

Prévision des coupures de routes par submersion lors des crues soudaines dans le Gard

Pierre-Antoine VERSINI

*Laboratoire central des ponts et chaussées,
Bouguenais, France*

*GRAHI, Université Polytechnique
de Catalogne*

Éric GAUME*, **Hervé ANDRIEU**

*Laboratoire central des ponts et chaussées,
Bouguenais, France*

■ RÉSUMÉ

Est-il possible de prévoir, lors de crues importantes, quelles routes vont être submergées afin de limiter les risques de dommages matériels et humains et d'orienter les services de secours sur des itinéraires sûrs pour leurs missions d'intervention ? Afin d'étudier les possibilités et les limites actuelles des modèles de prévision hydrologique, un premier prototype de prévision des coupures de routes par submersion lors de crues majeures a été développé par la division Eau et Environnement du LCPC pour le département du Gard. Cette recherche a fait l'objet d'une thèse de doctorat, réalisée en collaboration avec le Cereve (Ecole nationale des Ponts et Chaussées) dans le cadre du projet européen Floodsite (6^e PCRD). Le département du Gard était particulièrement adapté pour ce premier test dans la mesure où il est fréquemment touché par des crues violentes engendrant des submersions de routes et où de nombreuses données recueillies par les services gestionnaires des routes sur ces submersions permettaient un calage et un test du prototype. Les premiers résultats très encourageants obtenus démontrent, au-delà de cette application particulière, que les modèles de prévisions hydrologiques, en particulier les modèles distribués, peuvent avoir une grande utilité pour la gestion des crises, malgré les fortes incertitudes attachées à leurs sorties. Ces possibilités sont encore largement inexploitées par les services de prévision des crues.

Prediction of road closures due to submersion during flash floods in the Gard Department

■ ABSTRACT

Is it possible to predict, during major flooding events, which roads will be submerged, so as to mitigate the risks of property damage and personal injury on the road network and to direct rescue services onto safe itineraries for their emergency response missions? In order to study the possibilities and current limitations of hydrological forecasting models, an initial prototype for predicting road closures due to submersion during major floods has been developed by LCPC's Water Division for the Gard Department in southern France. This research mission has given rise to a doctoral thesis and has been conducted in collaboration with the Cereve Research Institute (ENPC Engineering Center), within the scope of the European project entitled Floodsite (part of the 6th R&D Framework Program). The Gard Department happens to be well suited for this initial test since it frequently experiences violent floods causing roads to be submerged, events for which considerable data have been collected by road operators, thus offering the possibility to calibrate and test the prototype. The first set of results obtained have been promising and demonstrates, beyond this particular application, that hydrological forecasting models (especially of the distributed type) can be of great utility in managing crisis situations despite the high level of uncertainty associated with their output. This potential remains largely untapped by agencies responsible for local flood forecasting.

* AUTEUR À CONTACTER :

Eric GAUME
eric.gaume@lcp.fr

INTRODUCTION

Quarante pour cent des victimes des inondations recensées durant les vingt dernières années sont des automobilistes pris au piège dans leur voiture sur des routes inondées, essentiellement des victimes des crues soudaines dans le sud méditerranéen de la France [1]. Lors des crues du Gard de septembre 2002, un nombre important de véhicules ont été bloqués sur les routes inondées et endommagés ou détruits, dont près de 240 véhicules des services de secours [2].

figure 1
*Un panneau indicateur
sur une route du Gard.*



Ce constat a conduit les services gestionnaires des routes, dans le département du Gard, à engager un recensement des submersions de routes et de leurs fréquences. Ce recensement, le PICH (plan d'intervention des crises hydrologiques), identifie les points du réseau routier sensibles à la submersion, mais ne permet cependant pas de déterminer le risque de coupure de chacun de ces points durant un événement pluvieux et donc les priorités d'intervention. Ce risque de coupure est en effet lié à la répartition des crues sur le territoire et donc à la distribution spatiale et temporelle des pluies. De même, les radios locales se sont organisées suite aux crues de 2002, et relaient les constats de coupures de routes émanant des services gestionnaires ou de particuliers. Ces informations, partielles, permettent de limiter le nombre de voitures qui s'engagent sur des routes inondées mais ne suppriment pas le risque d'accidents liés à l'effet de surprise qui surviennent le plus souvent au début des submersions.

Un outil de prévision des coupures de routes par submersion, fondé sur les prévisions météorologiques et hydrologiques – prévision des crues – manque actuellement pour améliorer la gestion des crises hydrologiques. Un tel outil permettrait de fermer à la circulation des tronçons routiers à risque élevé et de guider les services de secours vers les itinéraires les plus sûrs pour leurs interventions. Une recherche bibliographique montre qu'il n'existe pas actuellement d'exemple d'outils de ce type [3]. C'est donc à une application totalement nouvelle que se sont intéressés le LCPC et le CEREVE. L'approche proposée combine :

- une méthode de caractérisation de la vulnérabilité à la submersion des points de coupure potentielle qui a été développée et testée à partir de l'analyse des données de l'inventaire PICH ;
- un modèle pluie-débit distribué, à même de calculer à chaque instant d'une crue un débit prévu au droit de chaque point de coupure potentielle.

