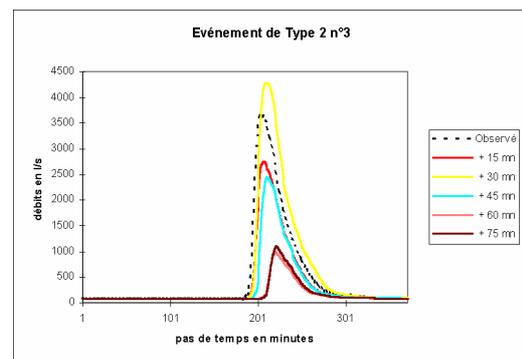
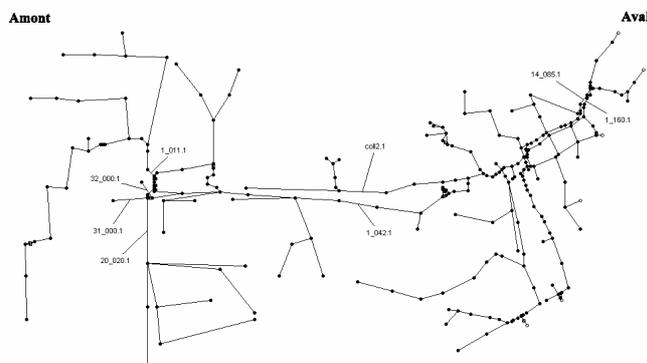
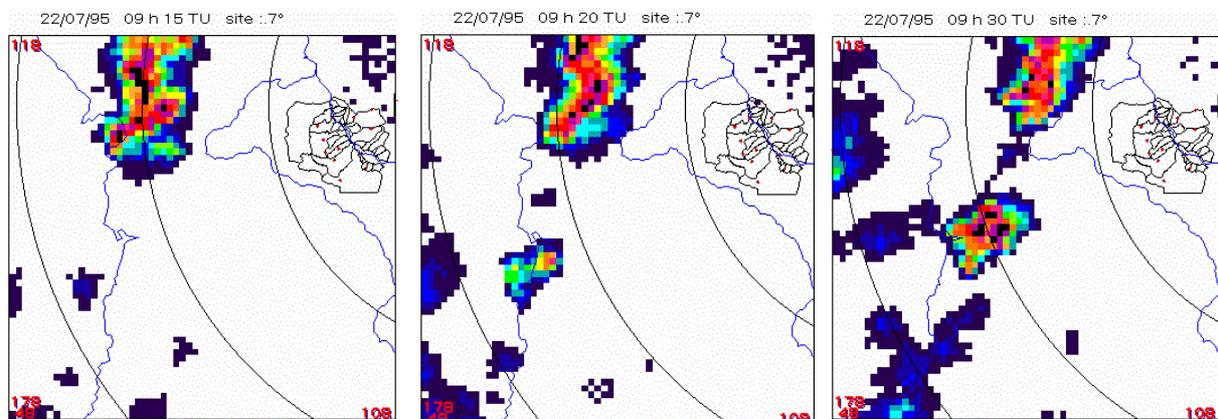


PREVISION DE L'EVOLUTION DES PRECIPITATIONS POUR L'OPTIMISATION DE LA GESTION D'UN RESEAU D'ASSAINISSEMENT URBAIN.

DOCUMENT DE SYNTHESE

(présenté lors de l'atelier
Toulouse - Météopole des 15-16 mars 2001)

D. Faure, R. Mathurin



1. Introduction :

Le travail qui a été réalisé avait un objectif très précis : étudier les limites de la prévision de l'évolution des précipitations pour les besoins de gestionnaires de réseaux d'assainissements. Cette prévision ne devait pas se limiter aux seules lames d'eaux quantitatives, mais prendre en compte également des informations plus qualitatives décrivant l'évolution de la situation pluvieuse. Une telle information peut en effet présenter un grand intérêt au quotidien, aussi bien pour sélectionner une option de gestion d'un ouvrage d'assainissement, que pour répondre directement à des besoins d'information synthétique sur la situation pluvieuse. On peut citer en exemple plusieurs utilisations opérationnelles de ce type d'information réalisées par la Communauté Urbaine du Grand Nancy : prévision pluie/non pluie pour la sécurité des chantiers et des équipes techniques intervenant dans les réseaux (depuis 1996); identification de situations types et génération automatique d'alarmes pour la mise en « *alerte d'orage* » de différents services (depuis 1997), ou pour l'optimisation de la gestion d'un bassin de rétention selon différents niveaux successifs d'alerte de "risque hydrologique" (depuis février 2000); prévision de la date de début de pluie, confirmation de fin de pluie pour optimiser le rapport coût/efficacité de la production de réactifs chimiques dans un bassin de traitement en ligne des effluents de temps de pluie (bassin en construction actuellement).

Les résultats présentés sont à interpréter dans le cadre de cet objectif initial. Avant de passer à l'étude proprement dite, nous rappelons donc très rapidement les principaux besoins des gestionnaires de réseaux d'assainissement et les difficultés liées à l'échelle d'utilisation des images radar en milieu urbain.

1.1. Les besoins des gestionnaires de réseaux d'assainissement :

Ces besoins sont très variés et l'utilisation de l'information radar présente un fort potentiel de développement. Il est donc délicat d'analyser les besoins en prévision radar à la lumière des réalisations passées, d'autant plus que ces besoins peuvent requérir des niveaux de précision très différents allant de l'estimation quantitative de pluie sur quelques dizaines d'hectares au pas de temps de la minute, à une simple information purement qualitative sur l'évolution des précipitations.

Si l'on fait un bilan des projets d'utilisation urbaine des prévisions de pluie par radar développés ces dernières années, les deux secteurs les plus riches en propositions ou en réalisations ont concerné la protection contre les inondations, et l'optimisation de la gestion des réseaux d'assainissement unitaires afin de réduire les déversements de pollution par temps de pluie dans le milieu naturel. Le second thème s'est fortement développé suite à la directive européenne 91/271 sur les rejets résiduaire et à ses traductions en droit Français, et ces deux préoccupations se rejoignent de plus en plus dans une démarche de conception et de gestion des ouvrages et des réseaux intégrant les deux objectifs. Cette nouvelle stratégie nécessite un contrôle affiné pour concilier en sécurité des contraintes souvent antagonistes, et la plupart des projets reposent fortement sur une anticipation de l'évolution des précipitations selon des approches plus ou moins déterministes ou probabilistes.

