

Une méthode pour anticiper les mises en alerte de crues sur la rivière Thoré (France)

Method for anticipating flood warnings for the Thoré river (Southern France)

L. Audette, C. Marche and M. Alquier

Volume 18, Number 4, 2005

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/705567ar>

DOI: <https://doi.org/10.7202/705567ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (print)

1718-8598 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Audette, L., Marche, C. & Alquier, M. (2005). Une méthode pour anticiper les mises en alerte de crues sur la rivière Thoré (France). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 18(4), 453–470. <https://doi.org/10.7202/705567ar>

Article abstract

This work was designed to contribute to the improvement of flood forecasting, in the context of the French alert system. We propose that the meteorological information contained in the French weather forecast bulletin (Bulletins d'alerte aux précipitations; BAP), produced by Météo-France (French meteorological organization), should be utilized in order to aid the forecasters of the French flood forecasting agencies (Services d'annonce de crues; SAC) to anticipate the timing of an alert associated with an increase in the water level of a river. The goal was to develop an approach to provide the SAC with a real-time operational forecasting tool in order to improve the evaluation of a probable Flood Alert decision. This approach integrates the information contained in the BAP received from Météo-France into the existing flood control process with the use of Duration-Intensity-Warning Time (durée-intensité-temps d'alerte, IDTA) curves for uniform rainfall forecasting, and Intensity-Area-Warning Time curves (intensité-surface-temps d'alerte, ISTA) for localized storm cells.

The rainfall parameters considered were the intensity (I , mm/h), the duration (D , h), and the area of the watershed affected by the rainfall (S , km²). These parameters are related by the equation $V=I \times D \times S$, where V is the volume of rain (mm³). The parameter directly related to the Flood Alert decision is the warning time (T_{alerte}), measured in hours. It is defined as the time from the beginning of the rainfall to the time when the flow at the watershed outlet reaches the alert flow (Q_{alerte} in m³/s), regardless of the maximum discharge (Q_{max}). Although Q_{max} may be an important indicator of the magnitude of the upcoming event, the chief concern is the Flood Alert decision, and therefore, the time to alert parameter (T_{alert}) is of primary importance.

The proposed approach involves creating a graphical connection of a series of rainfall intensity values (I) as a function of a range of rainfall (D) duration values with time to alert (T_{alert}) curves, which represent the I-D couples. As a result, a SAC forecast agent that receives a BAP indicating the quantitative precipitation forecast in a precise region for a defined period will be able to evaluate the time after the start of the rainfall that the alert flow (Q_{alert}) will be reached, simply by referring to the IDTA and/or ISTA curves. If an alert is foreseen within a certain delay, the flood forecast agent can say to receive improved forecasts before making the decision whether to start the flood alert procedures or not.

The construction of the IDTA and ISTA curves requires numerous simulations in order to cover a wide variety of intensity-duration and intensity-area of rainfall couples for which the alert flow (Q_{alert}) will be reached at the watershed outlet, and therefore the time corresponding to this discharge can be estimated. The simulations were performed through the use of a combination of a deterministic distributed parameter hydrological model and a hydraulic one-dimensional hydrograph transfer model. The neuronal models of the Generalized Regression Network (GRNN) type were also used. This allowed for the extraction of and/or interpolation between values in the database containing the parameters intensity, duration, area, and the hydrographs that resulted from the simulations done with the first two models. The interest in using the GRNN model is to cover a large range of values for all of the parameters considered, without having to simulate all cases, therefore reducing the potential computation time.

We developed this forecasting approach on the basis of a specific case related to the extreme flooding that occurred in southern France on November 1999. More precisely, our case study concerns the mountainous region in the upstream area of the Thoré watershed, in the Tarn Department. The simulation scenarios were 1) uniformly distributed rainfall on a watershed of 208 km²; 2) storm cells of 9, 36, 64 and 144 km² located in the watershed center; and 3) a storm cell located in various zones of the watershed.

The main observation of the simulation results was that the T_{alert} was constant for a rainfall of intensity I , as long as the duration was longer than the T_{alert} (i.e., provided it was still raining after Q_{alert} was attained at the outlet). On the other hand, if the rain stops before Q_{alert} is attained, T_{alert} is delayed. T_{alert} increases as a function of the duration of the rainfall, for a constant I . This is true for both uniform and localized rainfall.

The IDTA and ISTA curves were developed on the basis of several simplifying hypotheses and should be improved in order to increase their precision and flexibility. Therefore this approach can be amended by taking into account the following factors:

- infiltration (when the laws defining it are established);
- the initial conditions: since the results of the simulations for this study are valid for constant initial conditions of $Q_{ini}=20$ m³/s, it would be pertinent to include a correction factor to adjust the results (T_{alert}) for the real initial conditions such as the actual Q_{ini} and the actual soil humidity;
- the spatial variability of the storm cells; and
- the combination of uniformly distributed rainfall and localized storm cells. Nevertheless, we evaluated the use of the forecasting approach with the IDTA and ISTA curves referring to the November 1999 events. The contribution of these curves in the Flood Alert decision process was assessed with a fictitious scenario defined by the issued BAP related to this event. Understanding the simplifying hypotheses discussed above, we conclude that the flood alert on the Thoré River watershed could have been advanced up to seven hours and thirty minutes from the actual time it was issued. In a fast or flash flood event, this range of anticipation could have a considerable impact.

Une méthode pour anticiper les mises en alerte de crues sur la rivière Thoré (France)

Method for Anticipating Flood Warnings for the Thoré River (Southern France)

L. AUDETTE^{1*}, C. MARCHE², M. ALQUIER³

Reçu le 25 novembre 2003, accepté le 7 janvier 2005**.

SUMMARY

This work was designed to contribute to the improvement of flood forecasting, in the context of the French alert system. We propose that the meteorological information contained in the French weather forecast bulletin (Bulletins d'alerte aux précipitations; BAP), produced by Météo-France (French meteorological organization), should be utilized in order to aid the forecasters of the French flood forecasting agencies (Services d'annonce de crues; SAC) to anticipate the timing of an alert associated with an increase in the water level of a river. The goal was to develop an approach to provide the SAC with a real-time operational forecasting tool in order to improve the evaluation of a probable Flood Alert decision. This approach integrates the information contained in the BAP received from Météo-France into the existing flood control process with the use of Duration-Intensity-Warning Time (durée-intensité-temps d'alerte, IDTA) curves for uniform rainfall forecasting, and Intensity-Area-Warning Time curves (intensité-superficie-temps d'alerte, ISTA) for localized storm cells.

The rainfall parameters considered were the intensity (I , mm/h), the duration (D , h), and the area of the watershed affected by the rainfall (S , km²). These parameters are related by the equation $V = I \times D \times S$, where V is the volume of rain (hm³). The parameter directly related to the Flood Alert decision is the warning time (T_{alerte}), measured in hours. It is defined as the time from the beginning of the rainfall to the time when the flow at the watershed outlet reaches the alert flow (Q_{alerte} in m³/s), regardless of the maximum discharge (Q_{max}). Although Q_{max} may be an important indicator of the magnitude of the upcoming event, the chief concern is the Flood Alert decision, and therefore, the time to alert parameter (T_{alert}) is of primary importance.

