

Estimation des débits de crue exceptionnels par l'approche hydrogéomorphologique sur le bassin versant de l'Arc dans les Bouches-du-Rhône

Sébastien DAVID

INGEROP Conseil & ingénierie (IPSEAU®), Agence d'Aix-en-Provence, Domaine du Petit Arbois – Pavillon Laennec – Hall B, 13545 Aix-en-Provence Cedex 4, BP 20056, - sebastien.david@ingerop.com

RÉSUMÉ. – L'approche hydrogéomorphologique, préconisée en France pour la réalisation d'atlas des zones inondables, permet de cartographier les limites des plaines alluviales fonctionnelles des cours d'eau et des différents lits qui les constituent. Certaines de ces unités, ou parties de ces unités, ne sont inondables que de manière exceptionnelle. Les tronçons de vallée, où l'approche hydrogéomorphologique donne des indications nettes, peuvent être utilisés comme tronçons test pour l'évaluation des débits de crues exceptionnelles. La modélisation hydraulique sur ces secteurs donne alors une indication sur les débits hydrogéomorphologiques qu'ont pu générer les bassins versants. La réalisation de modèles hydrauliques sur sept sites du bassin versant de l'Arc (Département des Bouches-du-Rhône, France) a permis de constater que le débit de crue remplissant la totalité de la plaine alluviale fonctionnelle est d'un ordre de grandeur équivalent à deux fois le débit de la crue centennale. Une fonction de production hydrologique en rapport avec la surface drainée semble exister sur l'Arc comme sur l'Argent-Double et l'Orbieu dans l'Aude.

Mots-clés : approche hydrogéomorphologique, crues exceptionnelles

Determination of exceptional rates of flow by geomorphological approach: the Arc's river catchment example

ABSTRACT. – The french Department of Ecology, Sustainable Development and, Energy, recommends geomorphological approach for potential flooding zones mapping. Various floodable units are mapped. Some of them or parts of them are exceptionally flooded. So parts of valley are favourable to determine exceptional rates of flow. The hydraulic model determines the exceptional discharge of flood that covers the entire functional alluvial plain and exceptional floodable units. The implementation of seven hydraulic model for various areas of the Arc's river catchment (department of Bouches-du-Rhône, France) shows that the exceptional rate of flow is approximately twice the 100-year flood discharge. Some hydrological production function seems to exist for the Arc's catchment area, like for the Argent-Double and the Orbieu, other rivers of the South Eastern France.

Key-words: geomorphological approach, exceptional floods

I. INTRODUCTION

L'approche hydrogéomorphologique [Masson *et al.*, 1996], [Durin *et al.*, 2007] permet de définir les limites des plaines alluviales fonctionnelles, c'est-à-dire des parties de vallées encore potentiellement inondables. Les différents lits composant ces plaines correspondent à des espaces dont la période de retour d'inondation est variable. Les parties les plus hautes (limites du lit majeur, lits majeurs exceptionnels, terrasses anciennes inondables) correspondent aux zones exceptionnellement inondables. Les services instructeurs de l'Etat sont de plus en plus souvent amenés à demander une évaluation de la vulnérabilité de projets d'aménagements pour une crue exceptionnelle (digues, urbanisation nouvelle ...) sur ces espaces qui sont souvent hors de la zone inondable par la crue centennale.

A partir d'une expérimentation réalisée sur le bassin versant de l'Arc, on tentera de montrer qu'il est possible, comme cela a été vérifié ailleurs [Delgado, 2006], [Chave, 2003], d'évaluer les débits en mesure d'atteindre les parties

exceptionnellement inondables des plaines alluviales fonctionnelles sur certains secteurs clefs. La démarche a d'abord consisté à récolter les données existantes (hydrologie, topographie, cartographie des zones inondables), puis à réaliser des modèles hydrauliques sur certains secteurs identifiés par approche hydrogéomorphologique. Enfin, on verra quelle est la relation existante entre ces valeurs et les superficies de bassin versant drainées ainsi que les limites de l'approche.

