidus entre les valeurs estimées et les valeurs calculées.

banque HYDRO et par un coefficient de corrélation (R^2) égal à 0,88. En revanche, le gain n'est pas significatif au niveau des intervalles $[Q/2 ; 2Q]$ et $[2Q/3 ; 3Q/2]$ qui contiennent respectivement 92 % et 74 % des valeurs estimées.

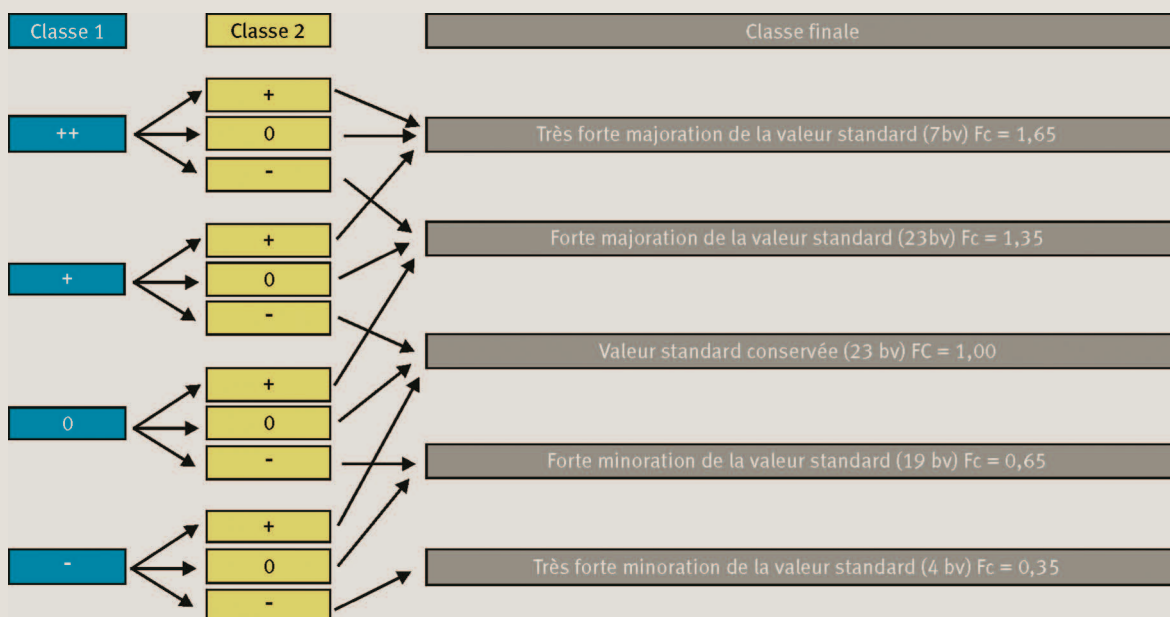
Performance de la méthode ANETO

Par rapport à la seule application des équations 1 à 5, le gain en précision apporté par la méthode ANETO, alliant l'application des relations statistiques et une analyse naturaliste du bassin versant, se traduit principalement par un écart nul en moyenne entre les valeurs calculées ($Q_{Calc.}$) et les valeurs estimées ($Q_{Est.}$) issues de la

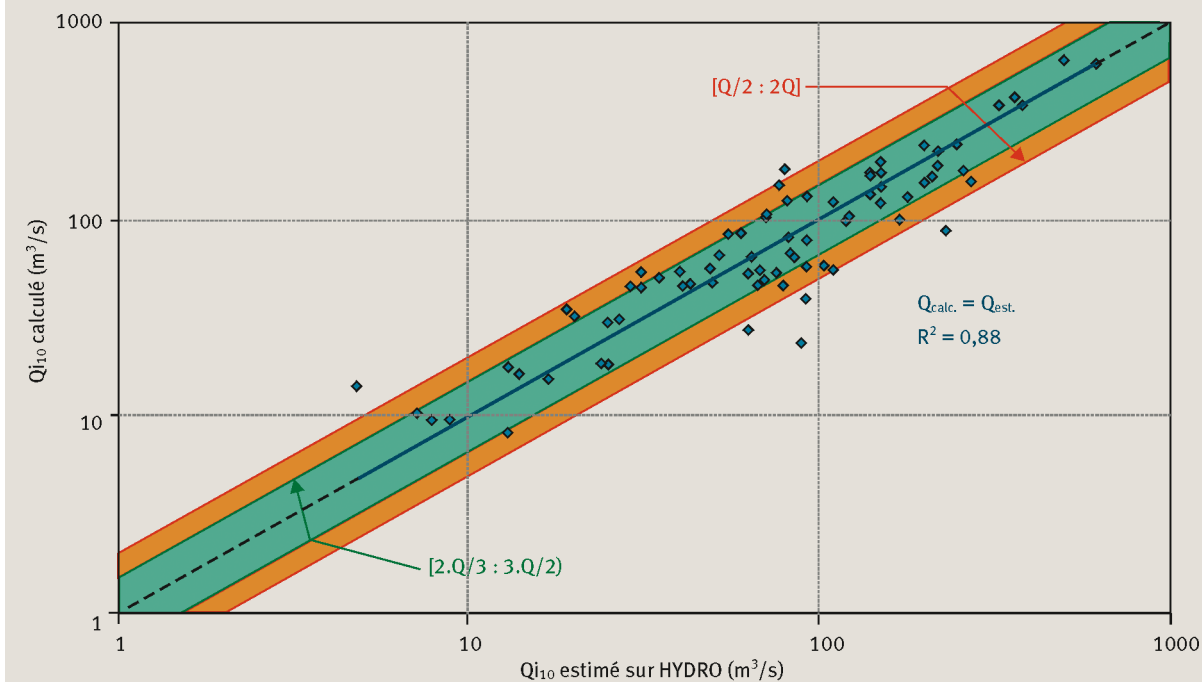
Extrapolation vers d'autres périodes de retour