Les projets d'orientation déterministe forte prévoient d'exploiter des estimations et des prévisions quantitatives de lames d'eau au sol pour alimenter des outils temps réel de modélisation hydrologique et d'optimisation de gestion assez complexes, visant une gestion dynamique des systèmes d'assainissement. Les utilisations en situation réellement opérationnelle de ces systèmes restent encore très limitées en raison de l'important travail de calage que nécessitent ces outils, de la fiabilité des

résultats, et des précautions d'utilisation qui apparaissent parfois peu adaptées aux conditions de stress et aux délais de décision que l'on peut rencontrer en situation d'urgence.

Les systèmes opérationnels de contrôle technique centralisé se sont donc pour l'instant plus orientés vers une gestion par scénarios pré-définis, qui se révèle assez adaptée au nombre souvent restreint d'alternatives dont disposent réellement les gestionnaires de réseaux pour un événement pluvieux donné. Le passage d'un scénario à un autre s'effectue pour chaque événement pluvieux en fonction de seuils pré-définis sur différentes variables quantitatives voire qualitatives. Ces démarches, fortement influencées par les pratiques de modélisations hydrologiques, comportent le plus souvent une phase d'estimation et/ou de prévision de lames d'eau au sol. On peut citer néanmoins un exemple de solution alternative : la gestion du bassin de rétention Gentilly à Nancy, qui repose sur une analyse de la structure des zones pluvieuses détectées par radar sans estimation d'intensités pluvieuses en mm/h ni de lames d'eau au sol [décrit dans 1].

1.2. La spécificité de la prévision à l'échelle urbaine :

Il convient d'insister sur deux particularités du milieu urbain qui influent fortement sur les besoins en prévision :

- La surface très réduite des bassins versants sur lesquels on souhaite anticiper l'évolution des précipitations : leur taille est en effet souvent de l'ordre de quelques km², inférieure à la taille des très petites cellules pluvieuses intenses. Il est donc nécessaire de décrire le devenir de chaque petite zone pluvieuse individuellement, et non leur comportement moyen sur une surface étendue. On peut parler de prévisions quasi-punctuelles compte tenu de la taille d'un pixel d'image radar.
- La vitesse de réaction de ces bassins versants urbains qui peut être très grande, et ne pas dépasser quelques minutes. En conséquence, le délai entre l'arrivée de la pluie au sol et l'augmentation des débits est souvent insuffisant pour la mise en sécurité d'un réseau d'assainissement. La prise de décision du gestionnaire de ce réseau doit donc être très rapide, et accorder un poids très important à l'anticipation de l'évolution des précipitations, souvent avant même que la pluie ne débute sur l'agglomération donc sans mesures au sol locales.

Il nous paraît intéressant d'illustrer ces spécificités à travers un exemple que nous connaissons bien et qui a servi de support à cette étude. La figure 1 représente le bassin versant de Boudonville à Nancy, qui regroupe au total 36 000 habitants sur une surface de 660 ha très urbanisée. Il comprend trois zones distinctes : un plateau amont, une plaine aval, séparés par une zone de forte pente avec une dénivellée totale de 160 m.

Le bassin de rétention de Gentilly, alimenté par la partie amont de ce bassin versant, joue un rôle majeur pour protéger des inondations la partie aval du bassin versant de Boudonville. La figure 2 illustre la vitesse de réaction du réseau d'assainissement lors d'un événement pluvieux le 22 juillet 1995 : le bassin a commencé à s'emplier seulement 10 minutes après le début de la pluie, et ses 12 000 m³ ont été comblés en seulement 45 minutes. Pour retrouver une capacité de stockage maximale, la vidange du bassin au débit maximum admissible par le réseau d'assainissement en aval a nécessité deux heures et demie. Ce jour là, trois épisodes pluvieux se sont succédés en moins de 10 heures, le troisième étant estimé décennal sur deux heures.

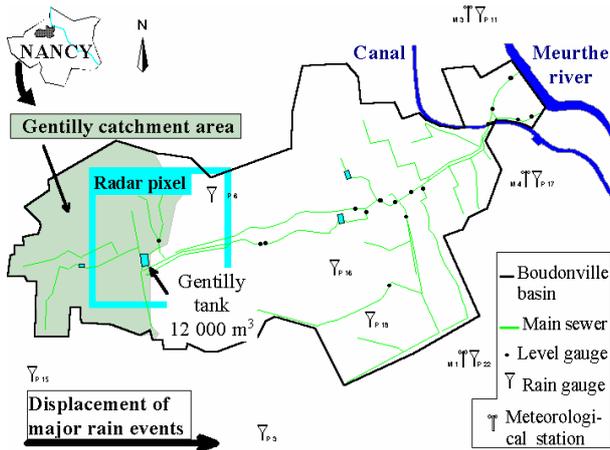


Figure 1 : Bassin versant Boudonville (6.6 km²) et surface drainée par Gentilly (150 ha). Un pixel radar (carré de 1km²) est localisé.

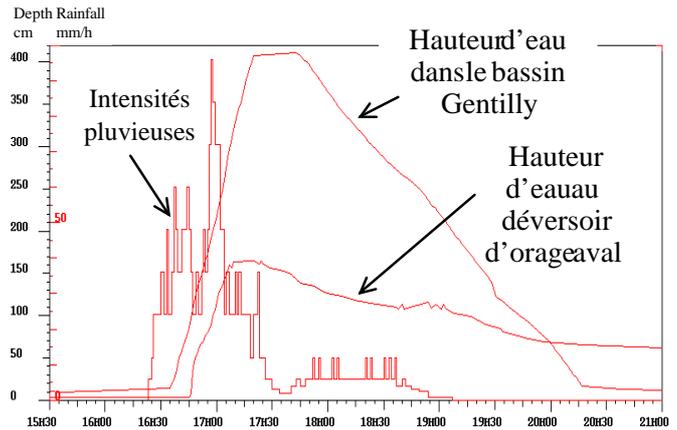


Figure 2 : L'événement pluvieux du 22/07/95. (35 mm de pluie en une heure, 20 mm entre début de pluie et déversement à l'exutoire)

2. Description de l'étude :

2.1. Les images et les logiciels utilisés dans cette étude :

Les images utilisées proviennent d'un radar opérationnel du réseau ARAMIS de Météo-France. Ce radar de 5cm de longueur d'onde est implanté à 27 km à l'est de Nancy, et fournit une image toutes les 5 minutes, en mode PPI à un seul site rasant. Les images utilisées dans cette étude sont réduites à une surface de 256 × 256 pixels de 1 km² chacun.

L'étude a été réalisée à l'aide de deux logiciels de prévision de pluie qui diffèrent aussi bien par les techniques mises en œuvre que par leurs niveaux de développement.

