

## JOURNÉES "BILAN" X<sup>ème</sup> PLAN, phase I (1989-1992)

### TITRE

Intérêt de la prévision de pluie pour la prévision de crue  
- Application aux affluents de la Loire supérieure -

### AUTEUR

Pierre VOIGNIER, Guy JACQUET :  
Société RHEA, 6 rue Léon Nautin 42000 Saint-Etienne.

### RESUME

Ce travail aborde l'intérêt de la prévision de pluie pour la prévision de crue-éclair sur des bassins versant ruraux à réponse hydrologique rapide (affluents de la Loire supérieure). Pour cela, nous présentons la méthode SCOUT de prévision de pluie conçue et utilisée pour l'hydrologie urbaine. Nous rappelons les facteurs d'influence sur la qualité d'une prévision de pluie par SCOUT, ainsi que les besoins en prévision d'annonce des crues du département de la Loire. De ce croisement, nous définissons une méthodologie pour appliquer SCOUT à ce contexte particulier. Une étude de cas fictive est présentée, elle permet d'évaluer la méthode de prévision de pluie opérante sur des pluies du Sud-Est de la France.

### 1) Introduction

Conscient de l'absence d'utilisation de la prévision de pluies pour la prévision des crues-éclair naturelles et de l'importance de ces crues sur la Loire supérieure et ses affluents (automne 80), ou sur d'autres cours d'eaux, le Conseil Général Rhône-Alpes, dans le cadre du plan Etat Région sur les risques naturels, a encouragé l'étude de l'application en milieu rural des techniques de prévision de pluies qui se sont montrées utiles dans la prévision de crues-éclair en milieu urbain. Avant d'aller plus en avant, nous rappelons le contexte et l'objectif de cette recherche.

*Contexte:* L'utilisation du système SCOUT de prévision de la pluie, est fondée sur les images radar de pluie. A l'heure actuelle, il n'existe pas de radar sur la Loire qui permette une approche directe de ce problème. Mais une autre étude - menée par la société RHEA, pour le Conseil Général de la Loire - a montré qu'il existe des sites potentiels de mise en place d'un radar hydrologique pour la surveillance du bassin versant situé à l'amont de Villerest, en dépit des contraintes topographiques existantes. Par ailleurs, le département de l'Ardèche peut être surveillé par le radar du réseau Aramis, situé à Manduel à proximité de Nîmes. De plus, Le Ministère de l'Environnement prépare et budgétise un plan de mise en place de radar s'insérant dans le réseau Aramis de METEOFRANCE à des fins hydrologiques (en 1994, par l'installation d'un tel radar en Haute Loire), et engage les actions de densification de ce réseau et de développement des moyens associés à l'utilisation des données radar.

*Objectifs:* **Ce projet de recherche ne vise donc pas l'application réelle à un ou plusieurs bassins versants, mais à mettre au point la méthodologie d'étude de l'intérêt de la prévision de pluie pour les besoins des crues torrentielles d'un bassin versant donné.**

Pour illustrer cette méthodologie, nous appliquerons des situations de pluie, observées sur le radar de Nîmes et ayant créé des crues sur d'autres bassins versants, à un bassin versant exemplaire sélectionné sur la Loire.

### 2) Rappel des Méthodes utilisées en hydrologie urbaine

**La nécessité d'une information de surface:**

Le pluviographe fournit une information sur la quantité d'eau tombée en un point. L'enregistrement de ces mesures avec un pas de temps assez faible permet d'accéder à une intensité pluvieuse. Cependant, connaître la structure spatiale de la pluie avec ce procédé supposerait une densité importante de pluviographes par unité de surface. Dans ce

contexte, les méthodes d'interpolation qui tentent de transformer un ensemble de mesures ponctuelles en un champ d'intensité pluvieuse sont trop approximatives.

Aussi s'est-on tourné vers la mesure radar de la pluie. L'information brute est non pas l'intensité, mais la réflectivité; les deux données sont cependant relativement équivalentes. Alors que le pluviographe fournit une mesure ponctuelle, le radar permet d'accéder à une donnée volumétrique. L'échelle spatiale à laquelle on résout le champ pluvieux fait du radar un outil fondamental en hydrologie; les chaînes de traitement placées en aval de la mesure radar permettent en effet une prévision de la pluie avec une résolution spatiale assez fine. Nous décrivons dans les paragraphes suivants la méthode SCOUT utilisée par RHEA.

#### **La méthode SCOUT:**

La méthode SCOUT de prévision de la pluie est fondée sur la **reconnaissance des formes**. La version "standard" de SCOUT est décomposée en quatre étapes distinctes. La première a pour fonction la définition sur l'image des échos, c'est à dire des ensembles de pixels connexes sur lesquels l'intensité pluvieuse est supérieure à un seuil. Ces sous-ensembles de l'image ont une réalité physique: ils correspondent à des cellules pluvieuses. Parmi ces échos, seuls ceux dont la taille est suffisante sont retenus en tant qu'entités; les autres sont agrégés dans un "écho des déchets". La seconde étape réalise le calcul des caractéristiques propres à chaque écho: taille (en pixels), masse (en intensité cumulée), centre de gravité, moments d'inertie, distribution des intensités, etc...A l'issue de ces deux étapes, les opérations de **structuration d'image** ont été exécutées.

Dans une troisième phase, l'image courante est comparée avec l'image précédente afin de coupler les échos lorsque la similarité des caractéristiques d'une image à l'autre est suffisante. Si le couplage est possible, on attribue à l'écho reconnu un vecteur déplacement individuel; à défaut de couplage, un écho non reconnu sur l'image précédente est affecté du vecteur déplacement moyen. On est alors en mesure d'achever le **traitement des informations de deux images successives** par la quatrième étape: la prévision. L'écho reconnu est translaté du vecteur déplacement qu'on lui a affecté et l'image prévue peut ainsi être construite.

