

Prédétermination de la crue de projet

Jacques LAVABRE, Cemagref

A priori, les méthodes de calcul des crues de projet ne diffèrent ni selon la taille des ouvrages, ni même selon celle des bassins versants, du moins en dessous de quelques centaines de km².

Mais en pratique, il y a deux spécificités importantes pour les petits et moyens barrages :

- ♦ *la première concerne la fréquence de l'épisode de crue contre lequel on veut se prémunir ; on pourra, en effet, admettre des fréquences modérées pour les très petits ouvrages, dont la rupture aurait des conséquences à peu près imperceptibles à l'aval ; on devra, par contre, retenir des fréquences faibles pour les barrages présentant des risques pour les populations aval ;*
- ♦ *la deuxième différence provient du fait que les petits et moyens barrages barrent très généralement des bassins versants de faible superficie. Ceux-ci sont rarement équipés de stations de mesure. La qualité de l'information hydroclimatologique est alors moins bonne. L'imprécision plus grande des résultats de l'étude hydrologique doit être prise en compte lors du choix du type d'évacuateur et de son dimensionnement.*

CONSIDÉRATIONS PRÉALABLES

Il est maintenant clairement admis que l'étude de la crue, qui sert au dimensionnement des ouvrages évacuateurs de crue des barrages, ne peut reposer sur la seule observation des débits. Les méthodes sont de type hydrométéorologique et associent la connaissance des pluies à celle des débits. Ces méthodes peuvent reposer simplement sur des concepts statistiques (méthode du GRADEX, modèle AGREGEE¹) ou proposer une approche déterministe de la transformation de la pluie en débit.

Dans plusieurs pays (en particulier dans les pays anglo-saxons), la méthode *Pluie Maximum Probable - Débit Maximum Probable* (PMP - PMF²), développée par l'école Nord-américaine, est d'usage courant. Cette méthode définit un débit maximum probable pour le bassin versant considéré, qui est le plus fort débit raisonnablement imaginable. Le risque d'occurrence d'un tel débit est en principe infiniment faible, en tout cas non chiffrable.

Dans d'autres pays, dont la France, on calcule un débit de projet assorti d'un risque d'apparition. En fonction de la vulnérabilité à l'aval : pertes en vies humaines, considérations économiques, submersibilité ou non de l'ouvrage... la fréquence retenue est de l'ordre de 10^{-2} à 10^{-4} . En terme fréquentiel, cela signifie par exemple, qu'un ouvrage conçu pour évacuer la crue de fréquence 10^{-3} a un risque de $1 - (0,999)^{100} = 9,5\%$, d'être soumis à la crue de projet, sur une durée d'exploitation de 100 ans. Le risque est de l'ordre de 1 % si l'ouvrage est susceptible d'évacuer la crue de fréquence décennale (durée d'exploitation de 100 ans). Il faut donc être conscient que l'ouvrage a un risque non négligeable d'être confronté à la crue de projet ainsi déterminée, tout en considérant que l'ouvrage est susceptible de résister à une crue supérieure grâce à la *revanche*.

Bien qu'a priori toutes les méthodes ne soient applicables que sur des sites pour lesquels des chroniques d'observation sont disponibles, des considérations pratiques conduisent parfois à des applications en mode dégradé. C'est souvent le cas pour les petits bassins versants, qui disposent rarement de chroniques de débits. La fiabilité de l'étude hydrologique reste toutefois extrêmement tributaire de la qualité de l'information hydroclimatologique disponible.

CRUE DE PROJET ET CRUE DE SURETÉ

La *crue de projet* est la crue de plus faible fréquence entrant dans la retenue. Elle est prise en compte pour déterminer les *Plus Hautes Eaux* (PHE) et dimensionner l'évacuateur de crues, en intégrant les possibilités de laminage. Souvent la crue de projet considérée est la crue de débit de pointe maximale. Il n'est pas toujours certain que cette crue soit la plus

1. Définition en pp. 26-29.

2. PMP - PMF : Probable Maximum Precipitation - Probable Maximum Flood.

défavorable pour le calcul de l'évacuateur de crue. Une crue moins pointue, mais plus étalée, pourrait être plus défavorable. La période de retour minimale préconisée pour cette crue est comprise entre 100 ans et 10 000 ans (fréquence 10^{-2} à 10^{-4}). Le choix de la période de retour dépend du risque induit par la rupture du barrage. *L'aléa intrinsèque au barrage* peut être quantifié par le paramètre $H^2\sqrt{V}$. Vis-à-vis de ce critère, on propose dans le tableau 1 des recommandations pour le choix de la crue de projet. Cependant le *risque global* est lié aussi à la *vulnérabilité* de la vallée en aval (occupation de la zone susceptible d'être noyée en cas de rupture). Les recommandations du tableau 1 seront à renforcer en cas de forte vulnérabilité (passer par exemple de la crue centennale à la crue millennale). Lorsque le barrage intéresse la sécurité publique, la période de retour ne devra en aucun cas être inférieure à 1 000 ans, quelle que soit la valeur de $H^2\sqrt{V}$.