Ces deux composants de l'outil de prévision de coupures, la méthode de combinaison de ces deux informations pour calculer un niveau de risque, ainsi que les résultats du test de cette approche sur cinq crues récentes pour lesquelles un recensement des coupures était disponible sont présentés succinctement dans ce qui suit.

LE CHOIX DU DÉPARTEMENT DU GARD

Le Gard est l'un des départements français les plus fréquemment soumis à des crues méditerranéennes violentes, dites crues éclair ou soudaines. Plusieurs inondations importantes se sont produites ces dernières années, notamment en septembre 2002, décembre 2002, novembre 2003, décembre 2003, novembre 2004, septembre 2005 ou encore septembre 2007. De nombreuses informations pluviométriques, hydrologiques mais aussi concernant la submersion des routes (cartes de routes submergées) existent sur ces crues récentes qui fournissent autant de jeux de données pour tester le prototype.

Par ailleurs, les services de la Direction départementale de l'Équipement ont réalisé un inventaire des points du réseau routier connus pour avoir été submergés au cours des 40 dernières années sur le territoire de certaines subdivisions de l'Équipement : le PICH [4].

Cet inventaire recense 167 points de coupure sur 2500 kilomètres de réseau routier, essentiellement dans la partie ouest du département (**figure 2**). La majorité de ces points (80 %) correspondent à des franchissements de cours d'eau. Le reste des points PICH sont des points bas et des points de côtoiement de cours d'eau qui se sont avérés impossibles à identifier à l'aide d'informations géographiques contenues dans la banque de données TOPO de l'IGN. Ils ont été écartés de l'étude, sachant que leur intégration dans un outil de prévision nécessitera d'autres approches que celle proposée et la prise en compte d'informations spécifiques sur chaque point lorsque celles-ci sont connues. Notons enfin que le PICH recense de nombreux points fréquemment submergés, i.e. les points les plus vulnérables du réseau. Près de la moitié des points PICH ont été inondés plus de 20 fois en 40 ans (**figure 3**). Ces fréquences élevées de submersion ne sont cependant pas nécessairement le fait de défauts de dimensionnement des ouvrages de franchissement comme nous allons le voir dans ce qui suit.

ETUDE DES POINTS DE COUPURE DES ROUTES RECENSÉS

Le croisement du modèle numérique de terrain et du réseau routier permet d'extraire près de 350 points d'intersection entre les réseaux hydrographique et routier dans les 7 fenêtres retenues pour le calage et la validation du prototype, ainsi que les bassins versants – hydrographiques – situés

figure 2
Département du Gard,
localisation des points de
l'inventaire PICH (points
noirs), fenêtres retenues
pour le calage et le test du
prototype.

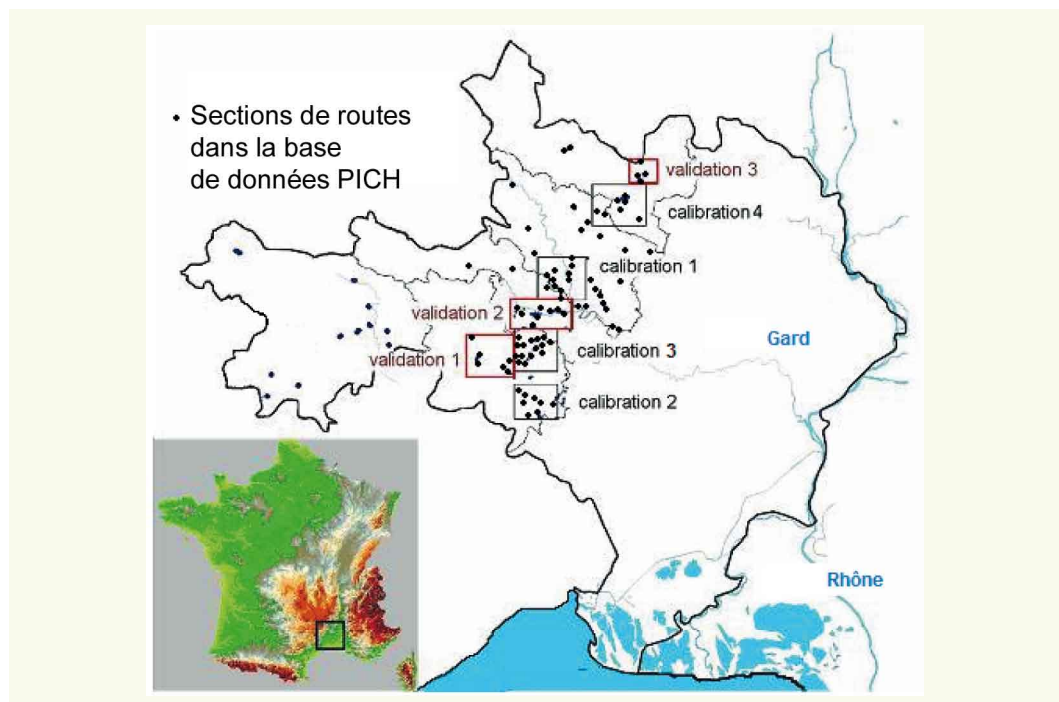
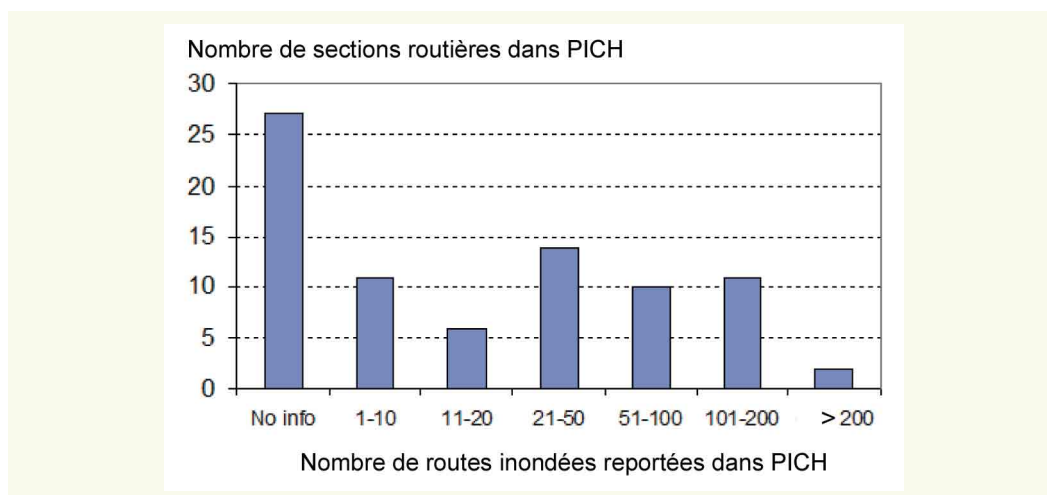