#### **Fiabilité de la prévision et situation météorologique:**

La fiabilité de la prévision, autrement dit notre capacité à prévoir le champ pluvieux qui se développera à une certaine échéance, dépend de la physique qui gouverne le phénomène pluvieux.

##### *Structures de précipitations:*

Deux grands types de mouvements atmosphériques sont générateurs de précipitations. Le premier correspond à des mouvements de petite échelle (au maximum une dizaine de kilomètres), engendrés par des gradients thermiques verticaux. Il s'agit de cellules convectives. Le second est associé à des mouvements de grande échelle (quelques centaines à quelques milliers de kilomètres) et résulte de gradients thermiques horizontaux. Il s'agit alors de phénomènes pluvieux frontaux.

L'un et l'autre sont d'ailleurs en général imbriqués dans un événement donné.

##### *Paramètres influençant la fiabilité de la prévision:*

Les caractéristiques des structures pluvieuses sont susceptibles d'affecter la fiabilité de la prévision. Ainsi, la prévision en un point est d'autant plus sensible à des erreurs de détermination du déplacement que la taille de la structure est plus petite. La taille peut amplifier un effet de bord: lorsqu'un écho est situé sur le bord de l'image, l'erreur de prévision est plus fréquente pour des zones de pluie étendues. Des cellules pluvieuses intenses provoquent aussi une atténuation du signal radar reçu, ce qui peut entraîner une sous-estimation de l'intensité. Cette atténuation est plus ou moins importante en fonction de la longueur d'onde utilisée par le radar.

La durée de vie des cellules limite le délai de la prévision. A délai fixe, la présence de petites cellules peut perturber la prévision, puisqu'un lien étroit entre taille et durée de vie semble exister. Enfin, le mode de déplacement (minimum observable) et le mode de formation des cellules peuvent diminuer la qualité de la prévision.

##### *Caractéristiques de la situation météorologique et fiabilité:*

La thèse de T. Denoeux montre que la fiabilité de la prévision est corrélée à des "descripteurs" de la situation météorologique, en d'autres termes à des quantités décrivant le type d'instabilité météorologique observée.

La méthode SCOUT s'avère fiable lorsque l'événement pluvieux est associé à une situation thermodynamiquement stable. On observe dans ce cas plutôt des cellules de taille importante. Une intensité moyenne élevée dans les échos affecte négativement la qualité de la prévision.

La détermination de ces facteurs d'influence est d'une grande importance méthodologique. Ayant cerné les variables explicatives de la qualité d'une prévision, le gestionnaire doit alors choisir le critère qui reflète au mieux la fiabilité de sa prévision. Il en résulte un arbre de décision qui intègre cette détermination a priori de la fiabilité.

Des paramètres plus liés à la configuration géographiques de la zone sur laquelle on veut anticiper la lame d'eau interviennent. Ainsi le relief générateur d'écho fixe et de croissances ou décroissances locales des précipitations est une source d'erreur.

### **Critères de qualité de la prévision de la pluie**

Suite à ces travaux statistiques, le besoin s'est fait sentir de définir des critères objectifs permettant de juger en temps réel de la qualité de prévision.

Une étude réalisée pour le compte du service d'assainissement de la Seine Saint Denis a montré que le principal critère de qualité devait tenir compte des spécificités suivantes :

- De faibles écarts entre observation et prévision n'ont pas d'influence sur la gestion du système; seuls les écarts importants sont susceptibles d'avoir une influence; dans les applications classiques, la performance est au contraire proportionnelle à cet écart.
- Une sur-estimation et une sous-estimation de la lame d'eau n'ont pas le même effet pour la gestion.

T.Denoeux montre qu'un ensemble de prévisions qu'on veut classer par qualité n'est pas ordonné de la même façon suivant que l'on choisit l'une ou l'autre des définitions de la qualité de la prévision données ci-dessous. Il s'agit alors d'adapter le choix du critère à l'objectif de prévision.

On a été ainsi amené à définir le critère NMP (Nombre de Mauvaises Prévisions), calculé comme suit: NMP est défini a posteriori sur la zone d'évaluation de la prévision. Le NMP est l'indice de qualité privilégié pour une utilisation hydrologique, mais des critères complémentaires ont été également définis pour donner une idée plus globale de la qualité:

- dtMAX: La prévision de l'heure du début et de la fin d'une période pluvieuse est une notion importante pour la gestion hydraulique. On mesure l'écart entre prévision et observation pour le début de pluie et pour la fin de pluie, et on définit dtMAX comme étant le maximum de ces deux valeurs. Une bonne prévision a pour effet de minimiser dtMAX.

- DVM: C'est la variation entre deux séquences du vecteur vitesse de l'ensemble des échos présents sur l'image. Lorsque DVM est élevé, cela trahit une situation évolutive, et donc favorable à une mauvaise prévision. Il quantifie l'erreur de détermination du déplacement et correspond plus précisément à l'erreur relative sur la vitesse moyenne des zones de pluie (ou échos) pendant la durée de la prévision. Ce critère s'avère utile lorsqu'on accorde une importance particulière à l'exactitude de la prévision en un point précis.

- TR: Qui est le taux de reconnaissance des échos, ou en d'autres termes, la proportion d'échos qui ont été appariés entre deux séquences consécutives. Lorsqu'un écho n'est pas apparié avec un autre, deux cas de figures sont possibles:

\* L'écho n'a pas de correspondant sur l'autre image, ce qui veut dire qu'il a disparu ou au contraire qu'il est apparu.

\* L'écho a bien un correspondant, mais c'est l'algorithme qui n'a pas réussi à faire le lien. Dans les deux cas, ce non-appariement va entraîner une baisse de la qualité de la prévision.

-DHM: il est basé sur la comparaison de hyétogrammes prévus et mesurés. Il s'agit alors de comparer une lame d'eau prévue et une lame d'eau mesurée sur un bassin versant. Ce critère a l'avantage d'avoir une signification plus adaptée à l'hydrologie, il ne peut être calculé qu'a posteriori.