II. PRÉSENTATION DU BASSIN VERSANT ET DES DONNÉES SUR L'ARC

II.1. Caractéristiques du bassin versant

Le bassin versant de l'Arc s'étend sur 695 km². Majoritairement situé dans les Bouches-du-Rhône, l'extrême amont de ce bassin versant est situé dans le département du Var. Ses altitudes s'échelonnent d'un peu plus de 1000 m NGF à 0 m NGF. Ce petit fleuve se jette dans

l'Étang de Berre. La moitié amont est encadrée par d'importants massifs (Sainte-Victoire, Mont Aurélien et Montagne de Regagnas) drainés par les affluents de l'Arc qui s'écoule au fond d'une vaste dépression creusée entre ces massifs. Le cours d'eau traverse ensuite une barre rocheuse avant d'entrer dans le bassin topographique d'Aix-en-Provence où il reçoit quelques affluents importants comme la Luynes, la Jouïne, ... Puis l'Arc entaille le plateau de l'Arbois formant les gorges de Roquefavour au débouché desquelles il aborde sa plaine littorale. Le cours de l'Arc traverse donc une série de trois sous-bassins topographiques.

La géologie du bassin versant est variée. Les terrains qui forment les massifs présentent une dominante calcaire alors que les secteurs de plaine au sein des différents sous-bassins topographiques correspondent à des terrains plus tendres : marnes, argiles, poudingues, molasses d'âge secondaire ou tertiaire.

II.2. Débits de référence

Plusieurs études hydrologiques ont été réalisées sur le bassin versant de l'Arc. La dernière en date [SIEE, 1997] donne des débits de référence qui sont repris par le SAGE (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux) de l'Arc.

Sur le bassin versant du Grand Vallat, qui est un affluent de la Jouïne, elle-même affluent de l'Arc, une étude [IPSEAU, 2006] donne les débits de référence.

Par application de la méthode des transferts, il a été possible d'extrapoler les valeurs de débits centennaux sur des points faisant l'objet d'une modélisation hydraulique, ayant pour but de quantifier le débit morphologique exceptionnel, et pour lesquelles les études précitées ne donnaient pas de valeurs de débit.

Le tableau 1 donne les débits de référence ainsi obtenus.

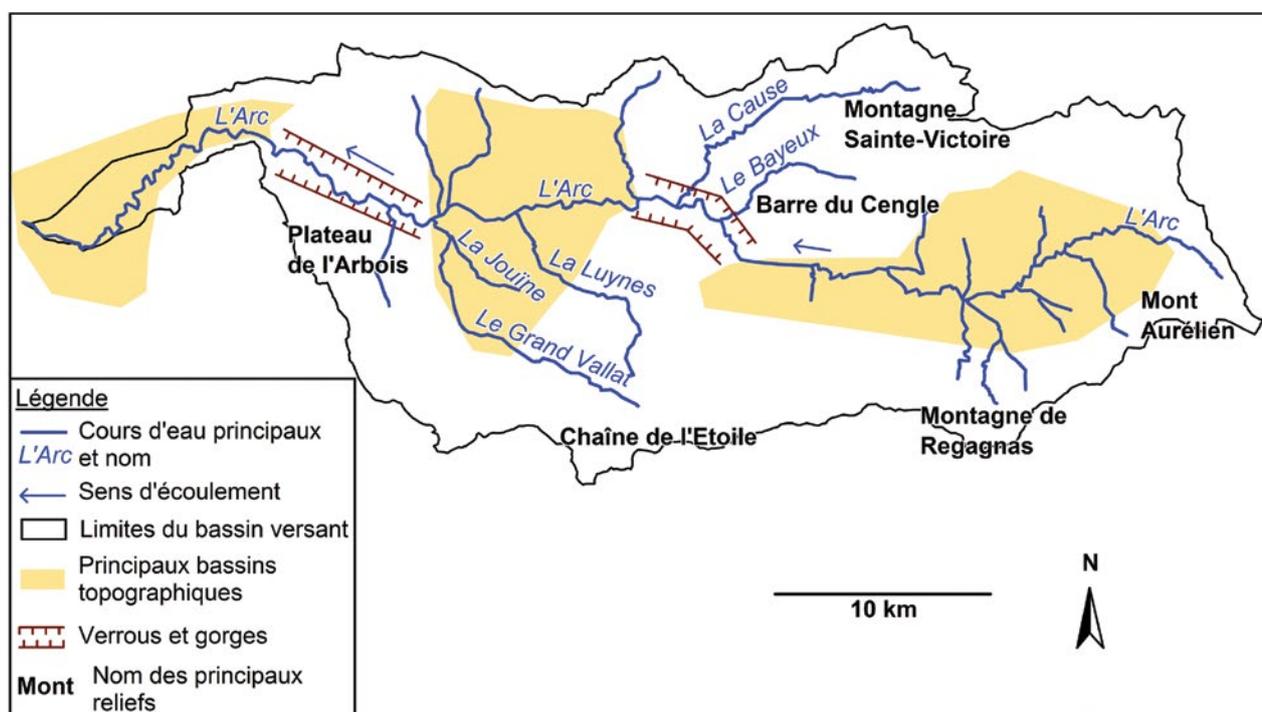


Figure 1 : Réseau hydrographique et structuration topographique du bassin versant de l'Arc.