Le calcul des *PHE* étant effectué, on adopte pour la crête du barrage une cote supérieure. La différence entre ces deux cotes est baptisée *revanche*. Cette revanche est essentiellement destinée à éviter la submersion par les vagues, mais joue en outre un rôle essentiel dans la sécurité vis-à-vis des crues. Un mode de calcul en est donné en page 73 (*chap. IV*).

La revanche permet au barrage de résister à une crue "dite crue de sûreté", supérieure à la crue de projet baptisée *crue de sûreté*. C'est par définition la crue la plus pénalisante que pourra subir l'ouvrage sans mettre en cause sa pérennité. Dans le cas d'un évacuateur à seuil libre d'un barrage en remblai, la crue de sûreté sera la crue qui provoque la surverse, sous réserve qu'elle ne provoque pas aussi un débordement en un point du coursier dans une zone dangereuse pour le remblai. Pour un barrage poids, la crue de sûreté correspond aussi à la crête de la partie non déversante. Pour un barrage à noyau, la crue de sûreté sera obtenue lorsque la retenue atteint non pas la crête du barrage, mais la crête du noyau.

$H^2\sqrt{V}$	< 5	5 à 30	30 à 100	100 à 700	> 700
Période de retour en années (crue)	100 (centennale)	500 (cinquennale)	1 000 (millennale)	5 000 (cinqmillennale)	10 000 (décamillennale)

Tableau 1 - Période de retour minimale pour la crue de projet d'un barrage en terre, compte non tenu de la vulnérabilité à l'aval ; (H : hauteur du barrage en m ; V : volume de la retenue en hm³)

LA MÉTHODE DU GRADEX¹

Cette méthode statistique, développée par EDF, est d'emploi courant en France. Son succès est en particulier lié à sa (relative) facilité de mise en œuvre, qui résulte de la simplification extrême du processus de transformation de la pluie en débit.

1. Voir *Bibliographie*, p. 36, notes 5, 7 et 11.

HYPOTHÈSES DE LA MÉTHODE DU GRADEX

La pluie est considérée globalement sur une certaine durée, égale à la durée moyenne des hydrogrammes.

Les lois de probabilité des précipitations de différentes durées sont à décroissance exponentielle simple. Le paramètre descripteur privilégié découle de la connaissance de l'écart type de la série des valeurs maximales des précipitations. Il est appelé Gradient Exponentiel, GRADEX. La loi de GUMBEL est souvent retenue. Sa fonction de répartition s'écrit :

$$F(P) = \text{EXP} (-\text{EXP} (-(P-P_0)/a))$$

Le GRADEX (a) peut être obtenu par la méthode des moments. Il est dans ce cas égal à 0,78 fois l'écart-type. a est bien sûr fonction de la durée de précipitation considérée.

Remarques :

- ◆ Lorsque $P \rightarrow \infty$, $F(P) \rightarrow 1 - \text{EXP} (-(P-P_0)/a)$ et le logarithme népérien de la période de retour $T = (1/(1 - F(P)))$ est égal à $(P - P_0) / a$. Les hauteurs de précipitations varient linéairement avec le logarithme de la période de retour, la pente (a) de cette droite étant égale au GRADEX.

- ◆ Si $P_{1\,000}$ et P_{100} désignent respectivement les hauteurs de précipitations de périodes de retour 1 000 et 100 ans, alors :

$$P_{1\,000} - P_{100} = a (\ln 1\,000 - \ln 100) = 2,3 a$$

(\ln désignant le logarithme népérien).

À partir d'un certain état de saturation du bassin versant, tout accroissement de pluie génère un accroissement égal du volume écoulé dans le même laps de temps. En première approximation, cet état est atteint pour des périodes de retour de l'ordre de 10 ans (bassins imperméables, à faible rétention), à 50 ans (bassins perméables, à forte rétention).

La loi des volumes écoulés est simplement obtenue par la loi des hauteurs de précipitation translatée au point de période de retour 10 ou 50 ans.

