

HYDROLOGIE DES BASSINS VERSANTS PERI-URBAINS EQUIPES DE RESEAUX SEPARATIFS

CONSTITUTION D'UNE BANQUE DE DONNEES EXPERIMENTALES SUR LE ROLE
DE LA VARIABILITE DES PRECIPITATIONS SUR LES INCERTITUDES DU BILAN
HYDROLOGIQUE EN MILIEU PERI URBAIN

SUBVENTION DE RECHERCHE 01 DST 12

DIVISION EAU ET ENVIRONNEMENT
JUN 2004

JUIN 2004

1. INTRODUCTION

La variabilité des précipitations aux échelles de l'hydrologie urbaine, et l'influence de la variabilité des précipitations sur la réponse des bassins versants restent encore mal connus. L'un des objectifs du projet « hydrologie des bassins versants péri-urbains » était de constituer une banque de données propice à la poursuite de recherches sur ce sujet. Dans cette perspective, la Division Eau et Environnement du LCPC a d'une part instrumenté en mesure pluviométrique et débitmétrique un bassin versant de 1090 ha de l'agglomération nantaise : l'Aubinière et d'autre part effectué une campagne de mesure de la pluie sur l'agglomération nantaise à l'aide d'un radar météorologique bande X enregistrant les précipitations avec une résolution spatiale de 250mx250m et une période temporelle de 2 minutes. Ce rapport retrace le déroulement de ces deux expérimentations. Il est complété de deux annexes plus détaillées respectivement consacrées à la modélisation hydrologique et à l'instrumentation du bassin de l'Aubinière. Cette expérimentation de longue durée a donné lieu à la constitution d'une banque de données critiquées et validées, ouverte à la communauté scientifique.

2. EXPERIMENTATION HYDROLOGIQUE – BASSIN VERSANT DE L’AUBINIÈRE

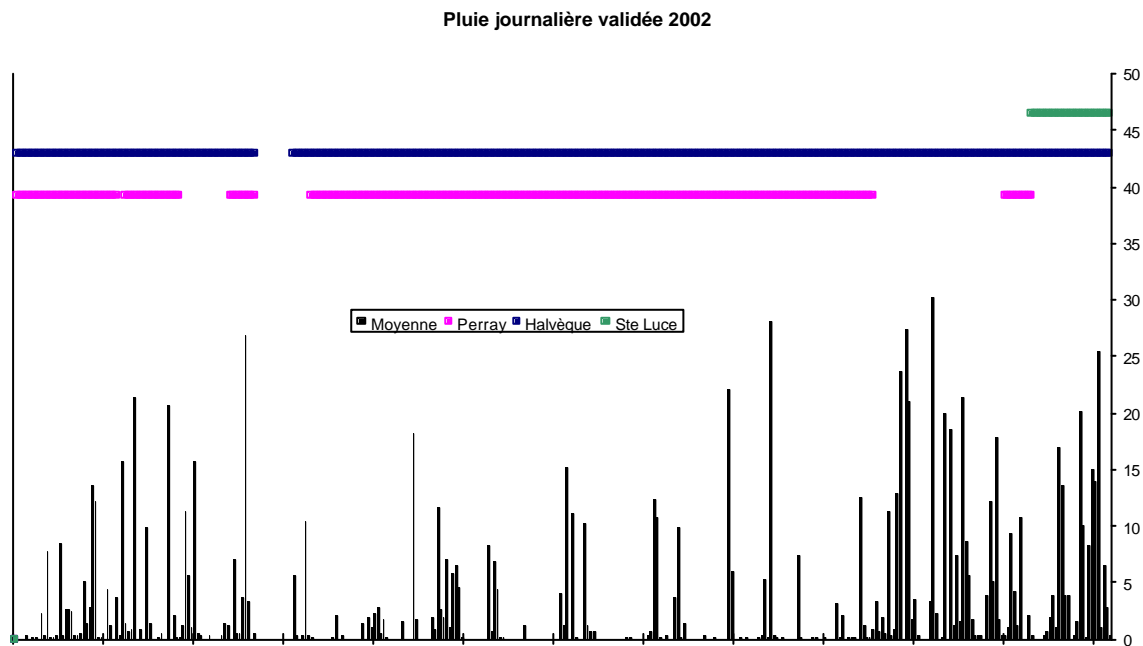
Le bassin versant de l’Aubinière situé en partie nord-est de l’agglomération nantaise est instrumenté depuis juillet 2002 pour la mesure de la pluie qu’il reçoit et du débit pluvial à son exutoire. Etendu sur 1095 ha et avec un coefficient d’imperméabilisation moyen de 0.42, il présente une grande diversité d’occupation du sol. Il inclut également le bassin des Gohards pour lequel la mesure de la pluie et celle du débit pluvial sont actives depuis juillet 1998. Enfin, un petit radar météorologique a été installé sur le site du L.C.P.C. soit à une distance de 15 km du bassin de l’Aubinière afin d’appréhender la répartition spatiale de la pluie. Installé en octobre 2002, il a fonctionné avec quelques difficultés jusqu’en septembre 2003.

