

NOTE TO USERS

This reproduction is the best copy available.

UMI[®]

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

**ANTICIPER LA MISE EN ALERTE DE CRUES SUR LE BASSIN DE LA RIVIÈRE
THORÉ, EN FRANCE**

LYNDA AUDETTE

**DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE CIVIL)
AVRIL 2003**

© Lynda Audette, 2003.



National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions et
services bibliographiques

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-81536-6

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

ANTICIPER LA MISE EN ALERTE DE CRUES SUR LE BASSIN DE LA RIVIÈRE
THORÉ, EN FRANCE

présenté par : AUDETTE Lynda

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. KAHAWITA René, Ph.D, président

M. MARCHE Claude, D.Sc.A., membre et directeur de recherche

M. ALQUIER Michel, D.Sc.A., membre et codirecteur de recherche

M. TURCOTTE Richard, M.Sc.A., membre

DEDICACE

« La vie, dans sa plénitude, tantôt obéit à des lois et tantôt leur échappe ; tantôt elle est rationnelle et tantôt irrationnelle » Carle Gustave Jung

« Dans la vie, quand on commence à abandonner, cette voie devient par la suite trop facile à suivre: lâche pas ma guidounne ! » Denis Beauchamp

À mes frères,

REMERCIEMENTS

Je désire remercier les nombreuses personnes qui ont contribué, de près et de loin, à ce projet.

Tout d'abord, mes remerciements sont dirigés vers mes directeur et codirecteur de recherche, soit respectivement : M. Claude Marche qui a su me dire ce dont j'avais besoin d'entendre au moment où il le fallait ; et M. Michel Alquier qui a cru en moi et qui a rendu tout ceci possible.

Je désire aussi témoigner ma profonde gratitude à Mme Cécile Llovel dont l'efficacité, la générosité, la disponibilité et la gentillesse qu'elle a manifestées à mon égard sont exemplaires. En ce sens, je tiens également à remercier Mme Valérie Estupina-Borrell pour tous ses conseils et commentaires, mais surtout pour son support et sa présence. Je ne peux passer sous silence la contribution logistique et technique mais aussi humaine et chaleureuse du personnel du groupe HYDRE de l'Institut de mécanique des fluides de Toulouse, plus particulièrement à Mmes Marie-Madeleine Maubourguet et Sylvie Regade-Senny et MM Denis Dartus et Jacques Chorda.

Je souhaite également remercier Météo-France, la Direction régionale de l'environnement de Midi-Pyrénées et la société Astrium pour l'accès aux données et informations s'inscrivant dans le projet PACTES, de même que M. Ousmane Seidou pour sa contribution scientifique et M. Jean-Sébastien Faure du Cémagref pour l'utilisation de MAGE.

Je remercie sincèrement mes lecteurs assidus dont Valérie, Nathalie, Paule et René, ainsi que mon équipe de soutien moral et de logistique : Claude, Annick, Sylvie, Julie, Denis et Francis.

Enfin, je ne peux passer sous silence la contribution de M. Gaëtan Thibault, instigateur de mon orientation de carrière et de mon retour aux études. Merci pour ta grande confiance et ton appui indéniable.

RÉSUMÉ

Ce mémoire vise à contribuer à l'amélioration de l'annonce des crues, dans le contexte du système d'alerte français. On propose d'utiliser les informations météorologiques contenues dans les Bulletins d'alerte aux précipitations [BAP] émis par Météo-France, afin d'aider les prévisionnistes des Services d'annonce de crues [SAC] français, à anticiper l'atteinte d'une cote d'alerte sur une rivière. Le but est de développer une approche visant à munir les SAC d'outils prévisionnels fonctionnant en temps réel, afin de mieux évaluer une Mise en alerte probable. L'approche préconisée intègre les informations contenues dans les BAP reçus de Météo-France dans le processus de surveillance des crues au moyen de courbes de Durée-Intensité-Temps d'alerte [IDTA] pour des prévisions de pluies uniformément réparties, et des courbes d'Intensité-Superficie-Temps d'alerte [ISTA] pour des prévisions de cellules orageuses localisées.

Les paramètres caractéristiques de la pluie qui sont choisis sont : l'intensité [I] (mm/ heure), la durée [D] (heure) et la superficie [S] (km²) du bassin versant touché par la pluie; ces paramètres étant liés entre eux par celui du volume [V] (hm³) de pluie tombée selon la relation suivante :

$$V = \frac{I}{1000} \times D \times \frac{S}{1\,000\,000}$$

Le paramètre directement lié à la Mise en alerte est le Temps d'alerte [Talerte] (heure). Ce dernier est défini comme étant le temps qui s'écoule entre le début de la pluie et le temps où le débit à l'exutoire atteint le débit d'alerte [Qalerte] (m³/s), nonobstant la pointe de l'hydrogramme [Qmax] (m³/s). En effet, bien que le Qmax puisse être un indicateur important quant à l'ampleur de l'événement à venir, le but visé dans la présente démarche s'articule autour de la Mise en alerte, et cerne donc le paramètre du Temps d'alerte.

L'approche privilégiée dans ce mémoire, consiste ainsi à créer un graphique reliant une gamme d'intensités de pluie en fonction d'une plage de durée de la pluie, par des courbes de temps d'alerte qui caractérisent les couples I-D dans le cas de pluies uniformément réparties sur l'ensemble du bassin. Pour les cellules orageuses localisées, ce sont des couples I-S qui sont caractérisés par des courbes de temps d'alerte. Ainsi, lorsqu'un prévisionniste d'un SAC reçoit un BAP indiquant le cumul (mm) de pluie prévue sur une région précise et pour une certaine durée, celui-ci peut se référer aux courbes IDTA et/ou ISTA afin d'évaluer dans combien de temps, après le début de la pluie, le débit d'alerte risque d'être atteint. Le cas échéant, si le délai est assez grand, il peut attendre pour interpréter les prochaines prévisions affinées, sinon, il peut décider d'enclencher le processus de Mise en alerte ou non.

L'élaboration des courbes IDTA et ISTA implique un ensemble de simulations permettant de couvrir une gamme de couples : intensité-durée et intensité-superficie de la pluie, pour lesquels on détermine le temps d'alerte. Ces simulations sont faites au moyen du modèle MARINE qui consiste en une combinaison d'un modèle hydrologique déterministe et distribué, avec le modèle hydraulique unidimensionnel de transfert d'hydrogramme MAGE. On a également recourt à un modèle de neurones de type Generalize regression network [GRNN] qui fait des interpolations de valeurs à partir d'une base de données constituées des paramètres Intensité, Durée, Superficie et des hydrogrammes issus des simulations. L'intérêt de ce modèle est de permettre de couvrir une plus grande gamme de valeurs des paramètres considérés en limitant le nombre de simulations requises, et donc le temps de calcul associé à celles-ci.

On développe la présente approche prévisionnelle à partir d'un cas concret s'inscrivant dans le contexte des crues extrême ayant touché le sud de la France en novembre 1999. Plus précisément, il s'agit d'une zone montagneuse, sise à l'amont du bassin versant de la rivière Thoré dans le Tarn.

Deux types de scénarii de simulation sont ciblés, soit :

- Scénario 1 : pluies uniformément réparties sur le bassin de 208 km² ;
- Scénario 2 : cellules orageuses de 9, 36, 64 et 144 km² localisées au centre du bassin et dont la durée est supérieure au Talerte.

La principale observation faite par rapport aux résultats de ces simulations est le fait qu'il existe un Talerte qui est constant pour une pluie d'intensité I , dans la mesure où celle-ci a une durée D supérieure au Talerte (il pleut encore après que le Qalerte ait été atteint à l'exutoire). En revanche, si la pluie cesse avant que le Qalerte soit atteint, le Talerte est retardé en fonction de la durée de la pluie à I constant (donc Talerte croît). Ceci est observé tant pour les pluies uniformes que localisées.

Les courbes IDTA et ISTA sont développées à partir d'hypothèses simplificatrices, et doivent être affinées afin d'accroître leurs précision, flexibilité et efficacité. On peut donc améliorer cette approche en prenant en compte, notamment : l'étalonnage des modèles de simulation;

- l'infiltration : lorsque la loi régissant celle-ci est bien établie ;
- les conditions initiales : puisque les résultats des simulations réalisées dans le contexte de ce mémoire sont valables pour des conditions initiales constantes de $Q_{ini} = 20 \text{ m}^3/\text{s}$; il serait pertinent d'inclure un facteur correctif pour ajuster les résultats (Talerte) aux conditions initiales réelles dont le Q_{ini} réel et l'état d'humidité initiale des sols ;
- la variabilité spatiale des cellules orageuses ; et
- la combinaison d'une pluie uniforme avec une ou plusieurs cellules orageuses.

Néanmoins, on évalue la pertinence de l'approche prévisionnelle par les courbes IDTA et ISTA en se basant sur les événements de novembre 1999. On évalue la contribution

de ces courbes dans le processus décisionnel de Mise en alerte par un scénario prévisionnel fictif, défini à partir des BAP qui ont réellement été émis. Selon les hypothèses posées et sous toutes réserves, on observe que l'alerte sur le Thoré aurait pu être devancé de 7 h 30, par rapport à la Mise en alerte réelle. Dans le contexte de crues rapides ou éclair, ce gain de temps est très substantiel.

ABSTRACT

This memoir aims at contributing to the improvement of flood forecasting, in the French alert system context. We are proposing to integrate the meteorological information contained in the French weather forecast bulletin “Bulletins d’alerte aux précipitations [BAP]” produced by Météo-France (French meteorological organisation), in a way to help the forecast agents of the French flood forecasting agencies “Services d’annonce de crues [SAC]” to anticipate the reach of an alert water level on a river. The goal is to develop an approach in order to provide the SAC of a real-time operational forecasting tool to improve the evaluation of a probable “Making an alert” decision. The privileged approach integrates the information contained in the BAP received from Météo-france in the existing flood control process by the use of Durée-Intensité-Temps d’alerte [IDTA] (Duration-Intensity-Time to alert) curves for uniform rain forecasting and of Intensité-Superficie-Temps d’alerte [ISTA] (Intensity-Area-Time to alert) curves for localised storm cells.

The rain parameter considered are: the intensity [I] (mm/hour), the duration [D] (hour), and the area [S] (km²) of the watershed affected by the rain; these parameters are interrelated through the volume [V] of rain (hm³) parameter by the following equation:

$$V = \frac{I}{1000} \times D \times \frac{S}{1\,000\,000}$$

The parameter directly related to the “Making an alert” decision is the Time to alert [Talerte], measured in hours. It is defined as the time between the beginning of the rainfall and the time when the flow at the watershed outlet reaches the alert flow value [Qalerte in m³/s], regardless the maximum discharge (Qmax) value. The Qmax may indeed be an important indicator of the magnitude of the event to come, but the main

goal of the present approach concerns the “Making an alert” decision and therefore the Time to alert parameter.

The proposed approach in this memoir consists in creating a graphic connecting series of rain I-intensity values in function of a range of D-duration of rainfall values with Talert-Time to alert curves, that characterises the I-D couples. Therefore, when a SAC forecast agent receives a BAP indicating the quantitative precipitation forecast in a precise region for a defined period, he will be able to evaluate the time, after the beginning of the rainfall, the discharge alert may be reached, by referring to the IDTA and/or ISTA curves. If an alert is foreseen in a certain delay, the flood forecast agent can wait to receive improved forecasts before taking the decision to start the “Making an alert” procedures or not.

The construction of the IDTA and ISTA curves requires numerous simulations in order to cover a large variety of couples: intensity-duration and intensity-area of rainfall for which the alert discharge value will be reached at the watershed outlet, and therefore the time corresponding to this discharge.

The simulations are made with a combination of a determinist distributed hydrological model with a hydraulic one-dimensional hydrograph transfer model. We also appeal to neurone models of Generalize regression network [GRNN] type, that makes interpolation of values referring to its data base that consists in the parameters Intensity, Duration, Area and of the Hydrographs that results from the simulations done with the first two models. The interest of using the GRNN model is to cover a large range of values of the considered parameters without having to simulates all cases, and therefore reducing the related computing time.

We develop the present forecasting approach on the basis of a concrete case related to the extreme flooding that occurred in southern France on November 1999. More precisely, it is the mountainous region of the upstream area of the Thoré watershed, in the Tarn department, that will be our study-case.

Two simulation scenarii are focused, as follow:

- Scenario 1: uniformly distributed rainfall on watershed of 208 km²;
- Scenario 2: storm cells of 9, 36, 64 and 144 km² localised in the watershed centre and lasting longer than the Talert

The main observation done from the results of the simulations is the fact that the Talert is constant for a rainfall of intensity I , as long as the duration is longer than the Talert (it is still raining after Qalert is attained at the outlet). On the other hand, if the rain stops before Qalert is attained, Talert is delayed in function of the duration of the rainfall, for a constant I (Talert increases). This is the case for both uniform and localised rainfalls.

The IDTA and ISTA curves are developed on the basis of several simplifying hypothesis and should be improved in order to increase their precision and flexibility. Therefore this approach could be ameliorated taking into account the following:

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

Nevertheless, we evaluate the pertinence of the forecasting approach by the IDTA and ISTA curves referring to the November 1999 events. We evaluate the contribution of

these curves in the “Making an alert” decision process with a fictitious scenario defined by the issued BAP related to this event. Without committing oneself, according to the hypotheses made, we observe that the flood alert on the Thoré watershed could have been advanced up to 9h30, in comparison of the real time it was made. In a fast or flash flood event, this range of anticipation could have a considerable impact.

AVANT-PROPOS

CONTEXTE DE L'ÉTUDE

Dernièrement, les événements orageux intenses s'abattent avec acharnement sur la France et certains pays limitrophes. Les récents événements de novembre 2002 dans la zone alpine et les inondations de septembre 2002 dans le sud-est (Gard, Vaucluse et Hérault) sont peut-être l'indice de la présence de plus en plus fréquente d'événements extrêmes. Bien que le sud-est de la France soit une zone fréquemment touchée par des événements météorologiques importants, d'où son appellation d'effet « cévenol », il appert que les événements des 12 et 13 novembre 1999 (le Tarn, l'Hérault, les Pyrénées Orientales et l'Aude) ont été exceptionnels.

S'inscrivant au cœur des préoccupations de plus en plus alarmantes de la population à l'égard de ces inondations dévastatrices, la communauté scientifique, les industriels et les gestionnaires français se sont intéressés à ces phénomènes afin de tenter, de mieux les comprendre afin de mieux s'y parer.

C'est dans ce contexte et à la suite des inondations de novembre 1999, que le Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement [MATE] a mandaté, en décembre 1999, le Conseil général des ponts et chaussées à la coordination des travaux d'une vaste étude Post-crise. Le but de ceci vise à aider l'État à mieux orienter ses efforts et aussi permettre aux chercheurs, scientifiques ainsi qu'aux industriels, à mieux répondre à ce type d'événement dont l'intensité et la fréquence semblent à la hausse.

Plusieurs recommandations émanent du rapport de cette étude (Lefrou, Martin et al. 2000) dont : « 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 ».

Emboitant le pas, le Ministère de la recherche a mandaté le Centre national d'études scientifique [CNES], à titre de Maître d'œuvre, dans le cadre des programmes du Réseau terre et espace. À ce titre, depuis l'automne 2000, le CNES collabore avec les gestionnaires, les industriels et les chercheurs, au sein du projet de Prévention et anticipation des crues au moyen des techniques spatiales [PACTES](ASTRIUM, I.M.F.T., 2000).

Le but de PACTES est de mettre au point un démonstrateur pré-opérationnel pour la gestion en temps réel des inondations avec support sur Système d'information géographique [SIG]. On tente, au moyen de cas concrets, de couvrir les deux types de crues les plus fréquentes en France : crues lentes (crues de plaine) et les crues rapides, et ce, pour toutes les phases qui s'articulent autour de ces événements, soit :

- Prévention : Moselle, crues lentes ;
- Anticipation/Alerte : Thoré, crues rapides ;
- Crise : Hérault, crues rapides & eau souterraine, effets karstiques et surcote marine ; et
- Post-Crise : Moselle, Thoré et Hérault.

L'objectif de PACTES vise donc à intégrer les technologies des domaines de la spatialisation (imageries satellitaires et radars, modèles numériques de terrains), des SIG, des réseaux de télécommunications, ainsi que les plus récentes avancées en modélisation des phénomènes physiques (modèles météorologiques, hydrologiques et hydrauliques), afin de fournir aux utilisateurs un outil complet pour améliorer la gestion des inondations en France.

Ce mémoire s'inscrit donc dans la démarche de PACTES, se situant plus précisément dans la phase **Anticipation/Alerte**. Cette dernière est sous la régence de la société Astrium, le mandat scientifique étant confié à l'Institut de mécanique des fluides de

Toulouse [I.M.F.T.]. C'est dans le cadre d'un programme d'échange étudiant que la mise à contribution de l'École Polytechnique de Montréal s'est amorcée.

Plus précisément, la présente étude est la continuité d'un stage effectué de février à juin 2001, au sein de l'I.M.F.T., dans le contexte de PACTES. L'objectif de ce stage était d'analyser le système de gestion des inondations en France dans sa globalité, espérant ainsi parvenir à poser un diagnostic non biaisé sur ce dernier. L'essentiel des résultats de cette analyse (Audette 2001) est présenté aux Annexes A, B et C et se résume tel que suit.

RÉSUMÉ DE L'ANALYSE DU SYSTÈME DE GESTION DES CRUES

La chaîne de gestion des crues en France gravite autour de trois noyaux principaux, soit :

- Prévisions Météorologiques : Météo France ;
- Prévisions de Crues : Services d'Annonce des Crues [SAC] ; et
- Mobilisation des Secours : Préfecture et Sécurité Civile.

Dans le cas des grands bassins versants (plus de 500 km²), généralement bien instrumentés (acquisition et transmission des données hydrométriques) et soumis à des crues relativement lentes (crues de plaines), cette procédure de mise en alerte ne pose pas de problème majeur (Lefrou, Martin et al. 2000). En général, les modèles de prévision des niveaux d'eau peuvent anticiper de façon satisfaisante les éventuelles Mises en alerte, d'autant plus que la réponse des bassins versants peut être de l'ordre de quelques jours.

En revanche, les petits bassins versants (de l'ordre de quelques centaines de km²) à ruissellement important et temps de concentration court, seront davantage soumis à des crues rapides et destructrices. En particulier, les zones montagneuses peuvent favoriser la formation d'orages convectifs très intenses (effet cévenol) qui vont engendrer des crues éclair d'autant plus dévastatrices qu'elles seront difficilement prévisibles. Les prévisions météorologiques, ne peuvent, à ce jour, cerner ces phénomènes dans un temps raisonnable pour s'y parer adéquatement (Lefrou, Martin et al. 2000). Les SAC ne disposent pas de moyens pour anticiper de façon quantitative l'alerte de ce type de crues.

L'élément clé qui ressort de l'analyse de la structure du système de gestion des inondations (Audette 2001) est que la Mise en alerte d'inondation et la Mobilisation des secours dans les départements et communes se font officiellement par la Préfecture du département affecté et ce, à la suite d'une recommandation émise par les SAC. Cette

recommandation de Mise en alerte se fait uniquement lorsque le niveau d'eau à une station d'alerte, atteint la **cote d'alerte**. Certaines rivières telles que la Garonne ou la Lèze, ont des cotes de vigilance et/ou de pré-alerte, qui permettent essentiellement la mise en vigilance ou en vigilance accrue du prévisionniste d'astreinte. La problématique de la Mise en alerte dans certains cas repose sur la rapidité du phénomène, ne laissant que très peu ou aucun temps d'anticipation : i.e. dès que la **cote d'alerte** est atteinte, il est déjà trop tard, il y a inondation. Au moment de la rédaction du rapport (Audette 2001), les SAC ne disposaient pas de moyen efficace pour anticiper sur ce type de crues.

Ainsi, il semble que les informations météorologiques ne sont pas quantitativement exploitées pour anticiper l'atteinte du niveau d'alerte. Ceci corrobore les observations de l'étude post-crise (Lefrou, Martin et al. 2000) sur les événements reliés aux inondations de novembre 1999, et dont une des constatations est :

« A l'échelon départemental, sauf dans les Pyrénées-Orientales, les BRAM¹ n'ont pas été interprétés comme traduisant le risque d'un événement exceptionnel. Plusieurs BRAM " fortes précipitations " avaient été publiés dans l'année et n'avaient pas eu de conséquences hydrologiques graves. Or les chiffres de précipitation annoncés en fin d'après midi du 12 novembre, même s'ils se sont révélés inférieurs à la réalité, étaient exceptionnels. Faute d'échelle de référence, ils n'ont pas entraîné la prise de conscience de l'ampleur du phénomène. »

¹ Considérant l'inefficacité des Bulletins régionaux d'alerte aux précipitations [BRAM] dû à leur banalisation, ceux-ci ont été remplacés, depuis l'automne 2001, par les Cartes de vigilance météorologiques, disponibles sur le site Web de Météo-France, par téléphone ou sur Minitel.

Ainsi, il appert que, dans le cas des zones sensibles à la formation de crues rapides ou éclair (la pointe de la crue apparaît quelques heures après le début de la pluie), l'imprévisibilité et la rapidité du phénomène soient une entrave à l'anticipation de l'alerte dans un temps suffisant pour mobiliser les secours. Le projet PACTES a pour objectif de répondre à cette problématique en exploitant quantitativement les informations des prévisions météorologiques dans le processus de Mise en alerte. Les moyens mis en œuvre sont :

- Création d'un démonstrateur sur SIG incorporant des prévisions de lames d'eau radar de Météo-France dans un modèle de prévision de débit, opérationnel en temps réel ;
- Élaboration de courbes d'Intensité-Durée-Temps d'Alerte [IDTA] et d'Intensité-Superficie-Temps d'Alerte [ISTA] qui permettent de donner une estimation du temps où le débit d'alerte est possiblement atteint, à partir des informations provenant des Bulletins d'alerte aux précipitations [BAP].

La première méthode est en cours d'élaboration. Son implantation à court ou moyen terme est limitée entre autre, par la disponibilité des prévisions de lames d'eau radar, excluant ainsi toutes les zones non-couvertes ou dont la couverture radar est faible. Les zones montagneuses et/ou au delà de 100 km (MÉTÉO-France 2003) à 240 km (Rousselle, Neill et Richards 1990) de la portée des radars en sont exclues. En revanche, ce sont les zones montagneuses qui sont particulièrement favorables à la formation de crues rapides. Ainsi, la démarche complémentaire est la seconde, et c'est celle qui est développée dans la présente étude.

TABLE DES MATIÈRES

DEDICACE.....	IV
REMERCIEMENTS	V
RESUME.....	VI
ABSTRACT	X
AVANT-PROPOS	XIV
TABLE DES MATIERES	XX
LISTE DES TABLEAUX	XXII
LISTE DES FIGURES.....	XXIII
TABLE DES SIGLES ET ACRONYMES.....	XXIV
LISTE DES ANNEXES.....	XXVI
CHAPITRE I : INTRODUCTION	1
CHAPITRE II : GENESE D'UNE CRUE : RESUME SUCCINT.....	4
2.1 Généralité sur les pluies	4
2.1.1 Description	4
2.1.2 Répartition spatiale de la pluie.....	6
2.2 Généralités sur les hydrogrammes de crues	7
CHAPITRE III : MÉTHODOLOGIE ET ORGANISATION DE L'ÉTUDE	10
3.1 Méthodologie	10
3.2 Bassin versant témoin.....	11
3.3 Paramètres de pluie	11
3.3.1 Paramètres de pluie et BAP	11
3.3.2 Hypothèses sur la pluie.....	12
3.3.3 Variabilité spatiale des cellules orageuses:.....	13
3.4 Paramètres de crue	17
3.4.1 Débit d'alerte	17
3.4.2 Hypothèses sur le débit d'alerte.....	18

3.4.3	Scénarii de simulations	19
3.6	Modèles de simulation	20
3.6.1	MARINE	20
3.6.2	Modèle neuronal	21
CHAPITRE IV : SIMULATIONS POUR LA MISE EN ALERTE SUR LE THORE		23
4.1	Pluie uniforme : Intensité	23
4.2	Pluie uniforme : Volume-Durée	25
4.2.1	Volume	25
4.2.2	Durée	26
4.2.3	Pluies uniformes : Courbes IDTA	32
4.3	Cellules orageuses	33
4.3.1	Superficie des cellules orageuses	33
4.3.2	Intensité et volume minimaux	34
4.3.3	Cellules orageuses : Courbes ISTA	38
4.3.4	Localisation	42
CHAPITRE V : EXEMPLE DE MISE EN ALERTE SUR THORE A MAZAMET		45
5.1	Événement de novembre 1999	45
5.1.1	Mise en alerte réelle	45
5.1.2	Mise en Alerte fictive en fonction des Bulletins d'alerte aux précipitations	47
5.2	Observations et Commentaires	50
CHAPITRE VI : RECOMMANDATIONS		52
6.1	Modèles étalonnés	52
6.2	Hypothèses simplificatrices	52
6.3	Pluies uniformes et cellules orageuses localisées	53
6.4	Conciliation des paramètres	54
6.5	Modèles de neurones	56
CHAPITRE VII : CONCLUSION		57
REFERENCES		60

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1 Simulations - pluies uniformes de 24 heures	23
Tableau 4.2 Simulations - pluies uniformes de durées variables	27
Tableau 4.3 Simulations - pluies localisées au centre du bv.....	39

LISTE DES FIGURES

Figure 3.1 Cellules localisées au centre du bassin	15
Figure 3.2 Localisation des cellules orageuses	16
Figure 3.3 Paramètre de la crue : Qalerte.....	18
Figure 4.1 Hydrogrammes pluies uniformes pour Imin 3,1 mm/h	25
Figure 4.2 Hydrogramme pluie uniforme : Imin pour 17,18 et 24 hres.....	26
Figure 4.3 Hydrogrammes de pluies uniformes pour même volume.....	29
Figure 4.4 Hydrogrammes pour Intensité de 5,5 mm/h	30
Figure 4.5 Hydrogrammes pour Intensité de 33 mm/h	31
Figure 4.6 Courbes Intensité-Durée-Temps d'alerte [IDTA]	33
Figure 4.7 Hydrogrammes Imin pour cellules centrées sur bassin	35
Figure 4.8 Graphique intensités et volumes minimaux de cellules orageuses.....	36
Figure 4.9 Courbes Intensité-Superficie-Temps d'alerte [ISTA]	41
Figure 4.10. Hydrogrammes: localisation différente I=38 D=18.....	42
Figure 4.11. Hydrogrammes: localisation différente I=75 D=09.....	43
Figure 5.1 Chronogramme de la Mise en alerte réelle du bassin Thoré	46
Figure 5.2 Chronogramme fictif de Mise en alerte avec les courbes IDTA	48

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

BV : Bassin versant

D : Durée de la pluie en heure

Dmin : Durée minimale de la pluie, pour qu'un débit d'alerte soit atteint

I : Intensité de la pluie en mm/h

IDTA: Intensité-durée-temps d'alerte

Imin : Intensité minimale de la pluie, pour qu'un débit d'alerte soit atteint

ISTA: Intensité-surface-temps d'alerte

J-1 : le passé récent, à ce jour

nb : nombre

Qalerte : Débit d'alerte en m^3/s

Qe : Débit d'équilibre d'un hydrogramme de crue

Qini : Débit de base ou initial dans la rivière

Qmax : Débit maximal d'un hydrogramme de crue

S ou S_{total}: Surface d'un bassin versant en km^2

S_{cell} : Surface d'une cellule orageuse en km^2

Talerte : Temps d'alerte en heure

Te : Temps d'équilibre en heure

V: Volume en hm^3

BAP : Bulletins d'alerte aux précipitations

BRAM : Bulletins régionaux d'alerte météorologique

CNES : Centre national d'études spatiales

DIREN : Direction régionale de l'environnement

I.M.F.T. : Institut de mécanique des fluides de Toulouse

MAGE : Maillé généralisé

MARINE : Modélisation de l'anticipation du ruissellement et des inondations pour des événements extrêmes

MATE : Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement

M.N.T. : Modèle numérique de terrain

ORSEC : Organisation des Secours

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES (suite)

PACTES : Prévention et anticipation des crues au moyen des techniques spatiales

P.C. : Poste de commandement

SAC : Service d'annonce des crues

S.I.G. : Système d'information géographique

LISTE DES ANNEXES

Annexe A Système de gestion des crues.....	63
Annexe B Le bassin versant Thoré	85
Annexe C Événement de novembre 1999.....	89
Annexe D Bulletins d’alerte aux précipitations	93
Annexe E Programme FORTRAN pour la création des pluies.....	96
Annexe F Hydrogrammes	106

CHAPITRE I

INTRODUCTION

Ce mémoire vise à contribuer aux efforts technologiques déployés en France, afin de mieux faire face aux inondations qui semblent de plus en plus intenses et fréquentes. Le présent travail s'inscrit dans le cadre d'une collaboration entre l'École Polytechnique de Montréal et l'Institut de mécanique des fluides de Toulouse [I.M.F.T.] et fait suite à un stage réalisé au sein de cette dernière, dans un contexte d'échanges étudiants. Dans ce stage, une analyse globale du système de gestion des crues en France a été réalisée. Les annexes A, B et C sont des extraits partiels du rapport qui découle de cette analyse (Audette 2001) et un résumé est présenté en Avant propos du présent mémoire.