Une interprétation *physique* de ce processus peut découler de l'observation du graphique de variation des volumes écoulés en fonction des hauteurs de précipitations (*voir fig. 1, p. 35*). La rétention du bassin versant est schématisée par le décalage entre la bissectrice (pluie = volume écoulé) et sa parallèle, tracée au milieu du nuage de points. La figure 2 (*voir p. 35*) illustre le principe : l'ajustement réalisé sur les valeurs de pluie a pour pente le gradex. Dans cette application, la période de retour retenue pour l'hypothèse de saturation du bassin versant est 20 ans (ce qui correspond à une variable réduite de GUMBEL égale à 2,97). Au-delà du volume écoulé correspondant à cette période de retour, l'ajustement est obtenu en traçant une droite de pente égale au gradex.

Dans cet exemple, le bassin versant est équipé, et il a donc été possible de faire un ajustement statistique sur les volumes écoulés, jusqu'à la période de retour 20 ans.

Dans le cas de petits bassins versants dépourvus de chronique de débit, cette opération n'est pas possible. Une approche régionale basée sur des bassins versants proches, et si possible similaires, est alors nécessaire. Mais il est aussi admissible d'avoir recours seule-

ment à des synthèses nationales telles que SOCOSE ou CRUPEDIX¹. Ces méthodes nécessitent essentiellement des données pluviométriques et fournissent un ordre de grandeur des débits de pointe de période de retour 10 ans (10 et 20 ans pour SOCOSE). Il s'avère qu'une erreur même importante sur la crue de retour 10 ans (ou 20 ans) a une influence relative faible sur la crue de période de retour 1 000 ans ou 10 000 ans calculée par la méthode du gradex.

On constate donc que dans le cas des petits bassins versants non jaugés, l'évaluation des débits de crue de fréquence rare repose quasi-exclusivement sur l'information pluviométrique. Celle-ci est fort heureusement plus largement disponible sur une très grande partie du territoire français.

Un simple rapport d'affinité permet le passage du volume écoulé pendant la durée considérée au débit de pointe. Ce rapport est estimé à partir des hydrogrammes observés ; on retient sa valeur moyenne (les lois de probabilité des rapports et des écoulements moyens peuvent aussi être combinées, pour aboutir à des rapports croissants avec la période de retour). Pour les bassins versants non équipés de stations limnigraphiques, on peut utiliser le rapport obtenu sur des bassins versants similaires.

Un exemple d'application figure en page 31.

DIFFICULTÉS D'APPLICATION DE LA MÉTHODE DU GRADEX

La décroissance strictement exponentielle des précipitations avec la période de retour conduit à affecter des périodes de retour extrêmement élevées à certains événements effectivement observés en un point quelconque du territoire français. Rappelons que des totaux de précipitations supérieurs à 500 mm en 24 heures, ne sont localement pas réellement exceptionnels en France, mais restent l'apanage de quelques régions particulières : autour de 1 000 mm dans la région du Canigou (Pyrénées Orientales) en octobre 1940, 800 mm dans la région de Solenzara (Corse) en octobre 1993... La crue de projet retenue conventionnellement pour dimensionner un barrage n'est donc pas la crue maximale susceptible de se produire.

Il n'existe pas de règle bien définie pour calculer la durée sur laquelle l'hypothèse d'égalité des accroissements de pluie et des volumes écoulés est appliquée. Seule une analyse détaillée des couples averses-crues permet une estimation pas trop hasardeuse. En l'absence de données précises, la formulation du temps caractéristique du bassin versant, développée dans la méthode SOCOSE², peut être retenue. Dans cette méthode, le temps caractéristique est défini comme la durée pendant laquelle le débit est supérieur à la moitié du débit de pointe. Si l'on ne dispose pas de données de débit sur le site, la formule régionalisée suivante peut être utilisée :

$$\text{Log } D = - 0,69 + 0,32 \text{ Log } S + 2,2 (Pa/Pta)^{0,5}$$

1. Voir *Bibliographie*, p. 36, note 1.

2. Voir *Bibliographie*, p. 36, note 1 et 12.

où

D : temps caractéristique (heure)

S : surface du bassin versant (km²)

Pa : pluie annuelle moyenne (mm)

P : pluie journalière de fréquence décennale (mm)

ta : température annuelle moyenne (°C)

Remarque :

La méthode est très souvent employée au pas de temps journalier lorsque la superficie du bassin versant est d'une certaine importance, en raison de la plus grande disponibilité des données journalières de pluie et de débit.