1. École Polytechnique de Montréal, 1801, avenue McGill College, Bureau 1060, Montréal (Québec), H3A 2N4, Téléphone : 514.844.8900 poste 2051 - Télécopieur : 514.844.6948.
2. Département de génie civil, hydraulique, École Polytechnique de Montréal, C.P. 6079, Succ. Centre-ville, Montréal, (Québec), H3C 3A7 - Courriel : claude.marche@polymtl.ca - Téléphone : 514.340.4711 poste 4801 - Télécopieur : 514.340.2989.
3. Institut de Mécanique des Fluides (IMFT), Groupe HYDRE, Allée du Professeur Camille-Soula, 31400 Toulouse, France - Courriel : michel.alquier@imft.fr - michel.alquier@enseiht.fr - Téléphone : 33 05 61 28 58 40 - Télécopieur : 33.05.61.28.58.99

* Correspondance : lynda_audette@hotmail.com

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 30 août 2006.

The proposed approach involves creating a graphical connection of a series of rainfall intensity values (I) as a function of a range of rainfall (D) duration values with time to alert (T_{alert}) curves, which represent the I-D couples. As a result, a SAC forecast agent that receives a BAP indicating the quantitative precipitation forecast in a precise region for a defined period will be able to evaluate the time after the start of the rainfall that the alert flow (Q_{alert}) will be reached, simply by referring to the IDTA and/or ISTA curves. If an alert is foreseen within a certain delay, the flood forecast agent can wait to receive improved forecasts before making the decision whether to start the flood alert procedures or not.

The construction of the IDTA and ISTA curves requires numerous simulations in order to cover a wide variety of intensity-duration and intensity-area of rainfall couples for which the alert flow (Q_{alert}) will be reached at the watershed outlet, and therefore the time corresponding to this discharge can be estimated. The simulations were performed through the use of a combination of a deterministic distributed parameter hydrological model and a hydraulic one-dimensional hydrograph transfer model. The neuronal models of the Generalized Regression Network (GRNN) type were also used. This allowed for the extraction of and/or interpolation between values in the database containing the parameters intensity, duration, area, and the hydrographs that resulted from the simulations done with the first two models. The interest in using the GRNN model is to cover a large range of values for all of the parameters considered, without having to simulate all cases, therefore reducing the potential computation time.

We developed this forecasting approach on the basis of a specific case related to the extreme flooding that occurred in southern France on November 1999. More precisely, our case study concerns the mountainous region in the upstream area of the Thoré watershed, in the Tarn Department. The simulation scenarios were 1) uniformly distributed rainfall on a watershed of 208 km²; 2) storm cells of 9, 36, 64 and 144 km² located in the watershed center; and 3) a storm cell located in various zones of the watershed.

The main observation of the simulation results was that the T_{alert} was constant for a rainfall of intensity I , as long as the duration was longer than the T_{alert} (i.e., provided it was still raining after Q_{alert} was attained at the outlet). On the other hand, if the rain stops before Q_{alert} is attained, T_{alert} is delayed. T_{alert} increases as a function of the duration of the rainfall, for a constant I . This is true for both uniform and localized rainfall.

The IDTA and ISTA curves were developed on the basis of several simplifying hypotheses and should be improved in order to increase their precision and flexibility. Therefore this approach can be amended by taking into account the following factors:

- infiltration (when the laws defining it are established);
- the initial conditions: since the results of the simulations for this study are valid for constant initial conditions of $Q_{\text{ini}} = 20 \text{ m}^3/\text{s}$, it would be pertinent to include a correction factor to adjust the results (T_{alert}) for the real initial conditions such as the actual Q_{ini} and the actual soil humidity;
- the spatial variability of the storm cells; and the combination of uniformly distributed rainfall and localized storm cells.

Nevertheless, we evaluated the use of the forecasting approach with the IDTA and ISTA curves referring to the November 1999 events. The contribution of these curves in the Flood Alert decision process was assessed with a fictitious scenario defined by the issued BAP related to this event. Understanding the simplifying hypotheses discussed above, we conclude that the flood alert on the Thoré River watershed could have been advanced up to

seven hours and thirty minutes from the actual time it was issued. In a fast or flash flood event, this range of anticipation could have a considerable impact.

Keywords : *flood, forecasting, alert, flooding, rainfall, France, neuronal models, hydrological model, flash floods.*

RÉSUMÉ

Cet article présente les conclusions d'une recherche visant l'amélioration de l'annonce des crues, et son application à la rivière Thoré, dans le contexte du système d'alerte français. On y exploite les informations météorologiques contenues couramment dans les bulletins d'alerte aux précipitations [BAP] émis par Météo-France, dans le but d'aider les prévisionnistes du Service d'annonce de crues [SAC] à anticiper l'atteinte de la cote d'alerte sur une rivière. Le travail présenté fait partie d'une approche visant à munir les SAC d'outils prévisionnels fonctionnant en temps réel et aptes à prévenir d'une mise en alerte probable. L'approche préconisée conduit à une utilisation directe des informations contenues dans les BAP reçus des services de météorologie dans le processus de surveillance des crues. C'est au moyen de courbes d'intensité-durée-temps d'alerte [IDTA], préalablement établies pour des prévisions de pluies uniformément réparties, et de courbes d'intensité-surface-temps d'alerte [ISTA] pour les prévisions relatives à des cellules orageuses localisées, que l'approche proposée est développée.

Mots clés : *crues, prévision, alerte, inondation, précipitation, France, modèles neuronaux, modèle hydrologique, crues rapides.*

1 – INTRODUCTION ET CONTEXTE DE L'ÉTUDE

C'est dans le contexte des événements pluvieux d'intensité extrême qui se sont récemment abattus sur la France et dans certains pays limitrophes, et à la suite des inondations des 12 et 13 novembre 1999 dans les régions du Tarn, de l'Hérault, des Pyrénées-Orientales et de l'Aude, que le ministère français de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement [MATE] a initié les travaux d'une vaste étude concernant ces nuisances. Le but était alors de mieux orienter les efforts de prévention des inondations, dont l'intensité et la fréquence semblent être à la hausse. La prévision des crues est bien sûr l'un des objectifs majeurs de l'hydrologie. Les travaux sont orientés soit vers la caractérisation statistique des crues, soit vers la prévision du déroulement de la crue (MAIDMENT, 1993). La mise en alerte est souvent considérée comme un objectif de ce dernier aspect. Dans ce contexte post événementiel le rapport, émis par LEFROU *et al.* (2000), recommandait au terme de cette étude : « [...] la révision de l'organisation de l'alerte pour tenir compte de la rapidité et de l'intensité des phénomènes météorologiques et hydrologiques du sud-est de la France ».

Le présent article présente certains résultats importants obtenus dans le cadre du projet *Prévention et anticipation des crues au moyen des techniques spatiales* [PACTES] (ASTRIUM et IMFT, 2000), grâce à des travaux partiellement réalisés à l'Institut de mécanique des fluides de Toulouse [IMFT] et à l'École Polytechnique de Montréal.