Faisant suite au diagnostic posé dans cette analyse (Audette 2001), la présente étude consiste en l'élaboration des bases d'une nouvelle approche pour pallier la difficulté à faire des prévisions de crues rapides ou éclair. Il appert (Audette 2001) que les informations météorologiques ne soient pas quantitativement exploitées dans la prévision des crues, particulièrement dans les zones sensibles aux orages localisés « générateurs de crues rapides ». Un gain de temps substantiel pourrait être envisagé dans ce contexte, s'il était possible d'intégrer quantitativement les informations météorologiques dans le processus de surveillance des crues et de Mise en Alerte.

La pertinence des informations disponibles dans la chaîne de gestion des crues, est fonction de leur poids dans le processus décisionnel de Mise en alerte. Une information de bonne précision sera très pertinente dans la mesure où elle est disponible au bon moment ; autrement elle devient moins utile, voire inutile. Ainsi, l'approche préconisée dans cette étude propose l'utilisation d'une information météorologique existante, possiblement peu précise mais disponible, afin de permettre aux prévisionnistes des

Services d'annonce des crues [SAC] français d'anticiper le risque qu'une rivière atteigne une cote d'alerte. Cette méthode proposée pourrait éventuellement être appliquée tant aux crues lentes que rapides. Son utilité, toutefois, peut être plus importante dans le second cas considérant l'imprévisibilité et la rapidité de ce type de crue.

D'ailleurs, ce sont les conséquences dévastatrices liées aux événements de novembre 1999 qui ont généré une volonté politique et scientifique de mieux comprendre et gérer ce type d'événement. Une vaste étude Post-crise sur ces inondations de novembre 1999 a engendré, entre autre, la mise sur pied d'un projet pilote visant à intégrer les technologies spatiales dans l'anticipation et la gestion des crues, soit le projet : Prévention et anticipation des crues aux moyens des techniques spatiales [PACTES] (cf. § Avant propos). Le présent mémoire s'inscrit dans ce projet. Plus précisément, c'est dans la phase Anticipation/Alerte, que le développement de cet outil prévisionnel se construit, à partir du bassin versant de la rivière Thoré, se réfèrent aux événements de novembre 1999.

L'approche proposée consiste donc à utiliser les informations météorologiques que Météo-France transmet aux SAC, de façon à ce que les prévisionnistes des SAC puissent anticiper une Mise en alerte dès la réception des bulletins météorologiques. C'est au moyen de courbes d'Intensité-Durée-Temps d'alerte [IDTA] et d'Intensité-Superficies-Temps d'alerte [ISTA] dont les bases du développement sont l'objet de ce mémoire, que l'on propose d'intégrer les bulletins météorologiques dans le processus de Mise en alerte de crues.

L'élaboration des courbes IDTA et ISTA implique donc un ensemble de simulations permettant de couvrir une gamme de couple : intensité-durée de la pluie uniforme et intensité-superficie des cellules orageuses, pour lesquels on doit obtenir le débit d'alerte à l'exutoire, et donc le temps d'arrivée correspondant à ce débit, soit le Temps d'alerte

[Talerte] (heure). Considérant la complexité de certains phénomènes et surtout l'interaction des éléments impliqués dans les inondations, certaines hypothèses simplificatrices se sont avérées indispensables dans un premier temps, afin de faciliter le développement de cette approche. Ainsi, on suppose que toute la pluie tombée contribue au ruissellement de surface (il n'y a pas de perte par évapotranspiration ou par infiltration). Il s'agit donc d'un écoulement de surface uniquement. Ceci est sensiblement le cas dans le contexte des crues rapides vu la rapidité du phénomène. Le débit initial dans la rivière est bien sûr important. Dans la présente étude, les simulations ont été réalisées avec un seul débit initial de $20 \text{ m}^3/\text{s}$. D'autres simulations pour des valeurs de débit initial différentes devraient être réalisées.

Les simulations sont réalisées au moyen du modèle Modélisation de l'anticipation du ruissellement et des inondations pour des événements extrêmes [MARINE] qui est une combinaison d'un modèle hydrologique (transformation de la pluie en débit) avec un modèle hydraulique (transfert d'hydrogramme). Un modèle neuronal est également utilisé afin de couvrir une plus grande gamme de cas tout en limitant le temps de calcul requis pour ce faire.

CHAPITRE II

GENÈSE D'UNE CRUE : RÉSUMÉ SUCCINT

Une crue, telle que défini par le Petit Larousse illustré (1990) est l' : « élévation du niveau d'un cours d'eau, due à la fonte des neiges ou à des pluies abondantes » alors que l'inondation est la « submersion des terrains avoisinant le lit d'un cours d'eau, due à une crue ; eaux qui inondent ». Une crue en soi n'est pas préoccupante dans la mesure où elle a lieu sans conséquence grave en termes de vie, d'environnement et d'activités économiques. En revanche, les inondations de terrains ou d'habitats causées par une crue, intéressent autant le riverain, l'hydrologue que l'État, dans un objectif commun de limiter les dégâts et donc le risque qui leur est associé.

Le concept d'une crue est fort simple à comprendre, mais plutôt complexe à cerner considérant les paramètres en jeu et leurs interactions. Dans une description simple, on considère la crue comme étant la réponse hydrologique d'un bassin versant à un apport d'eau : pluie, fonte des neiges, bris d'ouvrages de retenu (barrages, digues). Dans le présent mémoire, on s'intéresse uniquement aux crues engendrées par de très fortes pluies.

2.1 Généralité sur les pluies

2.1.1 Description

En France, on observe, de façon générale, des cumuls de pluie sur les plaines de l'ordre de 40 mm à 60 mm en 24 heures, alors qu'elles peuvent être de l'ordre de 100 mm à 120 mm pour la même période dans les régions montagneuses (Rivrain, Météo-France et Ministère de l'environnement 1997). Ces pluies sont qualifiées de « fortes précipitations » et peuvent occasionner d'importantes crues, telles que celles

fréquemment observées dans la région des Cévennes (effet cévenol cf. § Annexe B). Par ailleurs, des systèmes atmosphériques convectifs dits « de méso-échelle régénératif quasi-stationnaires en forme de V » (Rivrain, Météo-France et Ministère de l'environnement 1997), particulièrement présents dans le sud de la France, peuvent occasionner des précipitations très localisées, de l'ordre de 200 mm à 400 mm pendant une très courte période variant de 3 à 7 heures. Ce type de pluies dites « extrêmes », se produisant dans des petits bassins versants, peuvent être à l'origine de plusieurs inondations ou crues éclair (Rivrain, Météo-France et Ministère de l'environnement 1997) telles que celles observées en novembre 1999 sur la rivière Thoré.

Un épisode pluvieux peut contenir plusieurs averses et peut être séparé d'un autre épisode pluvieux par une période sèche (Datin 1998). Les principaux paramètres caractérisant l'épisode pluvieux selon (Datin 1998), (Lardet 1992) & (Schober 1996) sont les suivants :

- leur durée ;
- leur cumul ;
- leurs intensités maximale (pic) et moyenne ;
- la position du pic ;
- la pluie moyenne précédent le pic ;
- la période sèche entre deux averses (peut être considérée nulle).

Dans les études hydrologiques de bassins versants, on classe la pluie selon son effet sur ces derniers. Une pluie qui tombe directement dans un plan d'eau (lac, rivière, etc.) est appelée « précipitation sur réseau hydrographique » (UNESCO 2002) et contribue presque instantanément à la montée de la crue, mais il peut y avoir un effet de laminage de celle-ci vu la capacité de stockage du plan d'eau (Musy 2002). La partie des pluies qui contribue à la montée de l'hydrogramme de crue est la partie effective (Réménieras 1972). De celle-ci, on identifie la pluie nette (Réménieras 1972), ou

excédentaire (UNESCO 2002), la portion qui ruisselle directement sur la surface du bassin, vers l'exutoire, sans être retardée (écoulement en surface). L'écoulement subsurfacique et/ou sous-terrain, est la contribution tardive de la pluie effective, à l'hydrogramme. La transformation de la pluie brute en pluie nette est régit par une fonction de production, ce qui implique l'élimination de la portion de la pluie qui est perdue par les effets combinés notamment de l'évapotranspiration, de l'interception, du stockage superficiel et/ou de l'infiltration (Réménieras 1972, Chow, Maidment et Mays 1988). La fonction de production donne donc le volume provenant de la pluie effective ou nette, aboutissant à l'exutoire. C'est la fonction de transfert qui régit l'étalement temporel de ce volume, transformant celui-ci en débit par une relation que certains auteurs, dont Lardet (1992), assument linéaire. Vu le nombre d'éléments régissant les « pertes » associées à la transformation de la pluie brute en pluie effective ou nette ainsi que leurs interactions, la fonction de production est fortement non-linéaire (Lardet 1992) ce qui rend fort complexe de tenter de définir analytiquement la relation pluie-débit.

2.1.2 Répartition spatiale de la pluie

La compréhension des impacts de la variabilité spatiale des pluies sur la réponse des bassins versants est essentielle à la définition des relations pluie-débit, telle que décrites en §2.1.1. La recherche est ainsi encouragée, d'une part, pour mieux évaluer, interpréter et/ou corriger les informations recueillies par les instruments de mesure (pluviomètres) afin d'en assurer l'efficacité selon leur répartition spatiale (Lebel, Bastien, et al. 1987), (Krajewski, Lakshmi, et al. 1991) et, d'autre part, pour confronter les modèles distribués aux modèles globaux à différentes échelles (Wood, Sivapalan et al. 1988). Les conclusions de plusieurs auteurs (Dawdy et Bergman 1969 ; Wilson, Valdes, et Roddriguez-Iturbe 1979 ; Beven et Hornberger 1982; Corradini et Singh 1985; Krajewski, Lakshmi et al. 1991; Seliga, Aron et al. 1992; Troutman 1983) semblent appuyer l'affirmation selon laquelle la trajectoire des cellules orageuses est un

élément très important à considérer dans les simulations hydrologiques. La concordance du vecteur de vitesse de déplacement de l'orage avec l'écoulement de la rivière pourrait être une condition qui favorise l'atteinte du débit maximal. C'est, entre autres, pour cette raison que certains vont privilégier les modèles distribués par rapport aux modèles globaux (Obled, Wendling et Beven 1994). Par contre, ces auteurs affirment que c'est le volume de pluie total affectant le bassin qui est le paramètre le plus important, puisque la variation de la trajectoire de l'orage pourra être compensée par une distribution diffuse de la pluie sur le bassin. Ils estiment toutefois que la variabilité spatiale de la pluie peut effectivement avoir un impact sur l'hydrogramme d'un bassin rural de taille moyenne (100 à 1000 km²), mais pas de manière très significative, contrairement aux bassins de grandes superficies.

2.2 Généralités sur les hydrogrammes de crues

Différents paramètres peuvent être considérés pour caractériser une crue, soit :

- Débit de base [Qini] ;
- Débit maximal [Qmax] ;
- Débit d'équilibre [Qe] ;
- Temps de montée ;
- Temps de concentration ;
- Durée (temps de base) ; et
- Volume.

Le débit de base est le débit dans la rivière, avant que ne s'amorce la montée de la crue. Le paramètre de débit maximal est considéré notamment, par Schober (1996) pour caractériser la réponse (hydrogramme à l'exutoire) du bassin versant. Par ailleurs, Rousselle, Neill et Richards (1990) définissent le débit d'équilibre comme étant, pour une intensité constante, le débit lorsque la « capacité d'emmagasinement à la surface est atteinte », ce qui signifie que tout le bassin est mis à contribution dans le débit à l'exutoire. En d'autres termes, le débit entrant est égal au débit sortant et tout apport de

pluie supplémentaire ne fait que retarder la décrue. Selon Réménieras (1972), ceci est le cas lorsque la durée de la pluie excède le temps de concentration du bassin.

Les durées caractéristiques relatives à une crue sont définies par les paramètres suivants :

- le temps de montée : courbe ascendante de l'hydrogramme qui représente le temps « entre le début de l'arrivée à l'exutoire du « ruissellement » et le maximum de l'hydrogramme » (Javelle 2001) (Figure 3.3) ;

Le temps de montée correspond à l'intervalle dans lequel l'hydrogramme atteint le débit maximal. (Réménieras 1972) nomme « Courbe de concentration », cette partie de l'hydrogramme correspondant au temps de montée. Il précise que cette courbe de concentration dépend directement de la répartition spatio-temporelle de la pluie;

- le temps de concentration : le temps le plus long que met une particule d'eau pour ruisseler à l'exutoire. On l'estime par le temps entre la fin de la pluie efficace et la fin du ruissellement (décrue) (Javelle 2001).

Le temps de concentration est un paramètre très important pour caractériser et différencier les bassins versants. Il y a trois phases (Musy 2002) qui constituent le temps de concentration d'un bassin versant, soit :

- ✓ temps d'humectation : temps requis pour saturer le sol ;
- ✓ temps de ruissellement : durée de l'écoulement sur le bassin jusqu'au cours d'eau ; et
- ✓ temps d'acheminement ou de transfert : temps de transport dans le cours d'eau jusqu'à l'exutoire.

Le temps de concentration, selon Musy (2002) est fonction des éléments suivants :

- ✓ les caractéristiques géométriques des bassins : la surface, la forme et le relief ;
- ✓ le réseau hydrographique : la géologie, le climat, les pentes du terrain et des cours d'eau et l'intervention humaine (canaux, fossé, pompage,...) ;
- ✓ l'occupation et la nature du sol (coefficient de ruissellement): couvert végétal, plans d'eau, neige et glaciers, urbanisation, état d'humidité, texture du sol.

À titre indicatif, on peut dire que dans un contexte de crues rapides, le temps de concentration des bassins est de l'ordre de 12 heures (Roy 2000).

Enfin, les paramètres de temps de base (durée du ruissellement) et de volume de la crue sont considérés par (Javelle 2001) pour développer la méthode débit-durée-fréquence convergent, par une approche statistique analogue à celle utilisée pour les pluies (intensité-durée-fréquence) .

La genèse d'une crue est donc la combinaison de tous ces paramètres. Les premières pluies d'un épisode pluvieux sont généralement celles qui vont saturer le sol par l'effet de l'infiltration. Si la pluie cesse, une crue retardée peut tout de même être engendrée par l'effet du ruissellement retardé (écoulement subsurfacique et/ou souterrain). Par ailleurs, si la pluie persiste, le sol étant saturé, une crue peut être générée par l'effet de l'écoulement de surface résultant de la pluie nette ou excédentaire, puis elle sera prolongée ou maintenue par la contribution de l'écoulement subsurfacique et /ou souterrain. Dans ce mémoire, la totalité de la pluie est la pluie nette qui engendre un écoulement de surface, sans qu'il n'y ait de perte.

CHAPITRE III

MÉTHODOLOGIE ET ORGANISATION DE L'ÉTUDE

3.1 Méthodologie

La méthodologie entreprise dans le cadre de la présente étude est une série d'activités séquentielles telles que présentées ci-après, soit :

- Organisation de l'étude [élaborée ci-après] ;
 - ✓ identification du bassin témoin;
 - ✓ définition des paramètres de pluie et de crue considérés ;
 - ✓ définition des modèles de simulation ;
 - ✓ définition des scénarii de simulation.
- Simulation : élaboration des courbes IDTA-ISTA [élaborée au chapitre 4] ;
 - ✓ pluies uniformément réparties [IDTA] ;
 - ✓ pluies localisées [ISTA] ;
 - ✓ variabilité spatiale.
- Application aux événements de novembre 1999 [élaborée au chapitre 5] ;
 - ✓ résumé de l' événement réel ;
 - ✓ scénario fictif de Mise en alerte.
- Recommandations [élaborées au chapitre 6].

3.2 Bassin versant témoin

L'outil de prévision développé dans la présente étude découle d'un cas-type, soit la partie amont du bassin versant Thoré dans le Tarn. Celui-ci présente un intérêt particulier puisque cette zone n'est pas couverte par les SAC, et que ses conditions topographiques très accidentées (zone montagneuse) le rendent très sensible aux crues rapides, tel qu'en témoignent les inondations de novembre 1999 (cf. § annexe C).

La zone à l'étude s'étend depuis la commune de Labastide-Rouairoux jusqu'à Mazamet, 28 km plus bas, ce qui représente environ 35 % de la superficie totale (584 km²) du bassin. Une description plus détaillée du bassin versant et des pluies diluviennes auxquelles il est soumis, est présentée à l'annexe B.

3.3 Paramètres de pluie

Dans un contexte de Mise en alerte, on doit éliminer le nombre de variables aléatoires en jeu et privilégier une démarche plutôt déterministe afin de faciliter la prise de décision. Il devient ainsi nécessaire de définir le minimum de paramètres caractérisant la pluie, la crue et la Mise en alerte, et de définir un lien pertinent entre ceux-ci.

3.3.1 Paramètres de pluie et BAP

Afin de développer un outil qui s'intègre le plus facilement possible aux procédures actuellement en vigueur dans le système français de gestion des crues (cf. Annexe A), les paramètres de la pluie les plus pertinents s'inscrivant dans la présente étude sont ceux reliés aux informations de Météo-France déjà disponibles. Le contenu des Bulletins d'alerte aux précipitations [BAP] (cf. § Annexe D) que Météo-France transmet aux SAC couvrent plusieurs bassins en précisant, pour chacun, les éléments suivants :

- la plage de cumul prévisible selon différentes durées ;
- le cumul maximal ponctuel ; et
- le cumul de pluie tombée à J-1¹

Les paramètres de la pluie qui sont considérés sont donc les suivants :

- la durée : les BAP donnent des prévisions de début et de fin de pluie sur des durées de l'ordre de 6, 9, 12, 24,... heures ;
- le cumul : les BAP proposent une plage de cumuls possibles pour différents bassins, sans toutefois préciser la superficie exacte;
- les intensités maximale et moyenne : les BAP peuvent indiquer la présence de pointes de cumuls; en divisant celles-ci de même que la plage de cumuls possibles, par la durée, on obtient des intensités maximales ou moyennes respectivement.

En effet, le cumul [mm] indiqué sur les BAP se traduit par le produit des paramètres d'intensité [I en mm/hre] et de durée [D en heures] de la pluie de la façon suivante :

$$\text{Cumul} = \text{Intensité} \times \text{Durée} \quad [\text{Équation 1}]$$

On peut ainsi interpréter les informations contenues dans les BAP, à l'exception, pour le moment, du cumul de pluie tombée à J-1.

3.3.2 Hypothèses sur la pluie

Dans le cas des crues dites éclair, on peut considérer l'ensemble de l'épisode pluvieux comme la pluie nette ou excédentaire, puisque la rapidité du phénomène et le rapport des pertes par rapport aux volumes de pluie tombée, présupposent que l'infiltration peut être

¹ J : jour, le moment présent; J-1 ce qui est tombé à ce jour, au moment de la rédaction du bulletin.

négligeable. Les crues de novembre 1999, par exemple, ont été caractérisées par un ruissellement direct, considérant que (Lefrou, Martin et al. 2000):

« L'épisode pluvieux des 12 et 13 novembre 1999 a été marqué par des coefficients de ruissellement élevés dus :

- *à la durée et à l'intensité soutenue de la pluie qui a saturée la surface du sol ;*
- *aux intensités extrêmes qui ont provoqué un blocage de la remontée de l'air du sol et donc de l'infiltration. »*

Les précipitations ont vraisemblablement ruisselé quasi intégralement, non seulement pendant l'épisode pluvieux de la nuit du 12 et 13 novembre, mais probablement aussi pendant une partie de celui de l'après-midi du 12 novembre ».

Ainsi, dans la présente étude, toute la pluie est considérée comme étant entièrement la pluie nette.

3.3.3 Variabilité spatiale des cellules orageuses:

Dans le cas des événements de novembre 1999, il semblerait (Lefrou, Martin et al. 2000) que les petits bassins tel que le Thoré (ordre de grandeur non indiquée) aient été « entièrement couverts par des averses très intenses...et ont connu des crues très violentes ». En revanche, les bassins de plus grandes superficies auraient été sujets à une « superposition d'une crue classique (réaction à la pluie généralisée), et des crues rapides (réaction aux averses paroxystiques touchant une partie de leur bassin) » (Lefrou, Martin et al. 2000).

Ainsi, il s'avère intéressant de tenter d'évaluer la sensibilité du bassin Thoré à la présence de cellules orageuses de différentes tailles ainsi qu'à la variabilité spatiale de celles-ci. Ceci se traduit, dans un premier temps, par des simulations permettant de

comparer les réponses du bassin, à des cellules orageuses de même volume mais de superficies différentes, toutes localisées au même endroit, soit au centre du bassin (Figure 3.1).

Dans un second temps, on simule, des scénarii de pluie où l'on ne fait que déplacer la cellule orageuse à différents endroits, soit : à l'amont du bassin, en son centre puis à l'aval, près de l'exutoire sis à Mazamet (Figure 3.2).

Puisque dans ces scénarii on considère la superficie de l'orage, on introduit le paramètre du volume [V en hm^3] de la pluie nette, ce qui se définit par le produit du cumul [m] (cf. Équation 3.1) par la superficie [km^2] de la cellule orageuse, soit :

$$\text{Volume} = \text{Intensité} \times \text{Durée} \times \text{Superficie} \quad [\text{Équation 2}]$$

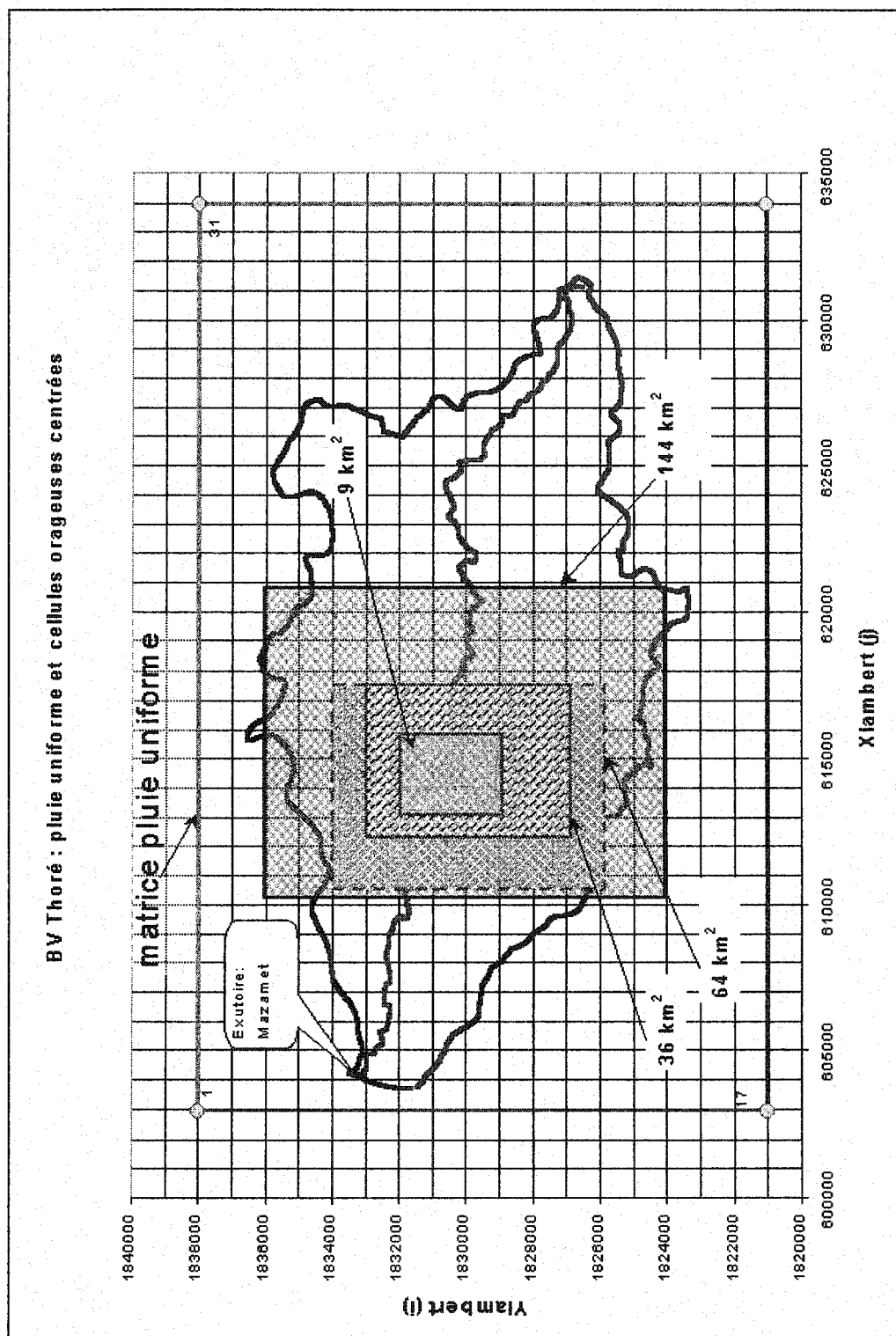


Figure 3.1 Cellules localisées au centre du bassin.