En ingénierie, la seule connaissance du débit de pointe de période de retour décennale est bien souvent insuffisante, notamment lorsque dans les PPR, l'intensité de la crue de référence centennale doit être définie pour établir un zonage d'aléa. Pour disposer d'un ordre de grandeur des autres débits de référence d'un bassin ver-

8 Clé de détermination de F_c à appliquer à la valeur standard du débit décennal calculée à partir des équations 1 à 5, en fonction de la classification du bassin versant. La répartition finale des bassins versants de l'échantillon de calage (bv) est reportée pour mémoire entre parenthèses



9 Reconstitution des débits de pointe décennaux à partir de la méthode ANETO



sant, une première démarche peut consister à multiplier la valeur estimée du débit de pointe décennal par un coefficient adapté à une région, une catégorie de bassins versants et une période de retour donnés. La synthèse hydrologique que nous avons réalisée sur les Pyrénées françaises à partir des quantiles issus des ajustements de Gumbel fournis par la banque HYDRO nous conduit à recommander les coefficients forfaitaires suivants :

- $Q_{i_{20}} = 1,20.Q_{i_{10}}$ ($R^2 = 0,996$) ;
- $Q_{i_5} = 0,80.Q_{i_{10}}$ ($R^2 = 0,996$) ;

(R^2 est le coefficient de corrélation entre les débits estimés par ce coefficient multiplicateur et les débits extraits de HYDRO).

Pour les débits de période de retour 2 ans, la distinction suivante est également proposée :

- pour les Pyrénées orientales et la Côte Vermeille : $Q_{i_2} = 0,45.Q_{i_{10}}$ ($R^2 = 0,986$) ;
- pour tous les autres secteurs : $Q_{i_2} = 0,60.Q_{i_{10}}$ ($R^2 = 0,975$).

Ces ratios sont très similaires à ceux proposés par l'approche débit-durée-fréquence (QDF*) pour le modèle de Soyans. Ce modèle est plutôt représentatif des bassins versants à faible capacité de stockage des précipitations et à fort écoulement superficiel. Dans ces conditions, il apparaît légitime, pour des périodes de retour rares, de conserver les ratios proposés par ce modèle, soit :

- $Q_{i_{50}} = 1,70.Q_{i_{10}}$;
- $Q_{i_{100}} = 2,25.Q_{i_{10}}$.

Retour d'expériences et perspectives

Un utilitaire sous Excel® a été développé pour l'application de la méthode. Depuis son élaboration en 2005, les

différents services RTM des Pyrénées ont testé et appliqué la méthode ANETO sur plus d'une cinquantaine de bassins versants torrentiels, soit dans le cadre de l'établissement de plans de prévention des risques, d'études préalables à des aménagements de protection ou d'expertises relatives à des avis d'urbanismes ponctuels. Récemment, EDF a également utilisé cette approche dans le cadre d'une étude portant sur un affluent torrentiel non jaugeé du fleuve Aude.

À titre d'illustration, la figure 10 présente une application d'ANETO sur le torrent du Valentin. Ce torrent est un affluent situé en rive droite du Gave d'Ossau, sur la commune des Eaux-Bonnes dans les Pyrénées Atlantiques.

Les premiers retours d'expérience confirment l'intérêt de cette approche. Elle permet à des praticiens non spécialistes de l'hydrologie, mais disposant d'un bon sens du terrain et du fonctionnement historique du bassin versant, d'obtenir un ordre de grandeur réaliste des débits de référence d'un cours d'eau dans des délais relativement rapides. Au-delà, la méthode ANETO permet également d'apprécier la sensibilité d'une estimation aux caractéristiques géographiques intrinsèques et extrinsèques au bassin versant.