figure 3
Distribution du nombre de submersions recensées durant les 40 dernières années pour les points de l'inventaire PICH.



à l'amont de ces points. Toutes les intersections recensées dans le PICH sont incluses dans cet ensemble.

Quelles sont les spécificités des points les plus fréquemment submergés, *a priori* inventoriés dans le PICH, qui permettraient de calculer un indicateur de vulnérabilité ? C'est la première question qui a été traitée. Pour tester si la fréquence de submersion pouvait être liée au dimensionnement des ouvrages de franchissement – facteur explicatif le plus naturel, le rapport entre le débit capable estimé de ces ouvrages (équation de Manning-Strickler, **équation 1**), lorsque leurs dimensions sont connues, et un ordre de grandeur du débit de période de retour de 10 ans des bassins versants amont (équation de Crupedix, **équation 2** proposée par le Cemagref (1980) et largement validée) a été calculé.

$$Q_c = K \cdot (S/P)^{2/3} \cdot I^{1/2} \cdot S \quad (1)$$

Q_c capacité à pleine section de l'ouvrage (m^3/s), K coefficient de rugosité (fixé à 60), I pente locale (m/m), P périmètre mouillé de l'ouvrage (m), S section de l'ouvrage (m^2).

$$Q_{10} = A^{0.8} \cdot \left(\frac{P_{j10}}{80} \right)^2 \cdot R \quad (2)$$

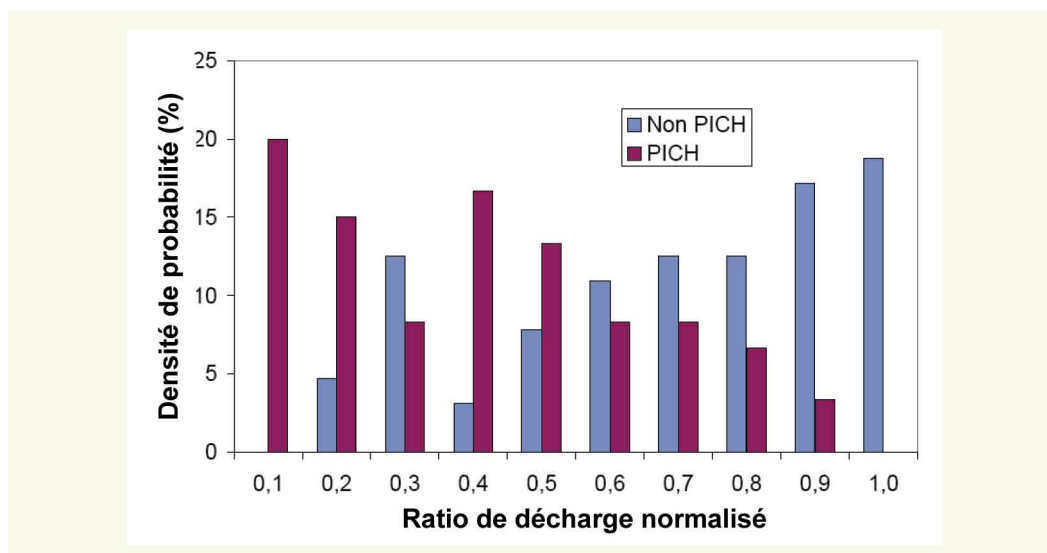
A surface du bassin versant amont (km^2), P_{j10} pluie journalière décennale (mm), R paramètre régional égal à 1,5 pour le Gard.