La brusque cassure qui affecte la loi des débits au point pivot (démarrage de la loi des pluies), conduit à une surestimation des débits de fréquence intermédiaire (périodes de retour de l'ordre de 50 à 500 ans).

Le rapport d'affinité pour obtenir le débit de pointe est très variable. La méthode préconise de retenir sa valeur moyenne. Si l'on a bien choisi la durée sur laquelle l'accroissement de débit est égal à l'accroissement de pluie, elle doit être de l'ordre de 1,5 à 2,0.

La méthode ne fournit pas une forme d'hydrogramme de projet qui est nécessaire pour la simulation du laminage des crues. Une forme bi-triangulaire qui respecte la durée, le débit de pointe et le volume écoulé peut être retenue. Généralement ces hydrogrammes de projet entraînent des surestimations de la capacité de laminage, car ils ne constituent qu'une partie de la crue. Il y a souvent lieu de tenir compte d'un débit de base du cours d'eau avant la crue lorsqu'il peut représenter une proportion non négligeable du débit de crue.

LE MODÈLE AGREGÉE¹

De développement récent au Cemagref, ce modèle se situe dans le prolongement de la méthode du GRADEX, dont il reprend la conception statistique et l'hypothèse que lorsque le bassin versant est saturé, tout accroissement de pluie génère un accroissement égal de l'écoulement. Les modifications portent sur :

- ◆ la combinaison des lois de probabilité des pluies et des débits pour obtenir un passage progressif de la loi des débits vers la loi des pluies ;
- ◆ la prise en compte de la distribution statistique du coefficient d'affinité (passage de l'écoulement moyen au débit de pointe) ;
- ◆ l'approche probabiliste des débits instantanés afin d'obtenir une forme d'hydrogramme synthétique de projet.

Ce modèle ne fait aucune hypothèse sur les lois de probabilité des pluies. La décroissance exponentielle simple des précipitations en fonction de la période de retour n'est pas imposée. Grâce au passage progressif de la loi des débits vers la loi des pluies, le modèle

1. Voir *Bibliographie*, p. 36, note 9.

échappe à la surestimation des débits de périodes de retour intermédiaires (50 - 500 ans). Bien que peu réalistes, les hydrogrammes synthétiques monofréquences obtenus sont d'emploi facile pour les calculs de laminage de la crue.

Le modèle AGREGEE et la méthode du GRADEX donnent des résultats voisins pour l'estimation des crues extrêmes (1 000 ans - 10 000 ans).

LA MÉTHODE PMP - PMF¹

Cette méthode est simplement citée ici pour mémoire car elle est très rarement utilisée en France. Elle repose sur la connaissance de la *Pluie Maximum Probable* (PMP) sur le bassin versant et sur une modélisation pluie-débit pour calculer le *Débit Maximum Probable* (PMF). Elle aboutit à un hydrogramme de projet.

La *PMP* est définie comme étant théoriquement la plus forte précipitation d'une durée déterminée qui est physiquement probable sur un site géographique déterminé. Son estimation repose sur les données des averses observées et sur la maximalisation des paramètres météorologiques liés aux précipitations : humidité, température, tension de vapeur saturante de l'air, vitesse du vent, phénomènes convectifs... Son calcul est du ressort du météorologue. Afin de faciliter sa détermination, certains pays (mais pas la France) ont publié des estimations régionalisées de la *PMP*.

LE MODÈLE SHYPRE : SIMULATION DE SCÉNARIOS DE CRUE²

Le Cemagref développe un modèle de simulation de scénarios de crues : le modèle SHYPRE (simulation d'hydrogrammes en prédétermination).

Cette approche s'attache à valoriser au maximum l'information temporelle contenue dans la pluie pour fournir des hydrogrammes de crues « réels ». Grâce au couplage d'un modèle de simulation de pluies horaires et d'un modèle de transformation de la pluie en débit, cette méthode propose une collection d'hydrogrammes de crues simulés sur un grand nombre d'années : 1 000 ans, 10 000 ans. Ces crues sont alors disponibles pour tout calcul en hydraulique transitoire : laminage dans une retenue, modélisation de champ d'inondation... L'aménageur peut ainsi simuler le fonctionnement des ouvrages hydrauliques et retenir comme crue de projet la crue dont la forme est la plus pénalisante pour l'aménagement. Il dispose également d'un échantillon de débits de crue entrants et sortants de la retenue qui permet d'effectuer des statistiques robustes sur les crues à l'aval de l'aménagement.