**FIAB: L'estimation a priori de la fiabilité de la prévision.** La qualité de la prévision des précipitations dépend de la situation. Il est donc extrêmement utile de disposer en temps réel d'un indicateur de la qualité de la prévision que l'on est en train d'effectuer. Pour définir cet indicateur, on a recours aux techniques d'Intelligence Artificielle: on constitue un échantillon de situations passées, appelé "base d'apprentissage", comprenant pour chaque événement un certain nombre de caractéristiques de l'image, ainsi que l'indice de performances de la prévision (basé sur NMP). On calcule objectivement un "arbre de décision", c'est-à-dire un ensemble de conditions imbriquées permettant de classer la prévision en "bonne" ou "mauvaise" selon la valeur de NMP.

L'intérêt de cette approche est sa grande souplesse, puisqu'elle permet un apprentissage automatique à mesure que la base de connaissance s'enrichit, ou une facile adaptation à des conditions climatologiques différentes. Elle est actuellement opérationnelle (Neumann 1992).

**Résultats des tests sur la qualité de la prévision:(Thèses de T. Einfalt et de P. Brémaud)**

En se basant sur ces différents reflétant les contingences pluie/non pluie sur l'ensemble des pixels de l'image, il s'avère que SCOUT est une des méthodes les plus efficaces dans les diverses situations météorologiques. Dans la thèse de P. Brémaud, une version améliorée par RHEA de SCOUT a été testée sur des images au format CALAMAR pour servir de référence à une méthode appelée PARAPLUIE, développée par P. Brémaud et fondée sur la reconnaissance de cellules de pluie grâce à la morphologie mathématique: les résultats sont comparables car les principales sources d'erreur sont identiques dans les deux méthodes.

Ainsi, SCOUT calcule pour différents horizons de prévision une lame d'eau prévue couplée à une probabilité d'occurrence (la fiabilité) et à un ensemble d'indice qualifiant la performance de cette prévision. A cette lame d'eau prévue, on peut associer un intervalle de lame d'eau qui contiendra avec cette probabilité, la lame d'eau qui précipitera effectivement. Cette méthode sera appliquée sur un cas fictif. Auparavant, nous nous intéresserons aux besoins spécifiques des services d'annonce des crues de la Loire.

### **3)Rappel des besoins des services d'annonce des crues de la Loire**

La compétence territoriale en matière d'annonce de crues de la DDE 42 ne s'applique qu'au fleuve LOIRE, du barrage de Grangent jusqu'aux communes du département de la Saône et Loire de Baugy en rive droite et de Bourg le Comte en rive gauche.

Une application à la région de la Loire nécessitait tout d'abord de connaître les besoins des différents utilisateurs régionaux. Ces besoins peuvent être regroupés en deux grands types de préoccupations:

- étudier et améliorer la connaissance des précipitations (formation, déplacement),
- améliorer les échéances de prévision de crues en intégrant dans les moyens de prévision actuels (modèles pluie-débits) la mesure de pluie par radar.

De manière plus précise:

- le service d'annonce des crues de la DDE 43 a besoin de connaître davantage la formation et l'évolution des pluies sur les hauts bassins de la Loire et de l'Allier, elle est également intéressée par des informations concernant les précipitations sur les bassins cévenols.

-le service d'annonce des crues de la DDE 42 après avoir évoqué les dégâts causés par des événements pluvieux exceptionnels sur la région: vallée du Gier, de l'Ondaine et le Furan estime tout à fait opportun la mise en place d'un réseau de surveillance sur les bassins septentrionaux du Pilat et sur ceux de la Coise et du Lignon pour améliorer les informations à transmettre aux autorités (sécurité civile, préfecture) pour le déclenchement des alertes.

Pour l'EPALA (Etablissement Public d'Aménagement de la Loire et de ses Affluents), l'observation concomitante et synthétique de la répartition spatiale de la pluie est indispensable sur les bassins versants situés à l'amont du barrage de Villerest.

Enfin, signalons que la Ville de Saint-Etienne estime qu'une mesure de pluie par radar permettrait "d'optimiser" la gestion des bassins d'orage qu'il est prévu d'implanter sur l'agglomération stéphanoise.

Pour ces deux principaux services d'annonce des crues concernés, si l'équipement en moyens de mesures complémentaires doit permettre d'améliorer l'annonce des crues, il n'existe actuellement aucune prévision en matière de pluie.

Comme nous allons le voir, l'argumentation économique montre que les investissements qui ont été entrepris en matière d'équipements et de surveillance (pluviographes, limnimètres, réseau) sont tout à fait justifiés. Les moyens actuels ne suffisent pas cependant, à satisfaire les besoins des différents acteurs et utilisateurs de l'annonce des crues, tels qu'ils ont été exprimés dans le but de réduire l'impact économique des crues des cours d'eau étudiés.

#### **Exemple de crue des affluents de la Loire**

Ce travail s'appuie essentiellement sur une partie du travail effectué par la société RHEA auprès du Conseil Général de la Loire. Par exemple, la crue de septembre 1980 avait été évalué à plus de 300 MF sur le département de la Haute Loire. Nous ne donnons ici qu'un aperçu très sommaire du travail effectué.

Entre le 13 et le 20 février 1990, le département de la Loire a connu des pluies importantes qui se sont abattues sur son territoire entraînant des crues de plusieurs affluents de la Loire (Lignon, Anzon, Aix) en particulier dans la région de Boën, de Noirétable, St. Georges en Couzan, St. Germain Laval, Feurs, Renaison. Des ouvrages, des bâtiments communaux, des chemins, des équipements sportifs ont subi des dégâts importants sur une trentaine de communes qui ont été déclarées en état de "catastrophes naturelles" pour les dégâts liés aux inondations et coulées de boues.