Ce rapport Q_c/Q_{10} a pu être calculé pour 75 % des points PICH et 25 % des points recensés dans le PICH dits points non PICH. Le lien entre ce rapport et la période de retour de submersion, supposée supérieure à 40 ans pour les points non PICH, apparaît très faible. Toutes les valeurs de rapport Q_c/Q_{10} sont présentes ou presque dans les deux échantillons PICH et non PICH, mais dans des proportions différentes : on observe une proportion plus élevée de faibles valeurs du rapport dans l'échantillon PICH (**figure 4**). De nombreux autres indices potentiellement liés à la vulnérabilité des points coupures ont été testés, mais seuls trois se sont avérés avoir une influence partielle sur cette vulnérabilité, i.e. présenter des distributions de valeurs différentes dans les échantillons PICH et non PICH. Il s'agit de la pente locale, de l'altitude et de la surface du bassin versant amont du point de coupure. Les points du PICH sont préférentiellement situés dans les parties basses des secteurs étudiés, où les pentes locales sont les plus faibles et à l'aval des plus grands bassins versants.

Devant la faible liaison entre les différents indices et le nombre constaté de submersions, et l'impossibilité de calculer un indicateur global de vulnérabilité des points de coupure en fonction de leurs caractéristiques par régression multiple par exemple, une approche plus simple a été retenue. Quatre

figure 4

Comparaison des distributions des rapports Q_c/Q_{10} des échantillons de points PICH et non PICH.



classes de vulnérabilité ont été définies sur la base des valeurs des indices ou d'une combinaison de ces indices : une classe de vulnérabilité « élevée » contenant 20 % des points PICH et si possible aucun point non PICH, une classe « moyenne » contenant 30 % de points PICH supplémentaires, une classe « basse » contenant le solde des points PICH et une classe « quasi nulle » ne contenant idéalement aucun point PICH et une grande majorité des points non PICH.

Le pouvoir discriminant de chaque indice testé se mesure à l'effectif des points non PICH de chacune des classes. Le **tableau 1** compare le pouvoir discriminant de l'indice de débit Q_c/Q_{10} et de la combinaison des trois indices géographiques (altitude, pente locale et surface du bassin versant amont). Nous passons sous silence ici le mode de combinaison retenu pour nous concentrer sur les principales conclusions de cette comparaison.

tableau 1

Pouvoir discriminant des différents indicateurs de vulnérabilité à la submersion en calage (cal.) et validation (val.).

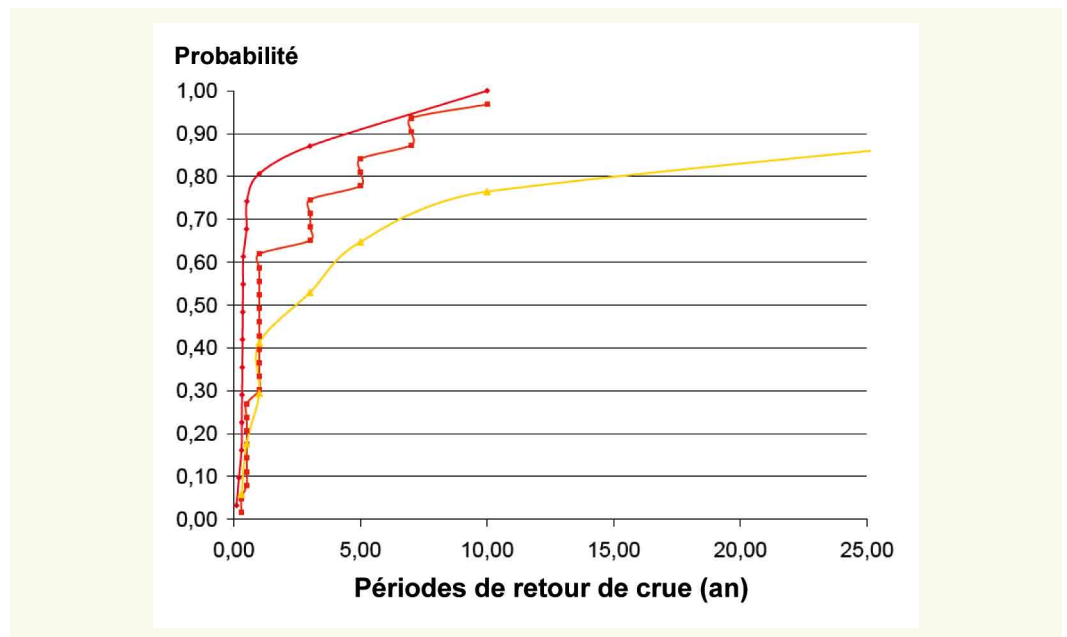
Classe de vulnérabilité	Q_c/Q_{10} cal.		Géographique cal.		Géographique val.	
	PICH	non PICH	PICH	non PICH	PICH	Non PICH
Elevée	20 %	2 %	20 %	1 %	10 %	5 %
Moyenne	30 %	16 %	30 %	15 %	33 %	15 %
Basse	50 %	62 %	47 %	51 %	51 %	52 %
Quasi nulle	0 %	20 %	3 %	33 %	6 %	28 %

Les pouvoirs discriminants de l'indice de débit et de l'indice composé géographique sont comparables sur les secteurs de calage. Le second apparaît même plus performant pour les classes de plus faible vulnérabilité. L'analyse détaillée des configurations de quelques points de coupure explique ce constat [3]. Dans de nombreux cas, lorsqu'une route traverse une vallée avec un lit assez large, configuration que l'on retrouve plutôt dans les parties basses et aval des bassins versants, ce n'est pas l'ouvrage de franchissement qui est submergé, mais la route dans la vallée en rive gauche ou droite de l'ouvrage. Le pont ou le passage busé sont en quelque sorte contournés par les flots. Ceci explique pourquoi les dimensions de l'ouvrage n'expliquent pas nécessairement les fréquences de submersion et pourquoi les routes situées dans les secteurs à relief plus marqué et aux vallées encaissées sans plaine inondable et sans possibilité de contournement des ouvrages de franchissement, sont moins souvent inondées.