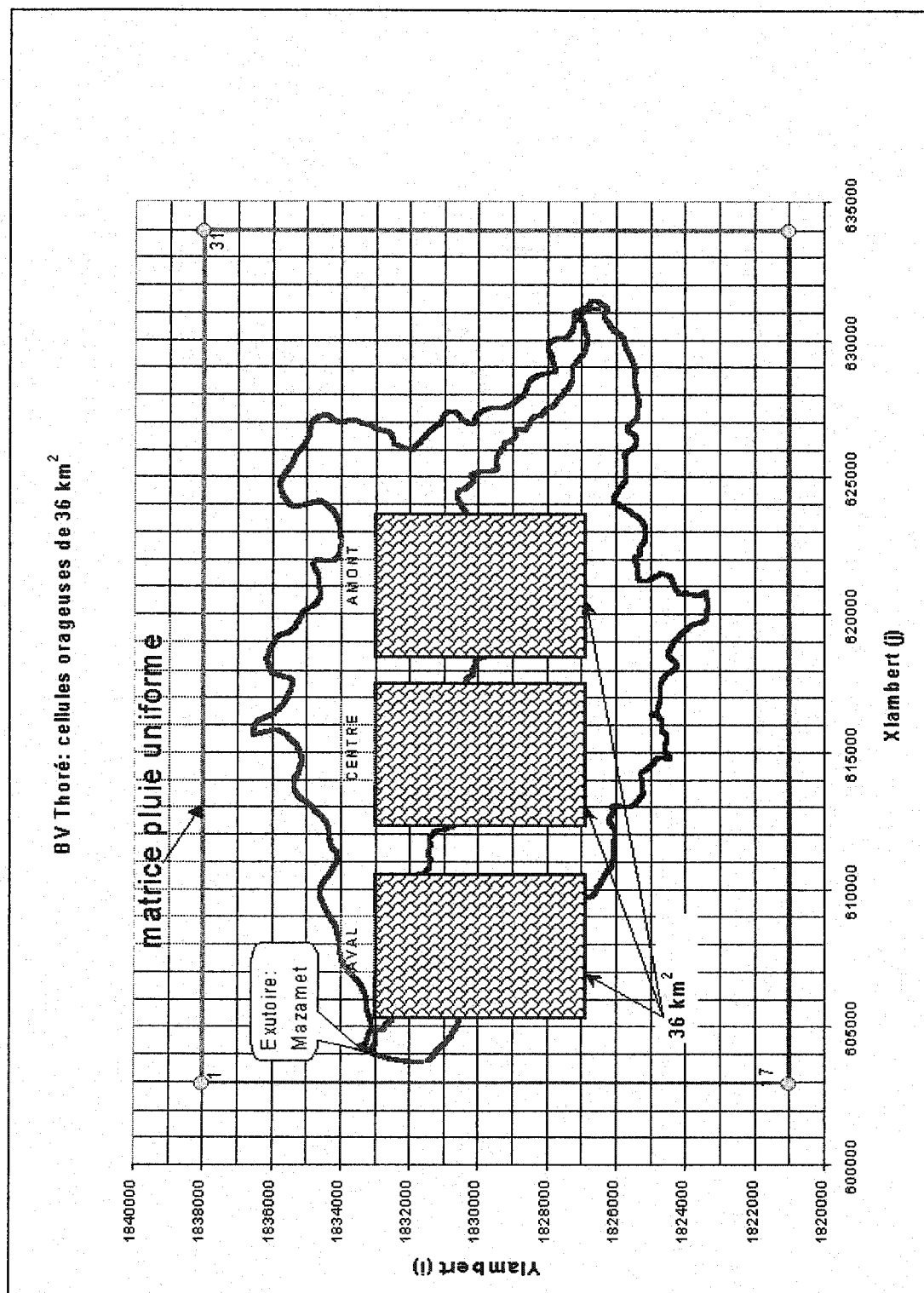


Figure 3.2 Localisation des cellules orageuses.

3.4 Paramètres de crue

3.4.1 Débit d'alerte

Dans un contexte d'inondation, le paramètre « Qmax » est un indicateur pour le volet « organisation des secours » puisqu'il définit l'ampleur du phénomène. Ainsi, il est proposé, d'une part, d'introduire le paramètre de « débit d'alerte » [Qalerte] (Figure 3.3) par analogie avec les **cotes d'alerte** (Annexe A) des SAC. La transformation d'un débit à un niveau d'eau est possible au moyen de la courbe de tarage.

D'autre part, la « durée » de la crue (cf. §2.2), dans un contexte de Mise en alerte, est une information moins pertinente pour les prévisionnistes des SAC que le moment où le débit d'alerte est atteint (Figure 3.3). Ainsi, le paramètre de « durée » de la crue n'est pas considéré mais plutôt celui du « temps d'alerte » [Talerte]. Le Talerte est donc défini comme le temps s'écoulant entre le début de la pluie et le moment où le Qalerte est atteint à l'exutoire. Il est fonction du « temps de montée » de l'hydrogramme qui, pour sa part, dépend des caractéristiques de la pluie (intensité-durée-superficie-localisation).

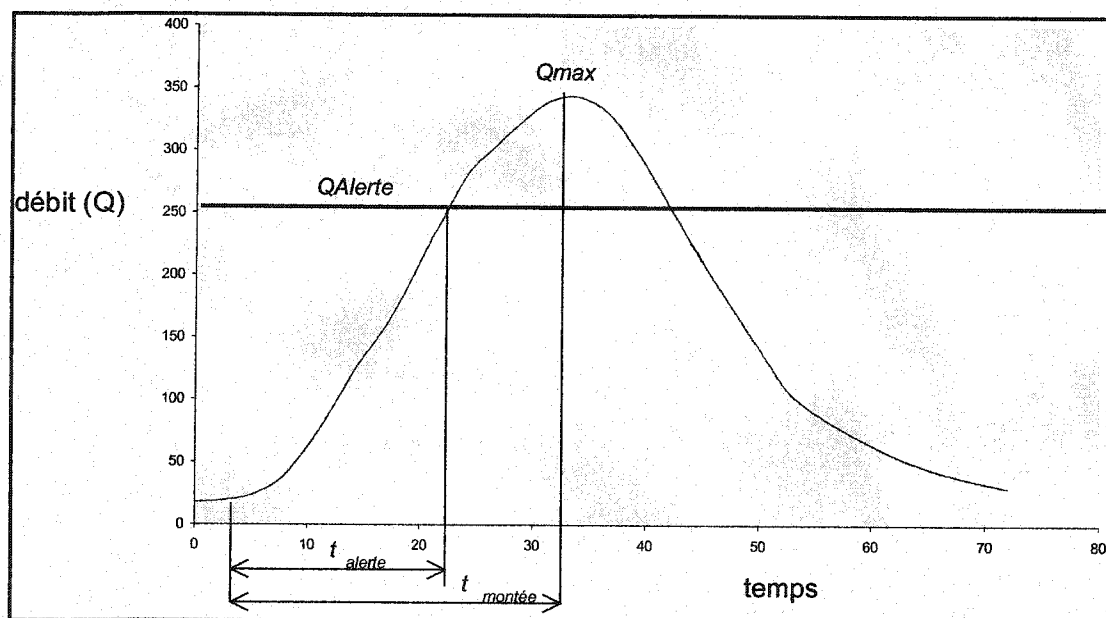


Figure 3.3 Paramètre de la crue : Q_{alerte}

3.4.2 Hypothèses sur le débit d'alerte

La zone à l'étude n'est ni instrumentée ni surveillée par les SAC, il n'y a donc pas de **cote d'alerte** définie à l'amont de Mazamet. Par conséquent, il n'existe pas de Q_{alerte} . Pour le bénéfice de la présente étude, une valeur fictive mais réaliste, d'un débit d'alerte a été fixée. Dans l'évaluation des débits reliés aux événements de novembre 1999, on estime (Lerflou, Martin et al. 2000) le débit spécifique à $1,6 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ sur le Thoré, à la hauteur de Labruguière (550 km^2 de superficie). Ceci correspond à une période de retour de l'ordre de 100 ans. Si l'on considère la superficie de 208 km^2 du bassin amont de Mazamet, on aurait un débit de l'ordre de $333 \text{ m}^3/\text{s}$. On propose l'hypothèse d'un débit d'alerte de l'ordre de $250 \text{ m}^3/\text{s}$, soit les $\frac{3}{4}$ du débit de pointe estimé pour la crue de novembre 1999 sur le Thoré à Labruguière.

Toutefois, l'anticipation du T_{alerte} au moyen du modèle neuronal (cf. § 3.5.2) permet de donner des valeurs pour n'importe quelles valeurs de Q_{alerte} spécifiées.

3.5 Scénarii de simulations

Les scénarii de simulations sont fixés de façon à interpréter l'information que Météo-France est actuellement habilitée à fournir (cf. § 3.3.1). Ainsi, des simulations de pluies uniformément réparties sur le bassin versant sont requises pour définir les Talerte selon les informations contenues dans les BAP (cumul et durée notamment). Également, des simulations pour des cellules de pluies localisées doivent permettre d'évaluer le Talerte des orages ponctuels (cumul maximal ponctuel) selon leur superficie. Enfin, on tente d'évaluer la sensibilité de la réponse du bassin (Talerte), à la variabilité spatiale de la pluie. Ainsi, les *scénarii* de pluies simulées sont :

- Pluies uniformément réparties sur le bassin versant (208 km²);
- Cellules orageuses de différentes superficies, localisées au centre du bassin; et
- Cellules orageuses identiques mais localisées en différents endroits.

Les résultats de ces simulations permettent de relier les paramètres de la pluie contenus dans les BAP au paramètre de la crue (Talerte) au moyen de courbes d'Intensité-Durée-Talerte [IDTA] pour des pluies uniformément réparties sur le bassin ou d'Intensité-Superficie-Talerte [ISTA] pour des cellules orageuses localisées en son centre, respectivement. Les résultats des simulations pour les cellules orageuses localisées en différents endroits sont trop succincts pour permettre l'élaboration de courbes reliant les paramètres de ce type de pluie au Talerte. Le paramètre de la localisation de la cellule orageuse n'est donc pas approfondi dans la présente démarche. Néanmoins, les résultats sont présentés en § 4.3.4.

3.6 Modèles de simulation

Les simulations qu'implique l'élaboration des courbes IDTA et ISTA pour le bassin versant du Thoré, sont réalisées, à partir du modèle Modélisation de l'anticipation du ruissellement et des inondations pour des événements extrêmes [MARINE] (version mai 2002) développé par l'I.M.F.T. (Estupina-Borrell, Dartus et Alquier 2002) ainsi qu'au moyen d'un modèle neuronal développé par le département d'Hydraulique, de l'École Polytechnique de Montréal.

3.6.1 MARINE

Le logiciel MARINE est une combinaison d'un modèle hydrologique (transformation de pluie en débit) et d'un modèle hydraulique (transfert d'hydrogramme).

Le modèle hydrologique est de type déterministe à base physique et distribué (maillage structuré). Ce dernier transforme la lame d'eau pluvieuse en apports latéraux le long des cours d'eau principaux. Il s'agit d'un programme développé en FORTRAN, et qui requiert :

- des données spatiales provenant des Modèles numériques de terrain [M.N.T.] pour le calcul des pentes (pente la plus forte) ;
- des précisions sur l'occupation du sol (images satellitales) pour estimer les coefficients de rugosité ; et
- les lames d'eau.

Les lames d'eau radar ne sont pas facilement disponibles dans les zones montagneuses dont la partie amont du bassin de la rivière Thoré. Ainsi, dans le cadre de cette étude, des pluies synthétiques uniformément distribuées puis localisées sur le bassin ont été créées au moyen d'un programme développé en FORTRAN (cf. § Annexe E).

On peut utiliser un modèle hydraulique quelconque de transfert d'hydrogramme dans la mesure où les résultats du modèle hydrologique sont adaptés aux intrants du modèle hydraulique. Le modèle MARINE est actuellement configuré pour l'utilisation du modèle hydraulique Télémac2D¹ et le modèle 1D Maillé généralisé² [MAGE] (Faure 1998). Ces modèles tiennent compte des apports latéraux tout le long du cours d'eau principal, issus du modèle hydrologique et résolvent les équations bi et monodimensionnelles de St-Venant. Dans la présente étude, MAGE (1D) a été utilisé puisque la configuration de Télémac2D pour MARINE n'était pas encore à point lors de la réalisation des simulations.

À ce jour, l'étalonnage de MARINE requiert des données mesurées de pluie-débit d'au moins un événement. Ces dernières n'étaient pas disponibles sur la zone à l'étude du bassin Thoré. Néanmoins, ce n'est que la méthodologie de l'approche qui est définie ici, le tout pouvant être validé et affiné ultérieurement lorsque l'étalonnage de MARINE sera fait sur le Thoré. La recherche se poursuit en ce sens à l'I.M.F.T. afin également de pouvoir exporter l'application de MARINE sur des bassins non jaugés en procédant à l'étalonnage du modèle à l'aide des informations spatiales (images satellitales).

3.6.2 Modèle neuronal

Le lien à créer entre les paramètres de la pluie (intensité, durée, superficie, volume) et de la crue (temps d'alerte) n'est pas univoque (cf. § 4.2.2) et n'a pas de formule connue. On

¹ Télémac2D : Logiciel de simulation bidimensionnelle d'écoulement en rivière, développé par EDF-DFR (1998).

² Mage : Logiciel de simulation monodimensionnelle d'écoulement en rivière, développé par le Cemagrf-Lyon

a donc eu recourt à un modèle neuronal (réseau de neurones artificiels) développé par la section hydraulique de l'École Polytechnique de Montréal. Ce dernier permet de définir un lien entre les paramètres, par apprentissage sur les données, pour la plage de valeurs des paramètres considérée, tout en limitant le nombre de simulations requis pour ce faire.

Ce modèle permet donc d'évaluer la bonne correspondance entre les éléments d'un même ensemble, tel que l'Intensité et la Durée ou la Superficie d'une pluie et le Temps d'alerte correspondant à un débit d'alerte spécifié.

Deux modèles neuronaux ont été développés pour la présente étude. Le premier permet de donner les valeurs d'Intensité, Durée et Talerte, pour un débit d'alerte spécifié dans le cas d'une pluie uniformément distribuée sur le bassin. Le second peut fournir, selon une Intensité de pluie associée à une Superficie de cellule orageuse centrée au bassin versant, le temps auquel le débit d'alerte sera atteint (Talerte) (cf. § 4.2.3 & 4.3.3).

CHAPITRE IV

SIMULATIONS POUR LA MISE EN ALERTE SUR LE THORE

Les paramètres de la pluie (cf. § 3.3.1) étant liés entre eux par l'équation 3.2, l'évaluation de la sensibilité de la réponse du bassin Thoré (Talerte) se fait à raison d'un paramètre à la fois (cf. § 4.1 & § 4.2).

4.1 Pluie uniforme : Intensité

Les premières simulations ont été réalisées pour une gamme d'intensités de pluies uniformément réparties, en fixant une durée de pluie de 24 heures pour chacune. Celles-ci donnent les résultats suivants :

Tableau.1 Simulations - pluies uniformes de 24 heures

Intensité (mm/h)	Volume (lm ³)	Temps d'alerte (hre)
2,5	12,48	N/A
3	14,98	N/A
3,1	15,48	17,3
4,5	22,46	8,2
5	24,96	7,6
7,5	37,44	5,8
10	49,92	4,7
13	64,90	3,9
16	79,87	3,4
22	109,82	2,8
33	164,74	2,2

Certains des hydrogrammes issus de ces simulations sont présentés à l'annexe F. Ces résultats semblent cohérents puisque les Talerte diminuent avec les intensités croissantes. En effet, pour une intensité plus forte, la montée de l'hydrogramme est plus rapide et donc Qalerte est atteint plus tôt. Les hydrogrammes démontrent également que, peu importe l'intensité, toutes les pluies ont un temps d'équilibre [Te] de l'ordre de 18,5 heures. En effet, bien que les débits d'équilibre soient différents (augmentent pour des I plus élevées), ils se produisent tous au même moment.

Enfin, les résultats de ces simulations permettent de cibler la plage de valeurs d'intensités de pluie, pour lesquelles une alerte est probable. D'une part, il est possible d'identifier l'intensité minimale pour laquelle le Qalerte n'est jamais atteint, peu importe la durée de la pluie, soit : pour $I < 3,1$ mm/h (le Q_e est inférieur au Qalerte). Par exemple, une pluie de 3 mm/h qui tombe pendant 24 heures ou plus (Figure 4.1) n'atteint jamais le Qalerte ($Q_e = 249$ m³/s). D'autre part, on cible l'ordre de grandeur des valeurs pour lesquelles le Qalerte est rapidement (2,2 heures) atteint, soit : $I \geq 33$ mm/h. On observe donc que le Talerte peut varier de l'ordre de 2 à 17 heures.

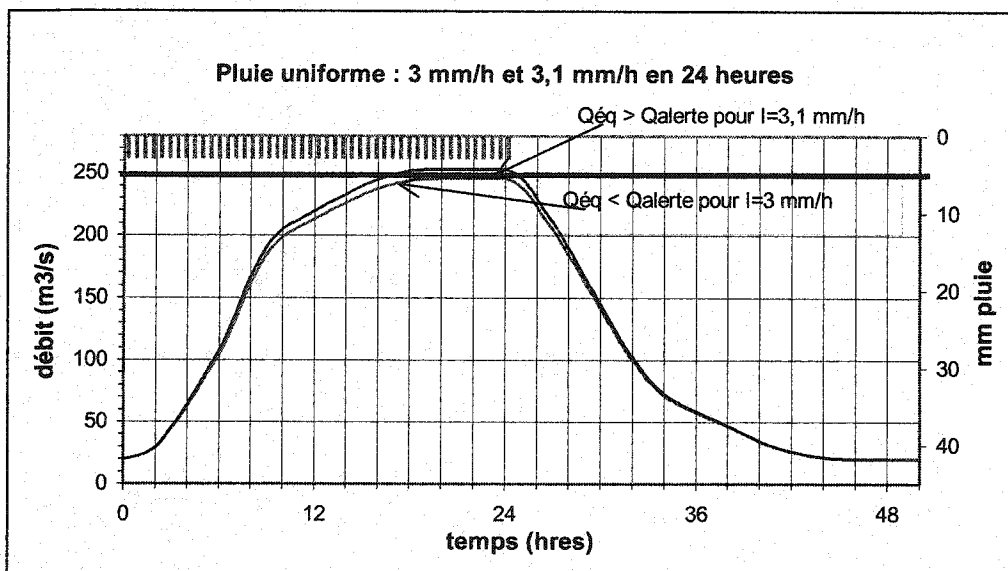


Figure 4.1 Hydrographes pluies uniformes pour I_{min} 3,1 mm/h

4.2 Pluie uniforme : Volume-Durée

4.2.1 Volume

Alors qu'à la Figure 4.1 on observe qu'une pluie de 3,1 mm/h (I_{min}) qui dure 24 heures, génère un Qalerte à 17,3 heures, la Figure 4.2 indique, pour sa part, que le Qalerte est possible dans la mesure où la durée de cette pluie est suffisante. En effet, cette même pluie (3,1 mm/h) d'une durée de 17 heures atteint un Q_{max} de $249 \text{ m}^3/\text{s} < Q_{alerte}$. Ceci démontre qu'il y a un volume minimal de pluie qui est requis pour une intensité donnée, pour engendrer un Qalerte. Dans ce cas-ci, pour une pluie d'intensité de 3,1 mm/hre, le volume minimal de pluie requis est de $11,61 \text{ hm}^3$. Par ailleurs, dans le cas où $Q_e = Q_{max} = Q_{alerte}$, le prolongement de la durée de la pluie au-delà de T_e , ne fait que retarder la décrue (prolongement de la pointe dans le temps) sans modifier le T_{alerte} . Il apparaît donc non pertinent de simuler des pluies de durées excédant le T_e .

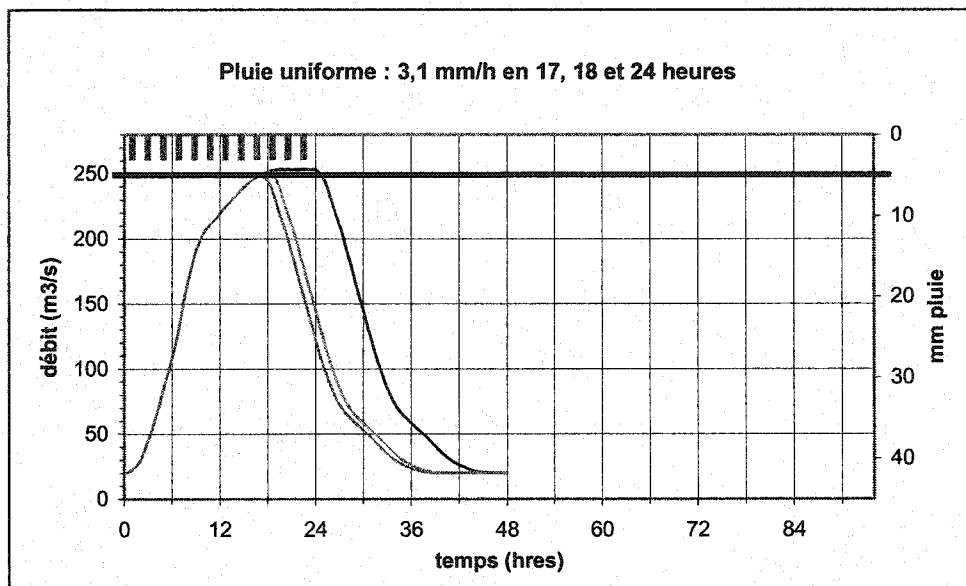


Figure 4.2 Hydrogramme pluie uniforme : I_{min} pour 17,18 et 24 hres

Ainsi, on observe que pour avoir un débit d'alerte, il y a une condition sine qua non sur la pluie : un volume minimal. De plus, celui-ci est propre pour chaque Intensité $I \geq I_{min}$. Il devient pertinent d'évaluer la durée minimale [D_{min}] de la pluie, donc son volume minimum requis pour atteindre le Q_{alerte} à l'exutoire pour une plage de valeur d'intensités.

4.2.2 Durée

Une série de simulations (Tableau 4.2) a été réalisée pour des pluies uniformes de diverses intensités et pour des durées variables mais inférieures au T_e (18,5 hres).

Tableau 4.2 Simulations - pluies uniformes de durées variables

Intensité (mm/h)	Durée (hre)	Volume (hm ³)	Temps d'alerte (hre)
3,1*	17	10,96	N/A
	18	11,61	17,3
4	8,5	7,07	N/A
	9	7,49	9,8
5,5	3	3,43	N/A
	5	5,72	N/A
	6	6,86	8,0
	7	8,01	7,1
	9	10,30	7,1
	18	20,59	7
7,5	4	6,24	N/A
	5	7,80	6,10
	6	9,36	5,75
9	2	3,74	N/A
	3	5,62	N/A
	4	7,49	6,1
	5	9,36	5,75
10	3,25	6,86	6,8
	5	10,40	4,7
	6	12,48	4,7
	12	24,96	4,7

Tableau 4.2 (suite) : Simulations - pluies uniformes de durées variables

Intensité (mm/h)	Durée (hre)	Volume (hm ³)	Temps d'alerte (hre)
11	2	4,58	N/A
	3	6,86*	6,67
	4	9,15	4,67
	9	20,59	4,4
	18	41,18	4,4
13	2	5,41	N/A
	3	8,11	5,17
	4	10,82	4
15	2	6,24	N/A
	3	9,36	4
	4	12,48	3,6
18	2	7,49	5,8
	3	11,23	3,2
22	4,5	20,59	2,8
	18	82,37	2,8
33	1,5	10,3	N/A
	3	20,59	2,2
	9	61,78	2,2
	18	123,55	2,2

* Valeur minimale

Les résultats du Tableau 4.2 et la Figure 4.3 montrent, entre autre, l'influence de la répartition temporelle d'un même volume de pluie : celle-ci est caractérisée par le paramètre Intensité. Ce dernier a pour effet de devancer ou retarder le Talerte. Par exemple, dans le cas d'une pluie de $20,59 \text{ hm}^3$, tombée en 3 ; 4,5 ; 9 ou 18 heures, les Talerte sont de 2,2 ; 2,8 ; 4,4 ou 7 heures respectivement.

Les résultats du Tableau 4.2 illustrent également que globalement, le volume de pluie minimal de $6,86 \text{ hm}^3$ est requis pour qu'un débit d'alerte puisse être atteint à l'exutoire. En effet, il n'y a aucun Qalerte pour un volume de pluie inférieur à cette valeur. Néanmoins, tel que mentionné en § 4.2.1, pour chaque intensité il y a un volume minimal de pluie requis pour générer un Qalerte à l'exutoire. Par exemple, un volume de $10,3 \text{ hm}^3$ d'une pluie de 33 mm/h en 1,5 hres ne produit pas un Qalerte alors que le même volume tombé en 9 heures ($I = 5,5 \text{ mm/h}$), donne un Qalerte à 7,1 heures.