Le premier est un logiciel opérationnel développé pour la Communauté Urbaine du Grand Nancy : le logiciel P@R@D. Utilisé depuis 1995 il a été perfectionné en bénéficiant du retour d'expérience direct lié à son exploitation par les services techniques de la Communauté Urbaine. L'identification des déplacements des zones pluvieuses est réalisée par corrélation croisée entre des fenêtres de tailles réduites définies sur deux images successives. La partie prévision, qui a subi de nombreux perfectionnements, repose sur une estimation d'images futures minutes par minutes dont sont déduites les lames d'eau au sol.

Le second est un logiciel expérimental peu testé, développé spécifiquement pour cette étude à partir de travaux réalisés précédemment au LCPC dans le cadre d'un travail de thèse [2]. La détermination des déplacements de zones pluvieuses est réalisée par identification et appariement de cellules pluvieuses sur deux images successives, et a été bien étudiée. La partie prévision proprement dite repose sur une estimation d'images futures et a bénéficié de peu de perfectionnements.

Les résultats de ces deux logiciels ne doivent pas être comparés pour en tirer des conclusions sur la "meilleure méthode". L'intérêt principal de la comparaison réside dans la cohérence des observations réalisées à partir des deux logiciels, et par le recul que cette comparaison permet vis à vis des résultats numériques obtenus pour les différents critères de validation.

2.2. Le protocole d'étude :

Les prévisions de pluie ont été produites séparément par les deux partenaires de l'étude à l'aide du logiciel à leur disposition. Ces prévisions ont ensuite été validées à NANCIE en utilisant la même chaîne de logiciels.

Cette validation repose sur une comparaison des prévisions radar et des "observations" radar de lames d'eau, sans tenir compte des mesures au sol. Ce choix résulte de la volonté d'étudier les limites de la seule prévision en tentant de s'affranchir (au moins en partie) des limites liées aux difficultés d'estimation quantitative de pluie par radar. Hormis les échos de sol, les sources d'erreur classiques de la mesure de pluie par radar n'ont pas été traitées sur les images utilisées, et on verra que certaines peuvent avoir une influence non négligeable sur les prévisions quantitatives. Le choix de ne pas les traiter résulte de la volonté d'obtenir des résultats qui ne dépendent pas de la performance des traitements effectués.

Les prévisions ont été réalisées pour des surfaces de bassins versants variant de 1,5 à 180 km² (i.e. : 1.5 km², 3 km², 6.6 km², 12 km², 34 km², 64 km², 128 km², 180 km²). Ces surfaces ont toutes été localisées géographiquement sur le territoire de l'agglomération de Nancy, et correspondent à des bassins versants naturels pour les plus petites, à des surfaces géométriques pour les plus grandes (figures 3).

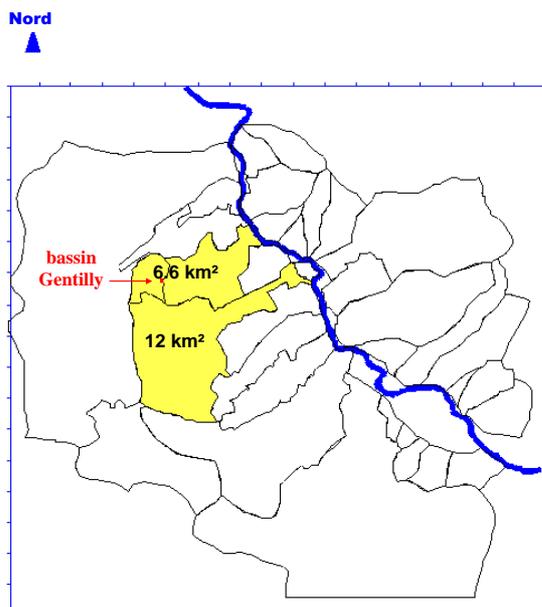


Figure 3 a : Les bassins versants naturels de la C.U. du Grand Nancy. Sont indiqués les bassins St Anne (12 km²) et Boudonville, ainsi que l'aire drainée par le bassin de rétention Gentilly.

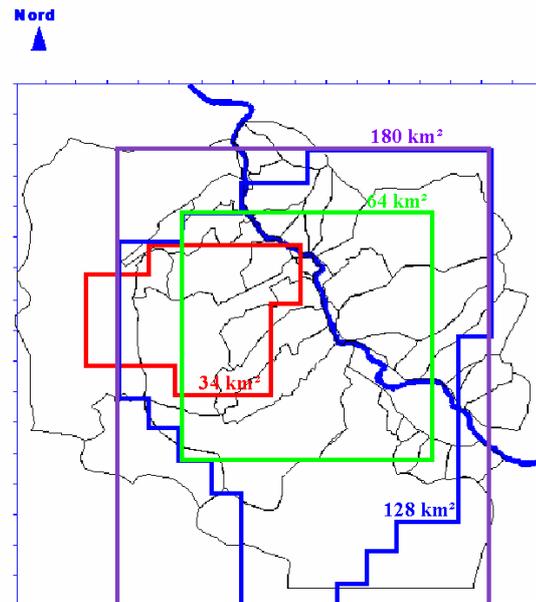


Figure 3 b : Les surfaces géométriques imbriquées utilisées dans cette étude.

Les prévisions de pluie sur ces bassins versants ont été validées en distinguant systématiquement deux types d'événements pluvieux :

- Treize événements dits "de type 1", à faibles intensités et assez homogènes dans le temps et dans l'espace, observés pendant des périodes s'étendant de mi novembre à fin avril.
- Douze événements dits "de type 2", à grande variabilité spatio-temporelle et comprenant des cellules pluvieuses intenses, enregistrés durant des périodes s'étendant de mi mai ou mi juin à mi septembre. Ces cellules intenses peuvent être de petites structures isolées (6 séquences), mais peuvent également être regroupées au sein de structures étendues de plusieurs dizaines de km d'extension dans leur grande longueur, et dont la cohésion peut persister pendant plusieurs heures (6 séquences).

Ces 25 événements pluvieux représentent au total 1348 images radar sur trois années de mesures (1995 à 1998). La sélection de ces 25 séquences d'images a été réalisée en respectant l'ensemble des critères suivants :

- Les images constituant chaque séquence sont considérées comme typiques du type d'événement pluvieux.
- Des pluies significatives ont été observées sur les bassins versants sélectionnés pour chacune de ces séquences.
- Les séquences sont continues : une image toutes les 5 minutes; pas d'image manquante.
- Les séquences débutent près de deux heures avant le début de la pluie effectivement observée au sol sur les bassins versants sélectionnés.
- Pour le type 2, les séquences se terminent après la fin de la pluie sur les bassins sélectionnés, si possible au moins une heure après cette fin. Cette condition n'a pas pu être respectée pour les pluies de type 1, souvent beaucoup plus longues.