Tableau 1 : Débits de référence.

Localisation	Superficie (km ²)	Débit décennal instantané (m ³ /s)	Débit centennal instantané (m ³ /s)
Arc à Pourrières	49	45	130
Arc à Trets (amont D56)	128	86	250
Arc au Pont de Bayeux	269	170	480
Arc à Langesse (amont A8)	295	181	511
Arc à Saint Pons	592	260	660
Arc au Pont de Mauran	689	310	710
Vallat de Babol (RD6)	11.3	14	49
Grand Vallat (A51)	33	33	118
Grand Vallat (RD9)	56	50	155
Jouïne (amont voie ferrée)	75	70	198

II.3. Données sur les zones inondables

La cartographie hydrogéomorphologique [IPSEAU, 2004] ayant servi au repérage des sections de contrôle a été réalisée dans le cadre de l'Atlas des zones inondables de la région Provence-Alpes-Côte-d'Azur pour le compte de la DIREN PACA. Cette cartographie et les rapports correspondants sont accessibles par le site internet de la DREAL PACA.

Les zones inondables de l'Arc ont par ailleurs fait l'objet d'études hydrauliques. La première [CERIC-HORIZON, 1991] a permis la production de 240 profils en travers régulièrement espacés du lit mineur et du lit majeur sur la partie du cours d'eau correspondant au département des Bouches-du-Rhône. Une modélisation hydraulique de la crue décennale et de la crue centennale avait également été réalisée. Cette étude constitue, encore aujourd'hui, l'étude de référence sur la majorité des communes. Quelques études plus récentes existent sur les communes d'Aix-en-Provence, Berre-l'Etang et Rousset.

Sur la Jouine et le Grand Vallat, des études hydrauliques [SCPid, 1999], [IPSEAU, 2006] comportent également une abondante couverture topographique des cours d'eau et de leur plaine.

Les données topographiques, ainsi que les lignes d'eau, ont été récupérées et utilisées dans le cadre de la présente expérimentation pour la construction et le calage des modèles hydrauliques.

III. DÉTERMINATION DES DÉBITS DE CRUE EXCEPTIONNELS

III.1. Méthode suivie

La méthode retenue dans le cadre de cette expérimentation consiste à définir, à partir des cartes hydrogéomorphologiques [IPSEAU, 2004], les secteurs de la vallée, ou tronçons test, présentant une aptitude à l'évaluation des débits de crue exceptionnels. Les secteurs les plus favorables sont ceux qui se caractérisent par l'absence de cours d'eau, ou de vallons secs, affluents. Les affluents, en élargissant les

zones inondables et en gommant les indices topographiques (talus), peuvent rendre difficile la distinction des limites géomorphologiques de la zone inondable par le cours d'eau principal. En pratique, ce sont donc souvent des zones de verrous rocheux (entrées de gorges, resserrements de vallée) ou des portions de plaine sans affluents qui seront considérées comme les meilleurs tronçons test.

La méthode consiste ensuite à monter un modèle hydraulique dont la géométrie est définie par des profils en travers avec une extension suffisamment importante pour prendre en compte la totalité de la largeur de la plaine alluviale fonctionnelle. Le logiciel HEC-RAS 4.0 Beta développé par l'US Army Corps of Engineers a ici été utilisé.

Une fois le modèle calé, et les ouvrages (ponts, digues ...), susceptibles d'influencer les lignes d'eau, enlevés du modèle, la simulation avec plusieurs valeurs de débit permet de déterminer le débit naturel capable d'atteindre le niveau de référence fixé par approche hydrogéomorphologique (limites de la plaine alluviale fonctionnelle ou un niveau d'inondation exceptionnel).

III.2. Présentation des sites et des résultats

Sept secteurs (cf. Figure 2) ont été retenus pour la réalisation de cette expérimentation.