Sur les trois secteurs de validation, le pouvoir discriminant de l'indice composé géographique se dégrade très peu, signe de la robustesse et de la pertinence de l'indice proposé. Notons cependant que les secteurs de calage et de validation sont très proches et ont des caractéristiques voisines. L'indice proposé ne peut donc être extrapolé sans vérifications à d'autres régions.

Enfin, on constate aussi que les périodes de retour de submersion des points PICH dans chacune des classes sont cohérentes avec les niveaux de vulnérabilité de ces classes (figure 5), ce qui constitue une autre indication de la pertinence du classement fondé sur l'indice composé géographique.

figure 5
Périodes de retour de submersion des points PICH dans chaque classe de vulnérabilité



En résumé, grâce à l'inventaire PICH, il a été possible de créer des classes de vulnérabilité des points de coupure potentielle. Ce classement résume l'information du PICH mais permet aussi de l'extrapoler à l'échantillon majoritaire de points non PICH. Nous verrons l'importance de cette caractérisation de la vulnérabilité dans ce qui suit.

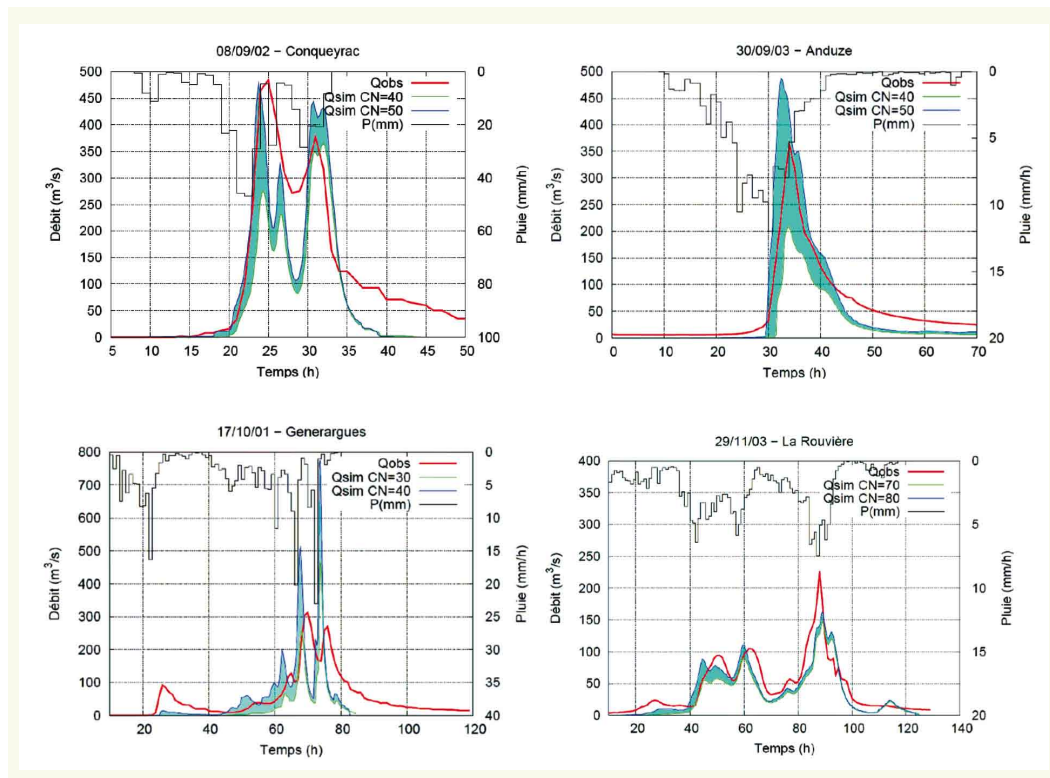
UN MODÈLE HYDROLOGIQUE DISTRIBUÉ

Nous ne détaillerons pas ici les caractéristiques du modèle pluie-débit retenu : CINECAR [5]. Il s'agit d'un modèle distribué qui valorise l'information pluviométrique spatialisée¹ et permet de calculer une valeur de débit à chaque pas de temps de calcul (typiquement 15 minutes) à l'amont immédiat de chaque point de coupure. Ce modèle a été sommairement ajusté et validé à partir des données hydrométriques disponibles sur 12 bassins versants dans la région d'étude. Notons qu'il sera utilisé en complète extrapolation dans la mesure où il n'aura été calé sur aucun des sites correspondants aux points de coupure du réseau routier.

Le principal paramètre d'ajustement du modèle, le *Curve Number* (CN), caractérise l'aptitude à l'écoulement des bassins versants. Plus sa valeur se rapproche de 100, plus le bassin versant répondra rapidement aux pluies et plus les rendements d'écoulement – proportions du volume de la pluie incidente qui rejoint les cours d'eau – seront élevés. L'ajustement du modèle a conduit aux choix suivants : a) la valeur du paramètre CN croît légèrement au cours de l'automne (valeurs différentes pour les mois de septembre-octobre et novembre-décembre), b) la valeur de CN croît avec le cumul de pluie observé durant les 15 derniers jours (une relation a été ajustée), c) une fourchette de valeurs de CN est utilisée pour tenir compte des incertitudes et produire une simulation hydrologique « haute » et une simulation « basse ».