Dans la première partie de cet article, nous donnons une très brève description du système de gestion des crues en France. Par la suite, nous présentons la démarche entreprise dans cette étude ainsi que les résultats importants qui en émanent, le tout suivi par la présentation d'un exemple d'application traitant d'un cas réel d'inondation, afin d'illustrer la contribution de cet outil d'anticipation d'alerte. Ceci nous amène à proposer certaines recommandations concernant l'outil prévisionnel et à identifier les possibilités de prolongement de ce travail.

2 - RÉSUMÉ DU SYSTÈME DE GESTION DES CRUES EN FRANCE

2.1 Structure du système de gestion des crues

La structure du système de gestion des crues en France implique, en 1999, un grand nombre d'intervenants ayant plusieurs types d'interactions formelles ou informelles entre eux (AUDETTE, 2001). Elle est établie à l'échelle nationale et peut être résumée selon l'organigramme de la figure 1.

Ce système de gestion des crues comporte trois niveaux d'activités relevant chacun d'une entité décisionnelle, tel que présenté au tableau 1.

Tableau 1 Structure du système français de gestion des crues.

Table 1 Structure of the French Flood Management Organization System.

Catégories	Noyau décisionnel
Prévision météorologique	Météo-France
Prévision de crues	Service d'annonce des crues (SAC)
Mobilisation des secours	Service interministériel de défense et de protection civile [SIDPC] (Préfecture) & Mairie

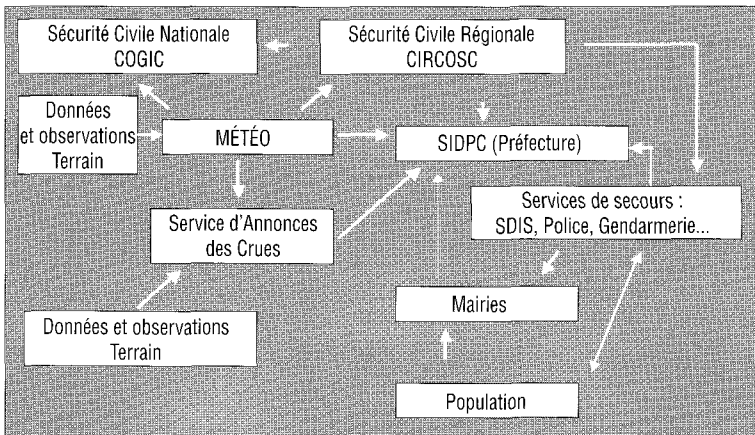


Figure 1 Schéma de la structure du système de gestion des crues en France. *Flood Management Organization System in France.*

La pratique de la gestion des crues, dans son fonctionnement à l'échelle régionale, devient localement spécifique et adaptée à chaque cas.

2.2 Mise en alerte

La responsabilité légale d'enclencher la *Mise en alerte*, ainsi que les opérations qui en découlent, appartient au Préfet du département concerné. La décision fait suite à une recommandation expresse émise par les prévisionnistes d'astreinte au SAC. Ceux-ci ne procèdent à cette recommandation que lorsque le niveau d'une rivière jaugée a effectivement atteint une cote d'alerte préalablement définie. Les rivières ayant une cinétique de montée des eaux bien établie ont également des cotes de pré-alerte et/ou de vigilance. Ceci permet d'anticiper l'atteinte de la cote d'alerte et donc de favoriser la préparation, l'organisation et le déploiement des secours. En revanche, d'autres rivières à cinétique rapide présentent un véritable problème en terme de temps de réaction puisqu'il appert que lorsque la rivière atteint sa cote d'alerte, le temps disponible pour procéder effectivement à la *Mise en alerte*, c'est-à-dire prévenir les citoyens et mobiliser les secours, est trop court, voire inexistant. De plus, certaines ne font l'objet d'aucune surveillance et aucune mise en alerte n'est possible avant qu'une inondation n'ait lieu.

Le but des recherches et essais effectués est donc de développer une approche qui permette de résoudre le problème de la mise en alerte aux crues de certaines rivières à cinétique rapide en favorisant l'anticipation de l'alerte, tout en évitant ou en minimisant les éventuelles fausses alertes pouvant singulièrement altérer la crédibilité des prévisionnistes. La version actuelle de cette approche est détaillée ci-dessous.

3 – DESCRIPTION DE L'APPROCHE POUR ANTICIPER LA MISE EN ALERTE DE CRUES

L'approche qui est présentée dans cet article vise à intégrer certaines informations météorologiques ciblées dans le processus décisionnel de mise en alerte. Leur rôle actuel n'est que de confirmer qualitativement une tendance. Or, il est en effet apparu possible, en analysant plusieurs événements, d'utiliser les prévisions météorologiques disponibles (même si elles sont parfois peu précises), pour anticiper une alerte de crue, et donc augmenter le temps disponible pour la mobilisation des secours.

L'analyse des événements vécus sur plusieurs bassins aux caractéristiques bien spécifiques a servi à développer une démarche en 4 étapes, soit : la caractérisation des pluies, la caractérisation des crues, leur modélisation et la synthèse globale de la réponse du bassin. Le potentiel en est illustré sur un cas concret, soit l'amont du bassin versant de la rivière Thoré, dans le département du Tarn (Midi-Pyrénées). Cette rivière présente un intérêt particulier puisque la zone n'est pas couverte par un Service d'annonce de crue et les conditions topographiques locales très accidentées (zone montagneuse) la rendent, par

l'effet orographique, sensible aux crues rapides. La zone à l'étude s'étend depuis la commune de Labastide-Rouairoux jusqu'à Mazamet, 28 km plus bas, ce qui représente une superficie drainée d'environ 208 km², et fut affectée gravement par les inondations de novembre 1999.

3.1 Paramètres de pluie à considérer

C'est en étudiant les Bulletins d'alerte aux précipitations (BAP) que l'on a déterminé quels pouvaient être les paramètres de la pluie qu'il serait pertinent de considérer. Essentiellement, les BAP sont émis lorsque les seuils d'alerte de cumul de pluie (définis par région) sont atteints ou si on prévoit les atteindre (AUDETTE, 2001). Ces BAP donnent le cumul (J-1), soit la lame d'eau déjà tombée, la plage de cumul (plage de lame d'eau à tomber, prévue pour une période déterminée), le cumul maximal (lame d'eau maximale prévue pour une période déterminée) et la durée de l'événement (début-fin) (période couvrant la prévision).

Le cumul [mm] indiqué sur les BAP traduit le produit des paramètres d'intensité [I en mm/h] avec la durée [D en heures].

On peut ainsi interpréter les informations contenues dans les BAP, à l'exception, pour le moment, du cumul de pluie tombée à J-1. Le cumul tombé à ce jour (J-1) est une information fort pertinente notamment pour tenir compte de l'évolution des conditions et pour évaluer la justesse des prévisions antérieures. Toutefois, ce paramètre requiert en soi une attention rigoureuse et, par mesure de prudence, il n'a pas été exploité dans la présente approche (il le sera dans une phase ultérieure de la recherche). L'outil prévisionnel qui est développé ici vise un seul événement orageux associé à des conditions hydrographiques initiales sur le bassin versant qui sont uniformes. La variabilité de ces dernières impliquerait un réajustement des résultats en fonction de leur évolution. Ainsi, par exemple, l'effet d'un orage générant une lame d'eau de 40 mm en quelques heures sur une rivière peut être très différent selon le débit de base et l'occurrence d'une averse. Le cumul d'hydrogrammes implique une étude poussée, permettant le calage de paramètres physiques tels que l'infiltration, ce qui est pertinent mais estimé non essentiel à cette étape de notre étude. Se positionnant donc dans un contexte d'une crue engendrée par une seule averse, le paramètre de cumul à J-1 n'est pas pris en compte.