Une première estimation globale du coût de remise en état des infrastructures et des ouvrages de défense contre les crues de ces cours d'eau s'élève à environ 11 MF90 (environ 50% des dommages liés à ces deux rubriques pour la crue de la Loire de septembre 80) dont 6 MF90 pour la seule commune de Boën.

Les dommages liés aux dégâts industriels agricoles et ceux concernant les particuliers ne nous ont pas été communiqués. Cependant, les fonderies de Boën ont subi des dégâts qui ont été estimés à 7MF et des noyades de bétail dues à la vitesse des écoulements (7 m/s) se sont produites. En fait, les dépenses subventionnables sous-estiment les dommages réels car il existe un écart plus ou moins important entre le dommage financier et la somme versée (prise en compte d'une partie seulement des dommages, franchise,...) et tous les sinistrés n'ont pas forcément droit à l'indemnisation.

Cet exemple de crue est donc destiné à montrer aussi bien l'importance des crues sur le haut bassin de la Loire que sur ses affluents. Les crues sur des affluents de la Loire entraînent donc des dépenses de la collectivité (fond "catastrophes naturelles", subventions du Conseil Général) qui pourraient être réduites en améliorant la prévision des crues sur les bassins en relation avec ces zones à risques. L'impact économique de la protection des zones à risques d'inondation pourrait alors être estimé en considérant les critères suivants:

#### **\* critères d'ordre hydrologique:**

- proximité d'un cours d'eau ou d'un affluent
- cote NGF par rapport à celle d'un système d'évacuation d'eaux pluviales
- degré d'urbanisation (estimation relative du taux de surfaces imperméables)
- connaissance de crues antérieures:
  - fréquences de retour
  - hauteurs critiques et seuils de mise en alerte
  - débit de référence

(exemple: pour la crue de 80 montée de 5,15 mètres en 2 heures à Bas en basset et débit de 1500 m<sup>3</sup>/s à Pont de Lignon)

#### **\* critères d'ordre économique:**

- proximité d'une zone urbaine

- importance des agglomérations concernées (population,..)
- type d'activité (industrielle, agricole, touristique,...)

L'estimation de ces risques reste essentiellement qualitative. L'enjeu économique en terme de coût demande l'acquisition de données supplémentaires comme, par exemple, la productivité en terme d'emplois, le chiffre d'affaire des entreprises.

En effet, la détermination du nombre de logements touchés dans une zone à risque d'inondations nécessite la connaissance:

- du nombre d'habitants des zones concernées,
- de leur surface,
- de la densité et du type d'habitat ( immeuble, maison individuelle)
- de la fréquentation des habitations aux périodes critiques (résidences principales et secondaires)

Tout gain de temps sur la prévision de la crue ne pourra être que bénéfique, puisqu'il peut induire une réduction de l'importance des dégâts. Pour que ce gain de temps soit efficace, il ne doit pas se transformer en fausse alerte.

#### **4) Méthodologie d'étude de l'intérêt de SCOUT pour la prévision de crue**

##### **Définition d'une bonne alerte**

Complémentaire au rapport sur la faisabilité de systèmes Experts en gestion de secours en cas d'inondation catastrophique (ITMI & CEMAGREF;1986), nous nous intéressons aux gains de temps en prévision et à la manière de les réaliser de façon fiable, pour limiter au maximum les besoins de secours ou pour améliorer leurs temps de mise en place, leurs efficacités dans le cas où ils deviennent nécessaires, sans pour autant accroître le nombre de fausse alerte.

Compte tenu des principaux paramètres qui intéressent les personnes ayant à subir les crues, nous voyons qu'il existe un seuil haut (noté +) en terme de hauteur d'eau ou de débit pour lequel, si le débit observé au lieu considéré dépasse ce seuil, il y aura des inondations. Par rapport à ce seuil haut, il est possible de définir un seuil bas (noté -), qui définit le seuil de danger. Au dessous de ce seuil, les personnes ne ressentent aucun risque vis-à-vis de la crue, au dessus de ce seuil, les personnes perçoivent un danger, croissant au fur et à mesure que le niveau se rapproche du seuil haut.

Nous allons, pour une crue donnée, analyser sa position par rapport à ces deux seuils. Pour cela, nous allons définir les trois scénarios possibles de positionnement d'une crue par rapport au seuil haut (+) et au seuil bas (-) notés: cas H, cas I et cas B.

Nous globalisons le temps de transmission et de diffusion de l'information entre le service d'annonce des crues et les intéressés concernés par un nombre  $n$  d'heures. La notion de personnes est vue au sens large du terme (personnes morales ou physiques).

au cas H correspond une crue qui a dépassé le seuil haut: on se situe dans un cas où les services d'annonce des crues doivent avoir prévenu à temps les personnes concernées (pour que ceux-ci puissent dans le délais leur restant engager les actions nécessaires pour minimiser au maximum les dégâts matériels). Il faut comme nous venons de l'écrire, que les personnes soient prévenues à temps, c'est à dire que la prévision de crue soit effectuée suffisamment à l'avance pour que la confirmation de l'information, la mise en place de la cellule de crise départementale, la diffusion de l'information aux responsables locaux (par quartier) de l'annonce des crues et la mise en place des mesures de sauvegarde (arrêt organisé des outils de production) des biens et des personnes puissent s'organiser avant que la "catastrophe" n'arrive.

Définissons par  $n$ , le nombre d'heures nécessaires à la mise en place des mesures de protection. Il faut donc, sachant que le seuil haut est dépassé à  $t_A$ , que cet instant soit prévu à  $T_{pi}=t_A-n$  heures.  $T_{pi}$  définit alors l'instant au plus tard ou la prévision doit être bonne pour que l'alerte et la transmission/diffusion de l'information puissent s'établir correctement.

Si nous n'arrivons pas à prédire la crue à  $T_{pi}$ , cela ne sert à rien de mettre en place tout un système complexe, car celui-ci opérera toujours trop tard, lorsque "le mal" sera déjà accompli.