Les critères de validations ont porté aussi bien sur des variables de type qualitatif (occurrence de pluie, date de début et de maximum de précipitations) que sur des variables quantitatives (intensité max. sur 5 mn, lame d'eau totale sur l'événement, cumuls prévus à échéances variables, dépassement de seuil d'intensité, valeurs prévues sur 5 mn pour une échéance donnée (hyétogramme)). Dans les pages qui suivent, nous présentons les principaux résultats obtenus.

3. Les résultats de validation :

3.1. Les critères de validation cités dans ce document :

On donne ci dessous la définition succincte des principaux critères de validation cités dans ce document entre lames d'eaux observées et prévues. Chaque critère est calculé pour un bassin, un type d'événement pluvieux, et une échéance donnés (se reporter au rapport complet de l'étude pour plus de détail).

Prévision pluie/non pluie :

ROPLUIE = Corrélation entre les occurrences de pluie observées et prévues

Prévision de cumuls à échéances variables (cumuls de t_0 à $t+n$ mn) :

RAPCUM = Rapport moyen (biais) entre séries observées et prévues de cumuls à échéances

ROCUM = Corrélation entre séries observées et prévues de cumuls à échéances

Prévision des valeurs de la lame d'eau maximale sur 5 mn par événement pluvieux :

RAPMAX = Rapport moyen (biais) entre valeurs observées et prévues des intensités maximales sur 5 mn

ECMAX = Ecart moyen absolu (en valeur absolue) entre valeurs observées et prévues des intensités max. sur 5 mn

Prévision de dépassement de seuil d'intensité (des lames d'eau) sur 5 mn : (avec coefficient d'abattement spatial)

ESEUIL = Ecart absolu moyen entre dates observées et prévues de dépassement de seuil d'intensité sur 5 mn

ROSEUIL = Corrélation entre les occurrences observées et prévues de dépassement de seuil d'intensité sur 5 mn

Prévision de hyétogrammes ou de valeurs sur 5 mn :

RAPMOY = Rapport moyen (biais) entre séries observées et prévues de valeurs sur 5 mn

ROMOY = Corrélation entre séries de lames d'eau observées et prévues sur 5 mn (pour une échéance donnée)

3.2. La limite absolue de prévision dans le cas de cette étude :

Les précipitations se déplaçant, la distance à laquelle on doit observer les zones pluvieuses augmente généralement avec l'échéance de prévision. Dans le cas du radar de Nancy dont le site est rasant, on estime à 150 km la limite ultime de détection des pluies de type 1, alors que pour les pluies de type 2 on note que des cellules intenses à fort développement vertical peuvent fréquemment être détectées à plus de 200 km du radar.

En pratique, Nancy étant situé à 30 km à l'ouest du radar et les précipitations provenant le plus souvent du secteur ouest-sud-ouest, la taille des images utilisées dans cette étude ne permet d'exploiter pour la prévision qu'une profondeur d'image variant en moyenne de 90 à 115 km. Pour les 12 événements de type 2 utilisés dans cette étude, les vitesses de déplacements étant de l'ordre de 60 à 70 km/h, cela n'autorise que des échéances de prévision de l'ordre de 80 mn à 115 mn. Pour les 13 événements de type 1, les directions et sens de déplacements sont un peu plus variables de même que les vitesses, mais les résultats indiquent que le nombre d'événements exploitables commence à diminuer à partir d'échéances de prévision de 60 à 65 mn, et est inférieur à 50% des événements au delà de 80 à 85 mn.

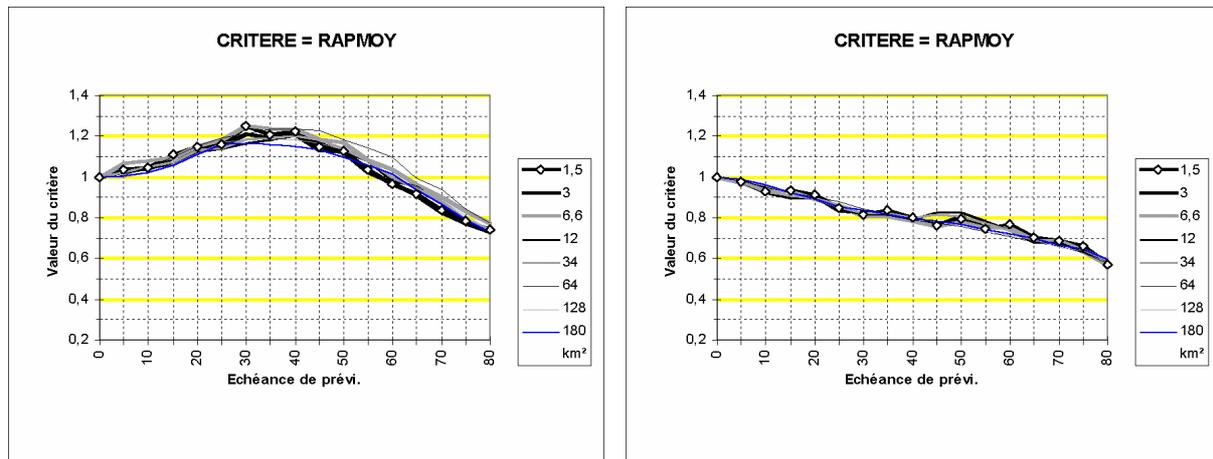
Afin d'obtenir des résultats de validation qui reposent sur un nombre minimum d'événements, les prévisions pour les bassins Nancéiens n'ont donc été exploitées, quel que soit le type d'événement, que pour des échéances de prévision comprises entre 0 et +80 mn, la confiance dans les résultats étant renforcée pour les échéances comprises entre 0 et +65 mn notamment concernant la prévision des débuts de pluies.

3.3. La qualité des prévisions quantitatives dépend de la localisation de l'agglomération :

Nous avons observé que la justesse des prévisions de valeurs quantitatives pouvait dépendre de la localisation géographique de l'agglomération par rapport au radar. Cette dépendance s'est révélée particulièrement marquée pour les 13 pluies de type 1, pour lesquelles les prévisions quantitatives sont en moyenne fortement influencées par les variations de PVR sur la région.