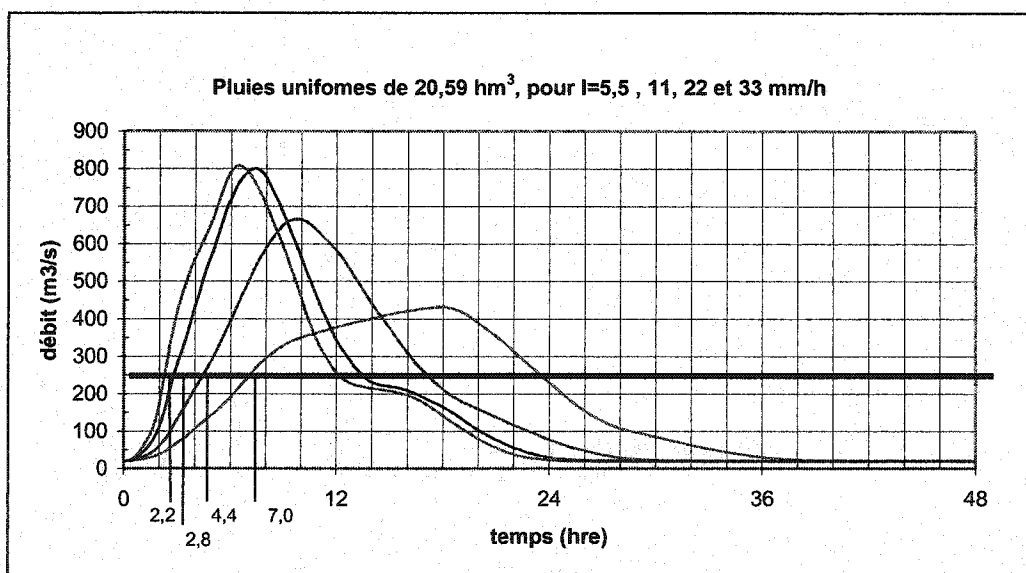


Figure 4.3 Hydrogrammes de pluies uniformes pour même volume

La Figure 4.4 démontre qu'une pluie de $5,5 \text{ mm/h}$ doit durer au moins 6 heures [$D_{\min} = 6 \text{ hres}$] pour que le Qalerte soit atteint à Talerte = 8 heures. Par ailleurs, si la

durée est supérieure à 7 heures, le Talerte est devancé de l'ordre d'une heure, soit à Talerte = 7,1 heures. Pour toute pluie de 5,5 mm/h dont la durée excède 7 heures, le temps d'alerte est le même (la pente de montée de l'hydrogramme est constante au voisinage de Talerte).

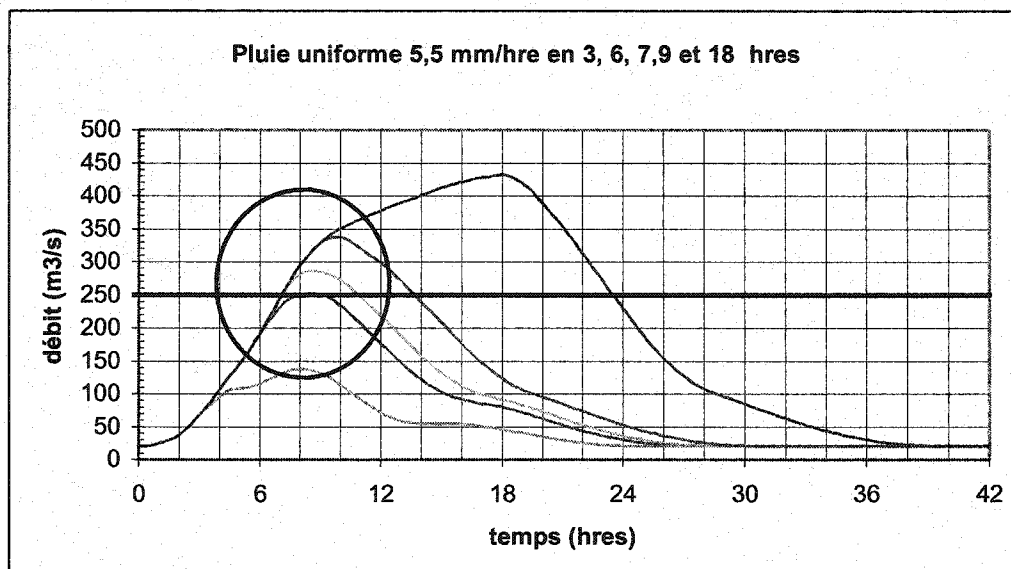


Figure 4.4 Hydrogrammes pour Intensité de 5,5 mm/h

Ces résultats font ressortir que Talerte est une valeur constante pour une pluie d'une certaine intensité [I] ($I > 3,1$ mm/h, cf. §4.1), dans la mesure où la durée de la pluie est supérieure au Talerte. En effet, lorsque la pluie cesse, il y a un changement de pente de l'hydrogramme : toutes les surfaces contributives du bassin ont ruisselées jusqu'à l'exutoire, donc l'hydrogramme tend vers Q_{max} pour amorcer la décrue. Si toutefois la pluie cesse après que le Q_{alerte} ait dépassé, le changement de pente n'affecte pas le Talerte qui demeure constant. En d'autres termes :

➤ Pour une pluie d'intensité I

$$Talerte(I) = f(Durée); D_{min} \leq Durée < Talerte$$

$$Talerte(I) = cte; \quad Durée > Talerte$$

[Équation 3]

Cette observation s'avère valable pour tous les cas simulés (sauf pour I_{min} car $Q_{alerte} = Q_{max} = Q_e$, cf. § 4.2.1).

Toutefois dans le cas des pluies de forte intensité (ex. : 33 mm/h, Figure 4.5), cette variabilité du T_{alerte} est moins prononcée puisque l'ordre de grandeur de la durée de la pluie pour atteindre Q_{alerte} est très petit (volume de pluie important en peu de temps). Ainsi, en moins d'une demi-heure on passe d'un hydrogramme n'atteignant pas le Q_{alerte} ($Q_{max} \approx 220 \text{ m}^3/\text{s}$) à un hydrogramme dépassant largement cette valeur ($Q_{max} \approx 500 \text{ m}^3/\text{s}$).

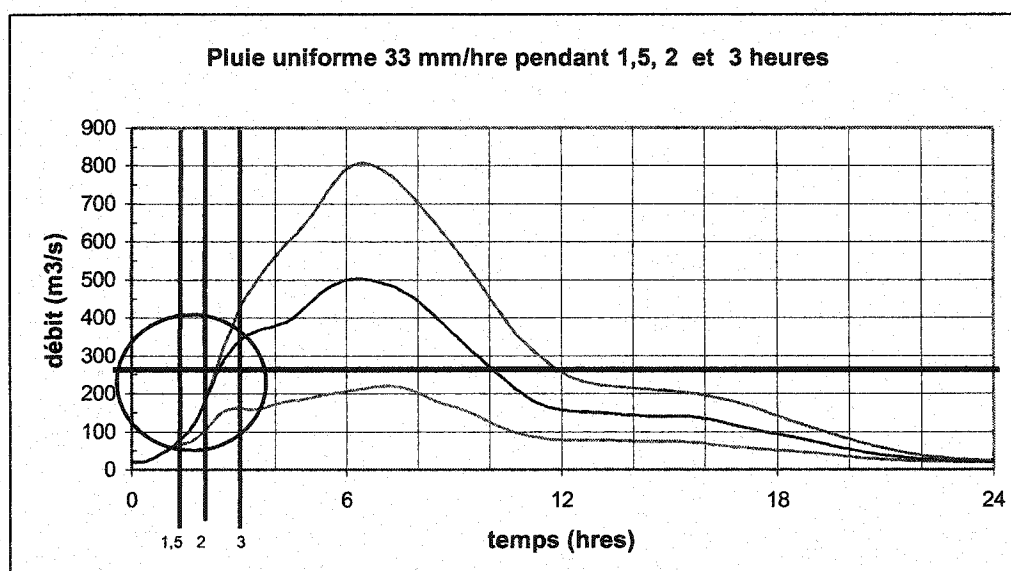


Figure 4.5 Hydrogrammes pour Intensité de 33 mm/h

Il s'avère donc plus difficile d'établir la fonction régissant les paramètres de la pluie (I et D) au T_{alerte} lorsque la durée de la pluie est inférieure à celui-ci, en particulier pour les pluies de faibles ou moyennes intensités. Ceci est également le cas où la prise de décision d'enclencher ou non une alerte, est le plus difficile. Il est donc essentiel de traiter cette situation. Pour se faire, il faudrait simuler tous les cas envisageables selon un pas de temps fixe de l'ordre d'une demi-heure, pour couvrir l'ensemble des valeurs

possibles. Ceci requiert un temps de calcul considérable. Ainsi, pour limiter le nombre de simulations requises, on a eu recours à un modèle de neurones (cf. § 3.2.6) qui permet d'établir les courbes reliant les intensités et les durées de la pluie uniforme au temps d'alerte [IDTA] (cf. § 4.2.3), à partir des résultats de seulement quelques simulations réalisées avec MARINE (cf. § 3.6.1).

4.2.3 Pluies uniformes : Courbes IDTA

L'ensemble des résultats des simulations faites en § 4.1 & § 4.2.2 constituent la base de données pour le modèle neuronal. Les hydrogrammes issus du modèle Mage (cf. § 3.6.1) ainsi que les paramètres de la pluie (Intensité et Durée) constituent la base de données du modèle. Le temps d'alerte est donné en fonction du débit d'alerte (cf. § 3.4.1) que spécifie l'utilisateur. Ainsi, l'hypothèse d'un Qalerte de $250 \text{ m}^3/\text{s}$ donne les courbes de la Figure 4.6 suivante :

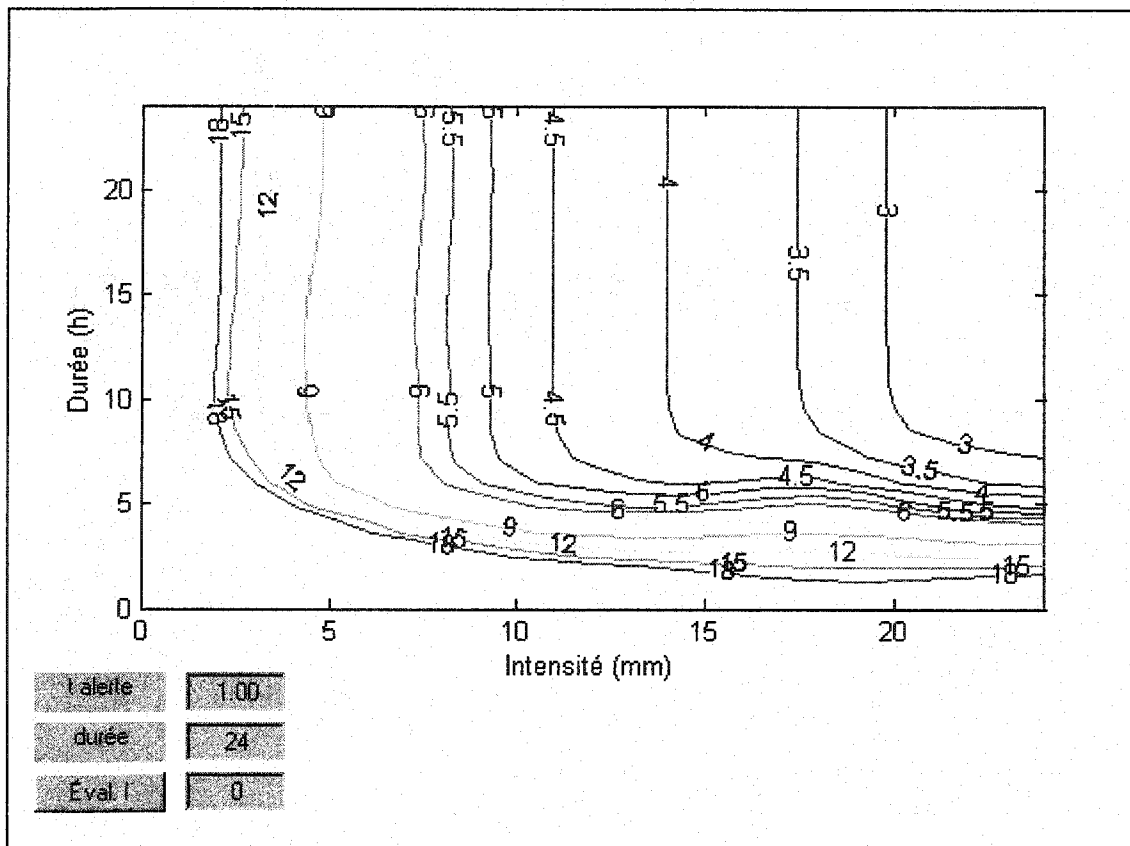


Figure 4.6 Courbes Intensité-Durée-Temps d'alerte [IDTA]

Tel que discuté précédemment, on observe qu'il n'y a pas de Talerte ($Talerte \rightarrow \infty$) pour les $I < 3,1$ mm/h et que le Talerte, pour une Intensité donnée, tend vers une valeur constante pour des pluies de plus longue durée ($D > Talerte$).

4.3 Cellules orageuses

4.3.1 Superficie des cellules orageuses

Les simulations faites en § 4.1 et § 4.2.2, ne couvrent que les cas d'une pluie uniformément répartie sur le bassin versant. On s'intéresse maintenant à des cellules orageuses de superficies variables, présumées stationnaires, semblables à celles produites par un effet cévenol (§ 2.1.1). Une série de simulations est requise pour

observer l'évolution des plages des paramètres de la pluie (cf. § 3.3.1) qui génèrent un Qalerte, en fonction de la superficie de ces cellules orageuses.

Considérant la taille du bassin (208 km^2), les cellules orageuses sont de superficies particulièrement petites (Figure 3.1) :

- 9 km^2 (4,3 % de la superficie totale du bassin) ;
- 36 km^2 (17,3 % de la superficie totale du bassin) ;
- 64 km^2 (30,8 % de la superficie totale du bassin) ; et
- 144 km^2 (69,2 % de la superficie totale du bassin).

4.3.2. Intensité et volume minimaux

Les simulations réalisées dans le cadre de cette étude visent notamment à déterminer, pour les différentes superficies de cellules orageuses, l'intensité minimale de la pluie qui est requise pour générer un Qalerte, de même que le volume de pluie minimal (cf. § 4.1 & § 4.2.2). Les hydrogrammes résultants pour les pluies à intensités minimales ($I_{\min}$) selon la superficie de la cellule orageuse, sont présentés à la Figure 4.7.

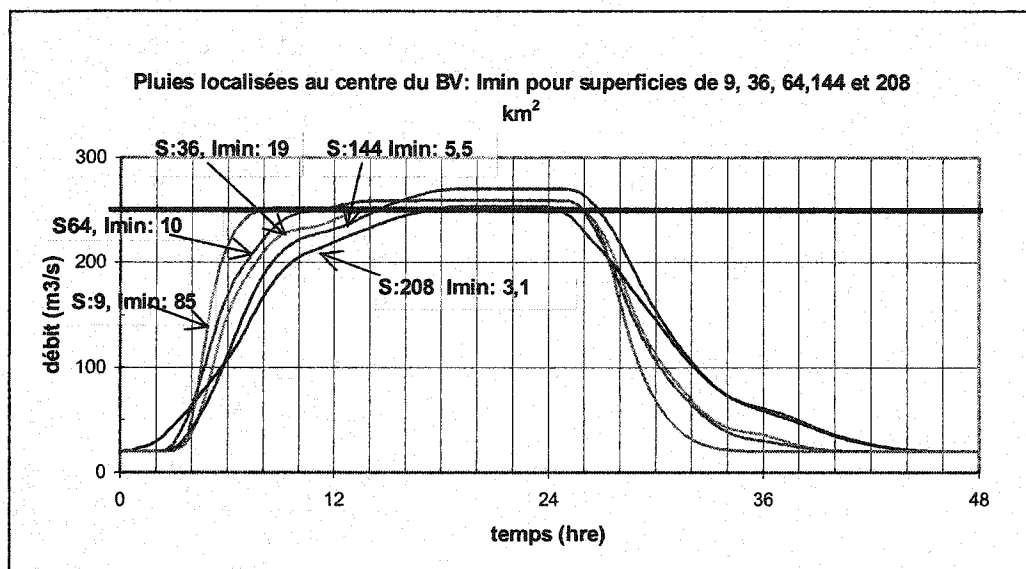


Figure 4.7 Hydrogrammes Imin pour cellules centrées sur bassin

Les hydrogrammes de la Figure 4.7 permettent de constater que plus la cellule orageuse est de petite superficie, plus l'intensité minimale requise pour générer un Qalerte est élevée. Ceci se traduit par une pente ascendante plus prononcée de l'hydrogramme. Plus particulièrement, c'est le cas de la cellule de 9 km² de superficie qui se démarque significativement des autres cellules. En effet, pour les cellules de 36, 64 et 144 km², les pentes ascendantes des hydrogrammes des cellules sont comparables et tendent vers celle de la pluie uniforme après 5 heures de pluie (pour $Q > 100\text{m}^3/\text{s}$), alors que la pente de l'hydrogramme de la cellule de 9 km² est un peu plus accentuée. Le graphique de la Figure 4.8 suivante démontre bien cette variation du taux de changement des Imin selon l'ordre de grandeur de la superficie des cellules orageuses.

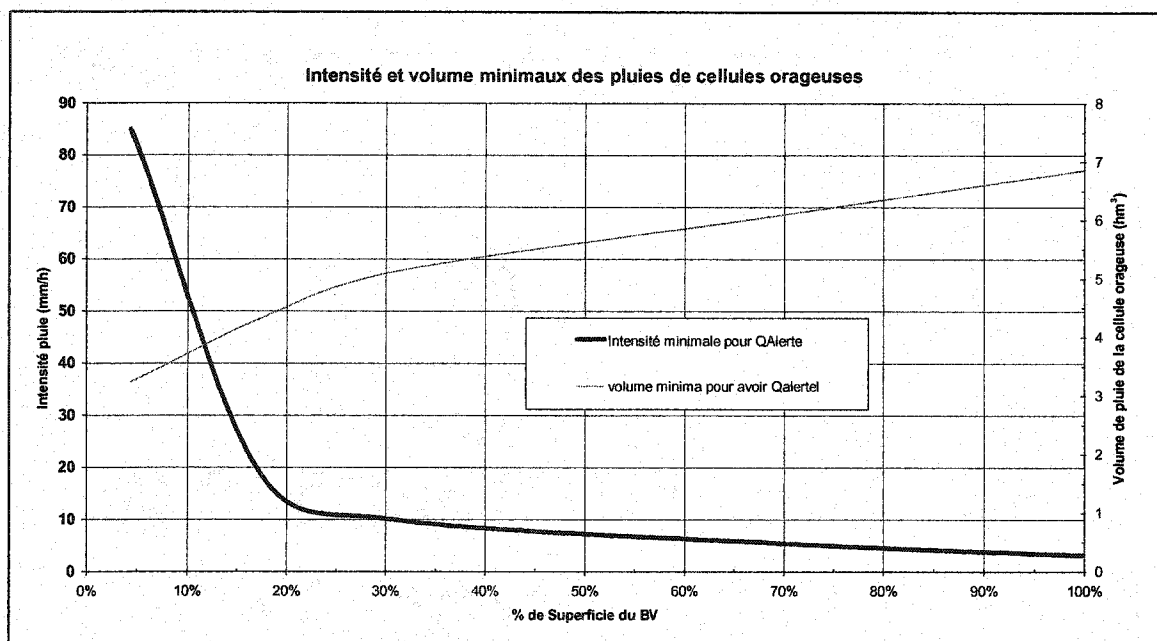


Figure 4.8 Graphique intensités et volumes minimaux de cellules orageuses

Ainsi, pour des cellules orageuses de superficie $[S_{\text{cell}}]$ de l'ordre de 20 % de la superficie totale (soit 40 km² et moins), l'ordre de grandeur de l'intensité minimale des pluies est très sensible à la taille de l'orage. Dans le cas des cellules de taille plus grande, la variation de I_{min} est moins importante, soit :

$$\text{Pour } S_{\text{cell}} < 20\% \text{ de } S_{\text{total}} \quad \frac{dI_{\text{min}}}{d\%S_{\text{total}}} = 5,08 \quad [\text{Équation 4}]$$

$$\text{Pour } S_{\text{cell}} > 20\% \text{ de } S_{\text{totale}} \quad \frac{dI_{\text{min}}}{d\%S_{\text{total}}} = 0,19 \quad [\text{Équation 5}]$$

Ces observations traduisent indirectement l'importance probable de l'effet de laminage de la crue par la rivière elle-même. En effet, une cellule orageuse de plus petite taille (moins de 40 km²) localisées au centre du bassin, a une plus grande proportion de « précipitation sur réseau hydrographique », c'est-à-dire de la pluie qui tombe

directement à la rivière sans qu'il n'y ait ou qu'il y ait peu de ruissellement sur le bassin. Ainsi, la superficie de la rivière par rapport à celle de la cellule orageuse est importante alors que pour les cellules orageuses de plus de 40 km², il y a une plus grande proportion de ruissellement sur le terrain et l'effet de laminage par la rivière devient moins important. Des comparaisons de l'effet de laminage d'une précipitation directe à la rivière par rapport aux cellules orageuses situées loin de la rivière pourrait confirmer ou infirmer cette hypothèse.

Pour sa part, la variation du volume minimal requis pour engendrer un Qalerte est moins sensible à la taille de la cellule orageuse que dans le cas de l'intensité minimale. En effet, pour les cellules dont la superficie est inférieure à 30% de la superficie totale, la pente du graphique de la Figure 4.8 n'est que légèrement plus accentuée que pour des cellules de plus grandes tailles, soit :

$$\text{Pour } S_{\text{cell}} < 30\% \text{ de } S_{\text{total}} \quad \frac{dV_{\min}}{d\%S_{\text{total}}} = 0,07 \quad [\text{Équation 6}]$$

$$\text{Pour } S_{\text{cell}} > 30\% \text{ de } S_{\text{totale}} \quad \frac{dV_{\min}}{d\%S_{\text{total}}} = 0,03 \quad [\text{Équation 7}]$$

Ces observations suggèrent donc que, dans le cas de petites cellules orageuses, le paramètre Intensité de la pluie est particulièrement sensible à la formation d'un Qalerte, surtout pour une pluie tombant directement à la rivière.

Il apparaît ainsi pertinent de souligner que, dans les bulletins météorologiques, une attention soignée devrait être accordée par les prévisionnistes de Météo-France ainsi que par ceux des SAC, à la présence ou non de cellules orageuses localisées. Une précision

affinée sur l'Intensité probable de celles-ci et sur leur localisation serait souhaitable surtout si elles sont de petites tailles.

Pour qu'une cellule orageuse puisse engendrer un débit d'alerte, les deux conditions indiquées au graphique de la Figure 4.8 doivent être rencontrées (cas d'une cellule orageuse localisée au centre). Ainsi, si la taille, l'intensité et le volume (éq. 3.2) d'une cellule orageuse sont disponibles, on peut vérifier au moyen du graphique de la Figure 4.8, si les conditions sont favorables à générer un Qalerte. Néanmoins, ceci ne permet pas d'anticiper sur le temps d'alerte, ce qui est la préoccupation des prévisionnistes des SAC et du présent mémoire. L'approche proposée pour l'estimation du temps d'alerte s'appuie sur celle préconisée pour les pluies uniforme tel que présenté à la prochaine section.

4.3.3. Cellules orageuses : Courbes ISTA

Dans le cas de cellules orageuses, un nouvel élément est à considérer par rapport aux pluies uniformément réparties (courbes IDTA cf § 4.2.3) : la taille de la cellule orageuse. Considérant l'importance du paramètre Intensité dans les cas de cellules orageuses (cf. § 4.3.2), on tente de relier les couples Intensité-Superficie au Talerte. Ce sont donc des courbes Intensité-Superficie-Temps d'alerte [ISTA] qui sont élaborées. Dans ces conditions, on doit poser l'hypothèse d'une durée de pluie supérieure au Talerte, afin d'avoir un Talerte constant par rapport à I (Équation 4.2) et variable seulement par rapport à S_{cell} . Les simulations réalisées avec MARINE (cf. § 3.6.1) sont résumées au Tableau 4.3 ci-après :

Tableau 4.3 Simulations - pluies localisées au centre du bv

Superficie km ²	Intensité mm/hre	Durée hre	Volume mm ³	Temps d'Alerte hre
9	84	24	18,14	N/A
	85*	24	18,36	8
	87	24	18,79	7,3
	90	4	3,24	N/A
		8	6,48	6,7
		24	19,44	6,7
	120	2	2,16	N/A
		3	3,24*	5,2
		6	6,48	5,2
		24	25,92	5,2
36	18	24	15,55	N/A
	19*	24	16	14,3
	30	24	25,92	6,1
	40	3	4,32*	5,3
		24	34,56	5,2
	50	24	43,20	4,8
	60	24	51,84	4,4
		3	6,48	5,9
		2	4,32	4,75
	80	2	5,76	4,20
		24	69,12	4,1
	120	2	8,64	4,20
		24	103,68	3,7
64	9	24	13,82	N/A
	10	24	15,36	11,3
	11	24	16,90	8,2
	12	7	5,38	N/A
		24	18,43	14,8
	14	24	21,50	12,7
	15	5	4,80	N/A
		5,25	5,04	N/A
		8	7,68	N/A
		10	9,60	11,8
		24	23,04	11,8
	17	24	26,11	8,4
	20	4	5,12*	7,4
	30	2	3,84	N/A
	40	1	2,56	N/A
		2	5,12	6,1
		24	61,44	3,7

* Valeurs minimales pour une superficie donnée

Tableau 4.3 (suite) Simulations - pluies localisées au centre du bv

Superficie km ²	Intensité mm/hre	Durée hre	Volume hm ³	Temps d'Alerte hre
64	60	2	7,68	3,2
		24	92,16	3,2
	80	1	5,12*	3,7
		24	122,88	2,9
	120	1	7,68	2,9
		24	184,32	2,7
144	5	24	17,28	N/A
	5,5*	24	19,01	14,5
	6	24	20,74	10
	12	24	41,47	5,2
		3,25	5,62	N/A
	13	24	44,93	3,6
		3,25	6,08*	6,4
		2	3,74	N/A
	40	24	138,24	3,6
	60	24	207,36	3,2
	120	24	414,72	Trop grand

* Valeurs minimales pour une superficie donnée

Afin de limiter le nombre de simulations requises pour élaborer les courbes ISTA, on a recours à un second modèle neuronal. Ce sont donc les résultats des simulations du Tableau 4.3 qui sont intégrés au nouveau modèle neuronal. Pour un débit d'alerte de 250 m³/s, on obtient les courbes de la figure 4.9 suivante :

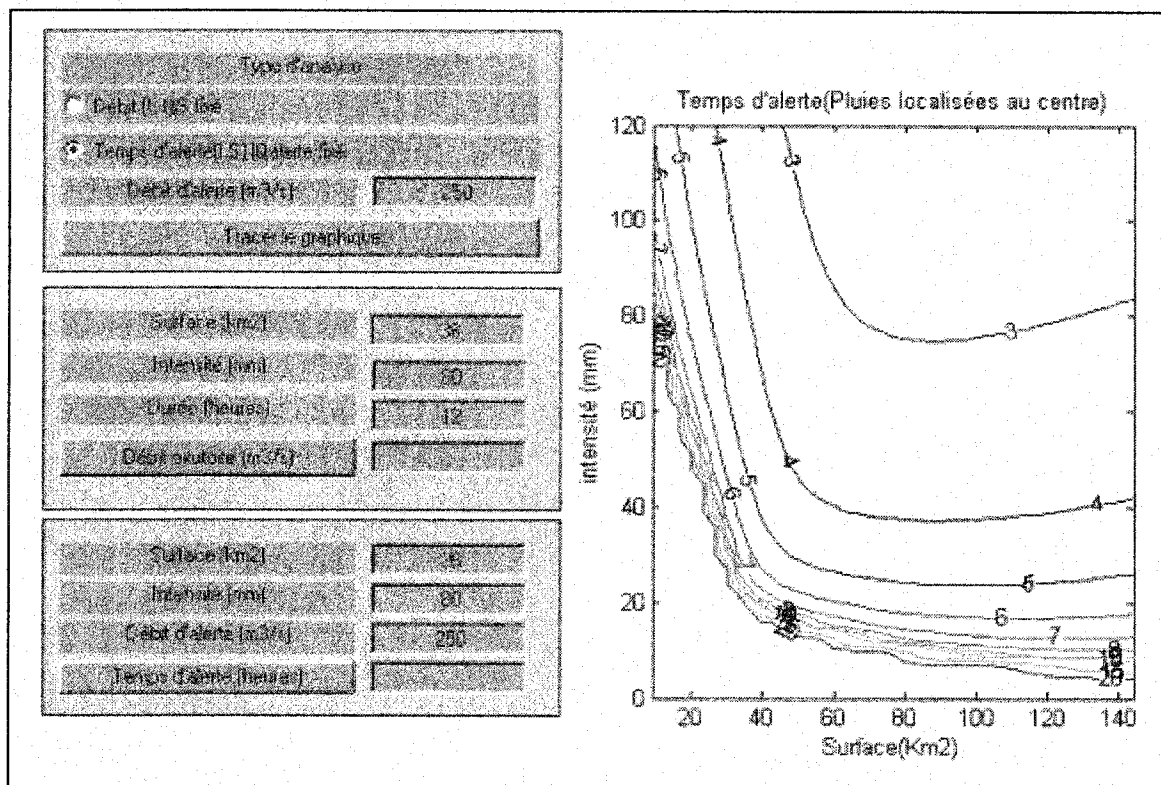


Figure 4.9 Courbes Intensité-Surface-Temps d'alerte [ISTA]

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, ces courbes illustrent bien l'observation faite en § 4.3.2 à l'égard de la sensibilité du Talerte par rapport à l'intensité de la pluie des cellules orageuses de petites superficies ($< 40 \text{ km}^2$ ou 20 % de superficie totale). Le modèle neuronal peut également donner une valeur numérique du Talerte, à défaut de la lire sur le graphique. Il suffit de préciser : la surface de la cellule orageuse, l'intensité et le Qalerte (voir paramètres en bas à gauche, à la Figure 4.9). Enfin, il est possible d'avoir une idée de l'ampleur de la crue en obtenant le débit maximal à l'exutoire, pour cellule d'une intensité et d'une durée précisées (centre-gauche de la Figure 4.9).