Il faut donc pour arriver à notre objectif que le nombre  $n$  d'heures de mise en place du système soit le plus petit possible - mise en place d'alerte directe (court-circuit dans le cheminement classique de l'information) chez les personnes ou groupes de personnes les plus menacées - , et que l'instant de prévision puisse être réalisé le plus tôt possible. La prévision de la pluie prend ici toute son importance, car elle peut permettre de gagner du temps sur l'ensemble du processus. Il faut toutefois que cette prévision de pluie soit fiable et suffisamment précise pour ne pas enclencher de fausse alerte.

au cas I correspond une crue qui a dépassé le seuil bas, sans avoir dépassé le seuil haut (nous abordons ici la notion de presque crue). Nous sommes dans le domaine frontière, où quelque soit le cas envisagé, il n'y aura pas sanction. Deux cas son en effet possible.

Dans le premier, les services d'annonce des crues ont prévenus les populations (à travers le protocole de transmission de l'information) de l'arrivée d'une crue, celles-ci s'y sont préparées. La presque-crue est effectivement arrivée, elle n'a produit que des dégâts matériels insignifiants. Compte tenu du fait que le seuil bas a été franchi, les personnes concernées ont quand même perçus le danger, et elles n'en voudront pas aux autorités de les avoir prévenu.

Dans le deuxième, les services d'annonce des crues n'ont pas prévenu les populations de l'arrivée d'une presque-crue, celles-ci ne s'y sont pas préparées. La presque-crue est effectivement arrivée, elle n'a produit que des dégâts matériels insignifiants. Compte tenu du fait que le seuil haut n'a pas été franchi, les personnes concernées estiment alors que les services d'annonces des crues n'avaient pas à les avertir. Il y avait un danger, mais pas de catastrophes en perspectives.

au cas B correspond une crue qui n'a pas atteint le seuil bas, il n'y a eu aucune inquiétude de la part des personnes concernées. Le service d'annonce des crues ne doit pas, dans ces conditions, les avertir; car il n'y avait rien de préoccupant dans la situation en cours. Si les services d'annonces des crues avaient averti les personnes concernées, cela correspondrait au cas néfaste d'une fausse alerte.

Il y a donc fausse alerte quand la crue n'a pas encore atteint le seuil bas, mais qu'il est prévu qu'elle dépasse le seuil haut (ce qui justifie de la part des services d'annonces des crues d'enclencher les procédures d'alertes) alors que le seuil bas ne sera jamais atteint au cours de l'événement.

### **Méthodologie**

Nous voyons qu'il y a donc deux blocs de données différentes pour aborder le problème: Le premier bloc concerne des caractéristiques spécifiques au bassin versant et au site pour lequel une protection contre les crues est nécessaire.

Elles correspondent aux paramètres hydrologiques du bassin versant, comme le temps de réponse  $D_r$  de celui-ci. A une variation de pluie donnée, correspondra une durée minimale pendant laquelle aucune variation significative de débit ne sera enregistrée. Elles sont associées à la définition des seuils bas et haut. L'intérêt de définir les deux seuils est de réduire le nombre de fausses alertes. Au niveau de l'affluent auquel nous nous intéressons, ces seuils sont souvent fournis en terme de cote NGF à ne pas dépasser. Ils peuvent également se traduire en terme de débit. Le positionnement des deux seuils (leur écart), va traduire la précision avec laquelle il est nécessaire de connaître la prévision de pluie compte tenu des imperfections de la transformation pluie-débit associée au bassin versant concerné. Si l'on suppose le modèle de transformation pluie débit parfait, l'écart entre les deux seuils sera uniquement associé à la précision de la lame d'eau. Cela permet alors de définir l'erreur maximale ( $E_0$ ) que l'on peut commettre sur la prévision de pluie. C'est l'hypothèse faite dans cette étude afin de mieux mettre en évidence la prévision de pluie. Pour une étude de cas précis, il faut tenir compte du bruit du modèle de transformation de la pluie en débit.

Le deuxième bloc concerne plus particulièrement la prévision de la crue. Il faudra donc vérifier si les horizons de prévisions sont compatibles avec les temps de réaction du système, compte tenu du temps de réponse du bassin versant.

Ce bloc est décrit par les variables :

-horizon de prévision de pluie ( $Dt_0$ )

**-Fiabilité de la prévision :  $FP=f(Dt0,E0)$** 

La fiabilité de la prévision traduit le pourcentage de chances d'être en dessous de l'erreur maximale de prévision (E0). C'est-à-dire, elle définit un intervalle de confiance qui nous permet d'affirmer qu'il y a X% de chance que l'erreur commise sur la lame d'eau prévue soit bien celle que nous avons estimée (E0). Si le X% est trop faible, la prévision que nous faisons n'a aucune signification, par contre si le X% est grand alors la probabilité est grande pour que la valeur prédite se situe dans la fourchette que nous avons estimée. Cet intervalle de confiance est associé principalement au type de la situation pluvieuse.

**Méthode de calcul de la prévision**

L'ensemble des considérations énumérées ci-dessus permet de déterminer par itérations successives le plus grand horizon de prévision ( $Dt0_{max}$ ), sa fiabilité associé et de prédire si il y a risque de crue ou non.

Pour cela nous connaissons la relation traduisant l'erreur commise sur la lame d'eau prévue en fonction de l'horizon de prévision, pour une fiabilité de prévision (FP) donnée, dépendant du type de situation pluvieuse. Cet indicateur peut se traduire par une relation du type :  $F(HP,E0,Dt0)(FP)=0$

Cette relation peut être décomposée de la manière suivante :

-Le système SCOUT est apte, pour un horizon de prévision  $Dt0$ , à calculer une lame d'eau prévue HP.