¹ En l'absence de données radar validées pour tous les événements étudiés, les mesures pluviométriques interpolées spatialement ont constitué la donnée d'entrée du modèle pour cette application. Des prévisions pluviométriques n'étaient pas non plus disponibles. L'horizon de prévision se limite donc ici au temps de réponse des bassins versants, typiquement de 15 minutes à plus d'une heure suivant les points de coupure.

figure 6
Exemples de résultats de simulations du modèle hydrologique distribué CINECAR obtenus après calage (gauche) et validation (droite).



La **figure 6** illustre quelques résultats de simulations représentatifs obtenus lors du calage et de la validation du modèle. Ces résultats sont loin d'être parfaits mais se situent dans la gamme des résultats que l'on peut attendre de modèles hydrologiques [6]. La forme générale des hydrogrammes mesurés est correctement reproduite, les pointes de crue relativement bien positionnées dans le temps et les ordres de grandeur des débits maximums généralement respectés. On constate cependant parfois des erreurs importantes, cas de la crue du 10 octobre 2001 du Gardon d'Anduze à la station de Générargues, sans qu'il soit possible de déterminer ce qui du modèle hydrologique, des pluies reconstituées ou des données débitmétriques est à incriminer. Compte tenu des objectifs actuels des services de prévision des crues, prévision à très courte échéance des débits en différents points du réseau hydrographique équipés de stations hydrométriques, ces incertitudes liées à la modélisation pluie-débit sont considérées comme inacceptables, ce qui explique que ces modèles sont encore peu utilisés par les services opérationnels.

PRÉVISIONS DES COUPURES DE ROUTES

Il reste à combiner les informations relatives à la vulnérabilité des points de coupure et celles relatives aux débits simulés pour pouvoir calculer un indice de risque de coupure. En utilisant la formule de Crupedix (voir supra), on peut calculer un ordre de grandeur de la période de retour des débits simulés, sachant que le débit de période de retour 2 ans est environ égal à $Q_{10}/2$ dans le Gard et le débit de période retour 50 ans environ égal à $2 Q_{10}$. D'autre part, on connaît empiriquement la distribution des points de coupure potentielle dans chaque classe de vulnérabilité en supposant qu'elle est supérieure à 40 ans pour les points non PICH (cf. **figure 5**). Il est donc possible de combiner ces deux informations, qui sont du même type, pour calculer pour chaque classe de vulnérabilité et chaque classe de débit, une proportion des points qui seront *a priori* submergés, i.e. une probabilité de submersion des points de la classe (**tableau 2**).

A partir de cette probabilité, des niveaux de risque ont été définis :

- ① risque de submersion très élevé (indiqué en rouge sur les cartes), correspondant à une probabilité de submersion supérieure à 65 %. Ce niveau correspond aux points de la classe de vulnérabilité

tableau 2
Probabilité de coupure des points de franchissement de cours d'eau en fonction de la classe de vulnérabilité et de la classe de débit simulé.

Classe de vulnérabilité	Débit simulé			
	$Q < Q_{10}/2$	$Q_{10}/2 < Q < Q_{10}$	$Q_{10} < Q < 2 Q_{10}$	$Q > 2 Q_{10}$
Élevée	65 %	100 %	100 %	100 %
Moyenne	33 %	55 %	59 %	100 %
Basse	20 %	33 %	34 %	100 %
Quasi nulle	0 %	0 %	0 %	100 %

élevée dès que la période de retour des débits dépasse 2 ans et à tous les points dès que cette période de retour dépasse 50 ans ;

- ② risque élevé (en orange sur les cartes), correspondant à une probabilité de submersion supérieure à 33 % ;
- ③ risque modéré (en jaune sur les cartes) correspondant à une probabilité de submersion supérieure à 20 % ;
- ④ faible dans les autres cas de figure (pas de couleur) et dans le cas où $Q < Q_{10}/4$.

La démarche a été testée dans les trois secteurs de validation en simulant cinq crues récentes. Le **tableau 3** résume les résultats obtenus pour les deux hypothèses hautes et basses de simulation hydrologique. Trois critères ont été calculés sur chaque étude de cas :

- ① Efficacité : proportion des points submergés identifiés comme à risque par le modèle.
- ② Lisibilité : proportion de l'ensemble des points de franchissements non submergés identifiés comme à risque. Ce critère donne une idée du taux de « fausses alertes » et de la possibilité de définir des itinéraires alternatifs.
- ③ Chronologie : proportions des submersions détectées en avance par rapport aux constats de terrain lorsque ceux-ci sont datés.

tableau 3
Performances du modèle de prévision des coupures de routes pour cinq crues récentes (nb coup. : nombre de coupures observées).