1. Voir *Bibliographie*, p. 36, notes 4 et 8.

2. Voir *Bibliographie*, p. 36, notes 2,3 et 10.

Ce modèle est opérationnel et nécessite de disposer des pluies horaires. Sur la façade méditerranéenne française, une version régionalisée est en outre opérationnelle à partir de la seule connaissance des pluies journalières. Le développement généralisé à d'autres typologies de pluie (climat océanique) ne devraient pas poser de problèmes, mais n'a pas encore été initié.

LES FORMULES EMPIRIQUES ET FORMULES RÉGIONALISÉES

Ces méthodes d'estimation des débits sont extrêmement sommaires et ne peuvent en aucun cas se substituer à une étude hydrologique complète.

LES COURBES ENVELOPPES DE FRANCOU-RODIER¹

À partir des crues maximales observées lors des deux derniers siècles sur 1 400 bassins versants répartis dans le monde et ayant des superficies dans la fourchette 10 - 2.10⁶ km², FRANCOU et RODIER ont établi la courbe enveloppe dont la formulation est la suivante :

$$Q/Q_0 = (S/S_0)^{1-k/10}$$

où

Q représente le débit de pointe de la crue en m³/s d'un bassin versant de superficie S en km². Q₀ = 10⁶ et S₀ = 10⁸.

k est un paramètre régionalisé. Il varie en France dans la fourchette 5,5 (zone méditerranéenne) à 3,5 (zone océanique du nord de la France).

S'agissant de l'enveloppe des crues maximales observées, ces estimations de débit ne sont pas affectées d'une fréquence d'apparition, les auteurs considérant toutefois qu'une bonne partie des crues correspond à une période de retour voisine de 100 ans.

SYNTHÈSE DES DÉBITS DE PÉRIODE DE RETOUR 1 000 ANS CALCULÉS PAR LA MÉTHODE DU GRADEX²

La méthode du GRADEX a été appliquée par EDF sur de nombreux bassins versants français, de superficie variant de quelques km² à quelques milliers de km². La régression établie sur 170 bassins versants du débit de pointe de période de retour 1 000 ans en fonction de la superficie du bassin versant s'écrit :

$$Q = \lambda \cdot S^{0,72}$$

où

S est la surface du bassin versant en km² et λ un paramètre donné par le tableau ci-après pour les trois zones suivantes :

- ♦ zone I : les bassins affluents de la Loire inférieure (Vienne, Creuse...) situés au nord du Massif Central, ceux de la Saône, de la Moselle, de la Bretagne ;

1. Voir *Bibliographie*, p. 36, note 6.

2. Voir *Bibliographie*, p. 36, note 5.

- ◆ zone II : les bassins des Pyrénées occidentales, centrales, de l'Aude et de l'Ariège, de la Dordogne et du Lot, les bassins de la Durance, du Fier et de l'Arve, des Dranses, de l'Isère ;
- ◆ zone III : les bassins de la Haute Loire, des Cévennes, du Tarn, des affluents rive droite du Rhône à l'aval de Lyon (Eyrieux, Ardèche...), des Alpes-Maritimes, de la Corse.

ZONE	λ	Fourchette à 90 %	Fourchette à 70 %
I	4,05	3,07 - 5,36	3,4 - 4,8
II	7,4	5,2 - 10,4	5,9 - 9,2
III	16,4	9,1 - 29,7	11,3 - 23,9

Cette formule n'est pas applicable aux bassins versants inférieurs à quelques km². Elle ne donne qu'un ordre de grandeur qu'il faut toujours affiner par une étude locale. Cet ordre de grandeur est seulement à considérer pour porter un premier jugement sur la capacité de l'évacuateur de crue. Il ne dispensera jamais d'une étude plus complète.

ANALYSE PLUIE-DÉBIT SUR UN BASSIN VERSANT BIEN DOCUMENTÉ

31

Il est très rare de disposer d'un petit bassin versant dont on connaît bien l'hydrologie. L'étude suivante n'a donc pas pour objet la détermination de la crue de projet d'un barrage. Elle présente les observations faites sur un bassin versant expérimental qui justifie la méthode préconisée et permet de constater que le débit de pointe de la crue de projet dépend peu de la durée des pluies considérées.