-la fiabilité de la prévision est fournie par l'équation (A) suivante :

$$(A) \quad \text{Prob} \left( (HP - E0^{sous} < HM < HP + E0^{sur}) / Dt0 \right) = FP\% \left[ \begin{array}{l} \text{caractéristique} \\ \text{de l'image} \end{array} \right]$$

Les lames d'eaux  $E0^{sous}$  et  $E0^{sur}$  qui permettent de définir un intervalle encadrant la hauteur d'eau (HM) mesurée, sont définis comme :

$$E0^{sous} = 0,5 \times HP; \quad E0^{sur} = 1,5 \times HP$$

Prob0 : défini la probabilité d'occurrence

Nous sommes donc capable à l'instant courant  $t0$  de prédire que la lame d'eau (HM) qui précipitera jusqu'au temps  $t0+Dt0$  se réalisera avec une probabilité valant FP%. Plus cette probabilité est forte, plus il y a de chance que la hauteur d'eau (HM) qui précipitera effectivement sur l'intervalle de temps  $[t0, t0+Dt0]$  sera comprise dans l'intervalle  $[HP - E0^{sous} ; HP + E0^{sur}]$ . Plus la valeur de la lame d'eau prévue est importante, plus l'intervalle contenant la hauteur d'eau mesurée (HM) est grand. Cette contrainte a tendance à réduire l'importance de l'horizon de prévision.

Pour un horizon de prévision  $Dt0$  donné, le système SCOUT peut estimer une lame d'eau prévue (HP), couplé à une fiabilité de FP%. Nous pouvons calculer à l'aide du modèle de transformation de la pluie en débit, les débits prévus  $Q_{psur}$  et  $Q_{psous}$  (à l'instant  $t1$ ) pour cet horizon, pour les lames d'eaux encadrant la valeur exacte (HM) et compte tenu du contexte antérieur à l'instant  $t0$ .

soit  $Q_{psur} = Q(HP + E0^{sur}, Dt0, \text{état du bassin versant à } t0)$

$$Q_{psous} = Q(HP - E0^{sous}, Dt0, \text{état du bassin versant à } t0)$$

Nous pouvons alors comparer ces valeurs aux valeurs des seuils haut ( $Q_{haut}$ ) et bas ( $Q_{bas}$ ) relatives au site.

Dans le cas où :  $Q_{psur} > Q_{haut}$  et  $Q_{psous} < Q_{bas}$ . (C1), nous ne pouvons émettre aucun avis, Il n'y a pas de choix possible. Nous nous trouvons dans la situation où l'erreur commise sur la lame d'eau est supérieure à l'erreur maximale admissible (E0). Nous avons alors ici une condition d'arrêt (C1) dans le calcul de l'horizon de prévision. L'horizon de prévision  $Dt0_{max}$  juste avant que n'arrive cette condition (C1) sera le plus grand horizon de prévision admissible. Il lui correspondra une fiabilité de prévision  $FP\%_{max}$ .

Ce cas indiscutable n'est donc jamais étudié et l'horizon de prévision est limité pour que seule trois cas de figures de positions des débits prévus par rapport aux deux seuils ( $Q_{haut}$  et  $Q_{bas}$ ) existent.

*premier cas* :  $Q_{psous} < Q_{bas}$  et  $Q_{psur} < Q_{haut}$  (cas B, I)

*deuxième cas* :  $Q_{psous} > Q_{bas}$  et  $Q_{psur} < Q_{haut}$  (Cas I)

*troisième cas* :  $Q_{psous} > Q_{bas}$  et  $Q_{psur} > Q_{haut}$  (Cas H)

Dans le premier et deuxième, il n'y a pas de risque de crue, puisqu'il n'y a pas prévision de dépassement du seuil haut. Dans le troisième cas, il y a risque de crue, puisqu'il y a prévision de dépassement du seuil haut.

Dés lors, il nous faut calculer avec plus de précision la fiabilité attendue de la prévision. Sans cela, il n'est possible que d'utiliser des prévisions de pluie extrême pour prédire le risque d'inondation (le dépassement de seuil).

### 5) Evaluation de la prévision sur des pluies du Sud-Est

Nous avons dans le chapitre précédant illustré comment nous abordons la notion de prévision des crues et pour laquelle nous avons défini une méthodologie permettant de définir la précision minimale requise sur la lame d'eau sous l'hypothèse de l'existence d'un modèle précis de transformation pluie-débit. Il nous faut quantifier les expressions utilisées:

- HM et HP à divers horizons Dto,
- le % FP de réussite de la prévision à l'intérieur d'un intervalle autour de HM.

#### Evénements sélectionnés

##### *La pluie du 30 septembre 1990 qui s'était abattue sur Privas*

Elle s'est abattue dans la région de Privas (Ardèche), avec sur Privas une hauteur d'eau précipitée de 267 mm en 8 heures. Cette pluie radar possède la dynamique des pluies "catastrophes" qui s'abattent sur le bassin de la Loire. En effet, au début de l'épisode pluvieux, nous avons des cellules orageuses alimentées par le Sud (événement cévenol), puis arrive une perturbation de l'Ouest (événement Atlantique) qui vient fusionner avec la première structure pour finalement emporter l'ensemble de la pluie vers l'Est. Notons que cette pluie a provoqué de nombreux dégâts dans la région de Privas.

##### *La pluie du 30 juillet 1991 qui s'était abattue sur Roquemaure et Villeneuve les Avignons*

C'est une pluie convective très intense, pour laquelle sur la région touchée, des secours n'ont pu être mis en place qu'après l'événement. Sur Roquemaure (Gard), il est tombé 165 mm d'eau, le niveau de l'eau est monté de 1 à 1,5 m en moins de 1h30, provoquant de graves inondations. Sur la Région d'Orange il y a eu 260 mm d'eau précipité en 4 heures. Au pluviographe de la Météorologie Nationale situé à Pujaut près de Villeneuve les Avignons dans le Vaucluse, en six heures il y a eu 195 mm d'eau.

#### Etude des pluies du 30/09/90 et du 31/07/91

Ces deux pluies (qualifiées de pluie brute) contiennent des zones d'échos de sol (monts du Ventoux, les massifs des Cévennes, le Lubéron, les Alpilles) qui nuisent à la qualité de la prévision. Nous avons donc généré des pluies (qualifiées de pluie modifiée), pour lesquelles, nous avons supprimé les échos de sol.