3.2 Paramètres de crue à considérer

Considérant que, dans le système actuel de gestion des crues, la *Mise en alerte* se fait à partir de cotes d'alerte, il est naturel que le premier paramètre de la crue à considérer dans la présente démarche soit le débit correspondant à cette cote d'alerte. On le nomme *débit d'alerte* (Q_{alerte}). Par ailleurs, se situant dans le contexte où l'on veut anticiper sur le moment où ce débit d'alerte sera éventuellement atteint, le second paramètre que l'on considère est le temps, soit le temps d'alerte (T_{alerte}). On définit T_{alerte} comme étant le délai entre le début de la pluie et celui où Q_{alerte} est atteint. Par analogie au débit de pointe (Q_{max}), T_{alerte} est au Q_{alerte} ce que le temps de montée ($T_{\text{montée}}$) est au Q_{max} , tel que schématisé à la figure 2.

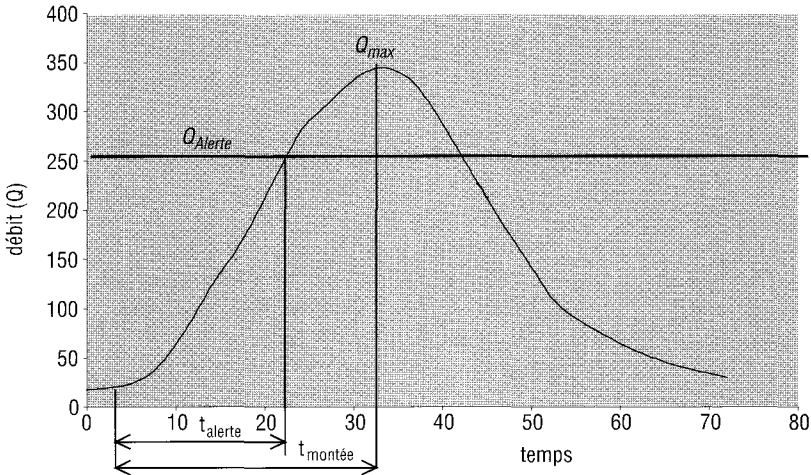


Figure 2 Paramètres de la crue : Q_{alerte} .
Flood Parameters: Q_{alert} .

3.3 Modélisation et scénarii de simulation

Les petits bassins versants non instrumentés comme celui visé par la présente étude, ne peuvent être caractérisés à partir d'un nombre important de données événementielles de qualité. Pour pallier cet inconvénient, leur comportement est défini en compensant le manque de données par une prise en compte des caractéristiques physiographiques plus facilement disponibles. Une modélisation distribuée à base physique, même simple, sur certains aspects tels que par exemple en ce qui touche l'infiltration, permet de relier les paramètres de la pluie contenus dans les BAP au paramètre de la crue (T_{alerte}). En procédant à la simulation de différents scénarii de pluie, on dispose de l'hydrogramme de crue à l'exutoire et il est alors possible de déterminer les valeurs de Q_{alerte} et de T_{alerte} correspondantes. Plusieurs modèles de ce type existent et ont été comparés dans le cadre de ce projet (ESTUPINA-BORREL, 2004). Le Modèle « *Modélisation de l'anticipation du ruissellement et des inondations pour les événements extrêmes* » (MARINE) a été retenu pour procéder à l'étude. Les résultats ont ensuite été traités au moyen d'un modèle neuronal d'interprétation (réseau de neurones artificiels) (SIMPSON, 1996) développé au laboratoire d'Hydraulique de l'École Polytechnique de Montréal, dans le but de mieux comprendre le rôle principal de tous les paramètres. Un tel modèle permet en effet de pondérer les interactions entre chacun des paramètres retenus, par apprentissage automatique sur un ensemble de données couvrant approximativement la plage des valeurs attendues de ces paramètres, tout en limitant significativement le nombre de simulations requis. On dispose ainsi d'un interpréteur de haut niveau permettant, entre autres, d'évaluer les relations entre intensité et durée, entre superficie couverte par une pluie, et temps d'alerte pour un débit d'alerte spécifié.

À la suite de cette interprétation étendue, deux interpréteurs ont été développés. Le premier permet de produire les valeurs d'intensité, durée et T_{alerte} ,

pour un débit d'alerte spécifié dans le cas d'une pluie uniformément distribuée sur le bassin. La seconde peut fournir, selon une intensité de pluie associée à une superficie particulière de cellule orageuse centrée sur le bassin versant, le temps auquel le débit d'alerte sera atteint (T_{alerte}).

3.4 Scénarii de simulation

Pour fournir à ces interpréteurs des données suffisantes et de qualité, des scénarii de simulations ont été fixés en respectant l'information telle que Météo-France est actuellement habilitée à la fournir, soit les éléments normalement contenus dans les BAP : le cumul, le cumul maximal et la durée. Également, considérant les avis partagés quant à l'impact de la répartition spatiale de la pluie, deux scénarii sont considérés afin d'observer cet impact sur le bassin Thoré. Il est donc apparu que trois scénarii de pluies simulées devaient être étudiés de manière détaillée, soit :

1. Pluies uniformément réparties sur le bassin versant (208 km²)

Des simulations de pluies de diverses intensités (cumuls et durées), uniformément réparties sur le bassin versant sont requises pour définir les ordres de grandeur du T_{alerte} correspondant. Il s'agit de considérer une matrice de pluie couvrant entièrement la superficie du bassin versant et produisant une lame d'eau constante sur chaque pixel, tel que schématisé à la figure 3.

2. Cellules orageuses de différentes superficies, localisées au centre du bassin

Des simulations portant sur des cellules de pluies localisées au centre sont considérées afin d'évaluer le T_{alerte} associé à des orages ponctuels intenses (cumul maximal ponctuel), en fonction de leur superficie.

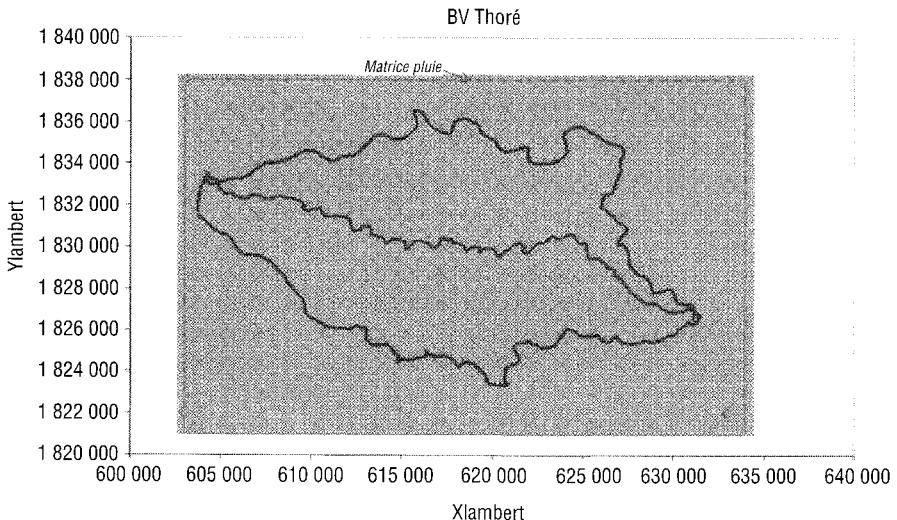


Figure 3 Pluie uniformément répartie.
Uniformly Distributed Rainfall.