	Nb coup.	Pluie (mm)	Efficacité		Lisibilité		Chronologie	
			Basse	Haute	Basse	Haute	Basse	Haute
21/11/03	6	150	100 %	100 %	4 %	15 %	-	-
29/11/03	7	180	100 %	100 %	25 %	30 %	85 %	100 %
17/12/03	0	60	-	-	-	-	-	-
03/11/04	0	100	-	-	-	-	-	-
06/09/05	31	300	58 %	93 %	19 %	27 %	75 %	80 %

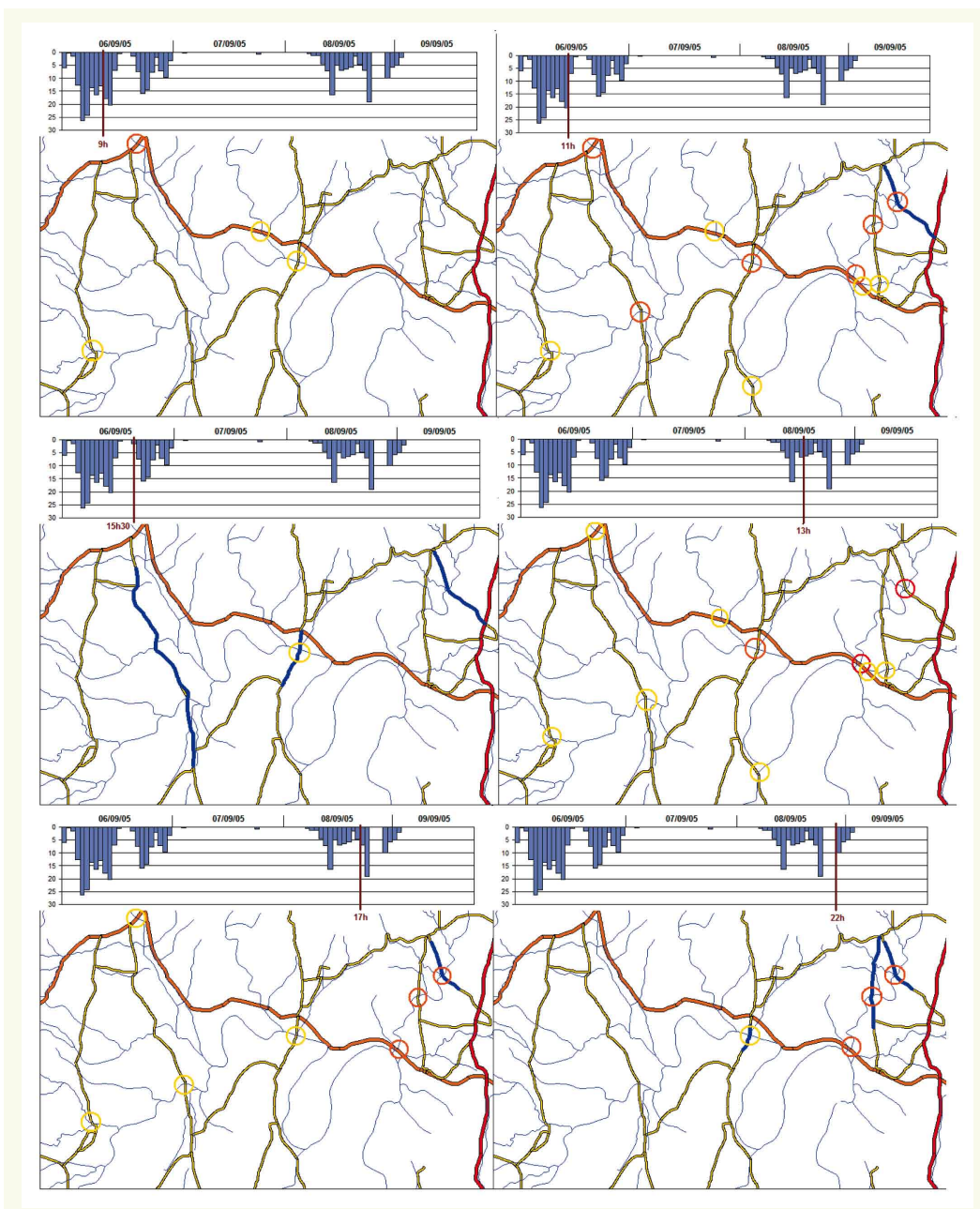
Ces premiers résultats sont extrêmement encourageants à plusieurs titres. D'une part, l'efficacité du prototype est proche de 100 % excepté pour la très forte crue du 6 septembre 2005 qui sollicite fortement le réseau routier. Dans ce dernier cas cependant, seuls deux points ne sont pas détectés par le modèle sous l'hypothèse hydrologique haute et l'un des points détectés ne fait pas partie de l'inventaire PICH, signe que le calcul de vulnérabilité extrapolé aux points non PICH a du sens. Cette efficacité, d'autant plus élevée que les points effectivement submergés sont, le plus souvent, concentrés dans les classes de risque les plus fortes, ne se fait pas au détriment de la lisibilité. Celle-ci reste dans des proportions acceptables, même lors de la crue de 2005. De plus, et conformément aux observations, le prototype ne prévoit aucune submersion lors des deux crues significatives mais plus modestes de décembre 2003 et novembre 2004. Notons que la non prise en compte des classes de vulnérabilité dégrade fortement l'efficacité et la lisibilité des résultats : la caractérisation de la vulnérabilité apparaît comme indispensable. Enfin, le modèle est en général en avance sur les observations.