Le secteur 1 est situé en amont de la D56, à Trets. Les limites du lit majeur de l'Arc sont nettes bien que plusieurs cours d'eau confluent à cet endroit. Un débit de crue de l'ordre de 500 m³/s mobiliserait intégralement le lit majeur sur le tronçon alors que la crue centennale (250 m³/s) n'en atteint pas les limites.

Le secteur 2, en amont du « Pont de Bayeux », correspond à un brusque resserrement de la vallée constitué par un verrou rocheux. La limite de la plaine alluviale fonctionnelle de l'Arc se situe aux environs de 175 m NGF. Un débit de 920 m³/s permet d'atteindre cette cote (le débit de la crue centennale y est de 480 m³/s).

Le secteur 3, à « Langesse », se caractérise par la présence d'un lit majeur exceptionnel en rive droite. L'altitude de ce lit se situe entre 161,56 et 161,87 m NGF sur la partie amont de

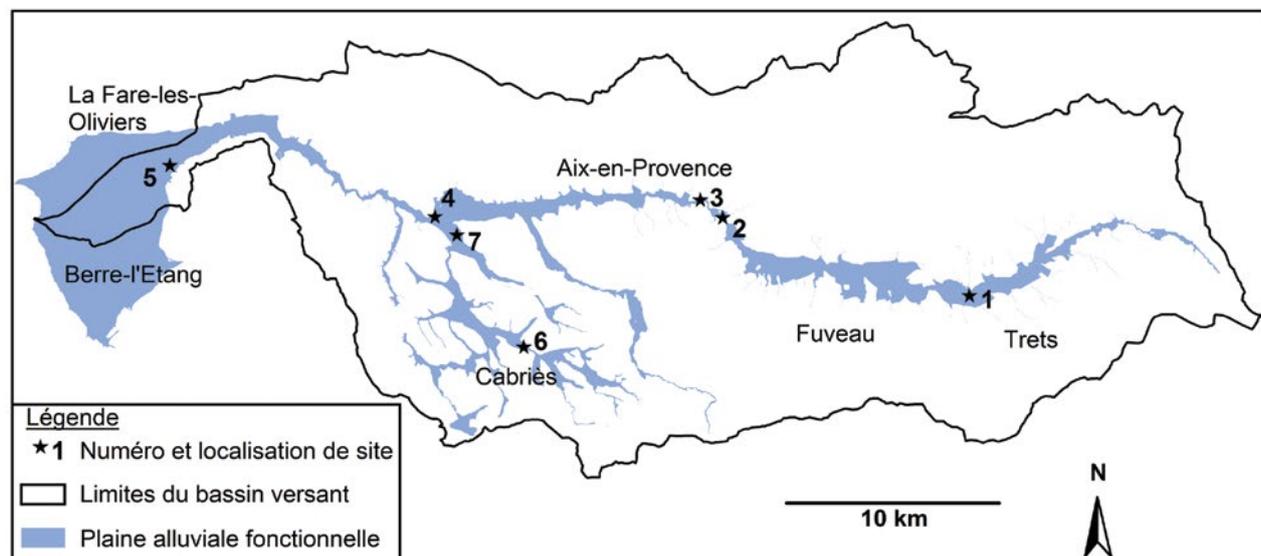


Figure 2 : Localisation des sites d'évaluation du débit hydrogéomorphologique sur le bassin versant de l'Arc.

la forme. Un débit de 965 m³/s inonderait complètement cette surface (le débit de la crue centennale y est de 511 m³/s). La figure 3 présente un profil en travers du site avec les lignes d'eau des crues décennale, centennale et exceptionnelle. La crue décennale reste dans les limites du lit moyen, la crue centennale dans les limites du lit majeur ordinaire et la crue exceptionnelle déborde sur le lit majeur exceptionnel.

Le secteur 4, au « Pont de St-Pons », est marqué par un resserrement important de la vallée en aval de la plaine des Milles. Ce resserrement contrôle en partie le niveau d'eau dans la plaine des Milles. En plusieurs points, la limite de la plaine alluviale fonctionnelle, tant sur l'aval de la plaine des Milles qu'au droit du resserrement du « Pont de St-Pons », se situe aux alentours de 102,5 m NGF. Cette cote serait atteinte pour un débit de 1320 m³/s (le débit de la crue centennale y est de 660 m³/s).