PRÉSENTATION DU BASSIN VERSANT

Ce bassin versant, situé en zone montagneuse méditerranéenne (massif des Maures), est géré par le Cemagref depuis 1967 dans le cadre du Bassin de Recherche du Réal Collobrier. Les terrains à l'affleurement sont essentiellement constitués de gneiss compacts. Le sol est peu épais. La végétation est formée d'un maquis à bruyère arborescente et arbousiers. Le bassin versant a une superficie de 1,47 km². La pluviométrie annuelle moyenne (1967-1990) est de 1 164 mm et l'écoulement correspondant est de 626 mm.

Les plus fortes crues sont générées par des épisodes pluvieux intenses observés surtout en septembre et octobre. À titre d'exemple, les deux épisodes pluvieux suivants, qui présentent des distributions temporelles très contrastées, illustrent parfaitement les différentes modalités de réponse du bassin (*voir tableau 2, p. 32*).

Date	Pluie maximale (en mm)		Écoulement maximal (en mm)		Débit de pointe (m ³ /s)	Ratio Débit de pointe/ Débit en 24 h
	24 h	1 h	24 h	1 h		
13.09.68	159	88	57	21	15,5	15,5
29.10.83	165	25	25	3,4	1,61	3,6

Tableau 2 - Crues des 13/09/68 et 29/10/83

MISE EN ŒUVRE DE LA MÉTHODE DU GRADEX

La méthode du GRADEX est appliquée à différents pas de temps : 1, 2, 4, 8, 12 et 24 heures, bien que ces dernières durées soient très supérieures à la durée caractéristique du bassin. Les figures 1 et 2 (voir p. 35) illustrent, à titre d'exemple, le cas des pluies et des écoulements observés en 4 heures.

On a retenu tous les phénomènes au cours desquels la pluie mesurée a dépassé un certain seuil.

LA RÉTENTION DU BASSIN VERSANT

32

On constate sur la figure 1 (voir p. 35) que pour les trois pluies les plus fortes, les rétentions sont comprises entre 70 et 100 mm et pour les trois plus importantes crues, entre 55 et 100 mm. L'analyse statistique exposée plus loin conduit à retenir pour le *point pivot* de la méthode du GRADEX, la fréquence 0,95 (période de retour 20 ans, variable réduite de GUMBEL, $u = 2,97$).

Le tableau 3 montre l'évolution de la rétention avec la durée de la pluie.

Durée (heures)	1	2	4	8	12	24
Rétention (mm)	30	43	57	76	86	98

Tableau 3 - Rétentions de période de retour 20 ans pour différentes durées de la pluie

DISTRIBUTIONS STATISTIQUES DES PLUIES ET DES LAMES ÉCOULÉES

Elles sont représentées sur la figure 2 (voir p. 35). Les pluies et les lames figurent en ordonnée et la variable centrée réduite de la loi de GUMBEL u , en abscisse.

La concavité des deux courbes s'explique par le fait que l'on a conservé des phénomènes de très faible durée de retour. La distribution asymptotique des pluies apparaît si l'on ne retient que les 27 événements les plus importants (un événement par année). Il n'est pas anormal que l'événement le plus important (13 septembre 1968) s'écarte sensiblement de la courbe.

Comme l'incertitude d'échantillonnage liée à un échantillon de 27 valeurs est importante pour déterminer les pentes des asymptotes proportionnelles aux écarts types, on a effectué les calculs à partir des 150 plus fortes pluies observées pour chacune des durées étudiées. Il semblerait, sur cet exemple, que cette méthode d'ajustement surestime la fréquence des plus fortes valeurs. Ceci n'est imputable qu'à l'échantillonnage. L'application de cette méthode d'ajustement aux échantillons des autres durées de pluie aboutit à des estimations soit tout à fait concordantes, soit par défaut (concavité des points vers le bas). Les résultats sont présentés dans le tableau 4.

Durée (h)		1	2	4	8	12	24
Lame (mm)	a	2,24	4,43	7,72	11,9	14,9	22,3
	b	3,90	7,60	13,5	22,4	29,3	44,2
Pluie (mm)	a	6,82	10,9	15,9	22,5	26,8	34,3
	b	20,1	31,5	46,5	66,2	79,7	106

Tableau 4 - Valeurs de a et de b des équations liant la pluie (ou la lame) à la variable centrée réduite de GUMBEL : P (ou L) = $au + b$

L'application de ces équations pour la fréquence 0,95 ($u = 2,97$) a permis d'établir le tableau 3.