Afin de le mettre en évidence, nous avons calculé et validé des prévisions quantitatives de lames d'eau pour deux emplacements différents des bassins versants : la localisation réelle de l'agglomération

Nancéienne, et une seconde localisation, située à même distance du radar mais au Nord-Nord-Est de celui-ci plutôt qu'à l'Ouest-Sud-Ouest (ce qui les rapproche de la localisation de l'agglomération de St Avold). Les figures 4a et 4b présentent l'évolution, en fonction de l'échéance de prévision, du biais moyen entre prévisions et observations pour ces deux localisations et pour les pluies de type 1 : la différence est due à un phénomène de bande brillante dont l'amplitude maximale (en moyenne sur les 13 événements) est observée à l'ouest des images radar, à une trentaine de kilomètres de Nancy.



4a : Bassins Ouest-Sud-Ouest (Nancy)

4b : Bassins Nord-Nord-Est ("St Avold")

Figure 4 : Biais moyen sur les lames d'eau à 5 mm pour les 8 surfaces en fonction de l'échéance.

Les résultats moyens obtenus pour les pluies de type 2 sont moins différenciés, mais il semble néanmoins que des renforcements géographiques d'activité pluvieuse pourraient avoir une influence sur ces résultats. Par contre, il apparaît clairement que les passages pluvieux les mieux prévus ne correspondent pas aux mêmes événements pour les deux localisations.

En conséquence, plutôt qu'aux valeurs exactes des critères de validation, qui dépendent également du logiciel utilisé, nous nous sommes surtout attachés aux limites de prévision mises en évidence, et à l'évolution de la fiabilité des prévisions en fonction du type de pluie, de la taille du bassin versant considéré, et de la variable prévue. (Les valeurs des critères indiquées dans ce document sont celles obtenues à l'aide du logiciel opérationnel *P@R@D*, et répondent au type de question suivant : pour des pluies effectivement observées à Nancy, qu'a prévu le logiciel *n* minutes à l'avance ? Les résultats sont détaillés dans le document complet)

3.4. Résumé des résultats de validation pour les pluies homogènes de type 1

Critères qualitatifs :

Pour les pluies de type 1, nous avons observé des possibilités de prévision importantes pour des variable décrivant l'événement en terme de pluie/non pluie, aussi bien pour l'identification de la date du début de pluie (erreur moyenne inférieure à 20 mn pour des échéances de prévision dépassant une heure) que pour la prévision des périodes pluvieuses ($ROPLUIE > 0,8$ jusqu'à des échéances de prévision de 30 mn pour tous les bassins, $>0,5$ jusqu'à des échéances de prévision de 75 mn). La prévision de la date

du maximum de pluie peut également être envisagée bien que les maximums soient peut marqués pour ces pluies relativement homogènes.

Critères quantitatifs :

Concernant les prévisions quantitatives, comme indiqué au §3.3 elles sont très influencées (en moyenne sur notre échantillon) par les variations de la mesure radar en fonction de la distance. Ces variations peuvent être interprétées sous la forme d'un PVR non constant qui traduit un phénomène de bande brillante significatif et un remplissage très partiel du faisceau aux grandes distances. Ces sources d'erreur classiques de la mesure de pluie par radar n'ayant pas été corrigées, leurs effets réduisent fortement la performance des prévisions pour la quantification absolue des lames d'eau sur 5 minutes pour toutes les tailles de bassins versants testées (RAPMOY, RAPMAX). Ces sources d'erreur influent beaucoup moins sur les prévisions de cumuls à échéances, le biais moyen RAPCUM restant d'ailleurs très proche de 1 dans le cas des bassins Nancéiens jusqu'aux échéances de 80 mn (les surestimations liées au phénomène de bande brillante compensant les sous-estimations liées au remplissage partiel du faisceau). On retrouve cette différence sur les valeurs de co-fluctuation entre prévisions et observations : $ROCUM > 0,8$ pour tous les bassins jusqu'à des échéances de prévision de 80 mn, $ROMOY > 0,5$ jusqu'à 40 mn pour les bassins de quelques km², jusqu'à 75 mn pour les bassins de plus de 100 km².

Compte tenu de ces résultats, et étant donné la faible variabilité de ce type de précipitations, on peut recommander de prévoir des valeurs de "cumuls à échéance" plutôt que des "hyétogrammes de pluie". Les prévisions peuvent alors être prises en compte jusqu'à 80 mn voire plus, et pourraient être améliorées par le traitement spécifique des sources d'erreur de la mesure de pluie par radar, notamment à l'aide de PVR adaptés. A ce sujet, le fait que dans le cas de Nancy (et en moyenne pour les 13 événements étudiés) les phénomènes de bande brillante et de remplissage partiel du faisceau se compensent presque exactement lorsque l'on cumule les prévisions (en allant chercher les pluies de plus en plus loin, sans dépasser 100 km du radar) met en lumière la nécessité de corriger "à bon escient" afin de ne pas dégrader l'information radar.

3.5 Résumé des résultats de validation pour les pluies de type 2

Pour les pluies de type 2, c'est la forte variabilité dans le temps des structures pluvieuses qui limite la prévision. Les validations mettent bien en évidence les limitations de prévisions liées à la naissance et à la disparition de cellules intenses, et à la rapide évolution de leur activité pluvieuse. **A l'échelle des bassins versants urbains, et tout particulièrement en dessous de surfaces de 50 km², c'est le cycle de vie de chaque cellule qui importe** pour ce type d'événement pluvieux, le diamètre de ces cellules pouvant ne pas dépasser quelques km.

Critères qualitatifs : prévision limitée par l'âge des cellules intenses

Les prévisions de variables qualitatives comme les prévisions d'occurrences de pluie sont limitées par l'âge des cellules au moment où elles passent sur l'agglomération. Cela a une forte incidence sur les résultats de validation. En moyenne sur les 12 événements pluvieux étudiés, la prévision des passages pluvieux principaux sur les bassins de Nancy s'est révélée impossible dans 50% des cas, pour des échéances de prévision dépassant 40 mn à 60 mn (aucune pluie prévue). Pour les autres événements, les

prévisions à plus longue échéance sont assez souvent initiées par des cellules différentes de celles qui passeront réellement sur l'agglomération !

Etant donné l'échelle des bassins d'intérêt, il paraît difficile de repousser cette limite. En effet, cela nécessiterait de prévoir à l'avance exactement où et quand va naître une nouvelle cellule intense, ce qui paraît très ardu, même si sa direction de déplacement semble par contre pouvoir être prévue avec une bonne fiabilité pour les événements étudiés.