#### Calcul par le système SCOUT et estimation de la fiabilité

Nous donnons ici, des valeurs très synthétiques, elles représentent les moyennes et écart types sur la durée de l'épisode pluvieux des différents critères utilisés. Elles permettent de comprendre globalement comment c'est déroulée la simulation des épisodes pluvieux. Le bassin versant sélectionné est celui du Furan. Il a un temps de réponse et une surface active de faible importance. Il se trouve sur les flancs du Pilat. Il reflète tout à fait la réponse de bassin en zone montagnaise.

##### Pluie du 30 septembre 1990

critère	moyenne		ecart type	
	pluie brute	pluie modifiée	pluie brute	pluie modifiée
DIR (°)	65	54	40,7	16,4
VIT (m/s)	12	31	4,6	7,7
DVM (-)	9	6	5,3	4,5
TR (-)	60	70	15,3	14,8
FIAB (-)	41	55	17,8	11,5

horizon de prévision	15'	30'	45'	60'	90'	
NMP pluie brute	24	32	42	48	56	(valeurs moyennes)
DHM pluie brute	26	36	50	57	59	(valeurs moyennes)
NMP pluie modifiée	23	37	48	55	67	(valeurs moyennes)
DHM pluie modifiée	28	47	59	59	56	(valeurs moyennes)

$(DHM = \frac{HM-HP}{HM})$  ; HM : hauteur d'eau mesurée HP : hauteur d'eau prévue

Pluie du 31 juillet 1991

critère	moyenne		ecart type	
	pluie brute	pluie modifiée	pluie brute	pluie modifiée
DIR (°)	64	62	83,1	58,5
VIT (m/s)	14	32	6,5	13,5
DVM (-)	8	9	5,9	7,8
TR (-)	60	66	14,5	21,7
FIAB (-)	56	42	16,6	20,8

horizon de prévision	15'	30'	45'	60'	90'	
NMP pluie brute	26	33	39	44	51	(valeurs moyennes)
DHM pluie brute	20	32	42	67	95	(valeurs moyennes)
NMP pluie modifiée	28	34	39	45	54	(valeurs moyennes)
DHM pluie modifiée	28	38	50	67	96	(valeurs moyennes)

1er Constat:

Nous constatons que la suppression des échos de sol induit une augmentation non négligeable de la vitesse moyenne d'advection des cellules de pluies (on passe de 12-14 m/s à 31-32 m/s). Nous améliorons considérablement notre perception du déplacement des cellules pluvieuses. Cela se perçoit nettement à partir de la valeur de l'écart type du critère direction (DIR) du vecteur déplacement de la pluie. Il est beaucoup plus faible avec les pluies modifiées ce qui traduit une meilleure connaissance du mouvement des cellules. Conséquence: La prévision n'est possible qu'après élimination des échos de sol.

2ième constat

La fiabilité de la prévision calculée à priori (FIAB) n'a aucun rapport avec la fiabilité calculée à posteriori (100-NMP). Nous rappelons que pour apprécier le critère FIAB, on constitue un échantillon de situations passées, appelé "base d'apprentissage", avec lequel est calculé un "arbre de décision" qui permet de classer la prévision en "bonne" ou "mauvaise". Pour ces pluies, l'arbre utilisé est celui généré à partir de situations pluvieuses de la région parisienne. Il n'a donc aucun rapport avec le contexte des pluies du sud-est comme nous pouvons le constater. Conséquence: l'arbre de fiabilité ne peut donc être construit qu'avec les événements de pluie du Sud-Est.

3ième constat (paradoxal)

L'erreur sur la prévision est plus grande avec les images modifiées qu'avec les images brutes. Pour les différents horizons de prévision retenue, compte tenu de l'augmentation de la vitesse d'advection des échos, il ressort pour les critères DHM,  $(DHM = \frac{HM-HP}{HM})$  et NMP de moins bonnes valeurs avec les pluies modifiées. Cela met en évidence les erreurs concernant les hypothèses de base de la méthode. Nous rappelons que l'hypothèse principale est l'extrapolation linéaire du mouvement des cellules de pluie. Tout changement dans les caractéristiques des cellules (variation de la vitesse, phénomène de croissance ou décroissance de ces dernières) vont entraîner une baisse de la qualité de la prévision. Comme les pluies utilisées sont fortement convectives, le phénomène de croissance/décroissance des cellules est marqué, nous nous trouvons dès lors en limite

**d'applicabilité de la méthode de prévision. Avec les images brutes, la présence des échos de sol induit une diminution de la vitesse de déplacement des cellules pluvieuses. De ce fait les deux erreurs se compensent en partie. Il apparaît donc que la prévision effectuée avec les images brutes semble meilleur comme nous pouvons le constater dans le tableau ci-dessus. En fait les images modifiées apportent une bien meilleur information sur le fonctionnement du modèle de prévision. Le phénomène de croissance/décroissance des cellules induit 80% des erreurs de prévision, nous retrouvons ici ce résultat avec les images modifiées**

#### 4ième constat

**Le nombre de mauvaise prévisions (NMP) sur une zone assez vaste est faible (moins de 30%) à l'horizon de 15 minutes, mais il a tendance à décrocher assez rapidement pour atteindre 50% à partir de 60 minutes. Aussi, nous voyons bien l'une des limites de la méthode SCOUT. l'utilisation du NMP est importante, car elle permet d'éviter de généraliser le phénomène d'erreur sur DHM.**

#### **6)Conclusions et perspectives**

**Les résultats de cette étude nous incite à penser que l'utilisation des images radar de pluie, en plus de nous apporter des informations quantitatives sur le phénomène pluvieux étudié, nous renseigne sur tout un ensemble d'indications qualitative (forme de la pluie, répartition spatiale, déplacement,...). Ces renseignements permettent d'asseoir la décision beaucoup plus rapidement.**