Le secteur 5, en amont du « Pont de la Fare », se distingue par la présence d'une terrasse ancienne en rive droite dont plusieurs indices laissent à penser qu'elle est encore potentiellement inondable par l'Arc. Ce phénomène d'inondation de terrasses a déjà pu être attesté par des crues historiques sur d'autres cours d'eau : Gardons, Vidourle ... Il est dû à l'enfouissement progressif depuis l'aval vers l'amont de la terrasse sous les alluvions holocènes suite à la remontée post-glaciaire du niveau de base marin qui impose à l'Arc d'ajuster sa pente. Un débordement sur la terrasse pourrait se produire à partir d'un débit de 1500 m³/s (le débit de la crue centennale y est de 710 m³/s).

Le secteur 6, de « Pont de Bouc » - A51, à Cabriès sur le Grand Vallat, se caractérise par une plaine alluviale fonctionnelle de faible largeur enserrée par les versants de deux collines puis par un élargissement important de la plaine affectée d'un important axe d'écoulement en crue parallèle au lit mineur qui accidente le lit majeur. Le lit majeur y est donc parcouru de deux grands sillons parallèles constituant des axes d'écoulements préférentiels. Une bonne mobilisation de la plaine d'inondation (atteinte des limites en plusieurs points, mise en eau des deux sillons et de la bande de terrain les séparant) est obtenue avec un débit de près de 240 m³/s (le débit de la crue centennale y est de 118 m³/s).

Le secteur 7, à la confluence entre le Grand Vallat et la Petite Jouine, qui donne naissance à la Grande Jouine, est caractérisé par une zone déprimée en rive gauche, constituant un axe préférentiel d'écoulement en crue, alors que les lits mineurs des cours d'eau sont endigués sur un niveau assez plat en rive droite. Un débit de l'ordre de 390 m³/s

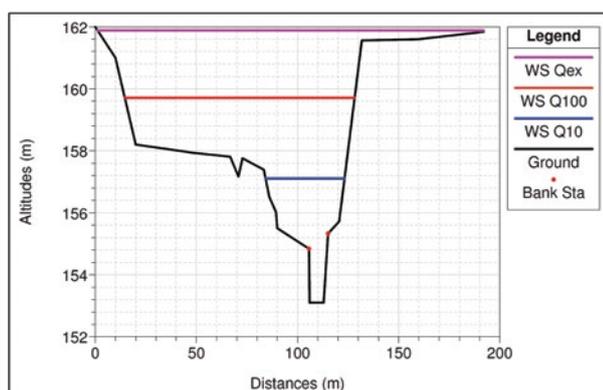


Figure 3 : Lignes d'eau pour Q10, Q100 et Qexceptionnelle à « Langesse » (secteur 3).

permettrait, en même temps que le remplissage de la zone déprimée, l'inondation du replat en rive droite et l'atteinte des limites du lit majeur sur les deux rives. Comparativement le débit de la crue centennale (198 m³/s) ne suffirait pas à remplir la zone déprimée en rive gauche.

La figure 4 présente les variations du ratio débit de crue exceptionnel géomorphologique / débit de crue centennale ainsi que de la période de retour associée aux débits de crue exceptionnels géomorphologiques d'amont en aval. Il en ressort une légère tendance à la baisse du ratio QexHGM / Q100 sur les 40 premiers kilomètres puis une légère hausse sur les 30 derniers. Les variations sont comprises entre 1,88 et 2,11.

Pour les périodes de retour, évaluées par la méthode du Gradex, les 40 premiers kilomètres de cours d'eau se caractérisent par des périodes de retour des événements comprises entre 2500 et 3400 ans. Les périodes de retour augmenteraient ensuite fortement sur l'Arc aval avec une période de retour de 4800 ans au « Pont de Saint-Pons » et d'un peu plus de 10000 ans en amont du « Pont de la Fare ». Cette dernière valeur peut sembler importante et doit être relativisée car une évaluation du débit 10% inférieure conduirait à estimer une période de retour de l'ordre de 4300 ans hors l'Arc aval a vraisemblablement connu un phénomène d'incision de son lit mineur de quelques mètres [IPSEAU, 2009] depuis le Petit Age Glaciaire. Dans ces conditions, on peut penser que le débit géomorphologique exceptionnel sur l'Arc au « Pont de la Fare » est légèrement surévalué, du fait de l'encaissement du cours d'eau, et que sa période de retour est quant à elle plus fortement surévaluée. Il est également probable que la situation soit similaire mais dans une moindre mesure au « Pont de Saint-Pons ».