Si l'on excepte cette limitation liée à l'âge des cellules intenses, les prévisions qualitatives sont en général possibles, aussi bien pour l'identification de la date du début de pluie (erreur moyenne inférieure à 20 mn pour des échéances de prévision jusqu'à 55 mn) que pour la prévision des périodes pluvieuses (ROPLUIE > 0,8 jusqu'à des échéances de prévision de 20 mn pour tous les bassins, > 0,5 jusqu'à des échéances de prévision de 55 mn). La prévision de la date du maximum de pluie semble également pouvoir être envisagée jusqu'à des échéances de 55 mn. Néanmoins, il convient de se souvenir qu'à tout moment peuvent se développer très rapidement des structures pluvieuses imprévues. Dans notre échantillon, nous avons pu observer plusieurs exemples d'incapacité quasi totale de prévision, correspondant au passage de cellules se formant en bordure directe de l'agglomération, voire même au centre de celle-ci (événement pluvieux n°7).

Critères quantitatifs : prévision limitée par la grande variabilité des cellules intenses

Si l'on s'intéresse aux prévisions quantitatives à l'aide des logiciels testés, la variabilité très importante des cellules intenses réduit plus encore la validité des prévisions. Que ce soit au regard de la quantification absolue des valeurs des lames d'eau (RAPMOY, RAPMAX, ECMAX) ou de la co-fluctuation entre prévisions et observations (ROCUM, ROSEUIL, ROMOY), les performances diminuent très vite avec l'échéance de prévision, et d'autant plus rapidement que la surface des bassins versants est réduite. Pour les petits bassins urbains (quelques km²), il nous semble au vu des résultats, que l'on puisse recommander de limiter la prévision de cumul à échéance aux 30 à 40 prochaines minutes (ROCUM < 0.5 au delà). La prévision d'une date de dépassement de seuil d'intensité semble assez peu fiable (ESEUIL), de même que la prévision des périodes correspondantes (ROSEUIL < 0,5 au delà de 10 mn d'échéance pour les bassins de quelques km², au delà de 20 mn pour la plupart des autres). Enfin, la prévision de hyétogrammes complets semble devoir être pratiquement exclue : les prévisions de lames d'eau sur 5 minutes ont très souvent peu de rapport avec les observations au delà d'échéances de prévision de quelques pas de temps, quelle que soit la taille du bassin versant.

On peut faire remarquer que les logiciels utilisés ne faisaient aucune hypothèse concernant le cycle de vie des cellules intenses (le logiciel *P@R@D* prend juste en compte de manière limitée une croissance ou décroissance des intensités pluvieuses). Un logiciel capable d'identifier très rapidement l'état de chaque cellule intense existante, et de prévoir son évolution dans les 30 à 40 prochaines minutes, pourrait peut être permettre d'améliorer ces résultats pour les faibles échéances de prévision. Ses possibilités de prévision seraient néanmoins limitées par la difficulté de prévoir des cellules non encore formées, et par conséquent limitées par l'âge des cellules au moment où elles passent sur une agglomération.

4. L'apport de la prévision par rapport à une hypothèse de persistance

Afin de mettre en évidence l'apport réel des logiciels de prévision, nous avons validé des "prévisions" réalisées à l'aide d'une hypothèse de persistance : la dernière lame d'eau enregistrée est prolongée jusqu'à l'échéance. Nous avons ensuite estimé l'apport de la prévision en calculant, pour chaque échéance i , la différence entre les valeurs obtenues par les deux procédures pour les carrés des coefficients de corrélation entre prévisions et observations. Par exemple pour la prévision de cumul à échéance :

$$APPcum(i) = ROCUM^2_{prévision}(i) - ROCUM^2_{persistance}(i)$$

Ce nouveau critère peut être interprété comme une représentation de la part de variance des cumuls réellement expliquée par la prévision (l'autre part étant "expliquée" par l'inertie du phénomène). Les courbes en cloche présentant les résultats obtenus à l'aide du logiciel opérationnel *P@R@D* permettent de résumer l'apport de ce logiciel de prévision en fonction du type de pluie, de la taille des bassins versants, et du type de variable prévue (figure 5). Plusieurs observations sont intéressantes :

- L'échéance limite au delà de laquelle le logiciel n'apporte plus d'information significative.
- La valeur maximale de l'information apportée, et l'échéance pour laquelle elle se produit.

Ces informations permettent de constater que pour une variable donnée, l'apport maximal du logiciel de prévision s'effectue en général pour les pluies de type 2. Cela veut dire que même si les prévisions sont moins bonnes pour ces pluies très variables, l'information apportée par la prévision est importante et comble un vide réel de connaissance sur l'évolution future de ce type de précipitations.

On note également pour les deux types de pluies, que les valeurs record de l'apport du logiciel sont atteintes pour la prévision de variables quantitatives. Par contre, plus les variables prévues décrivent précisément l'évolution de la pluie, plus l'apport du logiciel est concentré vers les faibles échéances, (devenant plus vite très important mais diminuant plus rapidement). Ces observations complètent la précédente en indiquant que plus la prévision s'attache à décrire finement l'évolution des lames d'eau au sol, plus son apport d'information est important, mais moins il est durable. Le même type d'évolution est observé pour le logiciel expérimental, pourtant moins performant, et reposant sur une méthode d'analyse des déplacements des zones pluvieuses complètement différente. Il serait très intéressant à ce niveau de tester selon la même procédure un logiciel capable de prendre en compte, au moins partiellement, le cycle de vie des cellules intenses.