La croissance du GRADEX, et donc l'évolution des valeurs de a, pente de la droite de distribution des pluies, s'ordonne parfaitement avec la durée et se traduit par la relation suivante :

$$\text{GRADEX}(t) = 7,4 t^{0,51}$$

Les lames de fréquence rare se déduisent directement de ces équations. En fixant le point pivot à la fréquence 0,95 ($u = 2,97$), les lames écoulées sur différentes durées, de fréquence 0,999, sont estimées aux valeurs reportées dans le tableau 5.

Durée (heures)	1	2	4	8	12	24
Lame (mm)	37,2	63,3	98,6	146	179	245

Tableau 5 - Estimation des lames écoulées de fréquence 0,999

COEFFICIENTS DÉBIT DE POINTE/DÉBIT MOYEN

Les rapports débit de pointe/débit moyen ont été calculés pour tous les événements considérés. Leur distribution permet d'évaluer les rapports à retenir pour déterminer les débits de pointe des crues de grande durée de retour.

Ces rapports sont très variables, surtout pour les crues de très faible volume. La valeur des rapports croît évidemment avec la durée du phénomène étudié : comprise entre 1 et 2 pour les durées de 1 à 2 heures, elle peut atteindre 25 pour certains épisodes de 24 heures.

En retenant pour chacune des durées de 1, 2 et 4 heures les rapports observés lors des trois plus fortes crues (soit 1,6 - 1,74 et 2,67), on obtient pour le débit de pointe de la crue millénaire des estimations très voisines, soit 24,3 - 22,5 et 26,9 m³/s.

CONCLUSION

Cette application permet de mettre en évidence la faible influence de la durée de la pluie prise en compte pour l'application de la méthode du GRADEX sur l'estimation du débit de pointe de crues de grande durée de retour.

Ce résultat est analogue à ceux obtenus pour des bassins versants beaucoup plus grands dont les crues ont été estimées en retenant successivement des pluies de 1 ou 2 jours.

HYDROGRAMME DE PROJET

L'hydrogramme de projet est calculé de manière à respecter :

- ◆ le débit de pointe de 24,5 m³/s (moyenne des trois estimations) ;
- ◆ le volume écoulé en 24 heures, de fréquence 0,999 (245 mm, soit 0,36 hm³).

La formulation suivante est retenue :

$$q(t) = \frac{q_p \cdot 2 \cdot (t/D)^\alpha}{1 + (t/D)^{2\alpha}}$$

où

q_p : débit de pointe

$q(t)$: débit à l'instant t

D : temps caractéristique du bassin versant, comme défini en page 27.

Une valeur de α de 2,7 permet dans cet exemple de respecter les deux conditions ci-dessus et conduit à l'hydrogramme de projet de la figure 3.