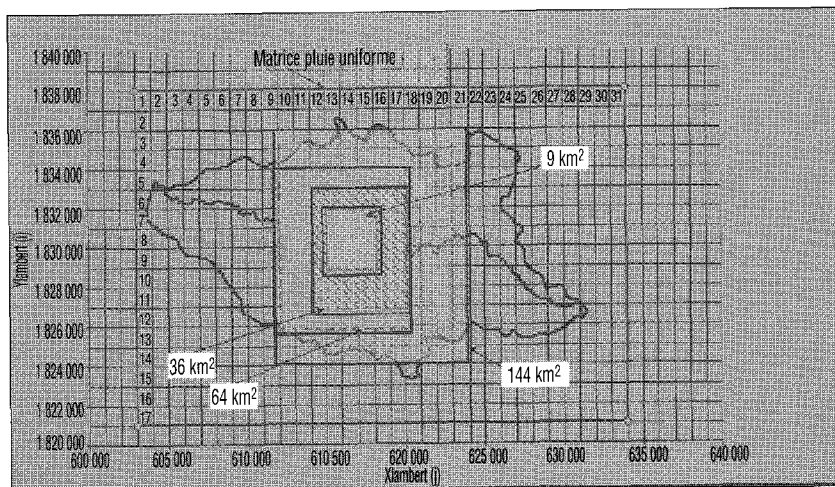


Figure 4 Pluie localisée au centre du bassin.
Storm Located at the Center of Basin.

3. Cellules orageuses identiques mais localisées en différents endroits

On tente enfin d'évaluer la sensibilité de la réponse du bassin (T_{alerte}), à la variabilité spatiale de la pluie. En effet, plusieurs auteurs, dont DAWDY et BERGMAN (1969), WILSON *et al.* (1979), BEVEN et HORNBERGER (1982), CORRADINI et SINGH (1985), KRAJEWSKI *et al.* (1991), SELIGA *et al.* (1992) et TROUTMAN (1983), semblent appuyer l'affirmation selon laquelle la trajectoire des cellules orageuses est un élément très important à considérer dans les simulations hydrologiques. OBLED *et al.* (1994) encouragent ainsi l'utilisation de modèles distribués tels que MARINE, par rapport aux modèles globaux. Par contre, ces derniers estiment que la variabilité spatiale de la pluie peut avoir un impact sur l'hydrogramme d'un bassin rural de taille moyenne (100 à 1 000 km²), telle que celle du bassin Thoré (208 km²). L'impact est cependant beaucoup moins significatif que sur les bassins de grandes superficies.

Pour tenter d'évaluer cet impact dans le cas du Thoré, on produit des cellules orageuses que l'on fait agir à l'amont, au centre, puis à l'aval de la rivière comme indiqué à la figure 5.

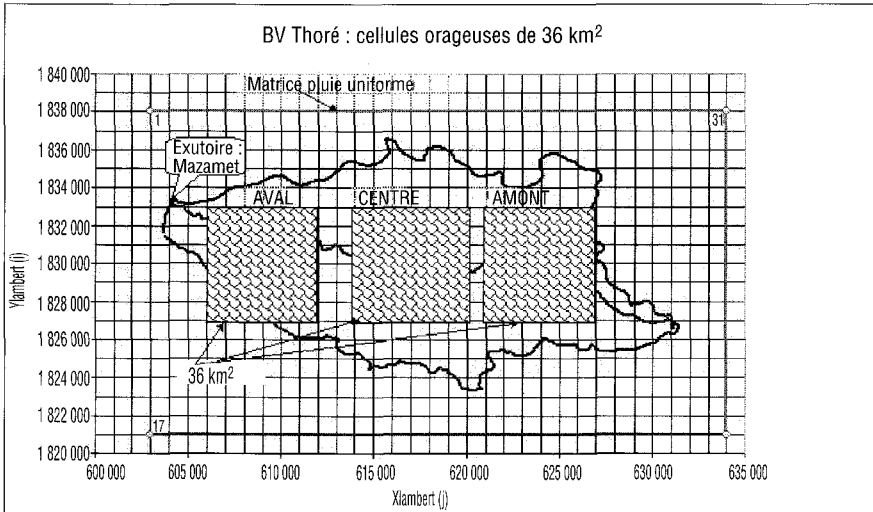


Figure 5 Cellule orageuse à différents endroits.
Storm Cell at Different Locations.

4 - SYNTHÈSE ET RÉSULTATS

Les résultats de ces simulations ont permis de relier les paramètres de la pluie contenus dans les BAP, au premier paramètre de la crue (T_{alerte}). Ce lien est illustré au moyen de courbes d'intensité-durée-temps d'alerte [IDTA] (figure 6), pour des pluies uniformément réparties sur le bassin, ou de courbes d'intensité-superficie-temps d'alerte [ISTA] (figure 7), pour des cellules orageuses localisées en son centre.

4.1 Courbes IDTA

Ainsi, selon les courbes IDTA (figure 6), le temps d'alerte associé au débit d'alerte spécifié, est évalué en fonction de l'intensité et la durée d'une pluie. Dans le cas d'un Q_{alerte} de $250 \text{ m}^3/\text{s}$, on observe, entre autres, qu'il n'y a pas de T_{alerte} ($T_{\text{alerte}} \rightarrow \infty$) lorsque l'intensité moyenne est inférieure à $3,1 \text{ mm/h}$. Cela signifie simplement que, sur ce bassin, toute prévision de précipitation ayant une intensité moyenne inférieure à $3,1 \text{ mm/h}$, ne permettrait pas d'atteindre le débit d'alerte (Q_{alerte}), indépendamment de la durée de la pluie.

De plus, à la figure 6, on peut constater que, pour une intensité donnée, le T_{alerte} tend vers une valeur constante pour des pluies de plus longue durée. Cela revient à dire que pour les longues pluies (ex. $D > 10$ heures), le T_{alerte} peut être déterminé par le seul paramètre d'intensité et qu'en situation de veille de crue, ce T_{alerte} sera inévitablement atteint.