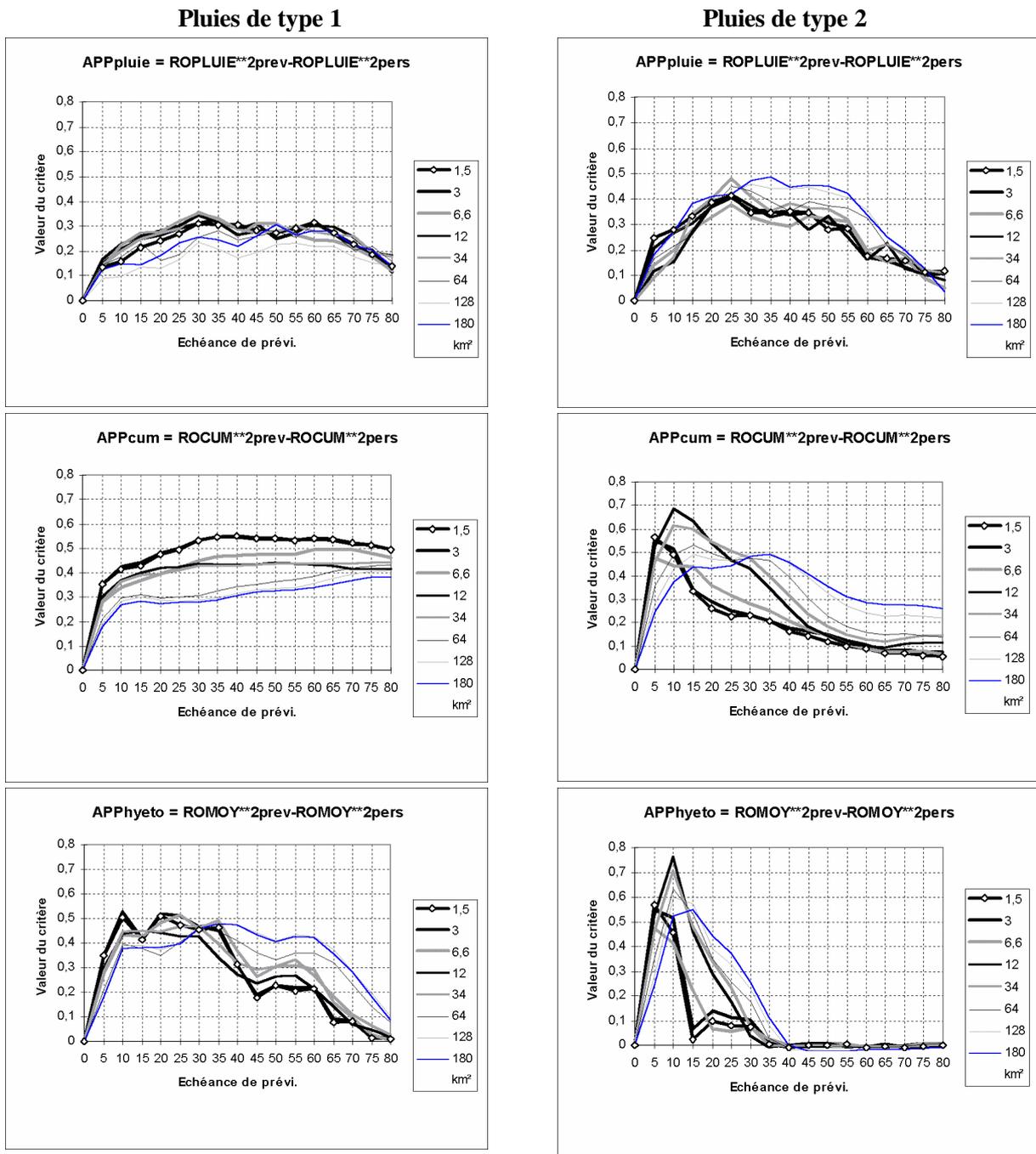


Figure 5 : Evolution de l'apport du logiciel *P@R@D* par rapport à l'hypothèse de persistance.

Le même type d'évolution est observé pour l'autre logiciel.

Appluie : prévision d'occurrences de pluie.

Appcum : prévision de cumuls à échéance.

Apphyeto : prévision de lames d'eau sur 5 mn pour une échéance donnée.

5. Impact sur les résultats de modélisation pluie-débit

La deuxième partie de l'étude a permis d'étudier l'impact des erreurs de prévision mises en évidence dans la première partie, sur des résultats de modélisation du comportement du réseau d'assainissement des plus petits bassins versant envisagés dans cette étude. On peut rappeler que ces bassins versants ont été le support de très nombreuses études dans le passé, et que leurs réseaux d'assainissement sont très bien modélisés.

Ces bassins versants sont caractérisés par un temps de concentration très court, et on pouvait donc supposer un effet tampon réduit. Les résultats ont montré que les biais moyens sur les quantités de pluie prévue pour chaque échéance de prévision se retrouvent très peu modifiés sur les débits modélisés. Par contre, les résultats tendent à montrer que les modélisations filtrent une partie importante des erreurs à caractère aléatoire effectuées lors de la prévision de lames d'eau sur des pas de temps de 5 mn. Pour les pluies de type 1, cet effet se rapproche de très près de l'effet obtenu par un cumul des lames d'eau prévues jusqu'à une échéance donnée.

6. Conclusion : conséquences pour les gestionnaires de réseaux d'assainissement

Ces résultats peuvent être confrontés aux besoins réels de prévision des applications courantes développées par les gestionnaires de réseaux d'assainissement pour chaque type d'événements pluvieux.

Pour les événements non intenses et relativement homogènes correspondants au type 1 défini dans cette étude, les résultats obtenus à l'aide du logiciel opérationnel qui était testé sont très intéressants. Concernant les prévisions quantitatives de lames d'eau, des possibilités de prévision de cumuls pour des échéances atteignant 1h30 à 2h peuvent trouver de nombreuses applications dans les nouvelles stratégies de gestion des réseaux d'assainissement rappelées au §1. C'est particulièrement le cas pour des objectifs de traitement des eaux de temps de pluie, qui nécessitent d'optimiser l'utilisation des moyens de stockage existants pour réduire les déversements de pollution dans le milieu naturel.

Pour les événements présentant des cellules pluvieuses intenses (le type 2 dans cette étude) les besoins concernent plutôt des objectifs de protection contre les événements violents, et en général contre les inondations. Les résultats obtenus à l'aide du même logiciel opérationnel conduisent à être très prudents, et demandent donc à être confirmés pour d'autres logiciels et d'autres données. Nos résultats montrent en effet que si les prévisions réalisées à partir des mesures radar apportent une information très significative, les échéances de prévision de lames d'eau pour ces événements sont fortement limitées par la petite taille des bassins versant urbains, et la très forte variabilité des structures auxquelles on doit s'intéresser à cette échelle. De plus, lors de précipitations à caractère orageux, un bassin versant n'est jamais complètement à l'abri d'un développement local ne permettant aucun délai d'anticipation.

La nécessité de systèmes d'alerte complétant les prévisions de lames d'eau

Dans ces conditions, pour la gestion de réseaux à réponse très rapide nécessitant une anticipation de plus de 30 minutes, et qui jouent un rôle dans la protection des personnes et des biens, il semble nécessaire de compléter les systèmes de prévision classiques de lames d'eau par un **système d'alerte** permettant d'identifier la présence d'un risque avec des échéances plus importantes. Un tel système nécessite une analyse automatique de la situation pluvieuse en temps réel, et une identification préalable

des situations à risque pour chaque site ou chaque application à protéger. Des démarches de ce type incluant un caractère qualitatif ont été développées par exemple en Seine St Denis [3], et à Nancy [4]. Dans ce dernier cas, deux niveaux d'alerte de risque ont été définis : un niveau de risque potentiel et un niveau de risque confirmé. Ces niveaux ont été définis après une analyse conjointe sur un grand nombre d'événements pluvieux, de l'information apportée par les images radar sur le type de précipitation, et de la réponse hydraulique du réseau d'assainissement concerné [5]. Ce système, complémentaire de la prévision de lames d'eau, est utilisé en utilisation opérationnelle depuis janvier 2000 pour la mise en sécurité du réseau d'assainissement du bassin versant Boudonville décrit dans cette étude [voir 1].