La **figure 7** permet d'étudier plus en détail ce dernier aspect sur le secteur de validation numéro 2. Les premières alertes ne sont émises qu'à 9h00 le 6 septembre 2005, soit 6 heures après le début des pluies intenses. Le prototype ne réagit donc pas trop rapidement aux pluies. Les alertes se renforcent et se précisent vers 11h00, en particulier dans la zone nord-ouest où les pluies semblent se concentrer. A ce moment, une seule submersion a été constatée, correspondant à une des six alertes orange. Un constat de submersion dressé à 15h30 au moment d'une accalmie, confirmera que deux autres alertes orange concernaient des routes effectivement submergées. Lors du second épisode du 8 septembre, des forts risques de submersion sont identifiés dès 13h00 dans le secteur nord-ouest. Une autre alerte orange est émise un peu plus tard sur un point apparemment moins vulnérable du même secteur. Trois de ces quatre alertes s'avèreront correspondre à des inondations effectives, lors d'un constat dressé à 22h00, après l'interruption des pluies

CONCLUSIONS

Un premier prototype de modèle de prévision des coupures de routes par submersion lors de crues soudaines a été développé et testé dans quelques secteurs du département du Gard. Les premiers

figure 7
Illustration des performances du prototype de prévision des coupures de route dans la zone de validation 2, pour l'épisode du 6 au 9 septembre 2005. Les routes identifiées comme submergées par les services de la voirie apparaissent en bleu.



résultats obtenus sont extrêmement encourageants : taux de détection des coupures proche de 100 %, taux de fausses alertes raisonnable.

Deux éléments semblent indispensables pour assurer de bonnes performances de ce type d'outils au regard des tests qui ont été conduits : le recours à un modèle hydrologique distribué capable d'exploiter les informations disponibles sur la répartition spatiale et temporelle des pluies et la caractérisation de la vulnérabilité des points de coupure potentielle. Du point de vue de l'hydrologie et des services de prévision des crues, ces résultats ouvrent de nouvelles perspectives. Les simulations et prévisions hydrologiques, malgré leurs imperfections, peuvent être d'une grande utilité pour la gestion des crises hydrologiques. Il faut cependant dépasser le cadre des missions actuelles des services de prévision des crues : prévisions limitées à certains points du réseau hydrographique.

De nombreuses améliorations peuvent être apportées à cette première approche parmi lesquelles l'intégration directe dans l'outil des périodes de retour des submersions lorsqu'elles sont disponibles. Ceci permettrait d'intégrer les points de coupures autres que les points de franchissement de cours d'eau. On peut aussi imaginer exploiter les informations pluviométriques quantitatives radar ou des prévisions de pluies si celles-ci sont disponibles, ou bien coupler ce prototype à un logiciel de calcul d'itinéraires routiers. Des premiers tests ont été effectués en ce sens par le Joint Research Center dans le cadre du projet européen Floodsite [7].

Mais avant toute chose, il est nécessaire de pousser plus avant le test et la validation de l'approche proposée. La direction des routes du conseil général du Gard a proposé de tester le prototype sur la crue qui a eu lieu en septembre 2007, plus au sud du département, dans un secteur où ni le modèle hydrologique, ni le modèle de vulnérabilité ont été ajustés et validés. De plus, dans ce cas, des données radar pourraient être utilisées. Voilà un beau défi pour ce nouvel outil.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 **ANTOINE J.-M., DESAILLY B., GAZELLE F.**, Les crues meurtrières du Roussillon au Cévennes. *Annales de géographie*, **622**, **2001**, 597-623.
- 2 **GAUME E., LIVET M., DESBORDES M., VILLENEUVE J.-P.**, Hydrological analysis of the river Aude, France, flash flood on 12 and 13 November 1999. *Journal of Hydrology*, **286**, **2004**, 135-154.
- 3 **HUET P., MARTIN X., PRIME J.-L., FOIN P., LAURAIN C., CANNARD P.**, Retour d'expériences des crues de septembre 2002 dans les départements du Gard, de l'Hérault, du Vaucluse, des bouches du Rhône, de l'Ardèche et de la Drôme. Inspection générale de l'Environnement. Paris. France. **2003**, 124 p.
- 4 **LIGNON S.**, Mise en place du Plan d'Intervention des Crises Hydrologiques (PICH) à la DDE du Gard. Thèse de Master, Ecole des Mines d'Alès, Université de Montpellier, **2004**, 67 p.
- 5 **LUMBROSO D.**, Evacuation and rescue management. Rapport D17.1 du projet de recherche européen Floodsite, Wallingford, Grande-Bretagne, **2007**, 190 pages.
- 6 **MOULIN L.**, Prévision des crues rapides avec des modèles hydrologiques globaux. Application aux bassins opérationnels de la Loire supérieure : évaluation des modélisations, prise en compte des incertitudes sur les précipitations moyennes spatiales et utilisation de prévisions météorologiques. Thèse de doctorat de l'Ecole nationale du génie rural des eaux et des forêts, Paris, **2007**, 653 p.
- 7 **VERSINI P.-A.**, Surveillance du risque hydrologique diffus le long des itinéraires routiers : Eléments pour la construction d'un outil d'annonce de coupure. Thèse de doctorat de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées, Champs-sur-Marne, **2007**, 257 p.