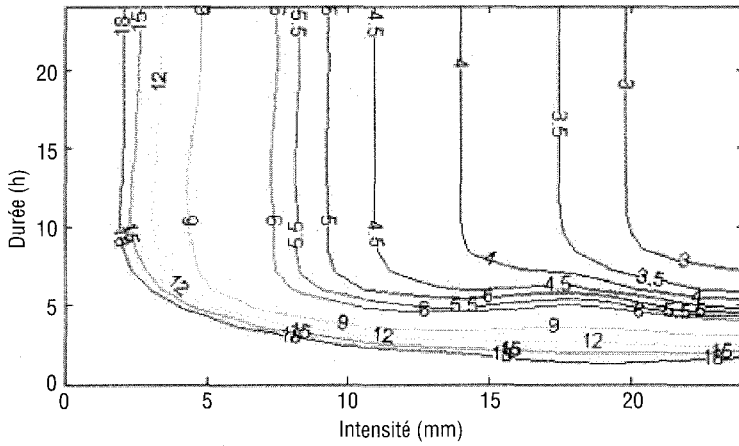


Figure 6 Courbes intensité-durée-temps d'alerte (IDTA).
Intensity-Duration-Time to Alert Curves (IDWT).

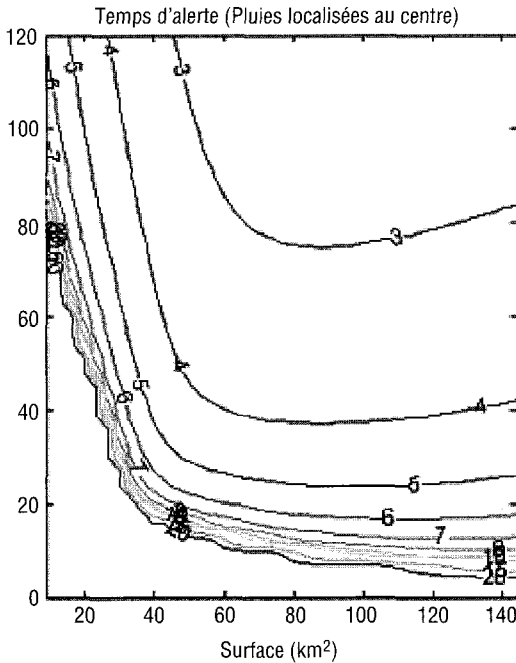


Figure 7 Courbes intensité-surface-temps d'alerte (ISTA).
Intensity-Area-Time to Alert Curves (IAWT).

4.2 Courbes ISTA

Dans le cas des cellules orageuses (courbes ISTA), un nouvel élément doit être considéré, soit la taille de la cellule orageuse (S_{cell}). Considérant l'importance du paramètre intensité dans les cas de cellules orageuses, on a tenté de relier les couples intensité-superficie au T_{alerte} . Ce sont donc des courbes intensité-superficie-temps d'alerte [ISTA] qui ont été élaborées, au lieu des courbes IDTA. Dans ces conditions, on doit poser l'hypothèse d'une durée de pluie supérieure au T_{alerte} , afin de disposer d'un T_{alerte} constant par rapport à l'intensité et variable seulement par rapport à la superficie de la cellule orageuse (S_{cell}). La figure 7 présente les courbes ISTA obtenues.

Puisque les courbes ISTA sont construites à partir de quelques cellules orageuses de superficies inférieures à 144 km^2 , le modèle neuronal n'est pas défini en dehors de ces limites. Néanmoins, les courbes retenues illustrent entre autres, la sensibilité du T_{alerte} à l'intensité de la pluie des cellules orageuses de petites superficies ($< 40 \text{ km}^2$ ou 20 % de superficie totale dans le cas du Thoré). Il suffit alors de préciser au modèle la surface de la cellule orageuse, l'intensité et le Q_{alerte} . Enfin, il est également possible d'avoir une idée de l'ampleur de la crue en obtenant le débit maximal à l'exutoire, pour une cellule d'une intensité et d'une durée particulières.

Il importe de noter que la méthode proposée résulte de certains choix dictés par le contexte. Il est clair qu'une utilisation en temps réel du modèle hydrologique pourrait servir à l'alerte. Toutefois, cette approche n'est pas envisageable pour au moins deux raisons : la première tient au temps de calcul et surtout d'analyse et de validation des résultats, requis après chaque simulation – incompatible avec une gestion en situation d'urgence ; la seconde est liée au fait que les prévisionnistes ne sont pas forcément des hydrologues et sont peu préparés à faire usage de tels modèles. Ainsi, grâce aux courbes IDTA et ISTA, le prévisionniste qui reçoit un BAP indiquant un cumul de pluie prévue pour une certaine durée (donc connaissant son intensité moyenne), peut avoir une indication importante quant à la possibilité d'atteindre prochainement une cote d'alerte et dans combien de temps, le cas échéant.

5 – EXEMPLE DE MISE EN ALERTE ANTICIPÉE GRÂCE AUX COURBES IDTA

Plusieurs exemples d'événements, permettant de vérifier l'application de l'outil d'anticipation d'alerte élaboré au terme de cette recherche, ont été identifiés dans les dernières années. L'événement sélectionné afin d'illustrer la méthode proposée a affecté tout le sud de la France, et notamment le bassin de la rivière Thoré, en novembre 1999.

5.1 Mise en alerte réelle

Selon le rapport post-crise de LEFROU *et al.* (2000), la mise en alerte sur ce bassin s’est amorcée dès le 12 novembre à 20 h 00, à la suite d’un appel envoyé au maire par un riverain de Saint-Amans-Soult (situé près du centre du bassin, à environ 10 km à l’amont de Mazamet, voir la figure 8). Suivant une série d’inondations subies dans diverses communes (Saint-Amans-Soult, Aussillon, Labastides-Rouairoux, etc.) un poste de commande [PC] de crise a été mis sur pied par la Préfecture du département du Tarn, le 13 novembre à 04 h 30 et le plan d’organisation des secours [ORSEC] a été enclenché à 06 h 00 le 13 novembre (comme le montre le chronogramme de la figure 9).

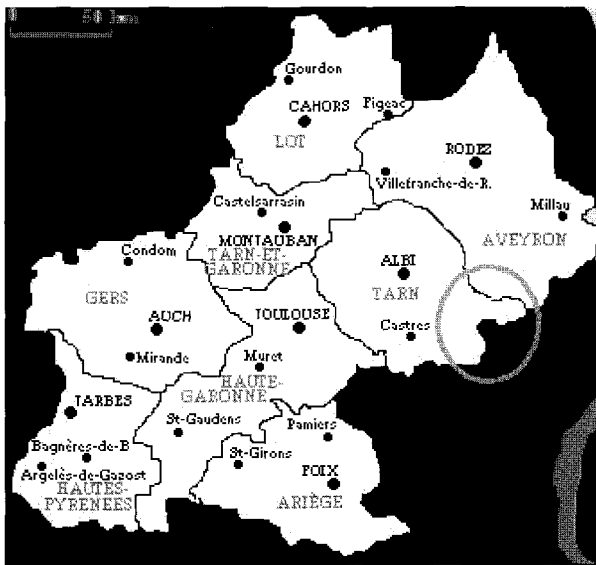


Figure 8 Localisation des inondations de novembre 1999, rivière Thoré.
Location of the November 1999 Flooding, Thoré River.