IV. SYNTHÈSE ET ANALYSE CRITIQUE DES RÉSULTATS ET DE LA MÉTHODE

IV.1. Signification hydrologique des résultats

Les expérimentations effectuées sur les sept secteurs test du bassin versant de l'Arc montrent que l'ordre de grandeur du débit géomorphologique exceptionnel serait d'environ deux fois le débit de la crue de référence centennale. Cet ordre de grandeur parfois utilisé de façon empirique dans le cadre de projets d'infrastructures (ouvrages d'art routiers ou ferroviaires) est ici confirmé.

A l'instar des expérimentations de même type réalisées sur l'Argent-Double et l'Orbieu [Chave, 2003], la mise en relation des débits de crue exceptionnels, évalués par cette approche, avec les surfaces drainées montre également une bonne corrélation sur l'Arc (cf. Figure 5) et l'existence d'une fonction de production hydrologique propre à ce bassin versant.

La relative régularité des résultats semble confirmer la cohérence de la cartographie hydrogéomorphologique réalisée sur le bassin versant de l'Arc, d'une part, et la notion de crue « géomorphologique », apte à remplir la totalité d'une plaine alluviale fonctionnelle et pouvant être retenue comme crue exceptionnelle pour des projets d'aménagement où la connaissance de ces niveaux de crue est nécessaire.

IV.2. Limites d'application et incertitudes

La méthodologie ici proposée présente des limites d'application géographiques dans la mesure où des configurations hydrogéomorphologiques favorables doivent exister pour qu'elle puisse être mise en œuvre et aboutir à des résultats significatifs. Le choix des tronçons test est, comme vu précédemment,

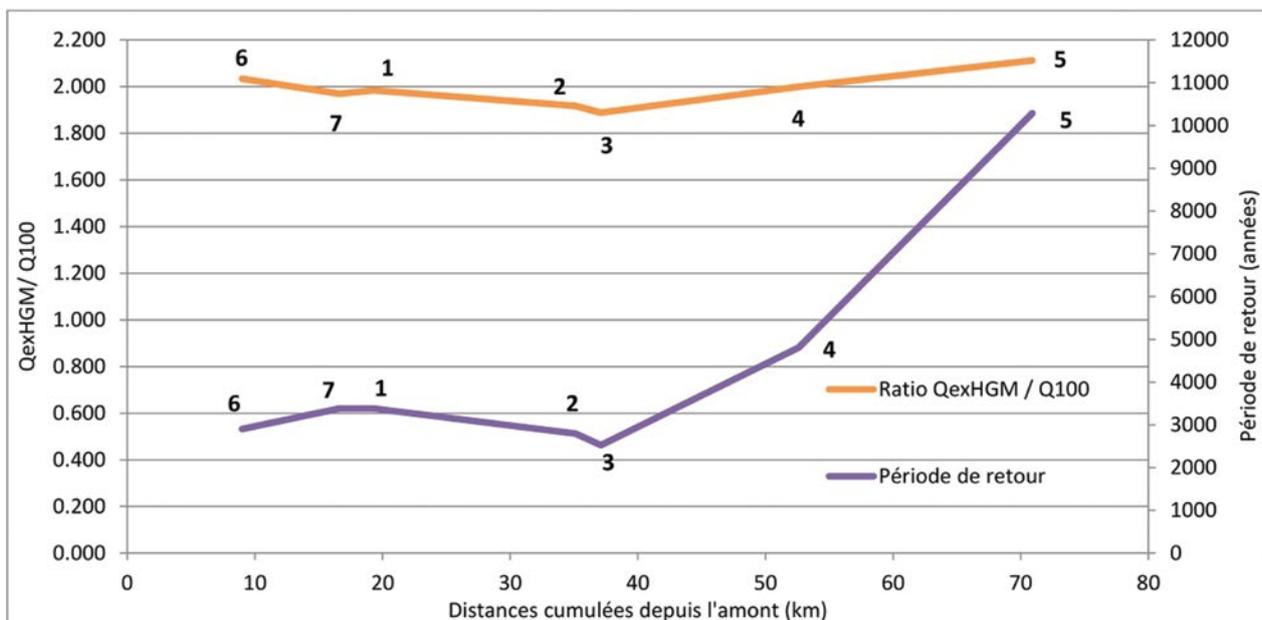


Figure 4 : Mise en relation des ratios débits de crue exceptionnels géomorphologiques (Q_{exHGM}) / débits de crue centennaux, et des périodes de retour associées aux débits de crue exceptionnels géomorphologiques, avec les linéaires de cours d'eau.