Un certain nombre de limites doivent cependant être rappelées :

- en raison des données hydrométriques disponibles, le domaine d'application ne concerne que les bassins versants dont la superficie est comprise entre 4 et 500 km². De très nombreux torrents ont souvent des tailles beaucoup plus réduites ;
- le choix retenu sur la banque HYDRO d'estimer les quantiles à partir d'une loi de Gumbel n'a pas été remis en cause. Or, des estimations plus fiables seraient éventuellement obtenues par la méthode du renouvellement,

10 Exemple d'application de la méthode ANETO sur le bassin versant torrentiel du Valentin aux Eaux Bonnes (camping de Gourette), dans les Pyrénées Atlantiques



Estimation des débits de crue de référence du bassin versant par la méthode ANETO	
Cours d'eau :	le Valentin au droit du camping de Gourette (64)
Zone hydrologique :	Pyrénées centrales nord-ouest
Superficie du bassin versant hydrographique :	15,40 km ²
Pluie journalière décennale :	85 mm
Qi10 standard :	15,4 m³/s
Périmètre du bassin versant :	17,90 km
Nombre d'affluents principaux :	2
Présence d'un bief de grande longueur avant l'exutoire :	oui
Indice de compacité :	1,25
Classification intermédiaire (1) :	0
Typologie des averses à l'origine des crues :	orages localisés et averses généralisées
Orientation du bassin par rapport aux averses :	au vent
Classification intermédiaire (2) :	+
Sens et importance de la correction prévisible : forte majoration du Qi10 standard	
Qi12 =	12,4 m ³ /s
Qi15 =	16,6 m ³ /s
Qi10 =	20,7 m ³ /s
Qi20 =	24,9 m ³ /s
Qi50 =	35,2 m ³ /s
Qi100 =	47,7 m ³ /s
Le Qi10 "réel" a 95% de chance d'être compris entre	10 et 41 m ³ /s
Le Qi10 "réel" a 80% de chance d'être compris entre	14 et 31 m ³ /s

▶ notamment quand elle permet d'augmenter la taille d'un échantillon ;

- à son stade de développement actuel, ANETO ne permet pas d'évaluer les volumes liquides écoulés en période de crue. Sur les bassins torrentiels, cette variable conditionne en partie l'intensité du transport solide par charriage ;
- la méthode proposée pour l'extrapolation des débits vers des périodes de retour rares est particulièrement sommaire. Les résultats présentés ici doivent donc être utilisés avec prudence en particulier dans les secteurs où l'aléa pluviométrique est susceptible de connaître une aggravation très significative dans les extrêmes (cas de la partie est des Pyrénées notamment).

Tous ces éléments nous incitent maintenant à tester la faisabilité de cette approche sur les Alpes françaises. Ce massif constitue un territoire où la densité des enjeux exposés à des aléas torrentiels est très élevée. L'application aux Alpes françaises vise aussi à approfondir les points restés en suspens lors de cette première étude, notamment l'estimation des volumes de crue. Engagé au tout début de l'année 2009 dans le cadre d'une collaboration entre le service RTM, le Cemagref,

le MEEDDAT, EDF et Météo France, ce projet bénéficie également d'un financement par le Pôle grenoblois « Risques naturels ». ■

Les auteurs

Christophe Peteuil

Office national des forêts,
Service de restauration des terrains en montagne de l'Isère,
9 Quai Créqui, 38000 Grenoble
christophe.peteuil@onf.fr

Simon Carladous

Office national des forêts,
Service de restauration des terrains en montagne des Pyrénées Orientales,
8 Place des Variétés, 66000 Perpignan
simon.carladous@onf.fr

Nicolle Mathys

Cemagref, centre de Grenoble,
UR ETNA, Érosion torrentielle, neige et avalanches,
2 rue de la Papeterie, BP 76, 38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex
nicolle.mathys@cemagref.fr

QUELQUES RÉFÉRENCES CLÉS...

- ADAM, F., 2003, *Premiers essais de régionalisation pour la prédétermination des débits de crue décennaux de bassins versants torrentiels des Pyrénées centrales*, rapport de stage de 2^e année de l'ENSHMG réalisé à la délégation nationale RTM Pyrénées de l'ONF, 71 p.
- CARLADOUS, S., 2005, *Prédétermination des débits de crue des bassins versants torrentiels des Pyrénées françaises*, mémoire de fin d'études de l'ENGEES réalisé à la délégation nationale RTM Pyrénées de l'ONF, 102 p.
- LANG, M., LAVABRE, J., SAUQUET, E., RENARD, B., 2007, *Estimation de la crue centennale pour les plans de prévention des risques d'inondations*, Éditions Quae, Versailles, 232 p.
- MÉTÉO FRANCE, 1999, *Estimation des hauteurs de précipitations d'occurrence rare pour des durées de cumuls de 1 à 10 jours sur 3 000 postes français – Méthode du renouvellement – Rapport d'élaboration*, Action cofinancée par le MATE/DPPR/SDPRM.
- MÉTÉO FRANCE, 2001, *Pluies extrêmes sur le sud de la France (1958-2000)*, CDROM cofinancé par le MATE/DPPR/SDPRM.



Le Gave de Héas (Héas, Hautes-Pyrénées).

Remerciements

Les auteurs ont à cœur de remercier toutes les personnes qui par leurs conseils ou leur collaboration ont permis à ce projet d'aboutir, en particulier : Martine Baillon (Météo France), Michel Bouziges (Direction régionale de l'environnement de Midi Pyrénées), Laurent Cobos (Service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations), Gilles Galéa (Cemagref), Jean Paul Goutorbe (Météo France), Benjamin Graff (Cemagref, présentement Compagnie nationale du Rhône), Arnaud Maisondieu (ONF-RTM) et Éric Sauquet (Cemagref).