CHRONOGRAMME MISE EN ALERTE RÉELLE										
12-Nov										
Heure	3:00	4:30	5:30	6:00	11:00	19:00	19:30	20:00	21:00	22:00 23:00 0:00
Activités	Début de la pluie selon les relevés			Début de la pluie selon BAP1		- 1er BAP		Appel au Maire de St-Amans-Soult	Alerte à St-Amans-Soult	
13-Nov										
Heure	3:00	4:30	5:30	6:00	11:00	19:00	19:30	20:00	21:00	22:00 23:00 0:00
Activités		- PC de crise - Plan ORSEC			- 3e BAP					

Figure 9 Chronogramme de Mise en alerte réelle sur le Thoré en novembre 1999.
Chronograph of Flood Alert Activities of November 1999 Event on Thoré River.

5.2 Mise en alerte fictive en fonction des Bulletins d'alerte aux précipitations

En reprenant ce scénario de *Mise en alerte réelle*, on a tenté d'évaluer l'apport probable des courbes IDTA-ISTA dans de telles circonstances. Ainsi, selon les informations contenues dans les BAP émis, un premier cumul est prévu de l'ordre de 40 à 60 mm sur 24 heures, avec une pointe maximale de 100 mm. Ce type de pluie est qualifié de « fortes précipitations » et peut occasionner d'importantes crues, telles que celles fréquemment observées dans la région des Cévennes (RIVRAIN *et al.*, 1997). Si on considère cette pointe sur l'ensemble du bassin (pluie uniforme), ceci se traduit par : $I = 4,2$ mm/h et $D = 24$ heures et les courbes IDTA (figure 6) proposent qu'un Q_{alerte} soit atteint à Mazamet environ 9 heures après le début de la pluie. Puisque selon le BAP, le début de la pluie est estimé autour de 6 h 00, le T_{alerte} serait alors prévu vers 15 h 00, le 12 novembre, soit 4 h 30 avant l'appel du riverain de Saint-Amans-Soult (figure 10).

Mais si elles avaient été diffusées, des indications sur les conditions qui prévalaient sur le terrain, combinées aux prévisions du BAP et des courbes IDTA, auraient pu, même dans ce contexte, inciter le prévisionniste à enclencher la *Mise en alerte* vers 12 h 00, soit 7 h 30 avant l'appel du riverain au maire de Saint-Amans-Soult.

Il est hasardeux de spéculer sur la réaction des autorités dans de telles conditions de crise. Néanmoins, on peut admettre dans ce scénario que, à la suite d'une telle mise en alerte plus précoce, les autorités auraient été davantage au fait de la situation et auraient pu commencer à gérer la crise avant que ne se produisent les inondations à Saint-Amans-Soult.

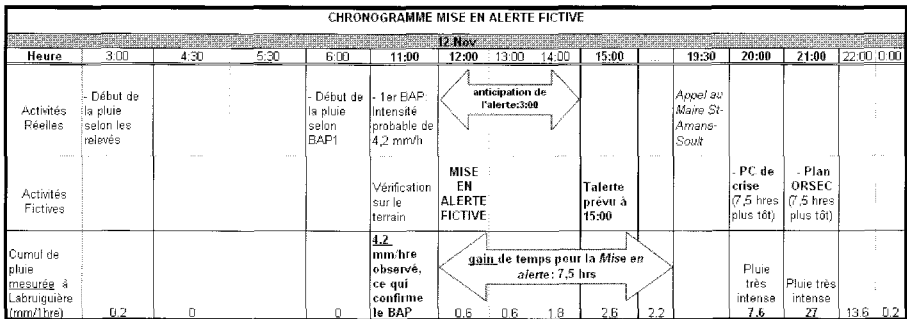


Figure 10 Chronogramme de Mise en alerte sur le Thoré avec courbes IDTA.
Chronograph of Flood Alert Activities on Thoré River with IDWT.

6 – DISCUSSION

L'exemple des inondations de novembre 1999 traité précédemment illustre l'apport potentiel des courbes IDTA-ISTA dans la surveillance des crues. Il semble qu'un gain de temps et une meilleure confiance dans les informations disponibles (vu le suivi sur le terrain), soient possibles dans les prises de décision. Il en résulterait une meilleure organisation des secours et une plus grande efficacité dans les interventions.

Par ailleurs, le principal risque dans ce contexte de *Mise en alerte* repose sur l'interprétation, que fait le prévisionniste, des informations dont il dispose. Dans l'exemple précédent, le premier bulletin d'alerte indique un cumul de l'ordre de 40 à 60 mm de pluie pour les 24 prochaines heures, ce qui représente une intensité moyenne de 2,5 mm/h (en considérant le pire des cas : 60 mm). Selon les courbes IDTA (figure 6), nous avons vu précédemment que dans le cas du Thoré, une pluie d'intensité inférieure à 3,1 mm/h n'engendrerait pas un Q_{alerte} . Ainsi, si le prévisionniste s'en tient à ces informations et interprétation, il n'a pas de raison de croire en une alerte probable. C'est la pointe maximale localisée, de 100 mm sur 24 heures (4,2 mm/h) qui, par les courbes IDTA, signale un Q_{alerte} probable. N'ayant pas de spécification sur la localisation de cette pointe, dans le pire des cas on peut supposer qu'elle couvre tout le bassin (au risque d'accroître le têt de fausses alertes), d'où le recours aux courbes IDTA et non ISTA. Les interprétations des informations fournies par le BAP et des courbes IDTA ou ISTA deviennent alors cruciales. Ces interprétations pourront susciter un besoin d'informations additionnelles, notamment sur les conditions qui prévalent sur le terrain, afin de mieux statuer sur la situation et limiter ces alertes inutiles.

Ceci fait ressortir, d'une part, l'importance de corroborer les prévisions avec la réalité observée sur le terrain. Dans ces conditions, la contribution des courbes IDTA-ISTA sera significative dans la mesure où, parallèlement à leur implantation, on instaure un processus de validation des prévisions en demandant par exemple, le concours des citoyens à titre d'observateurs aux points stratégiques du bassin versant.

D'autre part, les courbes IDTA-ISTA donnent une information précise, soit le T_{alerte} , mais à la fois incertaine. En effet, le T_{alerte} est évalué à partir d'un traitement d'informations biaisées (prévision météorologique, approximation de la réponse du bassin) et dont le biais n'est pas quantifié. Par exemple, on ne dit pas qu'il y aura une alerte probable dans 9 heures plus ou moins 3 heures avec une fiabilité de 70 %. Un rigoureux travail d'estimation de la fiabilité des résultats et d'analyse d'erreur serait nécessaire pour ce faire, et la pertinence de cette information additionnelle est discutable.

En effet, si l'on donne une information incertaine et que l'on quantifie son incertitude, est-ce que l'on fournit alors une information plus certaine ? En d'autres mots, si on dit qu'il y aura une alerte dans 9 heures plus ou moins 3 heures et que ceci est probable à 40 %, le prévisionniste sera-t-il plus ou moins soucieux de s'informer des conditions sur le terrain, que si on lui dit tout simplement qu'une alerte est probable dans 9 heures et que, par défaut, il sait que cette information est probable mais incertaine ?

À défaut de pouvoir quantifier l'incertitude sur le T_{alerte} , peut-être est-il préférable de fournir un indicateur sur l'alerte d'inondation en définissant, par exemple, des plages de délais plutôt qualitatives, telles que :

- inondation à très court délai : pour les T_{alerte} de 1 à 4 heures ;
- inondation à court délai : pour les T_{alerte} de 4 à 7 heures ;
- inondation à délai moyen : pour les T_{alerte} de 7 à 10 heures ;
- inondation à délai long : pour les T_{alerte} de 10 à 15 heures ;
- inondation incertaine : pour les T_{alerte} de plus de 15 heures.