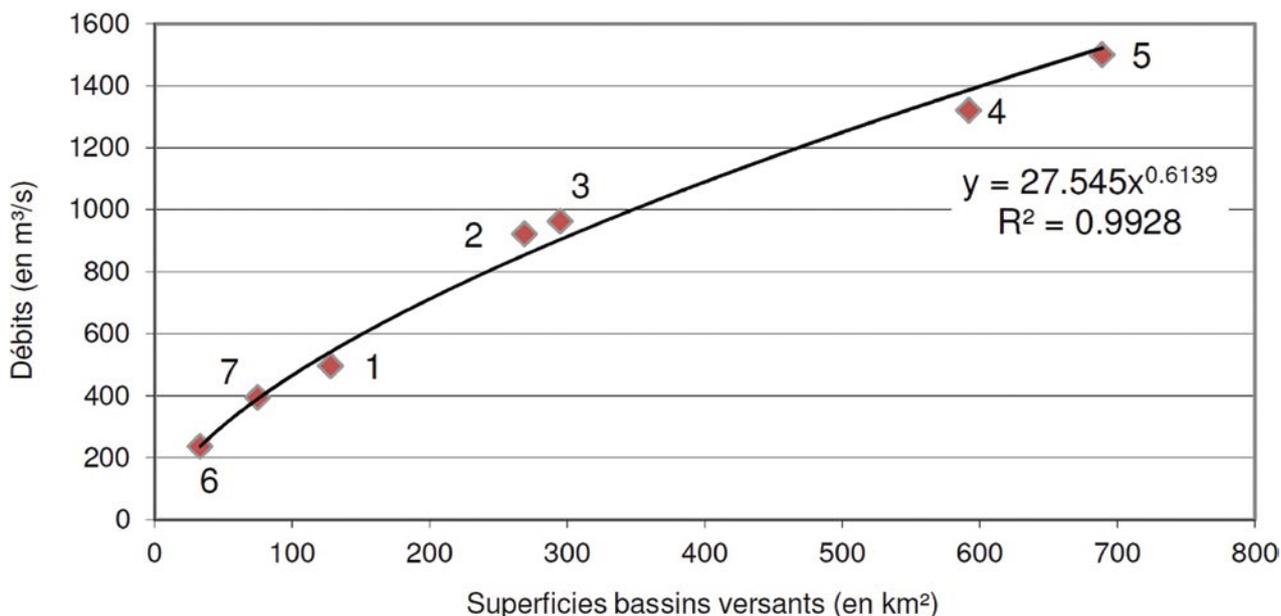


Figure 5 : Mise en relation des débits de crue exceptionnels évalués avec les surfaces drainées sur le bassin versant de l'Arc.

particulièrement important. Ces tronçons ne doivent pas être influencés par des confluences de cours d'eau ou vallons secs dont les zones inondables propres viennent élargir celle du cours d'eau principal et gommer les limites de la zone inondable de ce dernier. Certaines zones particulières, comme les plaines en toit ou les cônes de déjection, où le lit mineur peut être plus haut que le lit majeur ne se prêtent également pas à ces caractérisations. De même des secteurs qui auraient connu des incisions importantes et récentes, des recalibrages majeurs du lit mineur n'apparaissent également pas adaptés à la mise en œuvre de cette approche. Une recherche éclairée de tronçons test pertinents est donc primordiale.

L'étude des débits de crue exceptionnels par cette méthode peut également souffrir des incertitudes et limites des différentes données utilisées ou approches mises en œuvre.

En ce qui concerne la cartographie hydrogéomorphologique, des erreurs d'interprétation, en particulier dans les configurations peu nettes ou complexes peuvent exister et biaiser les résultats. Des évolutions récentes (incision des cours d'eau, recalibrages passés...) peuvent également avoir changé les conditions d'écoulement. La multiplication des tronçons test apparaît donc nécessaire pour lisser ces incertitudes.