4.3.4 Localisation

Les simulations de cellules orageuses localisées à différents endroits (cf. § 3.3.3) sur le bassin versant Thoré concernent les cas suivants :

- Variabilité spatiale : cellules de 36 km^2 et volume de pluie de $24,6 \text{ hm}^3$ localisées à l'amont, au centre puis à l'aval (Figure 3.2) :

➤ $I = 38 \text{ mm/h}$ et $D = 18 \text{ heures}$

➤ $I = 75 \text{ mm/h}$ et $D = 9 \text{ heures}$

Les hydrogrammes à l'exutoire sont présentés aux Figures 4.10 et 4.11, respectivement.

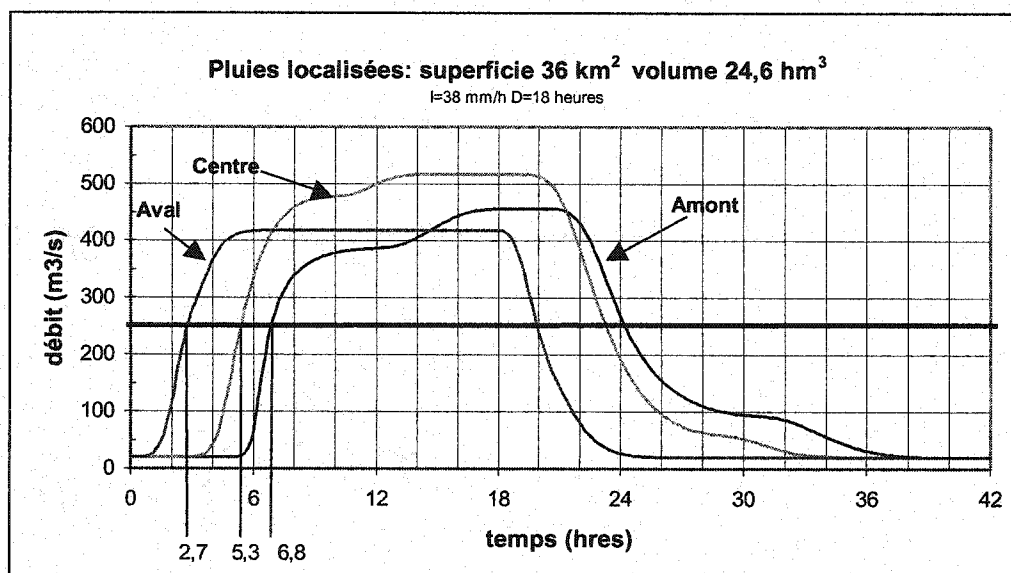


Figure 4.10 Hydrogrammes: localisation différente $I=38$ $D=18$

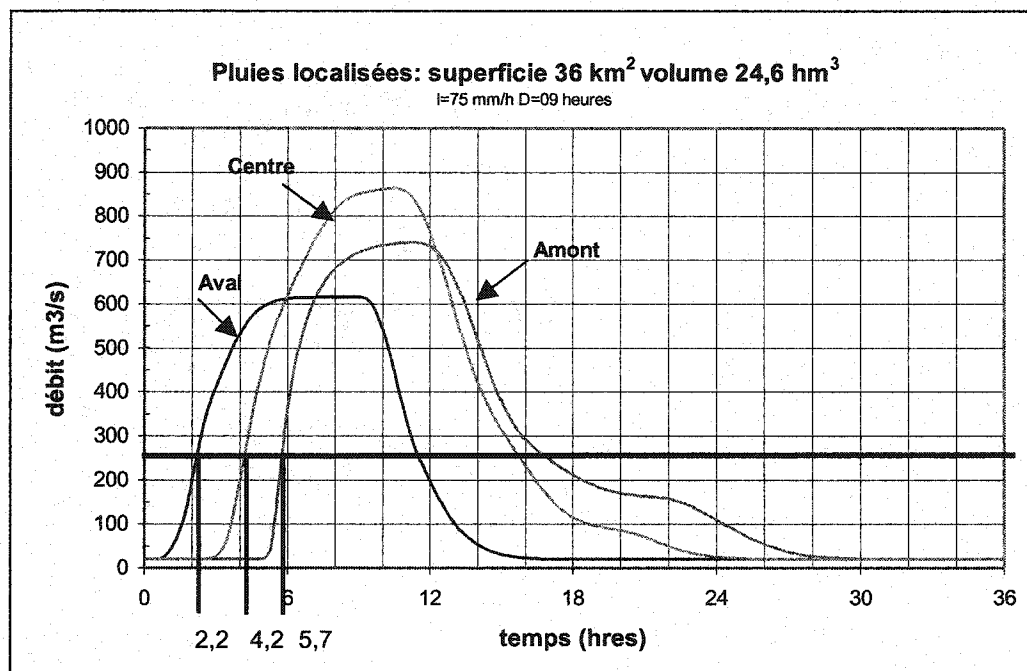


Figure 4.11 Hydrogrammes: localisation différente I=75 D=09

Malgré le fait qu'ils résultent de pluies de même volume, la différence entre les volumes des hydrogrammes, est due à la perte d'une partie de la pluie aux limites amont et aval du bassin. En effet, les cellules orageuses sont de formes carrées par compatibilité avec les pixels des matrices de pluie, à la différence des limites curvilignes du bassin (voir Figures 3.1 et 3.2). Ainsi, une certaine partie des cellules orageuses tombe à l'extérieur du bassin.

Les résultats des simulations corroborent l'observation faite en § 4.2.2 à l'égard de l'influence de la répartition temporelle de la pluie, et confirment l'importance du paramètre Intensité. En effet, dans ce cas-ci, une pluie localisée au centre du bassin peut devancer le Talarte de l'ordre d'une heure (4,2 heures au lieu de 5,3 heures) si le même volume tombe en moitié du temps (9 heures plutôt que 18 heures).

De ces simulations, on observe aussi qu'il peut y avoir un délai de 3 à 4 heures entre le temps d'alerte pour une pluie tombée à l'amont du bassin par rapport à la pluie tombée à l'aval. Dans un contexte de crues rapides, ce délai n'est pas négligeable. En d'autres termes, on considère que la répartition spatiale d'une cellule orageuse peut avoir un impact significatif quant au Talerte sur un bassin de taille de celui du Thoré (208 km²), alors que cet impact, dans une étude de crues par modèles globaux, n'est pas significatif selon (Obled, Wendling, et Beven 1994) (cf. § 2.1.2). Par ailleurs, ces derniers attribuent une atténuation de l'impact de la trajectoire de l'orage, à une certaine redistribution diffuse de l'écoulement sur le bassin. Les simulations faites dans la présente étude ne permettent pas de mesurer cet impact compensatoire probable puisque les pluies tombent uniquement sur une surface centrée sur la rivière (à l'amont, au centre et à l'aval) et ainsi l'effet de la variabilité de l'ensemble du bassin n'est pas suffisamment exploré.

L'ensemble de ces résultats, suggère une étude plus approfondie de la répartition spatiale de l'orage sur l'ensemble du bassin avant d'en conclure qu'elle serait négligeable. Ceci est particulièrement vrai dans un contexte de crues rapides alors que le temps de réaction est très limité. Cette étude toutefois déborde du cadre de la présente recherche et n'a donc pas été exploré plus en profondeur.

CHAPITRE V

EXEMPLE DE MISE EN ALERTE SUR THORE

5.1 Événement de novembre 1999

Un exemple d'événement permettant de vérifier l'application de l'outil d'anticipation d'alerte élaboré dans ce mémoire, est celui affectant tout le sud de la France, notamment le bassin de la rivière Thoré, en novembre 1999. L'annexe C donne un résumé de cet épisode, tiré du rapport de stage de Audette (2001).

Bien que certains Bulletins régionaux d'alerte météorologique [BRAM] aient alors été émis, ce mémoire se positionne dans le contexte actuel alors que ces bulletins ne sont plus émis. Par ailleurs, on n'exploite pas l'information potentiellement émise par les nouvelles Cartes de vigilance qui ont remplacé les BRAM, puisqu'il n'est pas possible de spéculer sur le contenu de novembre 1999. On s'en tient donc uniquement aux informations colligées dans les Bulletins d'alerte aux précipitations, émis lors de cet événement.

5.1.1. Mise en alerte réelle

Selon le rapport post-crise (Lefrou, Martin et al. 2000), la mise en alerte sur ce bassin s'est amorcée dès le 12 novembre à 20h00, à la suite d'un appel logé au maire par un riverain de St-Amans-Soult (sis près du centre du bassin, à environ 10 km à l'amont de Mazamet). À la suite d'une série d'inondations dans diverses communes (St-Amans-Soult, Aussillon, Labastides-Rouairoux,...) le Poste de commande [PC] de crise a été mis sur pied par la Préfecture du département du Tarn, le 13 novembre à 4 h 30 et le plan d'Organisation des secours [ORSEC] a été enclenché à 6 h 00 le 13 novembre (voir Figure 5.1 et Annexe C).

CHRONOGRAMME MISE EN ALERTE RÉELLE																							
12-Nov																							
Heure	3:00	4:00	4:30	5:30	6:00	7:00	8:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	19:30	20:00	21:00	22:00	23:00	0:00
Activités	- Début de la pluie selon relevés				- Début de la pluie selon BAP				- 1er BAP									Appel au Maire St-Amans-Scout		Alerte à St-Amans-Scout			
Cumul de pluie mesurée à Labouguère (mm/h)	0.2	1	0		0	1.8	1.4	2.4	4.2	0.6	0.6	1.8	2.6	2.2	2.4	4.3	5.6		7.6	27	136	2.4	0.2
Cumul continu (mm)	0.2	1.2	1.2		1.4	3.2	4.6	8.8	13	13.6	14.2	16	18.6	20.8	23.2	28	33.6	33.6	41.2	68.2	81.8	84.2	84.4
13-Nov																							
Heure	3:00	4:00	4:30	5:30	6:00	7:00	8:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	19:30	20:00	21:00	22:00	23:00	0:00
Activités			- PC de crise	- 2e BAP - Plan ONSEC					- 3e BAP														
Cumul de pluie mesurée à Labouguère (mm/h)	18	7.4			8.6	3	0.2	2.8	0	0	0	0.2	0	0	0.2	0.6	4.4		3.8	1.6	0.6	0	0
Cumul continu (mm)	124.4	131.8	131.8		149	152	152.2	155.2	155.2	155.2	155.2	155.4	155.4	155.4	155.6	156.2	160.6	160.6	161.4	166	166.6	166.6	166.6

Figure 5.1 Chronogramme de la Mise en alerte réelle du bassin Thoré

5.1.2 Mise en Alerte fictive en fonction des Bulletins d'alerte aux précipitations

Le premier BAP concernant la zone du bassin Thoré (Annexe D, Haut Tarn, no. 16) est émis le 12 novembre 1999 à 11 h 00 (Figure 5.2). On y indique un cumul prévu de l'ordre de 40 à 60 mm sur 24 heures, avec une pointe maximale de 100 mm.

Afin de faire une prévision d'alerte au moyen des courbes IDTA, les paramètres suivants sont évalués : une intensité moyenne de 60 mm et une durée de 24 heures (valeur moyenne la plus sévère), soit : $I = 2,5 \text{ mm/hre}$, $D = 24 \text{ heures}$ pour une pluie uniformément répartie.

A priori, pour un Qalerte fixé à $250 \text{ m}^3/\text{s}$, il n'y a pas d'alerte prévue puisque l'intensité minimale de $3,1 \text{ mm/hre}$ n'est pas atteinte (cf. § 4.1). Par ailleurs, ce BAP indique également une pointe de cumul de l'ordre de 100 mm, ce qui se traduit par : $I = 4,2 \text{ mm/hre}$ et $D = 24 \text{ heures}$. En supposant que cette pointe orageuse n'est l'effet que d'une cellule orageuse (superficie de moins de 144 km^2 , cf. § 4.3.3), les courbes ISTA (Figure 4.9) ne prévoient aucun Talerte (Q_{max} à l'exutoire est de $240 \text{ m}^3/\text{s}$ pour toutes les superficies $< 144 \text{ km}^2$).

En revanche, si on considère cette pointe sur l'ensemble du bassin (pluie uniforme), les courbes IDTA (Figure 4.6) proposent qu'un Qalerte soit atteint à Mazamet dans environ 9 heures après le début de la pluie. Selon le BAP, le début de la pluie est autour de 6 h 00, le Talerte serait alors prévu vers 15 h 00, le 12 novembre, soit 4 h 30 avant l'appel du riverain de St-Amans-Soult (voir Figure 5.2).

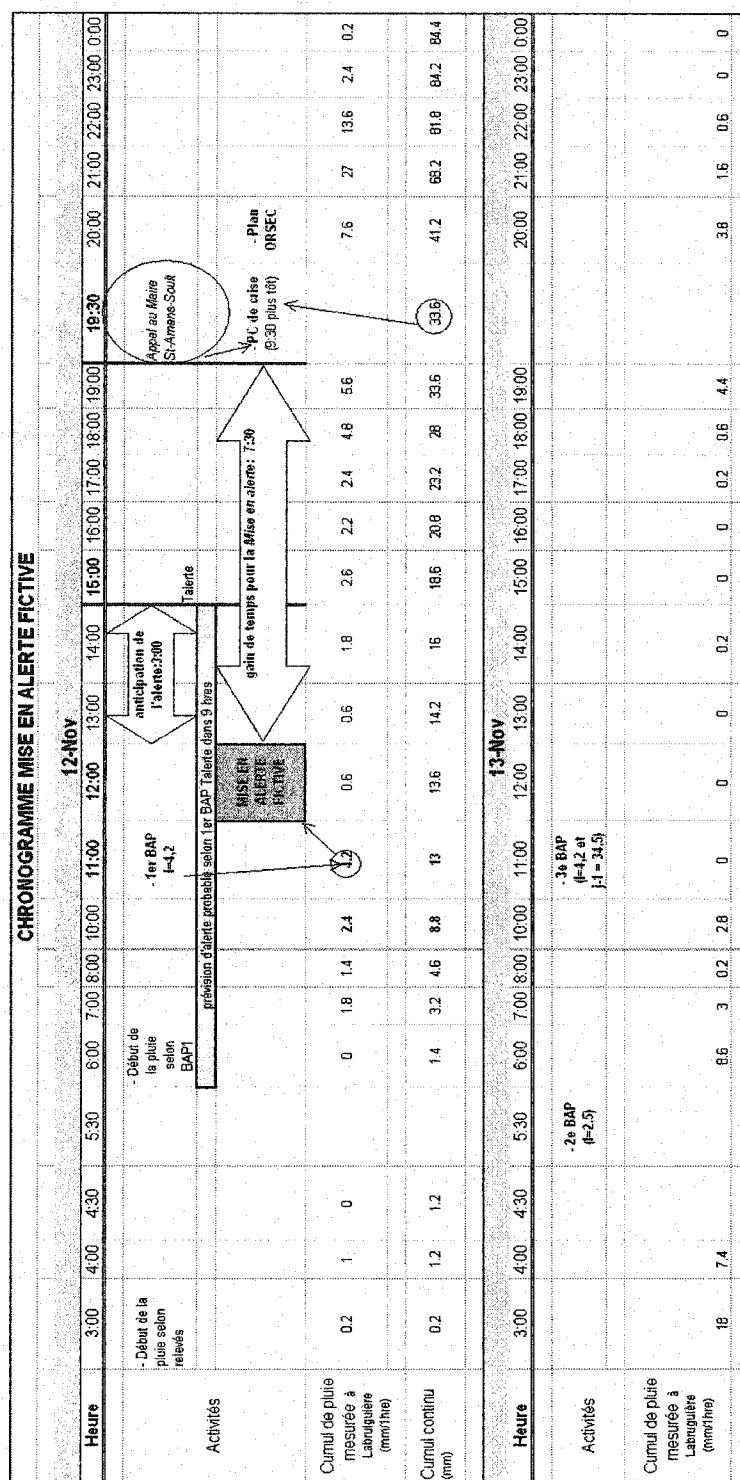


Figure 5.2 Chronogramme fictif de Mise en alerte avec les courbes IDTA

Toutefois, puisqu'il n'y a aucune précision sur le BAP quant à la localisation/superficie de cette pointe de 100 mm, le prévisionniste peut choisir d'attendre d'obtenir une prévision plus affinée sur la pluie, tout en entamant des vérifications sur les conditions qui prévalent sur le terrain.

Les relevés de pluies tombées réellement (Annexe C) indiquent qu'entre 10 h 00 et 11 h 00 le 12 novembre à la station de Labruguière (la station la plus près de Mazamet, sise à moins de 10 km à l'aval de cette dernière), il y a 2,4 mm de pluie tombée pour un cumul totalisant 8,8 mm, depuis le début de la pluie (à 3 h 00 le 12 novembre). Dans l'heure qui suit, on enregistre une lame d'eau de 4,2 mm à Labruguière portant le cumul à 13 mm. Ceci semble corroborer la prévision du premier BAP ($I = 4,2 \text{ mm/hre}$) en considérant la pointe de 100 mm sur l'ensemble du bassin (pluie uniforme). Ainsi, l'information sur la pluie tombée semble confirmer la prévision du BAP et peut donc inciter le prévisionniste à enclencher la Mise en alerte. Cette dernière aurait alors eut lieu le 12 novembre vers 12 h 00, soit 7 h 30 avant l'appel du riverain au maire de St-Amans-Soult.

Il est hasardeux de spéculer sur la mise sur pied du PC de crise dans de telles conditions. En effet, le PC de crise se forme lorsque les conditions sur le terrain le justifient et/ou à la demande des maires des communes (Audette 2001). Néanmoins, on peut admettre dans ce scénario hypothétique que, à la suite de la Mise en alerte, les autorités seraient davantage sensibles au suivi de la situation et auraient sans doute mis sur pied le PC de crise avant que ne se produisent les inondations à St-Amans-Soult ou, au plus tard, dès qu'elles eurent lieu. Le PC de crise et le plan ORSEC sur le département auraient ainsi été enclenchés le 12 novembre vers 19 h 30 et 20 h 00 ou avant, au lieu du 13 novembre à 4 h 30 et 5 h 30 respectivement.

5.2. Observations et Commentaires

Il est très périlleux de définir un scénario hypothétique de Mise en alerte. Il y a en effet peu d'arguments permettant d'appuyer fermement les décisions et les actions possiblement prises. Néanmoins, ce mémoire tente d'illustrer l'apport probable des courbes IDTA-ISTA dans la surveillance des crues. Il semble qu'un gain probable, en terme d'appui aux prises de décision, résulte en un gain de temps d'organisation des secours et donc d'efficacité dans les interventions.

Dans ce scénario hypothétique, le gain temporel s'évalue de l'ordre de 7 h 30 dans la mesure où le prévisionniste du SAC dispose d'informations sur les pluies et sur les conditions qui prévalent sur le terrain, lui permettant ainsi d'anticiper la crise. On rappelle que le Qalerte de $250 \text{ m}^3/\text{s}$ est hypothétique (cf.§ 3.4.2) et possiblement très élevé pour une Mise en alerte. Peut-être qu'une valeur réaliste serait moindre et qu'un Talerte aurait été plus clairement anticipé avec les informations du 1^{er} BAP (ex. $I = 2,5 \text{ mm/hre}$). Le gain de temps pour la Mise en alerte aurait alors été plus que 7 h 30.

Ainsi, ce scénario laisse entendre que le principal risque dans ce contexte de Mise en alerte repose sur l'interprétation du prévisionniste des informations des BAP et l'importance de corroborer les prévisions selon la réalité observée sur le terrain. En effet, dans cet exemple, il aurait fallu que, dès la réception du premier BAP, l'anticipation de l'alerte soit fiable. Une pointe de l'envergure du 1^{er} BAP (100 mm), étalée sur toute la superficie du bassin, corrobore les valeurs du 3^e BAP, et donc l'atteinte du débit d'alerte. Une Mise en alerte aurait donc été possible avec les courbes IDTA dès la réception du 1^{er} BAP (le 12 novembre à 11 h 00) si des précisions sur la taille/localisation de cette pointe avaient été fournies. À défaut de ceci, dans ce scénario hypothétique, cette pointe de cumul a été considérée pour l'ensemble du bassin, ce qui, dans une autre situation

(exemples un Qalerte moins élevé, une pointe plus localisée,...), pourrait s'avérer trop « sévère ».

On peut ainsi prétendre qu'il soit essentiel de disposer d'une information plus précise en termes de superficie/localisation des pointes orageuses. L'utilisation des courbes IDTA et ISTA serait alors plus fiable. Néanmoins, les informations des BAP combinées aux informations issues des courbes IDTA et ISTA peuvent encourager les dispositifs de surveillance accrue. Ces résultats ne peuvent qu'inciter les décideurs à suivre de façon très sérieuse l'évolution des conditions réelles, par rapport aux prévisions annoncées afin de mieux s'y parer.

CHAPITRE VI

RECOMMANDATIONS

6.1. Modèles étalonnés

Un rigoureux travail d'affinement de l'approche par courbes IDTA et ISTA est indispensable. Considérant, d'une part, que la version du modèle MARINE, utilisé pour obtenir les hydrogrammes de crues à l'exutoire, n'était pas étalonnée sur le bassin du Thoré au moment de procéder aux simulations. Les résultats des hydrogrammes ne sont donc pas validés. D'autre part, les temps d'alerte ont été évalués à partir d'un débit d'alerte fictif dont la valeur peut être discutée. Ainsi, le scénario de Mise en alerte présenté au chapitre 5 n'est qu'une hypothèse sans doute conservatrice, du gain de temps probable pour enclencher les procédures d'alerte, par rapport à la réalité.

Les courbes IDTA et ISTA devraient donc être développées à partir de modèles de simulation hydraulique et hydrologique, bien étalonnés sur des bassins dont on dispose d'informations historiques d'au moins un événement de Mise en alerte, soit : les hydrogrammes mesurés, les BAP émis relativement à ces hydrogrammes et la cote ou le débit d'alerte réel. Il serait ainsi possible de mieux évaluer la contribution de l'outil prévisionnel développé dans le présent mémoire.

6.2. Hypothèses simplificatrices

L'affinement de courbes IDTA et ISTA implique également de traiter certaines des hypothèses simplificatrices émises en cours d'élaboration de celles-ci, et ce, davantage si l'on vise à élargir le champs d'application de cette approche. Entre autres, les simulations doivent tenir compte des conditions initiales (Qini et humidité des sols) puisque l'hydrogramme de crue peut varier fortement selon celles-ci. L'introduction

d'un facteur correctif devrait être possible en reprenant, par exemple, un nombre « nb » de scénarii identiques de pluie mais ayant des conditions initiales différentes, qui seraient un facteur « e_i » d'une simulation de référence « Q_{ini} » ; soit :

$$Q_{ini\ i} = e_i \times Q_{ini}, \quad \text{pour } i = 1, nb \quad [\text{Équation 8}]$$

De plus, le paramètre d'infiltration qui était négligé dans le présent travail devrait être ajouté, celui-ci étant important dans la genèse d'une crue, même dans le contexte d'une crue rapide.

Enfin, négliger les pertes par infiltration et/ou évapotranspiration engendre une prévision plus critique puisque la crue prévue sera plus sévère, contrairement au cas où l'on négligerait les conditions initiales de la rivière. C'est pourquoi le premier paramètre à ajouter dans les travaux d'affinement de l'outil prévisionnel proposé dans ce mémoire, est la variabilité de la réponse du bassin versant selon les conditions initiales qui prévalent. Ceci permettrait également d'affiner les prévisions en temps réel en considérant les informations sur les cumuls déjà observés à J-1 (cf. § 3.3.1).

6.3. Pluies uniformes et cellules orageuses localisées

La variabilité de la réponse du bassin versant se reflète également par la présence de cellules orageuses, localisées à différents endroits sur le bassin. L'affinement des courbes IDTA et ISTA devrait considérer l'accouplement des résultats de pluies uniformément réparties avec ceux des cellules orageuses localisées. Ceci favoriserait sans doute l'interprétation des informations contenues dans les BAP.