7. Enseignements concernant l'évolution des systèmes pour ce type d'utilisateurs :

Les résultats obtenus pour les prévisions des pluies de type 1 montrent toute l'importance d'effectuer un traitement efficace des principales sources d'erreur de la mesure de pluie par radar. Des solutions existent, et il est urgent que les techniques maîtrisées en France au niveau de la recherche soient implantées dans les applications opérationnelles. Ces solutions n'étant pas exemptes d'insuffisances, il est important qu'elles ne soient pas effectuées de manière irréversible et qu'un contrôle d'efficacité soit réalisé à l'aide des mesures au sol collectées en temps réel par les différents réseaux de mesure nationaux ou locaux, notamment au sein des grandes agglomérations.

Concernant la résolution spatiale des mesures, il est exprimé depuis longtemps qu'une taille de pixel de 1 km² est un maximum pour les utilisations courantes en hydrologie urbaine [voir 6 notamment]. La figure 1 illustre à ce propos tout l'intérêt de disposer d'une résolution plus importante pour l'analyse des phénomènes en temps différé, notamment lors d'études de modélisation détaillées ou pour l'expertise d'événements pluvieux ayant provoqué des dégâts des eaux. Par contre, pour les besoins en temps réel et en prévision, la variabilité spatiale des pluies de type 1 n'impose pas obligatoirement une résolution très supérieure. Quand aux pluies de type 2, il a été montré que la principale limitation aux prévisions est due à l'extrême variabilité des phénomènes à cette échelle, et non à un manque de précision dans la mesure.

Enfin il nous semble très important dans le cas des pluies intenses pouvant générer très rapidement des débits importants, de travailler à la définition et à la validation de **critères d'alerte** "très en amont" (valables jusqu'à plusieurs heures à l'avance) reposant sur une estimation des risques locaux pour les utilisateurs. Les travaux dans ce domaine ne peuvent avancer que confrontés à des cas concrets d'application. Toutes les démarches peuvent être envisagées, et il conviendrait de ne pas se limiter à des critères reposant sur une estimation quantitative de pluie ou de lames d'eau au sol. Des critères basés sur la reconnaissance de "structures" particulières ont en effet pu être reliés avec succès à Nancy à la notion de risque pour les réseaux [1], notion qui se révèle bien adaptée à la prise de décisions opérationnelles [voir aussi 7 à ce sujet]. Ce type de critères peut présenter certains intérêts:

- ils peuvent varier assez lentement dans le temps et être moins sensibles aux influences des erreurs de la mesure de pluie par radar que les estimations d'intensités pluvieuses et de lames d'eaux;
- ils nécessitent des données moins précises que celles nécessaires à l'estimation de lames d'eaux, ce qui les rend compatible avec l'utilisation de mesures réalisées à grande distance des radars du réseau national ou à l'aide de radars moins performants dans le domaine quantitatif (radars

locaux). Les cartes de prévision de la couverture radar nationale pour les 15 prochaines années illustrent tout l'intérêt de cette qualité.

- Ils vont dans le sens de la notion "d'objet" qui peut être utilisée comme support pour la fusion de données provenant de nombreuses sources d'observations (radars, satellite, mesures au sol, sorties de modèles, historiques de situations types ou d'événements exceptionnels). Cette notion se réfère à certains travaux réalisés à Météo-France pour l'aide à la génération d'alertes d'orage précoces [8].

8. Références :

- [1] Faure D., Auchet P., Payrastra O., *Operational Management of a detention-settling basin using the qualitative information on rain areas supplied by a weather radar*, preprints of the Third International Workshop on Rainfall in Urban Areas, Pontresina/Switzerland, 10 - 12 December 2000, pp. 13 - 19. (soumis pour publication dans *Water Science & Technology*)
- [2] Mathurin R., *Introduction de techniques d'analyse d'images et d'optimisation combinatoire dans la prévision de la pluie par radar météorologique*, Collection Sciences pour l'ingénieur, Édition du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 178 p., ISBN.2-7208-270, Mars 1999.
- [3] Browne O., Auriaux G., Idier F., Delattre J.M., *A decision aid system for real-time operation of Seine Saint-Denis sewer network*, 3^{ème} conférence Internationale sur les nouvelles technologies en assainissement pluvial, Novatech98, Lyon, 4-6 mai 1998, Proceedings vol. 2, pp. 147-154, GRAIE, ISBN 2-9509337-2-6.
- [4] Faure D., Schmitt J.P., Badot R., *Réduction des déversements de pollution par temps de pluie par une stratégie globale pollution/ inondation de gestion d'un réseau d'assainissement*, 3^{ème} conférence Internationale sur les nouvelles technologies en assainissement pluvial, Novatech98, Lyon, 4-6 mai 1998, Proceedings Vol 2, pp. 287-294, GRAIE, ISBN 2-9509337-2-6.
- [5] Payrastra O., *Utilisation du radar météorologique pour l'aide à la gestion en temps réel d'un bassin de retenue : exemple du bassin de Gentilly à Nancy*, DEA/1999-01, Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg, 1999.
- [6] Faure D., *Etat des connaissances et des besoins des utilisateurs : collectivités, exploitants de réseaux d'assainissement*, Séminaire de réflexion et de programmation de la recherche en hydrologie radar, Ministère de l'Environnement et Météo-France, Toulouse, 18 Déc. 1996.
- [7] Champon M., *Expression des besoins des utilisateurs : Directeur adjoint de la sécurité civile, Ministère de l'Intérieur*, 31^{ème} Assemblée Plénière du Conseil Supérieur de la Météorologie, Paris, 22 mars 2001, annales à paraître.
- [8] Morel C., Sénési S., Autones F. and L. Labatut, *The Rapid Developing Thunderstorms (RDT) Product of the Nowcasting SAF. Prototyping activities and quality assessment using GOES images*. In *Proc. The 2000 Meteorological Satellite Data Users' Conference*, Eumetsat and CNR, Bologna, Italy, to be published.