On pourrait également associer une série de mesures à mettre en œuvre en fonction des T_{alerte} telle que :

- T_{alerte} de 1 à 4 heures - enclencher l'alerte ;
- T_{alerte} de 4 à 7 heures - vérification auprès des SAC amont et aval ;
- T_{alerte} de 7 à 10 heures - vérification terrain, météo ;
- T_{alerte} de 10 à 15 heures - vigilance accrue degré 2 ;
- T_{alerte} de plus de 15 heures - vigilance accrue degré 1.

Une panoplie de terminologies peut être envisagée. Il s'agit de savoir sous quelle forme on doit livrer l'information au prévisionniste pour qu'il se mette en vigilance accrue lorsque justifié, sans que ceci se fasse inutilement trop souvent. Cette vigilance accrue doit être accompagnée d'actions spécifiques à poser, devenues parties intégrantes du processus de *Mise en alerte* et de mobilisation des secours.

7 - CONCLUSION

L'exemple d'utilisation d'un outil d'anticipation d'alerte de crue dans le cas des inondations de novembre 1999, sur le cours amont de la rivière Thoré dans le Tarn, a permis de mettre en lumière l'apport intéressant des courbes IDTA-ISTA vis-à-vis de la protection des populations et de la minimisation des conséquences d'inondation. On estime en effet possible un gain de temps de l'ordre de 7 h 30 pour la mise en alerte sur ce bassin, ce qui, dans le contexte de crues rapides, est particulièrement significatif.

Une réelle amélioration de l'anticipation des alertes de crues est donc possible dans la mesure où l'on favorise des moyens qui sont réalistes et efficaces. C'est en ce sens que l'approche par les courbes IDTA-ISTA a été développée, dans la mesure où celles-ci :

- 1) s'appuient sur des informations existantes (les BAP) et accessibles ;
- 2) fournissent une information pertinente qui aide à la prise de décision ;
- 3) sont accessibles rapidement et simplement (lecture sur des courbes) ;
- 4) favorisent une vigilance accrue de la part des prévisionnistes ;
- 5) peuvent réellement offrir un gain de temps substantiel pour la mobilisation des secours.

Il est sans doute utopique de prétendre qu'un seul outil prévisionnel, aussi sophistiqué soit-il, puisse remplacer le jugement d'un prévisionniste expérimenté. Ce dernier aura toujours besoin d'informations pertinentes pour aider à la prise de décision et celle-ci sera favorisée dans la mesure où il disposera d'indicateurs fiables qui ne se contredisent pas. Par ailleurs, dans un contexte où peu d'informations sont disponibles, le meilleur prévisionniste aura du mal à prendre une décision éclairée. Deux utilisations potentielles apparaissent alors prometteuses.

D'une part, dans le cas où cet outil, ou la méthode dont il provient, peut s'intégrer dans un ensemble d'éléments déjà opérationnels, il permettra alors de mieux anticiper les prévisions d'alerte, puisqu'il est conçu pour fonctionner à partir des prévisions météorologiques, contrairement aux autres méthodes qui s'appuient sur d'autres sources d'information. Celles-ci pourront par la suite servir à confirmer ou infirmer progressivement les prévisions de T_{alerte}.

D'autre part, les courbes IDTA et ISTA pourront fournir un support décisionnel supplémentaire lorsque les informations hydrologiques ou hydrauliques sont rares ou même inexistantes sur un bassin versant. Le recours à ce type de courbes dans de telles situations pourra alors devenir un atout essentiel pour favoriser une vigilance accrue de la part des prévisionnistes.

Les applications actuelles montrent que dans un cas comme dans l'autre, la complémentarité entre courbes IDTA et ISTA et les autres procédures et outils actuellement utilisés semble garantir une meilleure efficacité du travail des SAC.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ASTRIUM, IMFT, 2000. PACTES - Proposition Scientifique et Technique. Toulouse. Vol.1-a. Document interne.
- AUDETTE L., 2001. Analyse dynamique du système de gestion des crues : Définition du système et représentation systémique. Rapport de stage ENSEEIHT Toulouse, 32 p.
- BEVEN K.J., HORNBERGER G.M., 1982. Assessing the Effect of Spatial Pattern of Precipitation in Modeling Stream Flow Hydrographs. *Water Resour. Bull.*, 18:5, 823-829.
- CORRADINI C., SINGH V.P., 1985. Effect of Spatial Variability of Effective Rainfall on Direct Runoff by Geomorphologic Approach. *J. Hydrol.*, 81, 27-43.
- DAWDY D.R., BERGMANN J.M., 1969. Effect of Rainfall Variability on Streamflow Simulation. *Water Resour. Res.*, 5, 958-966.
- ESTUPINA-BORRELL V., 2004. Vers une modélisation hydrologique adaptée à la prévision opérationnelle des crues éclair. Application à de petits bassins versants du sud de la France. France: INP Toulouse. 244 p. Thèse de doctorat.
- KRAJEWSKI, W.F., LAKSHMI, V., GEORGAKAKOSK.P., JAIN, S.C. 1991. «A Monte Carlo Study of Rainfall Sampling Effect on a Distributed Catchment Model». *Water Resource Research*. 27 : 1. pp 119-128.
- LEFROU C., MARTIN X., LABARTHE J.P., VARRET J., MAZIERE B., TORDJEMAN R., FEUNTEUN R., 2000. Les crues des 12,13 et 14 novembre 1999 dans les départements de l'Aude, de l'Hérault, des Pyrénées-Orientales et du Tarn. <http://www.environnement.gouv.fr/telch/rapports-ig/2000/1016-cruesaupe.pdf> 140 p. (Document consulté le 25 janvier 2003).
- MAIDMENT, D.R., 1993. Handbook of Hydrology, McGraw Hill.
- OBLÉD C., WENDLING J., BEVEN K., 1994. The Sensitivity of Hydrological Models to Spatial Rainfall Patterns: an Evaluation Using Observed Data. *J. Hydrol.*, 159, 305-333.
- RIVRAIN J.C., MÉTÉO-FRANCE, MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, 1997. Les épisodes orageux à précipitations extrêmes sur les régions méditerranéennes de la France. Météo-France. Document interne.
- SELIGA T.A., ARON G., AYDIN K., WHITE E., 1992. Storm Runoff Simulation Using

- Radar-Estimated Rainfall Rates and a Unit Hydrograph Model (SYN-HYD) applied to Greve watershed. American Meteorological Society, 25th conference on Radar Hydrology pp 587-590.
- SIMPSON, P. K, 1996. Neural Networks applications, New York, IEEE.
- TROUTMAN B., 1983. Runoff Predictions Errors and Bias in Parameters Estimation Induced by Spatial Variability of Precipitation. *Water Resour. Res.*, 19:3, 791-810.
- WILSON C.B., VALDES J.B., RODRIGUEZ-ITURBE I., 1979. On the Influence of Spatial Distribution of Rainfall on Storm Runoff. *Water Resour. Res.*, 15:2, 321-328.