De plus, dans le présent mémoire, les courbes IDTA et ISTA ont été élaborées à partir d'une gamme de pluie d'intensités, de durées et de superficies, couvrant des ordres de grandeurs s'approchant des valeurs observées (cf. § 2.1.1). Dans des applications

subséquentes à la présente, il serait intéressant de considérer les ordres de grandeur des paramètres de la pluie, au moyen des courbes isohyètes des zones à l'étude, et/ou grâce aux données des courbes d'abattement de hauteur de précipitation-surfaces-durées telles que décrites par Réménieras (1972), Rousselle, Neill et Richards (1990).

6.4. Conciliation des paramètres

Considérant tous ces paramètres à introduire dans l'approche prévisionnelle par courbes IDTA et ISTA, une discrétisation du poids de ceux-ci serait nécessaire afin d'orienter la prévision vers une solution (Talerte) unique et fiable. En effet, dans le contexte de surveillance des crues, les prévisionnistes des SAC peuvent faire face à des situations confuses, vue notamment un trop grand flux d'informations parfois contradictoires. L'introduction des courbes IDTA et ISTA ne doit pas ajouter une source de doute dans la prise de décision des prévisionnistes. Ainsi, dans l'optique d'affiner les prévisions issues de ces courbes par l'introduction des paramètres importants discutés plus haut, un travail parallèle d'organisation de cette nouvelle source d'information devient nécessaire. On peut penser, par exemple, à un système expert basé sur une méthode multicritères dans laquelle le poids de chaque paramètre considéré serait pondéré pour obtenir un Talerte global, soit :

$$Talerte\ global = aI + bD + cS + dCell + eQ_{ini} + f\ inf + etc. \quad [Équation\ 9]$$

$$a + b + c + d + e + f + \dots = 1 \quad [Équation\ 10]$$

où

I : intensité de la pluie

D : Durée de la pluie

S : Superficie du bassin

Cell : Cellules orageuses localisées (superficie, volume, intensité, durée, localisation,...)

Q_{ini} : Débit de base (initial)

Inf : infiltration

etc : tous les autres paramètres probables

a, b ,c, d, e, f,...: les coefficients de pondération du paramètre

Ceci pourrait être l'orientation de l'approche affinée des courbes IDTA et ISTA.

Ce mémoire a focalisé sur les trois premiers paramètres (I,D,S) et effleuré le quatrième (Cellules orageuses). Les bases sont maintenant fixées pour orienter la suite en focalisant sur les autres paramètres et le défi sera de concilier le tout en un outil opérationnel en temps réel

6.5. Modèles de neurones

L'affinement des courbes IDTA et ISTA proposé ci-haut, relance le débat sur les modèles distribués par rapport aux modèles globaux, dans un contexte où l'ordre de grandeur du poids des paramètres influents n'est pas implicite, et donc les termes à négliger sont discutables. Un outil prévisionnel d'annonce de crue facilement opérationnel en temps réel et exportable, devra permettre l'intégration de tous les paramètres significativement influents dans le processus de génération de crues, et donc dans l'estimation des Talerte, dans un temps de calcul relativement court. Ces paramètres étant liés entre eux par des relations plutôt empiriques ou difficilement établies, surtout lorsque l'apport historique de données est déficient ou inexistant, l'étude de l'influence par paramètre couplé, au moyen de modèles de neurones devient fort intéressant. En effet, grâce à quelques résultats de simulations, le modèle neuronal, par un processus d'apprentissage, peut générer des prévisions de résultats par interpolation à partir de la base de données. Le nombre de simulations requis pour établir le lien entre les paramètres est alors réduit et donc le temps de calcul largement plus court. Il devient ainsi réaliste d'entreprendre les études découlant de ce mémoire, dans l'optique d'affiner l'approche proposée pour la rendre opérationnelle dans un délai raisonnable.

CHAPITRE VII

CONCLUSION

Le présent mémoire propose une approche pour répondre au principal diagnostique issu de l'analyse du système de gestion des crues en France.

Essentiellement, la problématique dans la veille des crues en France se situe dans le contexte des crues rapides engendrées par des épisodes pluvieux d'intensités extrêmes. Ceux-ci étant apparemment de plus en plus fréquents, intenses et difficilement prévisibles, il apparaît être d'un intérêt national d'arriver à mieux les cerner, pour mieux les prévoir et mieux s'y parer. C'est donc dans le contexte de crues rapides ou éclair que ce mémoire s'est positionné.

L'intérêt de ce mémoire était donc de développer une approche pour favoriser l'anticipation des Mises en alerte de crues éclair ou rapides, par les Services d'annonce des crues français [SAC].

Pour favoriser l'intégration d'un nouvel outil prévisionnel dans le système français de gestion des crues, il est jugé souhaitable que cet outil puisse fonctionner à partir des informations déjà disponibles dans le mode opérationnel de surveillance des crues. Ainsi, l'approche proposée dans ce mémoire visait l'intégration, de façon quantitative, des prévisions météorologiques de Météo-France dans le processus de décision de Mise en alerte par les SAC.

L'outil développé dans ce travail consiste donc en des courbes d'Intensité-Durée-Temps d'alerte [IDTA] et d'Intensité-Superficie-Temps d'alerte [ISTA] qui permettent

de chiffrer le temps probable d'une alerte, en fonction des paramètres des bulletins météorologiques émis par Météo-France.

En cours d'élaboration de ces courbes, les résultats des simulations ont mis en lumière la non-linéarité de la relation Intensité-Durée-Talerte, pour des pluies dont la Durée est moindre que celle du Talerte (il cesse de pleuvoir à peu près au moment où le Talerte est atteint). Parmi les paramètres caractérisant la pluie qui ont été considérés, c'est celui de l'Intensité qui semble être le plus influent sur le Temps d'alerte. Il s'avère que le poids du paramètre Intensité est plus significatif dans le cas de cellules orageuses, surtout pour les cellules de petites tailles. Ainsi, pour limiter le risque relié aux ambiguïtés, il serait souhaitable que les informations météorologiques puissent fournir une bonne précision sur la taille et l'intensité des cellules orageuses, lorsque celles-ci sont présentes.

L'exemple d'application de ces courbes pour la crue de novembre 1999 sur la rivière Thoré, a démontré qu'une anticipation de l'alerte probable est possible et que le gain de temps pourrait être significatif par rapport à la Mise en alerte réelle. Ceci suggère qu'une telle approche puisse avoir un impact non-négligeable dans le processus décisionnel d'annonce des crues, et ce, particulièrement dans le contexte de crues rapides. Ce résultat est encourageant et propose donc un affinement de l'outil prévisionnel, développé dans ce mémoire sur les bases des éléments suivants :

- L'étalonnage des modèles de simulations ;
- La prise en compte des hypothèses simplificatrices ;
- L'impact de la variabilité spatiale de la pluie ;
- Le couplage des pluies uniformes avec les cellules orageuses ;
- La conciliation de tous les paramètres au sein d'un modèle de type multicritères.

L'utilisation des modèles neuronaux semble fort utile pour réduire les temps de calcul reliés aux études proposées. On se trouve ainsi à optimiser les avantages reliés à l'utilisation d'un modèle distribué tel que MARINE, représentant bien le phénomène

physique à petite échelle, avec celles d'un modèle global (neural) dont la rapidité de calcul offre plus de possibilités d'analyses.

Il est fort utopique de prétendre qu'un seul outil prévisionnel, aussi sophistiqué qu'il soit, peut 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 l'on dispose d'indicateurs fiables qui ne se contredisent pas. Par ailleurs, dans un contexte où peu d'informations, voire aucune, sont disponibles, même le meilleur prévisionniste aura du mal à prendre une décision éclairée. Ainsi, d'une part, dans le cas où cet outil s'intégrerait dans un ensemble d'éléments déjà opérationnels (cf. Annexe A), il permet d'anticiper les prévisions d'alerte puisqu'il fonctionne à partir des prévisions météorologiques, contrairement aux autres sources d'information. Celles-ci pourront par la suite confirmer ou infirmer les prévisions de Talerte.

D'autre part, les courbes IDTA et ISTA peuvent fournir un support décisionnel lorsque le manque d'information est très problématique ou inexistant sur un bassin versant. Le recours à ce type de courbes dans de telles situations serait alors certainement un atout de taille pour favoriser une vigilance accrue de la part des prévisionnistes.

Dans un cas comme dans l'autre, la complémentarité des courbes IDTA et ISTA aux procédures et outils actuellement en vigueur ne peut qu'être garant d'une meilleure efficacité du travail des SAC.

RÉFÉRENCES

- 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.* » Toulouse, 32 p Rapport de stage ENSEEIHT.
- BEVEN, K.J., HORNBERGER, G.M. 1982. "Assessing the Effect of Spatial Pattern of Precipitation in Modeling Stream Flow Hydrographs". *Water Research Bulletin* 18:5, pp 823-829.
- CHOW, V.T, MAIDMENT, D.R., MAYS, L.W., 1988. "Applied hydrology." McGraw-Hill. 572 p.
- CORRADINI, C., SINGH, V.P. 1985. "Effect of Spatial Variability of Effective Rainfall on Direct Runoff by Geomorphologic Approach". *Journal of Hydrology*. 81, pp 27-43.
- DATIN, R. 1998. « *Outils opérationnels pour la prévision des crues rapides : traitement des incertitudes et intégration des prévisions météorologiques. Développement de TOPMODEL pour la prise en compte de la variabilité spatiale de la pluie. Application au bassin versant de l'Ardèche* ». Grenoble, France: INP Grenoble. 369 p. Thèse de doctorat.
- DAWDY, D.R., BERGMANN, J.M. 1969. "Effect of Rainfall Variability on Streamflow Simulation". *Water Resources Research* 5, pp 958-966.
- ESTUPINA-BORRELL, V., DARTUS, D., ALQUIER, M. 2002. "Forecast of Flash Floods in Ungauged Basins with Satellite Data. ". *Kick-off workshop on IAHS Decade for Prediction in Ungauged Basins*. vol. Communication. Brésil., Ed. P. Hubert D.S., K. Takeuchi and S. Koide, IAHS and the University of Brasilia.
- FAURE J.B. 1998. « *Document utilisateurs de MAGE* ». Cemagref, France
- JAVELLE, P. 2001. « *Caractérisation du régime des crues : le modèle débit-durée-fréquence convergent. Approche locale et régionale* ». Grenoble, France: INP de Grenoble. 268 p. Thèse de Doctorat.
- KRAJEWSKI, W.F., LAKSHMI, V., GEORGAKAKOS, 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.

- LARDET, P. 1992. « *Prévision des crues : contribution à l'utilisation opérationnelle des modèles pluie-débit* ». Grenoble, France: INP Grenoble. 205 p. Thèse de Doctorat.
- LEBEL, T., BASTIN, G., OBLED, C., CREUTIN, J.D., 1987. "On the Accuracy of Areal Rainfall Estimation: A case Study". *Water Resources Research*. 23 : 11, pp 2123-2134.
- LEFROU, C., MARTIN, X., LABARTHE, JP., 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-cruesauode.pdf> 140 p (Page consultée le 25 janvier 2003)
- MUSY, A. 2002. Hydrologie générale, section GREM et GC, 4^e semestre 2002. Notes de cours. <http://hydram.epfl.ch/e-drologie/> (Page consultée le 25 janvier 2003)
- MÉTÉO-FRANCE. <http://www.meteo.fr/meteonet/services/espro/produit/rad.htm#1> (Page consultée le 25 janvier 2003)
- OBLED, C., WENDLING, J., BEVEN, K. 1994. "The Sensivity of Hydrological Models to Spatial Rainfall Patterns: an Evaluation Using Observed Data". *Journal of hydrology*. 159 pp 305-333.
- RIVRAIN, J.C., MÉTÉ-FRANCE, MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT 1997. « Les épisodes orageux à précipitations extrêmes sur les régions méditerranéennes de la France ». Météo-France. Document interne.
- ROUSSELLE, J., NEILL, C., RICHARDS, L.T. 1990. « *Hydrologie des crues au Canada-Guide de planification et de conception*. » Ottawa : Conseil national de recherches Canada-Comité associé d'hydrologie. 277 p.
- ROY, J.L. 2000. "De l'image radar à la prévision des crues". *La Houille Blanche* 3, pp 91-93.
- RÉMÉNIÉRAS, G. 1972. « *L'hydrologie de l'ingénieur* » 2e ed. Paris : Eyrolles. 456 p.
- SCHOBBER, A. 1996. « *Analyse de la variabilité des paramètres caractéristiques de l'hydrologie d'un bassin versant et modélisation des crues en présence de données hydrologiques succinctes*. » Grenoble, France: Université Joseph Fourier-Grenoble I. 300 p. Thèse de Doctorat.

- 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.
- TROUTMAN, B. 1983. "Runoff Predictions Errors and Bias in Parameters Estimation Induced by Spatial Variability of Precipitation". *Water Resources Research*. 19:3. pp 791-810.
- UNESCO. Glossaire hydrologique
<http://www.cig.enscm.fr/~hubert/glu/aglo.htm>
(Page consultée le 28 novembre 2002)
- WILSON, C.B., VALDES, J.B., RODRIGUEZ-ITURBE, I. 1979. "On the Influence of Spatial Distribution of Rainfall on Storm Runoff". *Water Resources Research*. 15:2, pp 321-328.
- WOOD E.F., SIVAPALAN, M., BEVEN, K., BAND, L. 1988. "Effects of Spatial Variability and Scale with Implications of Hydrologic Modeling". *Journal of hydrology*. 102, pp 29-47.
- YUE, S., OUARDA, T.B.M.J., BOBBÉE, B., LEGENDRE, P., BRUNEAU, P. 1999. "The Gumbel mixed model for flood frequency analysis". *Journal of hydrology*. 226, pp 88-100.

ANNEXE A

SYSTÈME DE GESTION DES CRUES

[Extrait du rapport de stage (AUDETTE, L. 2001)¹]

[2] Gestion des inondations en France

[2.1] Phases de gestion des inondations

La gestion des inondations en France s'articule autour de quatre phases qui cernent une crue importante, soit la prévention, l'anticipation/alerte, la crise et la poste-crise.

- **La prévention** consiste essentiellement à évaluer le risque probable de dégâts (humains et matériels) occasionnés par une crue, et de mettre en place les mesures et dispositifs appropriés pour contrer ou limiter ces effets néfastes ;
- **L'anticipation/alerte** est la phase de prévision de l'aléa et de surveillance renforcée. Cette phase permet de préparer les interventions de secours à déployer pour la sauvegarde des personnes et des biens ;
- **La crise** c'est lorsque l'événement a lieu et que la situation requiert l'intervention des secours tel que défini dans les plans de mesures d'urgence, afin de protéger les citoyens et limiter les dégâts ;
- **La post-crise** est le bilan de l'événement qui vise à apporter des améliorations à toutes les phases de gestion des inondations. Cette phase inclue l'évaluation des dommages et de la gestion de la crise, les indemnisations et le retour d'expérience en soit.

¹ [XX.XXX] numérotation dans le rapport(AUDETTE, 2001)

Puisque la présente étude vise principalement à identifier les défaillances de la chaîne de gestion de la crise, l'analyse du système de gestion s'attarde particulièrement aux phases d'anticipation/alerte et crise .

[2.2] Structure de gestion des crues en France

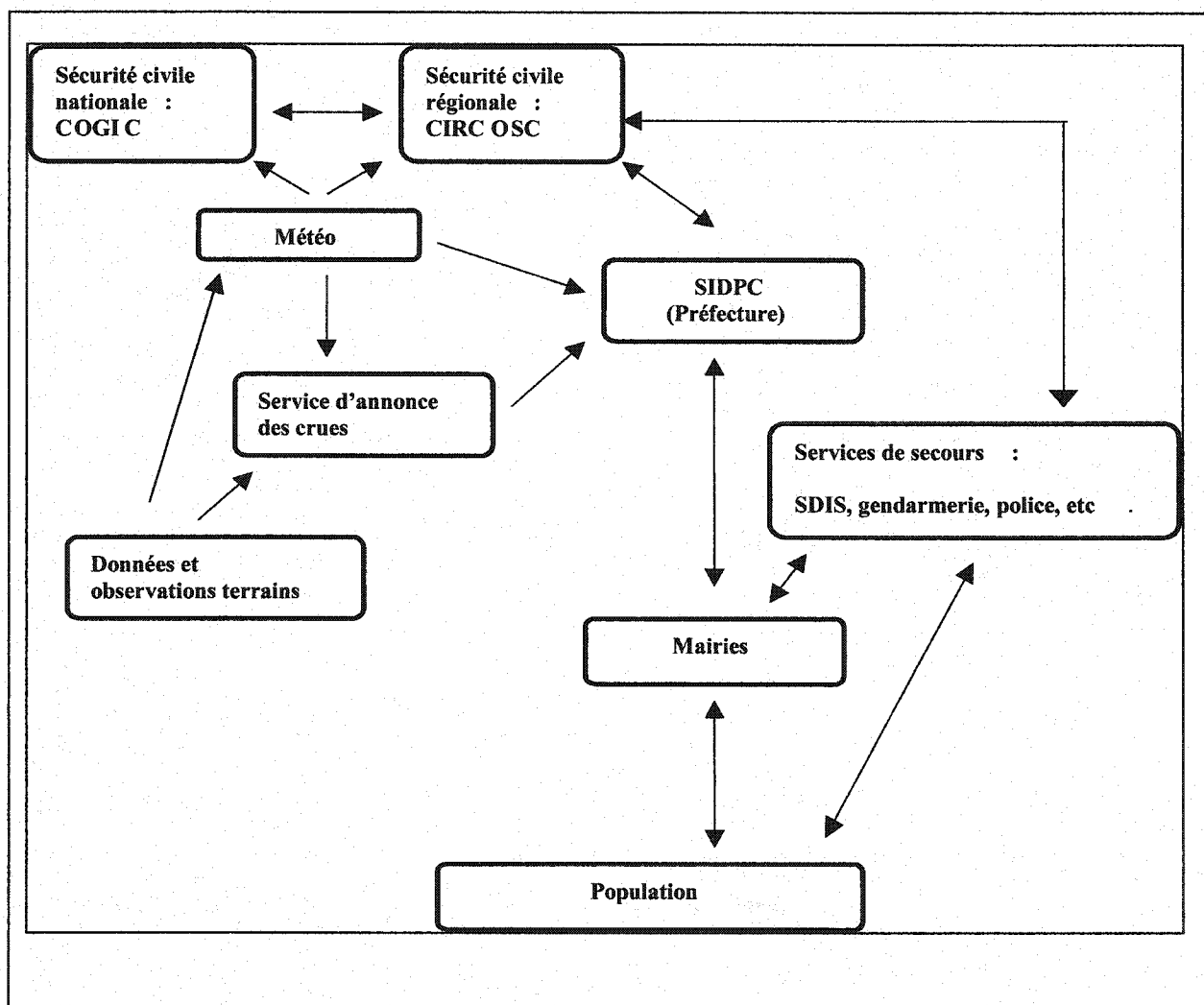
[2.2.1] Organisation

En France; la responsabilité d'informer la population à risque, dans le cas d'une crue, relève des Maires des communes. Toutefois, selon les arrêts ministériels du 27/02/1984 et du 11/02/1997, la surveillance des cours d'eau et le suivi des crues sont assurés par les Services d'Annonce des Crues (SAC), organismes relevant de la DDE, la DIREN ou de la DDAF. Les SAC ont la responsabilité d'informer le Préfet de Département de la situation et proposent la mise en Alerte le cas échéant. Ce sont alors les Préfets qui enclenchent la mise en Alerte en avisant notamment la Sécurité Civile et les Maires concernés, et qui chapeautent les activités de secours dans la phase Crise.

Par ailleurs, par le décret du 08/06/1993 et la circulaire interministérielle du 02/09/1993, les missions d'Etat de Météo-France concernent la mise en alerte météorologique, dès que certains seuils de précipitations sont atteints. Dans ces conditions, Météo-France avise directement les Services de Sécurité Civile (COGIC pour ALARME, CIRCOSC pour BRAM) ou les SAC (pour BAP).

La figure 2.1 représente l'organigramme de la gestion des crues, tel qu'actuellement prescrit par la réglementation française. Il faut toutefois considérer que cette structure est présentement en mutation.

Figure [2.1] : Schéma de l'organisation de la gestion des crues en France.



[2.2.2] Grands bassins versants

Il existe 53 SAC en France qui assurent la surveillance de plus de 16 000 km de cours d'eau. Puisque la géomorphologie du territoire français n'est pas uniforme, la France est touchée par une diversité de phénomènes météorologiques et hydrauliques qui sont fonctions des régions. Les DIREN, en collaboration avec les SAC, ont développé des technologies, outils et méthodologies de prévision et de suivi des crues qui sont adaptés aux conditions des bassins versants.

Par exemple, certains bassins tel que la Moselle (près de 20 000 km²) sont caractérisés par de grandes superficies (plus de 10 000 km²) ayant un temps de réponse hydrologique lent. Ces bassins peuvent générer des inondations de type « crue de plaines », c'est à dire des crues suffisamment lentes pour en évaluer la propagation. Elles sont donc plutôt prévisibles et connues, avec un temps d'anticipation raisonnable. Dans ces conditions, c'est au moyen des réseaux de mesures de données télétransmises et d'outils de modélisation en temps réel, que les SAC assurent la surveillance des cours d'eau.

Les inondations dans les grands bassins versants sont plutôt bien gérées puisque le temps d'anticipation est en général suffisant pour limiter les dégâts et pour mobiliser les secours tel que prévu par les plans d'urgence.

[2.2.2] Petits bassins versants

En revanche, certains petits bassins versants (ordre de quelques centaines de km²) ou des secteurs de bassins versants, sont de superficie de moindre envergure et ne sont pas couverts par les SAC. Or, les rivières de ces bassins peuvent représenter un risque sérieux d'inondation rapides. En effet, certains petits bassins versants peuvent réunir les

conditions favorables (pentes raides, ruissellement important, etc) aux développements de crues de type « crues éclairs ». Il s'agit de crues subites (moins de 12 heures s'écoulant entre le début de la pluie et la pointe de la crue). N'étant pas surveillées par un SAC et étant peu prévisibles, ces crues peuvent être catastrophiques lorsque la zone à risque est habitée. Ceci fut le cas par exemple pour la commune LABASTIDE-ROUAIROUX et les collectivités locales, à l'amont de la rivière Thoré, lors des événements de novembre 1999.

[3] Anticipation/Alerte

[3.1] Prévision Météo

[3.1.1] Structure organisationnelle : Météo-France

La structure organisationnelle de Météo-France se divise en trois niveaux couvrant l'ensemble du pays à l'échelle nationale, régionale et départementale. Chaque entité assure le suivi des conditions météorologiques qui prévalent sur son territoire en concertation avec les services voisins de même niveau (exemple CMIR sud-ouest et CMIR sud-est), ou entre les services à zones communes mais à échelles différentes (exemple CMIR sud-ouest CDM Tarn).

[3.1.1.1] National : Direction de la Production (anciennement SCEM)

La Direction de la Production (SCEM), sise à Toulouse, assure le traitement en temps réel des données météorologiques de l'ensemble du pays et de DOM/TOM.

La France étant membre de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), participe à la définition des règles régissant les échanges entre les pays membres ainsi qu'à l'établissement des normes de protocoles de mesure. Le lien entre Météo-France et l'OMM est assuré par le SCEM, et de ce fait, celui-ci bénéficie d'un accès à une foule d'informations météorologiques à une échelle globale.

Les prévisions météorologiques du SCEM couvrent une période de 7 jours. Les prévisions sont élaborées par les prévisionnistes du SCEM. Par ailleurs, les informations et expertises échangées avec les spécialistes des autres pays membres de l'OMM,

permettent aux prévisionnistes du SCEM d'affiner leurs propres prévisions, afin de statuer sur les conditions météorologiques à l'échelle de la France et des DOM/TOM. Les prévisions du SCEM ne spécifient pas les hauteurs de précipitation, ceci relève des CMIR et/ou CDM.

[3.1.1.2] Centres Météorologiques Interrégionaux (CMIR))

Le Centre Météorologique InterRégional, surveille en permanence les conditions météorologiques à l'échelle régionale. Le bassin du Thoré, dans le Tarn, reçoit des informations du CMIR/sud-est mais est couvert surtout par le CMIR/sud-ouest, duquel il reçoit officiellement les bulletin d'alerte. Le CMIR/sud-ouest a sous sa surveillance la zone de responsabilité des 20 départements des régions Midi-Pyrénées, Aquitaine, Poitou-Charente et Limousin. Il peut prévoir les effets de l'atlantique sur le bassin du Thoré, alors que le CMIR/sud-est prévoit les remontés d'air de la Méditerranée.

Selon les prévisions météorologiques au niveau national et en collaboration avec les prévisionnistes du SCEM et des Centres Départementaux de Météorologie (CDM), les spécialistes des CMIR assurent les prévisions météorologiques de leur région en temps réel. Par ailleurs, ils peuvent fournir des prévisions d'évolutions immédiates, en situation de crise météorologique notamment, avec renforcement des moyens. Ainsi, en périodes de pluies intenses par exemple, le CMIR peut estimer la lame d'eau à précipiter dans les 6 heures à venir (t+6).

De plus, ce sont les CMIR qui gardent sous archives les observations météorologiques de leur région et affinent ainsi l'expertise de la climatologie de la zone.

Enfin, parallèlement à leurs fonctions prévisionnistes, les CMIR assurent également la gestion et l'entretien du réseau d'observations météorologiques de sa région, en collaboration avec les ressources des CDM.

[3.1.1.3] Centres Départementaux de la Météorologie (CDM)

L'expertise des Centres Départementaux de la Météorologie permet d'affiner les prévisions à l'échelle départementale. Également, les CDM collaborent avec les CMIR pour l'entretien des équipements. En phases d'anticipation et de crise, les CDM déploient leurs ressources humaines afin de réaliser des observations-terrains et ce, particulièrement lorsque que les instruments de mesures ne sont plus en fonction.

[3.1.2] Outils et ressources pour les prévisions

Météo-France dispose d'une panoplie de ressources et de moyens techniques pour réaliser des prévisions météorologiques, à l'échelle nationale, régionale et départementale.