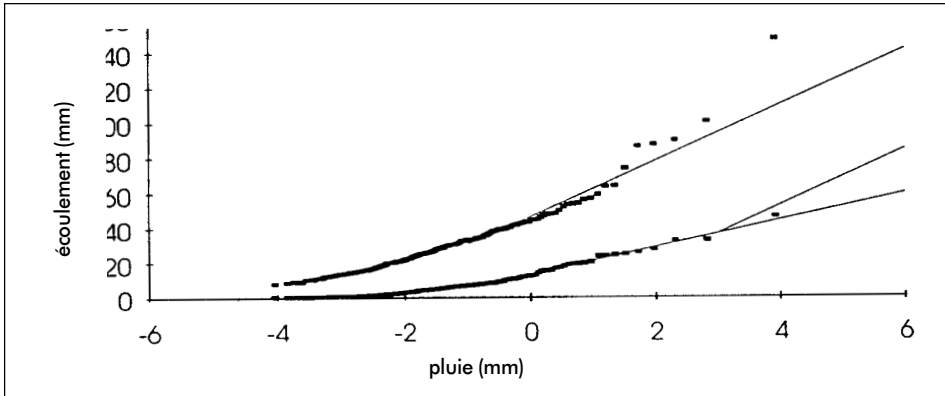


Fig. 1 - Écoulement et pluie de durée 4 heures

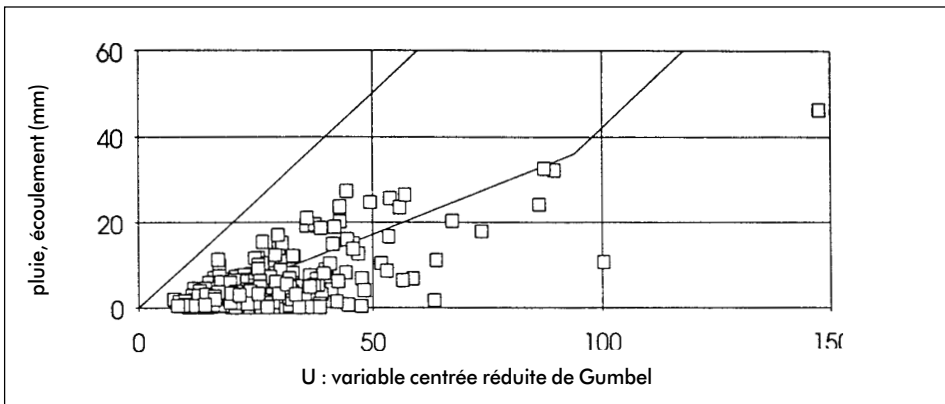


Fig. 2 - Distribution statistique des écoulements et des pluies de durée 4 heures

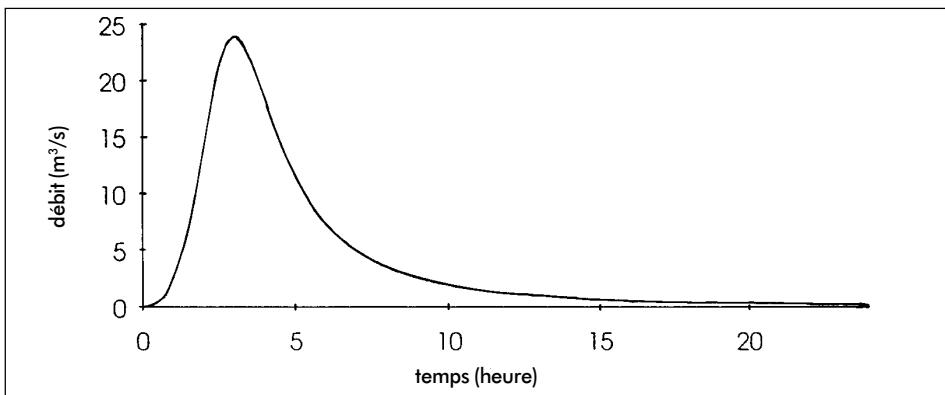


Fig. 3 - Hydrogramme de projet

BIBLIOGRAPHIE

- 1 - Cemagref, 1980 - *Synthèse nationale sur les crues des petits bassins versants ; méthodes SOCOSE et CRUPEDIX*, 3 fascicules, 120 p.
- 2 - Cernesson (F.), 1993 - *Modèle simple de prédétermination des crues de fréquence courante à rare sur des petits bassins versants méditerranéens*, thèse de doctorat, Université des Sciences et Technique du Languedoc, Montpellier, 240 p. + annexes.
- 3 - Cernesson (F.), Lavabre (J.), Masson (J.-M.), 1992 - *Flood simulation from rainfall/runoff modeling*, Symposium dams and extreme floods, Grenade, tome I, pp. 46 - 55.
- 4 - CIGB - ICOLD, 1992 - *Choix de la crue de projet ; méthodes actuelles*, bulletin 82.
- 5 - Duband et al., 1988 - *Évaluation des crues extrêmes et de la crue de projet par la méthode du GRADEX*, 16^e congrès CIGB, San Francisco, vol. IV, Q 63-R 60, pp. 1 009 - 1 047.
- 6 - Francou (S.), Rodier (F.), 1967 - *Essai de classification des crues maximales observées dans le monde*, Cahiers de l'ORSTOM, vol. IV, n° 3, pp. 19 - 46.
- 7 - Guillot (P.), Duband (D.), 1968 - *La méthode du GRADEX pour le calcul de la probabilité des crues à partir des pluies*, SHF, question 1, rapport 7, Paris, 7 p.
- 8 - Lavabre (J.), 1993 - *Prédétermination des crues*, cours à l'ENGREF, Montpellier, 30 p.
- 9 - Margoum (M.), 1992 - *Éstimation des crues rares et extrêmes, le modèle AGREGEE. Conception et premières validations*, thèse de doctorat, École des Mines de Paris, Cemagref, 252 p.
- 10 - Arnaud (P.), Lavabre (J.), 1995 - *Simulation du fonctionnement hydrologique d'une retenue d'eau*, Research and Development in the field of dams. Swiss National Committee on Large Dams, Crans Montana, pp. 641 - 652.
- 11 - CFGB, 1994 - *Les crues de projet des barrages : méthode du GRADEX*, 96 p.
- 12 - Leviandier (Th.) et al. - *Hydrologie appliquée. Tome 1 : méthodes globales et synthétiques*, Cemagref éditeur, à paraître.