En matière de modélisation hydraulique, des incertitudes liées au type de modèle mis en œuvre ainsi qu'aux données

d'entrée et aux paramètres de calage existent. Dans le cas présent, un modèle 1D a été mis en œuvre. Ce type de modèle ne permet pas une représentation fidèle des écoulements dans des cas complexes. Dans ces cas de figure un modèle 2D serait plus adapté mais nécessite des données topographiques plus importantes (semis de points sur l'ensemble de la plaine alluviale fonctionnelle). Dans le cas présent, les données d'entrée topographiques existantes étaient majoritairement des profils en travers. L'implantation, le nombre de ces profils ainsi que leur extension peuvent également influencer sur les résultats de la modélisation. Enfin les coefficients de rugosité choisis conditionnent également les résultats. Dans le cas présent, les coefficients de rugosité des études hydrauliques de référence sur les zones inondables, qui sont des valeurs couramment utilisées dans ce type d'études, ont été repris.

Les données hydrologiques de la bibliographie n'affectent pas directement l'évaluation des débits de crue exceptionnels par la méthode ici proposée. En revanche la comparaison des débits de crue exceptionnels avec les débits de référence centennaux peut souffrir des incertitudes dont ces derniers peuvent être porteurs. Ces débits sont issus de différentes études qui ont utilisé des méthodes d'évaluation différentes (modèle pluie-débit, méthode rationnelle). Les incertitudes sur les pluies de référence ainsi que les superficies découlant de la précision de délimitation des bassins versants, les paramètres appliqués aux bassins versants (temps de concentration, coefficients de ruissellement) affectent les valeurs des débits de référence.

V. CONCLUSIONS

Le calcul de débits de crue exceptionnels géomorphologiques sur les différents secteurs de l'Arc expérimentés montre une homogénéité importante, puisqu'il est pour chaque secteur égal ou proche du double du débit centennal. La mise en relation des débits de crue exceptionnels et surfaces drainées tend à démontrer l'existence d'une fonction de production hydrologique homogène spécifique au bassin versant de l'Arc. Le calcul de ces débits de crue exceptionnels s'appuyant sur des réalités physiques est intéressant dans des secteurs dépourvus de données historiques suffisantes sur les crues exceptionnelles. Le modèle de la plaine alluviale fonctionnelle qui a été façonné par les crues passées

joue alors le rôle d'archives hydrologiques qui peuvent être traduites par la modélisation hydraulique.

VI. REMERCIEMENTS

J'adresse mes remerciements à Sébastien Huard pour ses conseils, ainsi qu'aux relecteurs qui, par leurs remarques et suggestions, ont contribué à rendre cet article plus complet.

VII. REFERENCES

- CERIC-HORIZON (1991) — *Zones inondables de l'Arc de Pourrières à Berre-l'Etang*. Syndicat d'Aménagement du Bassin de l'Arc
- CHAVE S. (2003) — *Élaboration d'une méthode intégrée de diagnostic du risque hydrologique*. Thèse de doctorat, Université de Provence Aix-Marseille I. 284 p
- DELGADO J.-L. (2006) — *Estimation des crues de référence par approche hydrogéomorphologique*. *La Houille Blanche*. 5 : 97-101
- DURIN V., DAVID S., MATHIEU L., MATHIEU J., MICHELS L., BACOU M., GARRY G., RODITIS J.-C., VINDRY R., RENNE M. (2007) — *L'approche hydrogéomorphologique en milieux méditerranéens : une méthode de détermination des zones inondables*. *DIREN PACA, DGUHC*. 59 p
- IPSEAU (2004) — *Cartographie hydrogéomorphologique des zones inondables en région PACA, Département des Bouches-du-Rhône*. *DIREN PACA*
- IPSEAU (2006) — *Synthèse et mise en cohérence des études existantes relatives à l'inondabilité des communes de Bouc-Bel-Air, Cabriès et Simiane-Collongue*. *DDE des Bouches-du-Rhône*
- IPSEAU (2009) — *Etude opérationnelle d'aménagement et de gestion de l'Arc dans la plaine de Berre*. *Syndicat d'Aménagement du Bassin de l'Arc*
- MASSON M., GARRY G., BALLAIS J.L. (1996) — *Cartographie des zones inondables : approche hydrogéomorphologique*. Ministère de l'Équipement, Ministère de l'Environnement, Les Editions Ville et Territoires. 100 p
- SCPID (1999) — *Etude générale du bassin versant de la Jouïne et du Grand Vallat*. *Syndicat d'Aménagement du Bassin de l'Arc*
- SIEE (1997) — *Etude hydrologique et hydraulique : constat - diagnostic*. *Syndicat d'Aménagement du Bassin de l'Arc*