[3.1.2.1] Outils et ressources : National –SCEM

- Météosat (OMM) : 7 satellites météorologiques ; traitement et interprétation des images satellitales à partir du centre de Lannion en Bretagne ; information transmise à Toulouse (SCEM) toutes les ½ heure. Donne de l'information en temps réel dont un aperçu des profils verticaux telle que l'imagerie des nuages avec leur classification et les paramètres météorologiques et permet de mesurer régulièrement la pertinence des prévisions en suivant l'évolution des systèmes atmosphériques;

NOAA (Etats-Unis) : satellites polaires héliosynchrones, donnent des images et sondages de l'atmosphère, donc fournissent davantage d'information (l'imagerie des

nuages, température, humidité), et offre un complément aux informations obtenues par les radios-sondes ;

Les informations obtenues par les satellites sont accessibles à tous les échelons de prévisions météorologiques de Météo-France (SCM, CMIR, CDM)

- Observation en altitude (OMM) : 7 Radios-sondes Vaisala permettent de réaliser des observations biquotidiennes (en France à 0h00 et 12h00 UTC « temps universel coordonné ») et expérimentales (6h00 et 18h00 UTC). Les radios-sondes permettent d'évaluer les profils de vent (avec localisation par GPS), la température, la pression et l'humidité du sol.
- Réseau de radars ARAMIS : images radars prises aux 5 minutes (information stockée), mais seulement celles aux 15 minutes qui sont diffusées. 200 km de portée environ pour des mesures qualitatives et 100 km en utilisation quantitative, incluant un calculateur de traitement des données; estimation des précipitations « R » en mm (i.e ; en litres/m²) ;
- Observation terrestre : stations synoptiques :

Réseau principal : Observation humaine (visibilité, couvert nuageux) ;

Réseau radome (en voie d'implantation) : mesures automatique en surface et en temps réel, vitesse d'opération accélérée si des phénomènes importants sont décelés;

Réseau complémentaire : stations automatiques en surface mesures des paramètres météorologiques enregistrées aux 6 min et transmises par téléphone aux 3 hres, ce réseau inclus également d'autres images satellitaires;

- Information de la navigation : Information complémentaire provenant des avions et de certains navires (91), de bouées ancrées (33) et de houlographes (2) : température, humidité, vent, etc.

[3.1.2.2] Outils et ressources : Régional–CMIR et Départemental-CDM

L'ensemble des outils d'observation relève du SCEM. Par ailleurs, les CMIR et CDM se partagent la gestion et l'entretien des équipements d'observation sis sur leur territoire. Par exemple, sur le territoire du CMIR sud-ouest, sont localisés: équipement de radiosondage (ballon et sonde Vaisala,) (à Bordeaux), trois radars du réseau ARAMIS (Bordeaux-Mérignac, Toulouse et Grèzes), plus de 218 stations automatiques en surface, 26 stations synoptiques avec observation humaine, 700 postes complémentaires de relevés de pluie, etc.

[3.1.3] Prévision

[3.1.3.1] Modèles

- ARPEGE : Le modèle ARPEGE est un modèle numérique utilisé pour réaliser les prévisions globales sur le France.

Ce modèle de calcul donne des prévisions de conditions météorologiques, à partir des paramètres météorologiques dont la pression, le vent, la température et l'humidité sur un réseau maillé tridimensionnel. Également, le modèle peut approcher des valeurs de précipitation, que les prévisionnistes pourront affiner à l'échelle régionale. Le modèle ne donne pas de valeur d'intensité maximale des pluies prévues (mm/temps), mais fournit le total cumulé au bout de 6 heures.

Le modèle ARPEGE fonctionne sur un réseau à mailles variables de l'ordre de 30 km sur le territoire métropolitain et jusqu'à 300 km aux antipodes. Il est lancé aux 6 heures à partir des données de 0h00 UTC et fournit des prévisions jusqu'à 72 heures d'échéance.

- ALADIN: Le modèle ALADIN est essentiellement le même modèle que ARPEGE, mais il fonctionne sur un réseau à mailles plus petites. En fait, les conditions limites du modèle ALADIN sont incluses dans celles du modèle ARPEGE. Le couplage de ces modèles peut donc être utilisé pour réaliser des prévisions plus affinées.
- Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme: Météo-France utilise aussi pour couvrir la moyenne échéance (du jour J+3 au jour J+7) les résultats fournis par le modèle du Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT) qui couvre le globe entier avec une résolution moyenne de 60 km mais se trouve initialisé uniquement à partir des données de 12h00 UTC.
- Autres échelles: la plupart des informations est accessible en tout temps, via METEOTEL, SYNERGIE, ASPIC. Les prévisionnistes des CMIR et des CDM puisent donc des informations par ces systèmes et complètent leurs prévisions locales avec les outils de modélisation selon un calcul plus affiné (ALADIN ou ARGEGE-ÉTIRÉ) ou avec d'autres outils adaptés à leur secteur tel que SYMPOSIUM utilisé par le CDM pour les prévisions dans le Tarn.
- L'expertise humaine: Les résultats des modèles combinés avec l'analyse des observations en cours (observation humaine, images radars, images satellitales, observation de surface de la mer, etc.) permettent aux prévisionniste d'élaborer les prévisions météorologiques pour une période allant jusqu'à 7 jours (SCM) ou pour la journée à venir (CMIR et CDM), et en période de crise, on peut prévoir pour les 6 prochaines heures. La précision des prévisions est périodiquement vérifiée à partir des images satellitales révisées et disponibles aux ½ heures.

Le travail du prévisionniste consiste donc à suivre avec attention le comportement réel de l'atmosphère à partir du réseau d'observation (Météosat, images radars, etc.) et de comparer les sorties des modèles numériques pour validation.

[3.1.3.2] Prévisions :

Les informations en temps réel qui sont indispensables pour faire tourner les modèles numériques sont celles provenant des Radios-sondes et des capteurs des avions. Les autres informations (réseaux complémentaires, stations synoptiques,...) sont également incorporées au cycles d'assimilation du modèle ARPEGE, mais ne sont pas indispensables. Le SCEM réalise ses prévisions météorologiques au moyen des modèles ARPEGE et ALADIN, mais reçoit également les prévisions des modèles : allemand, britannique et du CEPMMT. L'analyse des résultats des différents modèles permet de conclure sur le niveau de confiance des sorties de ARPEGE (ou ALADIN). En effet, si les modèles convergent vers le même scénario, l'indice de confiance des prévisions est plus solide. Toutefois, dans le cas contraire, on va suivre de plus près l'évolution des phénomènes au moyens des images satellitales afin d'identifier lequel des modèles est le plus juste. La prévision s'appuiera sur ce dernier.

A la suite de l'analyse des résultats des modèles numériques de prévision, le SCEM transmet, par télécopie, aux CMIR leurs conclusions d'analyse. Par la suite, il y a une conférence téléphonique entre les prévisionnistes des CMIR et du SCEM afin de statuer sur les prévisions météorologiques pour les 24 heures à venir et sur le choix du type de bulletin d'alerte à émettre, le cas échéant. C'est suite à la conférence téléphonique quotidienne avec les CMIR que le SCEM statue sur les prévisions météorologiques de l'ensemble de la France.

Une seconde conférence téléphonique a lieu en début de soirée afin de donner un aperçu succinct des conditions météorologiques prévalant.

[3.1.4] Échange d'information

[3.1.4.1] Bulletins météorologiques

- SCEM : Le SCEM est quotidiennement en contact avec la sécurité civile à l'échelle nationale par le COGIC et l'informe de la situation météorologique des jours à venir selon les conclusions de la conférence téléphonique.

Également, le SCEM met à jour les informations diffusées par Minitel, dont les Bulletins Réguliers de Précipitations (BRP) ainsi que celles sur internet (ex. Cartes de vigilance).

- CMIR sud-ouest : Le CMIR transmet des BRP aux SAC. Également, le CMIR envoie 3 fois par jour des directives techniques de prévisions vers les CDM.
- CDM-Tarn : Ce CDM transmet quotidiennement vers le CMIR sud-ouest, 4 bulletins de prévisions météorologiques sur le département. Les CDM fournissent l'expertise locale-terrain lors des alertes, et informent le CMIR, le SAC et le SIDPC de la situation.

[3.1.4.2] Bulletins d'alertes

Le choix du type de bulletin d'alerte à émettre se définit principalement lors de la conférence téléphonique entre le SCEM et les CMIR, au présage de phénomènes météorologiques à risques. Ainsi, dans sa responsabilité d'État de mise en alerte, tel que spécifié dans la Circulaire du 2 septembre 1993 Météo-France doit aviser les divers services de la sécurité Civile en fonction de l'ampleur du phénomène prévu. Concernant les crues, il existe 3 types de bulletins d'alerte pouvant être émis : BAP, BRAM et

ALARME. Le contenu de ces bulletins d'alertes est présenté à l'[annexe A] l'annexe D [de ce mémoire].

➤ Bulletins d'alerte aux précipitations-BAP

Les BAP sont émis par le CMIR sud-ouest vers les SAC , dès que les précipitations prévues ou mesurées atteignent 30 mm en 24 heures (seuil fixé en fonction de la zone) à l'échelle du bassin hydrologique. Ce bulletin est révisé périodiquement jusqu'à ce que la fin de l'alerte soit annoncée.

➤ Bulletins régionaux d'alerte météorologique-BRAM

Les BRAM-pluie sont émis par le CMIR sud-ouest vers le CIRCOSC de Bordeaux et les CDM concernés, dès que les précipitations prévues ou mesurées atteignent 50 mm en 24 heures (seuil fixé en fonction de la zone) à l'échelle du bassin hydrologique. Des BRAM peuvent être émis pour d'autres conditions nécessitant la mise en alerte : vents, neige, verglas, vague de froid ou avalanche. Au préalable du BRAM-pluie/orage, un BAP devrait normalement être transmis aux SAC.

La décision d'émettre ou non un BRAM peut être prise conjointement avec le SCEM lors de la conférence téléphonique biquotidienne. Pour l'année 1999 , on répertorie 259 BRAM émis et 9 absence d'alerte. Le CMIR sud-ouest pour sa part en a émis 37 dont 5 BRAM pour des précipitations et 23 pour des orages.

➤ Alerte au risque météorologique exceptionnel-ALARME

En situation prévisible de crise qualifié « d'événement météorologique exceptionnel » et conjointement avec les CMIR, le SCEM amorce la procédure particulière de diffusion de l'information météorologique de type ALARME. Ceci implique l'émission d'un bulletin d'alerte ALARME vers le COGIC ainsi qu'une alerte de type BRAM vers les CIRCOSC. Ce niveau d'alerte est peu fréquent, pour l'année 1999 il y en a eu 7 d'émissions.

[3.2] Prévision crues

[3.2.1] Structure organisationnelle

[3.2.1.1] Direction Régionale de l'Environnement (DIREN) Midi-Pyrénées :

Le rôle de la DIREN/Midi-Pyrénées, en ce qui a trait aux bassins Adour & Garonne, est d'assurer la coordination des actions dans le domaine de l'eau sur les bassins. Dans cette fonction, la DIREN coordonne notamment les dispositifs d'annonce et de prévision des crues pour le bassin de la Garonne, elle assure l'annonce des crues du bassin supérieur à la Garonne (à titre de SAC) et elle offre son expertise et un support technique aux quatre autres SAC du bassin de la Garonne (Montauban, Cahors, Agen et Auch), ainsi qu'aux SAC des bassins Adour, Dordogne et Charente (voir figure page 15 [Non disponible]).

Dans le domaine de prévision de crue, la DIREN gère et coordonne toutes les activités de recherche et de développement, incluant la conception et l'amélioration des systèmes de surveillance des crues sur l'ensemble du bassin de la Garonne et le calage des modèles de prévisions. Elle assure également l'entretien des stations d'observation et du système de gestion et de transmission des données.

Enfin, la DIREN reçoit et garde sous archive des copies de tous les BAP transmis aux SAC, ainsi que des comptes-rendus des événements à la fin des alertes. Également, toutes les informations hydrométriques manuscrites (incluant celles d'avant 1982), de même que les données télétransmises, sont archivées à l'état brute au central de Toulouse. Par ailleurs, en phase d'anticipation/alerte, ces données brutes sont acheminées en temps réel à même les SAC qui les gardent sous archives. En revanche, en phase de prévention, les données brutes seront traitées pour fins d'études, avant d'être transmises aux SAC.

[3.2.1.2] Service d'annonce des crues (SAC)

Selon l'arrêté ministériel de février 1984 et sa mise à jour en février 1997, les SAC doivent assurer le suivi et l'annonce des crues des cours d'eau du bassin relevant de leur compétence.

L'Annonce des crues du bassin de la Garonne est partagée entre 5 SAC, relevant principalement des Directions Départementales d'Équipement (DDE) et couvrant les bassins suivants :

- bassin moyen de Garonne (DDE-Montauban) ;
- bassin du Lot (DDE-Cahors) ;
- bassin inférieur Garonne (DDE-Agen) ;
- bassin du Gers (SAC-Auch) ; et
- bassin supérieur de la Garonne (Service Hydrologique de la DIREN-Toulouse).

Les SAC des sous-bassins de la Garonne assurent donc la veille et l'alerte sur leur sous-bassin versant respectif. Par ailleurs, il assurent également la maintenance de premier niveau (réparations ponctuelles, pas de remplacement) des équipements, le maintien de la banque de données des informations recueillies à partir des stations de mesure (télétransmises par le Central ou observées) et enfin, ils assistent les Maires dans leur tâche de prévention des inondations. En ce sens, ils peuvent par exemple, émettre des recommandations au Préfet, pour fixer les cotes d'alerte, en concertation avec la DIREN, en se fiant notamment aux crues historiques. Le SAC Montauban pour sa part, offre un appui technique et de logistique aux communes du département (couvertes et non couvertes par son service) en matière de prévention. D'ailleurs, c'est la DDE Montauban

(donc SAC Montauban) qui a élaboré le Plan de Prévention des Risques - Inondation du département Tarn et Garonne.

[3.2.2] Outils et ressources pour les prévisions

[3.2.2.1] SOPHIE

La DIREN Midi-Pyrénées (SAC de Toulouse) a développé un outil opérationnel de prévision des crues en temps réel, adapté aux crues plutôt rapides, soit le « Système Ouvert de Prévisions Hydrologiques Informatisé avec Expertise » (SOPHIE 2- nouvelle version de SOPHIE). Cet outil permet d'anticiper le comportement de la Garonne (et de ses affluents) sur 2 à 4 heures pour les bassins amonts, et jusqu'à 6 heures d'anticipation pour le sous-bassin Garonne Supérieur (SAC- Toulouse).

SOPHIE est donc un opérateur de prévision de crues se basant sur un processus multi-modèles qui produit des prévisions de hauteur d'eau en utilisant les données en temps réel (mesures de hauteurs d'eau et de précipitations). Ainsi, pour chaque station, une prévision en hauteur d'eau est produite. SOPHIE établit ce résultat en comparant au préalable, les hauteurs d'eau calculées par différents modèles indépendants. Certains paramètres des modèles doivent être calés afin de tenir compte des changements qu'il y a eu dans le bassin ou pour améliorer le degré de précision des résultats.

Les modèles n'utilisent pas les mêmes données d'entrée, et en absence de certaines valeurs, il y a des modèles qui ne tournent pas alors que d'autres ne sont pas affectés par cette lacune. De ce fait, la prévision peut s'effectuer sur plusieurs niveaux offrant au prévisionniste la possibilité d'interpréter les résultats selon le degré de détail recherché, soit :

- une prévision globale : tous les multi-modèles de toutes les stations du bassin ;
- une prévision station : tous les multi-modèles à une station précise ;
- une prévision modèle : un modèle individuel pour une station ;
- une prévision multi-modèles : une procédure multi-modèle pour une station précise (discrétisation des résultats des modèles en terme de performances récentes et passées).

La prévision multi-modèles de hauteur d'eau implique une analyse des résultats des modèles en évaluant d'abord un critère de variance des erreurs par rapport à la réalité lors du calage des modèles, ensuite le poids de chaque modèle est revu suivant l'évolution des conditions et des données.

[3.2.2.2] Types de modèles du multi- modèles

Les types de modèles qui sont utilisé dans le processus multi-modèles de SOPHIE sont les suivants :

- Modèles de relations linéaires (RL) autorégressifs : calculent la prévision de hauteur d'eau selon l'accroissement précédant mesuré, aucun calage n'est requis, fonctionne même si certaines données sont manquantes, acceptable pour des crues lentes, mais pas recommandé pour des changements brusques de pente de l'hydrogramme ;
- Modèles RL à propagation : relient les hauteurs d'eau des stations amonts et de la station aval (celle pour la prévision) en considérant le décalage temporel relié à la propagation de l'onde de crue, requièrent le calage du paramètre α de $Q_{\text{aval}}(t)$ pour améliorer la précision de la prévision ;
- Modèles Pluie-Débit (P-Q) et (PQ2) avec ou sans le paramètre b : relations empiriques reliant les précipitations uniformes sur l'ensemble du bassin (méthode de Thiessen) au débit à l'exutoire, le coefficient de réduction (b) tient compte de la

pluie réellement ruisselée et doit être calé, la plus grande imprécision repose sur la mauvaise estimation de la pluie tombée, et ce particulièrement lors d'une crue excédant la plage de validité du paramètre b , la méthode PQ2 considère la variabilité temporelle de b , ces méthodes sont applicables idéalement pour des petits bassins versants, en forme d'éventail et à temps de réponse plutôt court ;

- Modèles Réglette Bachet (RB) : méthode graphique reliant les hauteurs des stations amonts et de la station aval, en considérant les décalages temporels, valides que pour les hautes eaux ;
- Modèles Relation puissance (RP) : relations empiriques non-linéaires évaluées à partir d'une courbe de tarage (niveau/débit) ou de niveaux d'eaux et dont les coefficients sont calculés grâce à des logiciels de statistiques, valables seulement dans les limites du calage des coefficients et utilisées en particulier pour simuler l'atténuation des ondes de crue lors d'un débordement ;
- Modèles Relations multiples (VT) : plusieurs RL ou RP en fonction de la hauteur à une station de référence, modèles doivent être calés, ils tiennent compte du changement de comportement hydrologique entre les stations ;
- Modèles Prévisions intuitives formalisées (PIF) : pondération des paramètres selon l'expérience des gens ;
- Modèle VALHERIE : prévisions faites à partir de lame d'eau provenant des images radars.

Dans le processus multi-modèle, les modèles opèrent soit en parallèle, soit en série. En parallèle, il y a des données d'entrées qui sont communes à certains modèles alors qu'en série, les données d'entrées des uns peuvent être les résultats fournis par d'autres si les prévisions sont faites sur plusieurs pas de temps. Dans ces conditions, les prévisions sont à plus longue échéance et donnent des résultats moins fiables.

[3.2.2.3] Réseau de mesure

Sur le bassin de la Garonne, la DIREN dispose d'un réseau de mesures des données hydrométriques (pluie et hauteur d'eau), télétransmises ou relevées. Les mesures télétransmises vers le Central de Toulouse, où elles sont archivées à l'état brutes et ensuite réacheminées vers les terminaux des SAC. Le Central déclenche une alarmes technique dès qu'une défaillance du matériels est décelée.

Le réseau de mesures sur le bassin comporte plus d'une centaine de stations de mesure automatiques de niveaux des rivières et/ou de pluie dont soixantaine de stations d'alerte (seuil de vigilance, de pré-alerte et d'alerte) répartis selon le schéma de la figure à page suivante.

[Figure non disponible]

[3.2.3] Prévision

[...]

La surveillance des crues par les SAC s'articulent autour de trois types de mise en alerte : la Vigilances, la Pré-Alerte et l'Alerte. Dès que le niveau d'eau à une station atteint la cote de vigilance, le système appelle automatiquement le prévisionniste d'astreinte. Celui-ci fait un état de la situation en regardant notamment les prévisions météorologiques (Météotel, la réception ou non de bulletins d'alerte météorologique, information auprès du CDM, ou des CMIR) et en s'informant auprès du SAC amont. Il lance une simulation SOPHIE-2, ce dernier pouvant surseoir le temps de calcul jusqu'à 10 min s'il n'a pas tourné depuis un certain temps puisqu'une compilation des données d'entrée doit d'abord être faite.

Une fois les résultats de SOPHIE-2 obtenus, le prévisionniste en fait l'analyse et assure un suivi de la situation. Il doit alors décidé d'informer ou non la Préfecture et aviser les SAC aval.

[3.2.4] Échange d'information

[3.2.4.1] Bulletin d'alerte

Ce n'est que lorsque la cote de Pré-Alerte est atteint ou en voie de l'être que le prévisionniste du SAC avise la Préfecture. Lorsque la situation (SOPHIE-2, informations météorologiques, etc.) laisse présager l'atteinte des cotes d'Alerte, le SAC transmet une proposition de mise en Alerte à la Préfecture, en lui indiquant les cotes observées, les cotes prévues et une appréciation de la tendance (voir formulaire à l'annexe A). Par ailleurs, il est possible que la surveillance renforcée soit amorcée avant l'atteinte des cotes de vigilance, notamment par la réception au SAC d'un BAP par le CMIR.

C'est la Préfecture qui enclenche la mobilisation des secours après avoir analysé le degré d'urgence, après la réception de la proposition de mise en pré-Alerte ou Alerte de la part du SAC.

ANNEXE B

LE BASSIN VERSANT THORÉ

[Extrait du rapport de stage(AUDETTE, L. 2001)¹

[5.1.1] Surveillance du bassin Thoré

La vallée du Thoré, dans le Tarn, est un petit bassin versant d'une superficie totale d'environ 584 km² sur près de 58 km de longueur, prenant sa source dans les gorges du sud-est de Labastide-Rouairoux, à une altitude de l'ordre de 800 m (voir figures [5.1] et [5.2]). Cette zone réunie des conditions favorables à la formation des crues éclairs, telles que décrites [2.2.3].

[5.1.2] Climat sur le sous-bassin Thoré

Le sous-bassin versant Thoré, étant très près de la ligne de partage des eaux entre les bassins Atlantique et Méditerranéen, est soumis aux vents d'ouest et nord-ouest ainsi qu'aux pluies diluviennes de type « Cévenol ». Ces dernières sont provoquées par la remontée du sud d'air méditerranéen très chaud et humide se heurtant directement sur les Cévennes le propulsant en altitude. L'air se refroidit et la vapeur se condense et précipite sous forme de pluies intenses et, en général, très localisées (voir figure [5.3]).

Par ailleurs, lorsque la remonté d'air méditerranéen est soumise à un vent de l'est, il est dirigé vers le littoral Audois avant de se heurter aux Corbières et aux Minervois (voir figure [5.3]). On parle alors du phénomène « languedocien » ou « averses méditerranéennes extensives ». Ce phénomène est régulièrement observé lors des

¹ [XX.XXX] numérotation dans le rapport Audette, (2001)

changements de saison et ce, plus intensément à l'automne, puisque la masse d'air chaud provenant du sud est plus chaude et donc plus humide qu'il ne l'est au printemps. Les pluies occasionnées par ce type de phénomène, s'apparentent aux pluies « cévenoles » créant subitement des orages intenses et instables.

[...]

L'amont du sous-bassin Thoré à la hauteur de Labastide-Rouairoux, regroupe donc les conditions favorables à la formation de pluies de type « Cévénol » qui peuvent occasionner des crues éclair et catastrophiques, tel qu'en témoignent les événements de novembre 1999.

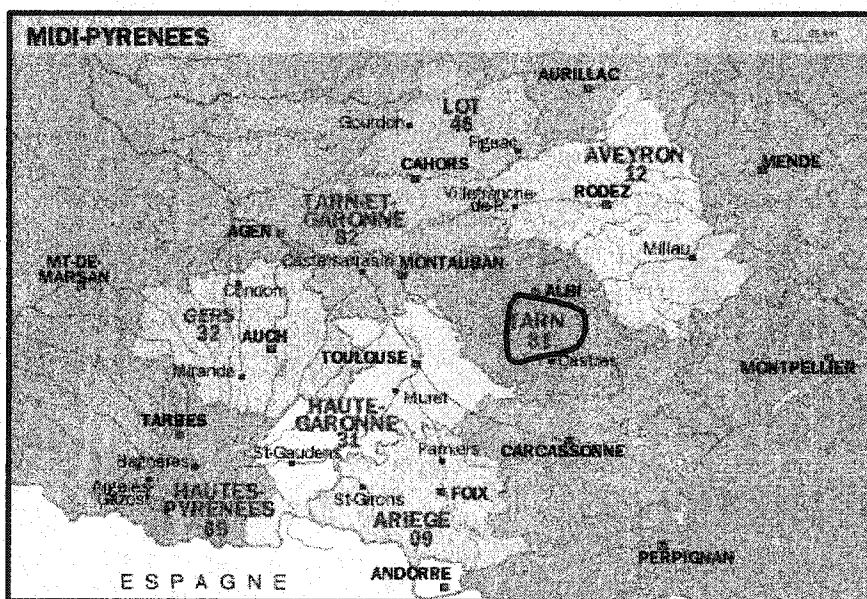


Figure [5.1] Le Tarn

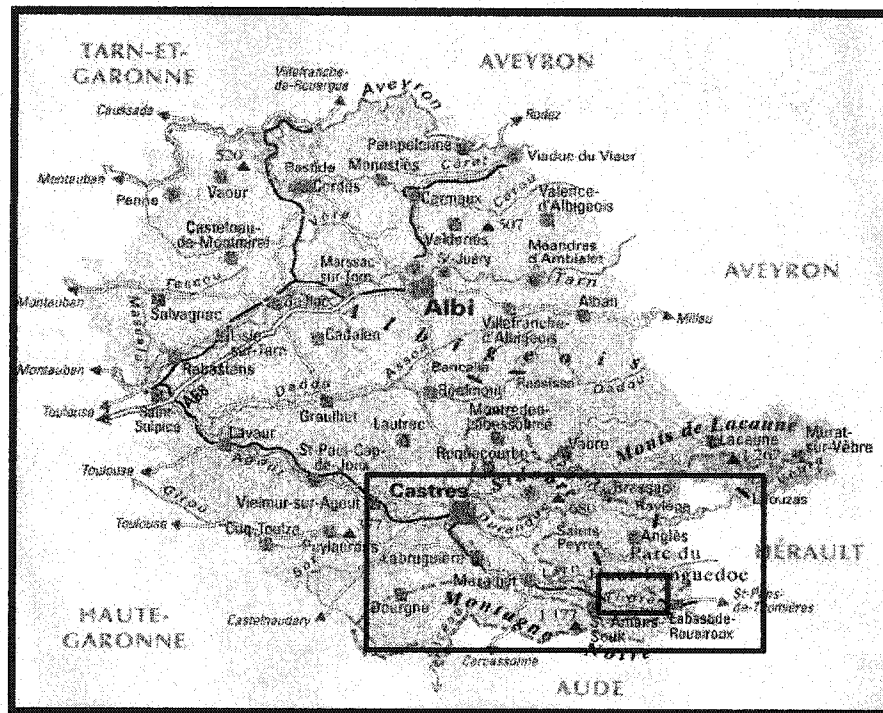


Figure [5.2] Le Thoré

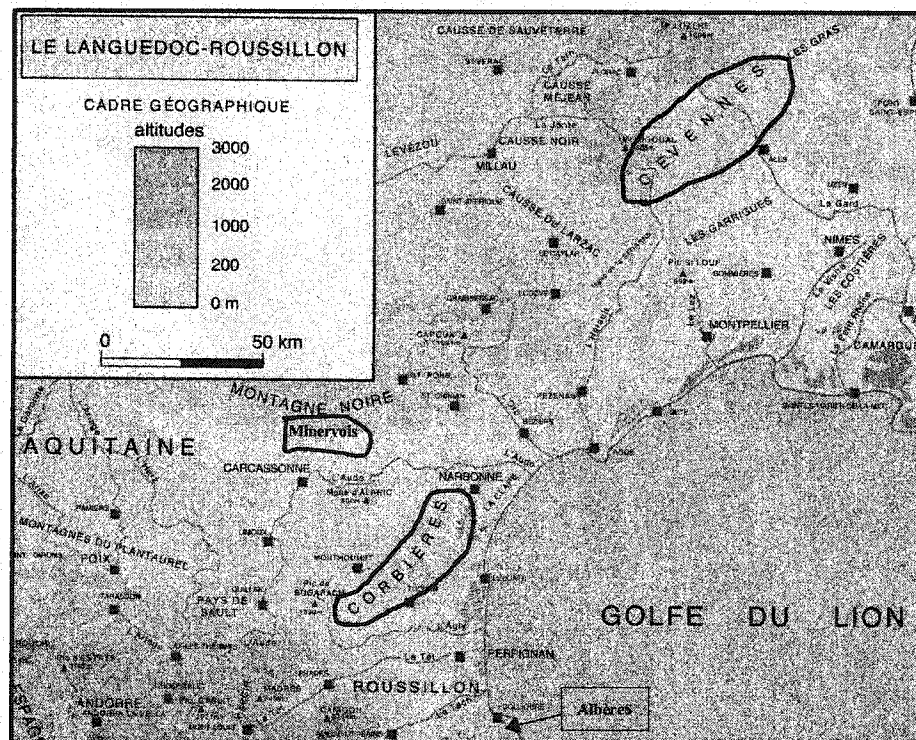


Figure [5.3] Massifs

ANNEXE C

ÉVÉNEMENT DE NOVEMBRE 1999

[Extrait du rapport de stage (AUDETTE, L. 2001)¹]

[5.1.3] Événement météorologique de novembre 1999

[5.1.3.1] Pluie

Le 12 novembre 1999, la remontée d'air chaud du sud, combiné à la présence d'une dépression au centre de l'Espagne, favorise la formation d'un phénomène « languedocien », tel que décrit plus haut [annexe B du mémoire]. Par ailleurs, la montée du vent d'est sur le littoral Audois, est de l'ordre de 100 km/hre (entretenu pendant 36 à 48 heures), ce qui intensifie le phénomène en amenant l'air quasi saturé, à se heurter aux massifs Albères, Corbières et Minervois (figure [5.3]), à une vitesse démesurée. Des pluies diluviennes et orageuses sont ainsi provoquées. Les précipitations les plus intenses sont estimées à environ 107 mm de pluie en une heure à Lézignan (Aude) et un cumul de l'ordre de 620 mm en 48 heures, dont 551 mm en 24 heures. On évalue la période moyenne de retour de cet épisode entre 50 et 100 ans, sur l'ensemble du territoire affecté.