**Compte tenu des projets de recherche menés par l'IMG, tant au niveau de la modélisation hydrologique de bassin versant en zone de montagne (modèle pluie-débit) (C. OBLED), qu'au niveau de l'étude de la qualité des images radar en zone de montagne et de leurs traitements spécifiques (D. CREUTIN), ce projet complémentaire se situe en aval en examinant les besoins en précision sur la lame d'eau et les gains que peut apporter une prévision de pluie pour une annonce des crues efficiente. Les deux principales hypothèses que nous avons adoptée et qui sous-tendent les deux projets ci-dessus décrits, sont les suivantes :**

**-Il existe un modèle mathématique représentant de façon satisfaisante le comportement du bassin versant.**

**-Les données issues du radar hydrologique sont correctes, c'est-à-dire qu'elles ont subi un traitement spécifique pour que chaque pixel représente effectivement l'intensité de la pluie.**

**Avec ces hypothèses, nous avons simulé l'effet d'une pluie sur un bassin versant ayant un temps de réponse court, représentatif des petits bassins versants des affluents de la Loire. Il s'est avéré que la méthode de prévision automatique élaborée n'entraîne aucune fausse alerte, mais ne permet pas d'accroître le délai de déclenchement de l'alerte.**

**Cette insuffisance est due à la principale hypothèse utilisée dans SCOUT. Elle consiste à extrapoler linéairement le déplacement des cellules pluvieuses, leur création au voisinage du site à risques est donc indétectable; En revanche, la méthode SCOUT de prévision permet de percevoir clairement l'instant où le danger est passé (la décrue).**

**La recherche entreprise a permis de mettre au point une maquette de démonstration, pour comprendre les limites de la prévision de pluie appliquée au déclenchement de l'alerte sur des bassins versants à temps de réponse rapide pour des pluies de type cévenol.**

**Elle permet d'orienter vers de nouvelles voies la méthode de prévision de pluie mise au point en région parisienne pour l'adapter aux situations de pluie observées dans le Sud-Est:**

- détermination des zones de création d'orages à répétition,**
- déclenchement d'alerte sur les sites situés à proximité de ces zones,**
- accroissement de l'horizon de prévision compte tenu de la stabilité des situations observées.**

**Elle permet aussi d'orienter le mode de déclenchement d'alerte vers l'utilisation de prévisions récurrentes.**

**Il est certain que cette recherche devrait donc être poursuivie par:**

- l'amélioration de la méthode de prévision adaptée aux situations rencontrées dans le Sud-Est. (Un financement européen a récemment été demandé dans ce sens).
- L'étude, sur un grand nombre de cas incluant des situations sans risque (B) ou indifférentes (I) en sus des situations à risque (H) de cette nouvelle méthode de prévision; cette étude statistique permettra d'évaluer le nombre de fausses alertes et l'accroissement du délai de déclenchement de l'alerte de cette nouvelle méthode.
- La détermination de la fiabilité à priori de cette nouvelle méthode dans le cas des situations pluvieuses du Sud-Est, forts différentes de celles utilisées en région parisienne.

## 7) Bibliographie

- ANDRIEU H. (1986) Interprétation de mesures du radar Rodin de Trappes pour la connaissance en temps réel des précipitations en Seine St.Denis et val de Marne, Thèse de Dr. Ingénieur ENPC.
- Conseil Générale de la Loire DARAT (Mars 1991) Etude des gains apportés par l'implantation d'un radar hydrologique dans la région stéphanoise (Mars 1991 RHEA).
- DACHARRY M. (1974) Hydrologie de la Loire en amont de Gien Nouv. ed. latines tomes 1 et 2.
- DDE 42 (1991) (Service hydraulique - annonce des crues) Amélioration de la prévision de crue à l'aide d'une mesure de pluie par radar hydrologique (RHEA).
- DDE 42 (1988) Services d'Annonces des crues. Règlement particulier du service d'annonce des crues du bassin supérieur de la Loire.
- DDE 42 (1983) Arrondissement Saint-Etienne. Lutte contre les inondations en Plaine du Forez.
- DENOEUX T. (1989) "Fiabilité de la prévision de pluie par radar en hydrologie urbaine", Thèse de doctorat de l'ENPC, CERGRENNE, Noisy-le-Grand, 246p.
- EINFALT T. (1988) "Recherche d'une méthode optimale de prévision de pluie par radar en hydrologie urbaine", Thèse de doctorat de l'ENPC, CERGRENNE, Noisy-le-Grand, 189p.
- ITMI & CEMAGREF (décembre 1986) Faisabilité de systèmes Experts en gestion de secours en cas d'inondation catastrophique.
- NEUMANN A. (1989) Marché n°89-04-037 CERGRENNE-DEA Département Seine Saint Denis - "Analyse à postériori des résultats de la prévision automatique" - respectivement tâches 1, 2 et 3.
- NEUMANN A. (1991) Introduction d'outils de l'intelligence artificielle dans la prévision de pluie par radar. Thèse de 3ème cycle de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- NEUMANN A. (1992) Construction d'un arbre de fiabilité des prévisions effectuées avec Scout à partir des images de 1991. Rapport d'étude effectué pour le compte de la D.E.A. de Seine Saint-Denis.
- RHEA Evénement du 30 juillet 1991, pluie au format CALAMAR sur ROQUEMAURE.
- RHEA Evénement du 30 septembre 1990, pluie au format CALAMAR sur PRIVAS.
- STARON G. (1981) Hydrologie : la crue des 21 et 22 septembre 1980 sur le bassin de la Loire supérieure, Revue de Géographie de Lyon.
- VOIGNIER P. (1990) Influence de la structure spatiale des pluies et du bassin versant sur les écoulements en réseau. Approche à l'aide du logiciel EAUSER. Application à Saint-Etienne. Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, Ecole des Mines de Saint-Etienne.