Ce n'est que dans la matinée du 13 novembre que le système s'est atténué, l'intensité du vent s'affaiblissant. Les pluies ont cessé dans l'après-midi sauf dans certaines zones à l'est du Languedoc qui ont été exposées à d'intenses pluies jusque dans la nuit du 14 et du 15 novembre.

¹ [XX.XXX] numérotation dans le rapport (AUDETTE, 2001)

L'étendu du territoire affecté par cet épisode touche les départements limitrophes au golf du Lion, soit l'Aude, l'Hérault et les Pyrénées Orientales, ainsi que le Tarn. De moindre envergure, les départements de l'Aveyron, Lozère, le Lot et le Gard ont également été touchés.

[5.1.3.2] Crue

Considérant l'intensité exceptionnelle des pluies, le ruissellement sur les bassins versants s'est avéré fort important, l'eau n'ayant pas le temps de s'infiltrer. Ainsi, c'est la quasi totalité de la pluie qui a ruisselée vers les rivières.

Ceci s'est traduit par une montée importante du débit des rivières. Des petites rivières asséchées se sont ainsi transformées en torrents. Sur certains petits bassins versants, le débit spécifique était de l'ordre de 10 fois plus élevé que les valeurs enregistrées lors de très forte crues (ex. Gourg de Bianco, $22,5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$). Pour le Thoré, on estime un débit spécifique ayant atteint environ $1,6 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$, ce qui correspond, dans ce cas, à une période de retour de l'ordre de 100 ans. Ce bassin a d'ailleurs été aux prises avec des glissements de terrain dont une coulée de boue ayant occasionné la mort de 4 personnes à Labastide-Rouairoux. Le bilan des victimes pour l'ensemble de l'événement s'élève à 35, dont 25 dans le département de l'Aude, le plus durement touché. La Sécurité Civile compte plus de 3 000 interventions.

Relevé du cumul de Pluie: Novembre 1999

Pluies tombées dans l'heure précédente (pluies horaires en dixièmes de mm)											Cumuls horaires depuis le début de l'épisode (en mm)											
De gauche à droite, stations sud au nord, plus ou moins dans l'axe du maximum, sud dans le Tarn où ces stations croisent le maximum à l'ouest et au nord, Courmoult à l'est dans l'Hérault, très près du Tarn																						
Jour	II début	II fin	Perpignan	Durban	Lézignan	Caunes	Dourgne	Labruguière	Lacaze	Courmoult	Jour	II début	II fin	Perpignan	Durban	Lézignan	Caunes	Dourgne	Labruguière	Lacaze	Courmoult	
12	0	1									12	0	1									
	1	2		4	0							1	2	0	0,4	0	0	0	0	0	0	
	2	3		2	2	2				4		2	3	0	0,6	0,2	0,2	0	0	0	0,4	
	3	4		2	8	4	2	2		10		3	4	0	0,8	1	0,6	0,2	0,2	0	1,4	
	4	5		2	2	6	4	10	5	4		4	5	0	1	1,2	1,2	0,6	1,2	0,5	1,8	
	5	6	4	8	10	4	2	2	15	6		5	6	0,4	1,8	2,2	1,6	0,8	1,4	2	2,4	
	6	7	7	4	16	14	2	0	5	10		6	7	1,1	2,2	3,8	3	1	1,4	2,5	3,4	
	7	8	4	18	36	32	12	18	40	38		7	8	1,5	4	7,4	6,2	2,2	3,2	6,5	7,2	
	8	9	13	22	36	24	22	14	50	38		8	9	2,8	6,2	11	8,6	4,4	4,6	11,5	11	
	9	10	66	82	154	32	38	18	30	42		9	10	9,4	14,4	26,4	11,8	8,2	6,4	14,5	15,2	
	10	11	119	154	212	60	44	24	20	62		10	11	21,3	29,8	47,6	17,8	12,6	8,8	16,5	21,4	
	11	12	140	40	140	40	62	42	45	96		11	12	35,3	33,8	61,6	21,8	18,8	13	21	31	
	12	13	10	36	82	18	38	0	30	60		12	13	36,3	37,4	69,8	23,6	22,6	13,6	24	37	
	13	14	47	74	116	35	20	0	30	60		13	14	41	44,8	81,4	27,4	24,6	14,2	27	43	
	14	15	357	138	168	92	16	18	45	83		14	15	79,7	58,6	98,2	36,6	26,2	16	31,5	51,8	
	15	16	75	126	176	80	28	26	55	100		15	16	87,2	71,2	115,8	45,2	29	18,6	37	62,4	
	16	17	85	154	182	40	44	22	80	118		16	17	95,7	86,6	134	49,2	33,4	20,8	45	74,2	
	17	18	112	450	368	58	6	24	75	120		17	18	106,9	131,6	170,8	55	34	23,2	52,5	86,2	
	18	19	75	780	548	142	66	45	55	124		18	19	114,4	209,6	225,6	69,2	40,6	28	58	98,6	
	19	20	39	108	266	338	46	56	45	118		19	20	118,3	220,4	252,2	103	45,2	33,6	62,5	110,4	
	20	21	75	62	92	500	22	76	55	190		20	21	125,8	226,6	261,4	153,6	47,4	41,2	68	130	
	21	22	12	45	46	676	34	270	70	124		21	22	127	231,4	266	205,6	50,8	68,2	75	142,4	
	22	23	62	372	372	454	12	136	50	140		22	23	133,2	268,6	203,2	251	52	81,8	80	157	
	23	0	75	240	1066	104	0	24	80	174		23	0	140,7	292,6	409,8	361,4	52	84,2	88	174,4	
13	0	1	12	60	854	22	0	2	95	260		13	0	1	141,9	298,6	495,2	263,6	52	84,4	97,5	201
	1	2	147	140	26	260	0	40	150	126		1	2	156,6	312,6	497,8	289,6	52	83,4	112,5	213,6	
	2	3	575	58	40	398	50	180	45	58		2	3	214,1	318,4	501,8	329,4	57	106,4	117	219,4	
	3	4	75	138	208	662	84	180	40	26		3	4	221,6	332,2	522,6	395,6	65,4	124,4	121	222	
	4	5	37	60	270	116	44	74	63	263		4	5	225,3	338,2	549,6	407,2	69,8	131,8	127,5	248,8	
	5	6	6	30	40	36	74	86	45	70		5	6	225,9	341,2	553,6	410,8	77,2	140,4	132	255,8	
	6	7	12	28	14	45	112	86	40	46		6	7	227,1	344	555	415,6	88,4	149	136	260,4	
	7	8	6	32	24	42	20	30	40	44		7	8	227,7	347,2	557,4	419,8	90,4	152	140	264,8	
	8	9	6	86	40	30	0	2	83	38		8	9	228,3	355,8	561,4	422,8	91	152,2	148,5	268,6	
	9	10	5	34	64	26	2	2	125	76		9	10	228,8	359,2	567,8	425,4	91,2	152,4	161	276,2	
	10	11	15	46	46	32	4	28	83	64		10	11	230,3	363,8	572,4	428,6	91,6	155,2	169,5	282,6	
	11	12	6	20	18	4	0	0	100	56		11	12	230,9	365,8	574,2	429	91,6	155,2	179,5	288,2	
	12	13	50	24	8	2	0	0	45	28		12	13	235,9	368,2	575	429,2	91,6	155,2	184	291	
	13	14	140	48	70	14	14	0	25	38		13	14	249,9	373	582	430,6	93	155,2	186,5	294,8	
	14	15	2	104	22	8	4	2	15	42		14	15	250,1	383,4	584,2	431,4	93,4	155,4	188	299	
	15	16	12	20	118	12	0	0	15	10		15	16	251,3	385,4	596	432,6	93,4	155,4	189,5	300	
	16	17	0	0	62	54	4	0	0	16		16	17	251,3	385,4	602,2	438	93,8	155,4	189,5	301,6	
	17	18	0	2	42	14	6	2	15	40		17	18	251,3	385,6	606,4	439,4	94,4	155,6	191	305,6	
	18	19	0	2	12	30	8	6	0	30		18	19	251,3	385,8	607,6	443	95,2	156,2	191	308,6	
	19	20	0	0	46	60	28	44	5	20		19	20	251,3	385,8	612,2	449	98	160,6	191,5	310,6	
	20	21	0	0	16	70	54	38	25	74		20	21	251,3	385,8	613,8	456	103,4	164,4	194	318	
	21	22	0	0	6	20	24	16	30	4		21	22	251,3	385,8	614,4	458,6	105,8	166	197	318,4	
	22	23	6	0	0	0	8	6	5	6		22	23	251,9	385,8	614,4	458,6	105,6	166,6	197,5	319	
	23	0	0	0	0	2	0		35	12		23	0	251,9	385,8	614,4	458,6	105,6	166,6	201	320,2	
Total			252	386	614	458	107	167	201	321	Total			252	386	614	458	107	167	201	321	

Tableau 3 : Pluviométrie des 12 et 13 novembre à huit stations caractéristiques

*Labruguière : station la plus près de MAZANET

ANNEXE D

BULLETINS D'ALERTE AUX PRÉCIPITATIONS

TELEX : BAP

cree le 991112 a 101325

TEXTE DU TELEX :

WGBD41 LFBD 121005

B.A.P. NO 43

BULLETIN D'ALERTE DE PRECIPITATIONS

ORIGINE: METEO-FRANCE SUD-OUEST

CENTRE INTERREGIONAL BORDEAUX-MERIGNAC

URGENCE: IMMEDIAT

DATE/HEURE REDACTION: 12/11/99 11H LEG

RISQUE: FORTES PRECIPITATIONS

DESTINATAIRES:

-SERVICES D'ANNONCE DE CRUES

-CENTRES METEO DEPARTEMENTAUX

PERIODE DE VALIDITE:

DU 12/11/1999 A 12H LEGALES

AU 13/11/1999 A 12H LEGALES.

TEXTE: DE FORTES PLUIES SONT
ATTENDUES SUR LE TARN ET L' AVEYRON
(SURTOUT SUR VERSANTS EST DU RELIEF);
DES PLUIES MODEREES A FORTES SONT
ATTENDUES DE L'EST DE MIDI-PYRENEES
A LA GIRONDE .

DEMAIN: PEU D'EVOLUTION.

APRES-DEMAIN: AMELIORATION .

- DONNEES CHIFFREES PREVUES:

	12/11/99	J-1	PREVU J	MAX	DE/FI
11	GARON INF	1.6	20/30	-	12/06
14	LOT AMO	0.6	20/40	-	06/06
15	GARON MOY	0.3	20/30	-	/
16	HAUT TARN	1.2	40/60	100	06/06
17	AGOUT	1.0	30/50	100	06/06
19	LANNEMEZ	0.9	20/30	-	06/06
21	GARONNE	0.5	20/30	-	/
24	ARIEG AMO	0.8	20/40	-	06/06

TERMINE

QSL SVP=

envoye a

etat debut de trans fin de tran:

TRANSMET T975002
SAC CAHORS-46 f00565236080
LASER_PREVI SR1
SAC AGEN-47 f00553980760
SAC_MONTAUB-82 f00563034940
SAC_DIREN_MP f00561233363
SAC_AUCH-32 f00562056938

F 101327 101328
F 101511
F 101328
F 101449
F 101448
F 101456
F 101503

WGBD41 LFBD 131020

B.A.P. NO 46
BULLETIN D'ALERTE DE PRECIPITATIONS
ORIGINE: METEO-FRANCE SUD-OUEST
CENTRE INTERREGIONAL BORDEAUX-MERIGNAC

URGENCE: IMMEDIAT
DATE/HEURE REDACTION: 13/11/99 11H LEG
RISQUE: FORTES PRECIPITATIONS

DESTINATAIRES:
-SERVICES D'ANNONCE DE CRUES
-CENTRES METEO DEPARTEMENTAUX

PERIODE DE VALIDITE:
DU 13/11/1999 A 1100H LEGALES
AU 14/11/1999 A 1200H LEGALES.

TEXTE:
-- AVEC LA DEPRESSION ORAGEUSE DE
MEDITERRANEE, TRES FORTES PLUIES
S'ETENDANT A L'ARIEGE ET SE MAINTENANT
SUR L'EST DE MIDI-PYRENEES MALGRE UNE
LEGERE ATTENUATION EN DEUXIEME MOITIE
DE NUIT.
ATTENUATION UN PEU PLUS SENSIBLE EN
COURS DE JOURNEE DE DEMAIN MAIS AVEC
ENCORE QUELQUES PRECIPITATIONS.
-- PLUIES ENCORE MODEREES A ASSEZ
FORTES TEMPORAIREMENT AUJOURD'HUI
SAMEDI SUR LE RESTE DE LA REGION.
PLUIES DEVENANT FAIBLES DEMAIN,
CESSANT SUR POITOU-CHARENTES.

- DONNEES CHIFFREES PREVUES:

	13/11/99	J-1	PREVU J	MAX	DE/FI
04	VI, CR, GAR	13.7	15/30	-	06/09
06	CHAR MAR	11.0	15/30	-	09/18
07	CHARENTE	13.6	30/50	-	06/12
08	DR, IS, DO	9.7	20/40	-	06/18
09	DORD AMO	7.3	30/50	-	06/18
10	VEZER, COR	21.9	30/50	-	06/15
11	GARON INF	10.9	20/40	-	06/18
12	LOT AVAL	49.5	40/60	-	06/18
13	CELE	64.8	40/60	-	06/18
14	LOT AMO	0.0	50/80	-	06/06
15	GARON MOY	26.9	40/60	150	06/06
16	HAUT TARN	34.5	70/100	-	06/06
17	AGOUT	90.1	70/100	375	06/06
19	LANNEMEZ	11.1	20/40	-	/
21	GARONNE	17.1	30/50	200	/
22	PYREN OCC	10.2	15/30	-	09/06
23	GARON AMO	16.8	30/50	-	06/06
24	ARIEG AMO	16.4	30/45	-	06/06

TERMINE
QSL SVP=

ANNEXE E

**PROGRAMME FORTRAN POUR LA CRÉATION
DES PLUIES**

Programme de création pluies uniformes en FORTRAN

```

C   Last change: LA  20 Mar 102  11:08 am
      program pluieuniform
c-----
C creation des pluies uniformes sur BV Thore de deux intensites durees diff
c auteurs: Audette, L. et Llovel, C.
c-----
c-----
C   Declaration des variables
c-----
      implicit none
      INTEGER I,J,t,tpluie,
&      JP,IP,kcell,k,plu
      REAL tk,xnop,ynop,x,y,pluieU,pu,pu1,pu2,P,
&      P1,P2,lametot,voleaut,unipluie,pixtot,
&      dxp,xminp,yminp,airepluie,tpluie1,
&      tpluie2,t1,t2,tb,cumul,cum,moy,cumulverif
      CHARACTER nomp*6,NOMPLUIE*15,Fich*100, REP*80,CI(3)
      ALLOCATABLE plu(:,.),pluieU(:,.),cum(:)
c-----
C   Initialisation des parametres fixes
c-----
      ALLOCATE(plu(20,35),pluieU(20,35),cum(5000))
      airepluie=0.
      cumul=0
      cum(:)=0
      pluieU(:,.)=0
      IP=17
      JP=31
      dxp=1000.
      x=633000.
      y=1822000.
      xnop=603000.

```

Programme de création pluies uniformes en FORTRAN (suite)

```
ynop=1838000.
```

```
pu=0
```

```
pu1=0
```

```
pu2=0
```

```
c-----
```

```
C   Intrants: Intensite et duree de la pluie en deux composantes
```

```
c-----
```

```
write(*,*)'quelle intensite de 1ere pluie en mm par hre : '
```

```
read(*,*)P1
```

```
write(*,*)'quelle duree de 1ere pluie en hre : '
```

```
read(*,*)tpluie1
```

```
write(*,*)'quelle intensite de 2e pluie en mm par hre : '
```

```
read(*,*)P2
```

```
write(*,*)'quelle duree de 2e pluie en hre : '
```

```
read(*,*)tpluie2
```

```
c-----
```

```
C   Initialisation des parametres a fixer: permet d'identifier la matrice de pluie
```

```
c   par son Intensite et sa duree
```

```
c-----
```

```
nomp='22_24' !nom a ajuster selon valeur de pu...corriger nbre caract
```

```
t1=tpluie1*4
```

```
t2=tpluie2*4
```

```
tpluie=(t1+t2)
```

```
pu1= (P1*10.)/(4.) !pu valeur a ecrire sur un pixel en 0.1 mm
```

```
pu2= (P2*10.)/(4.)
```

```
print*,pu1, pu2
```

```
c*****
```

```
c creation des fichiers pluies (aux 15 min )
```

```
c*****
```

```
open(15,file='truc',status='scratch')
```

```
do t=1,tpluie
```

```
write (15,'(I3)') t
```

```
enddo
```

Programme de création pluies uniformes en FORTRAN (suite)

```

rewind(15)
  do t=1,t1

  if (t.EQ.1)then
    pixtot=JP*IP
    airepluie=pixtot*dxp*dxp
  END if

    read (15,'(3A1)')CI(1),CI(2),CI(3)
    do i=1,3
      if (CI(I).EQ.' ') CI(I)='0'
    enddo

    Fich=nomp/'_'//CI(1)//CI(2)//CI(3)//'.hdm'
    NOMPLUIE=TRIM(Fich)
    OPEN (17,FILE='pU22_24'/'/'//NOMPLUIE)
    PRINT*,t
    WRITE (*,'(2X,A)') NOMPLUIE
    WRITE(17,'(10F10.0,I5,I5)')xnop,ynop,
&      x,y,x,y,x,y,dxp,dxp,JP,IP
    do I=1,IP
      do J=1,JP
        pluieU(I,J)=pu1
      end do
    end do
    do I=1,IP
      WRITE(17,'(1001F10.3)')(pluieU(I,J),J=1,JP)
    END do
  END DO  !boucle t1
  CLOSE (17)
  tb=t1+1
  print*,tb

```

```

do t=tb,tpluie
read (15,'(3A1)')CI(1),CI(2),CI(3)

      do i=1,3
            if (CI(I).EQ.' ') CI(I)='0'
      enddo

Fich=nomp//'_ '//CI(1)//CI(2)//CI(3)//'.hdm'
NOMPLUIE=TRIM(Fich)
OPEN (18,FILE='pU22_24'/'/'//NOMPLUIE)
PRINT*,t
WRITE (*,'(2X,A)') NOMPLUIE
WRITE(18,'(10F10.0,I5,I5)')xnop,ynop,
      x,y,x,y,x,y,dxp,dxp,JP,IP
do I=1,IP
do J=1,JP
      pluieU(I,J)=pu2
end do
end do
do I=1,IP
WRITE(18,'(1001F10.3)')(pluieU(I,J),J=1,JP)
END do
end do ! boucle t2
LOSE(18)
t*, 'programme termine avec succes'

ALLOCATE(plu,pluieU,cum)

t program pluieuniform

```

$$\& \quad x,y,x,y,x,y,dxp,dxp,JP,IP$$

```
do I=1,IP
  do J=1,JP
    pluieU(I,J)=pu2
  end do
end do
do I=1,IP
  WRITE(18,'(1001F10.3)')(pluieU(I,J),J=1,JP)
END do
end do ! boucle t2
```

CLOSE(18)

```
print*, 'programme termine avec succes'
```

DEALLOCATE(plu,pluieU,cum)

```
end program pluieuniform
```

Programme de création de cellules orageuses en FORTRAN

C Last change: LA 16 May 102 11:59 am

program pluiloc

c-----

C creation des pluies localisees sur BV Thore

C auteurs: Audette, L et Llovel, C

c-----

c-----

C Declaration des variables

c-----

implicit none

INTEGER I,J,t,tpluie,tb,X1,Y1,

& JP,IP,kcell,k,plu

REAL tk,xnop,ynop,x,y,pluieL,pu,pu1,pu2,P,

& P1,P2,lametot,voleaut,unipluie,pixtot,

& dxp,xminp,yminp,airepluie,tpluie1,

& tpluie2,t1,t2,cumul,cum,moy,cumulverif

CHARACTER nomp*5,NOMPLUIE*19,Fich*100, REP*80,CI(3)

ALLOCATABLE plu(:,,:),pluieL(:,,:),cum(:)

c-----

C Initialisation des parametres fixes

c-----

ALLOCATE(plu(20,35),pluieL(20,35),cum(500))

airepluie=0.

cumul=0

cum(:)=0

pluieL(:,:)=0

IP=17

JP=31

Programme de création de cellules orageuses en FORTRAN (suite)

```

dxp=1000.
x=633000.
y=1822000.
xnop=603000.
ynop=1838000.
pu=0.
pu1=0.
pu2=0.
tb=0.

```

c-----

C Intrants: Intensite et duree de la pluie en deux composantes

c-----

```

write(*,*)'quelle intensite de 1ere pluie en mm par hre : '
read(*,*)P1
write(*,*)'quelle duree de 1ere pluie en hre : '
read(*,*)tpluie1
write(*,*)'quelle intensite de 2e pluie en mm par hre : '
read(*,*)P2
write(*,*)'quelle duree de 2e pluie en hre : '
read(*,*)tpluie2

```

c-----

C Initialisation des parametres a fixer: permet d'identifier la matrice de pluie

c par son Intensite et sa duree

c-----

```

nomp='35_03' !nom a ajuster selon valeur de pu... nbre caract 6
t1=tpluie1*4
t2=tpluie2*4
tpluie=(t1+t2)
pu1= (P1*10.)/(4.) !pu valeur a ecrire sur un pixel en 0.1 mm
pu2= (P2*10.)/(4.)
print*,pu1,pu2

```


Programme de création de cellules orageuses en FORTRAN (suite)

```

c*****c
pluie localisee pour 9km2: amont i est de 8 a 10 et j de 22 a 24, centre i 7 a 9
c et j de 13 a 15 et aval i et j sont de 5 a 7
c
c 36km2: amont pour j de 19 a 24, au centre pour j de 12 a 17
c ou a l aval pour 4 a 9 dans tous les cas i de 6 a 11 est le meme
c
c pour 64 km2: i de 5 a 12 dans tous les cas et j amont de 17 a 24, centre de 10 a 17
c et aval de 4 a 12
c
c pour 144 km2: i de 3 a 14 dans tous les cas et j centre de 8 a 19, amont de 10 a 21
c et aval de 4 a 12...15
c*****
      do I=6,11
          do J=12,17
              pluieL(I,J)=pu1
          end do
      end do
      do I=1,IP
          WRITE(17,'(1001F10.3)')(pluieL(I,J),J=1,JP)
      END do
      END DO ! boucle t1
      CLOSE(17)
c*****
c deuxieme pluie
c*****
      tb=t1+1
      print*,tb
      do t=tb,tpluie
          read (15,'(3A1)')CI(1),CI(2),CI(3)
      end do

```

```

do i=1,3
    if (CI(I).EQ.' ') CI(I)='0'
enddo
Fich=nomp/'_'//CI(1)//CI(2)//CI(3)//'.hdm'
NOMPLUIE=TRIM(Fich)
OPEN (18,FILE='pL_35_03_S36c'/'/'//NOMPLUIE)
PRINT*,t
WRITE (*,'(2X,A)') NOMPLUIE
WRITE(18,'(10F10.0,I5,I5)')xnop,ynop,
&      x,y,x,y,x,y,dxp,dxp,JP,IP
do I=6,11
    do J=12,17
        pluieL(I,J)=pu2
    end do
end do
do I=1,IP
    WRITE(18,'(1001F10.3)')(pluieL(I,J),J=1,JP)
END do
END do
CLOSE(18)
print*,'programme termine avec succes'
DEALLOCATE(plu,pluieL,cum)
end

```

ANNEXE F

HYDROGRAMMES