L’étude hydrologique du bassin versant est disponible dans le rapport annexé. Nous décrivons ici le fonctionnement du système de mesure pluviométrique et débitmétrique du bassin, puis celui du radar, au cours des années 2002 et 2003.

Les Pluviomètres

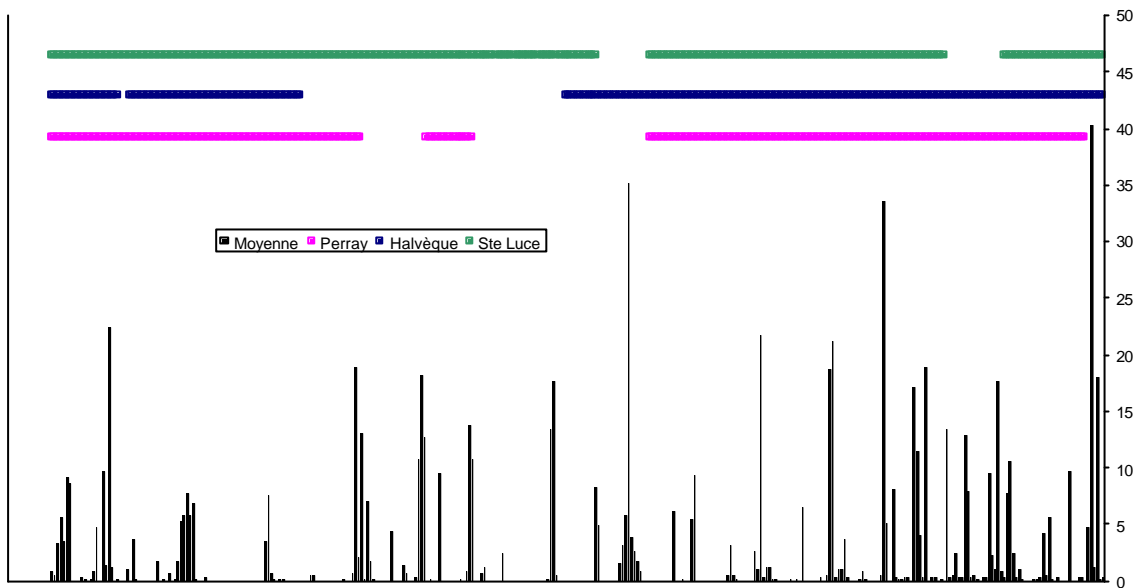
La division Eau disposait de deux pluviomètres. Ce dispositif a été complété par un troisième appareil installé sur le toit de l’école de musique de Ste Luce sur Loire qui fonctionne depuis le début décembre 2002. Les trois appareils sont du même type avec capacité d’auge de 20 cm³ et surface réceptrice de 1000 cm² soit une résolution de 0,2 mm. Les enregistreurs sont identiques, programmés pour le cumul à la minute et alimentés par batterie et panneau solaire.

Hormis quelques incidents ponctuels d’ordre électrique ou mécanique un peu plus fréquents sur le pluviomètre du Perray, aucun problème majeur n’est survenu. Il en résulte une bonne continuité globale dans la mesure pluviométrique validée comme illustré sur les graphes annuels de fonctionnement.



La période d’absence de données en mars 2002 n’était pas pluvieuse comme l’a montré la mesure sur le bassin voisin de St Joseph de Porterie.

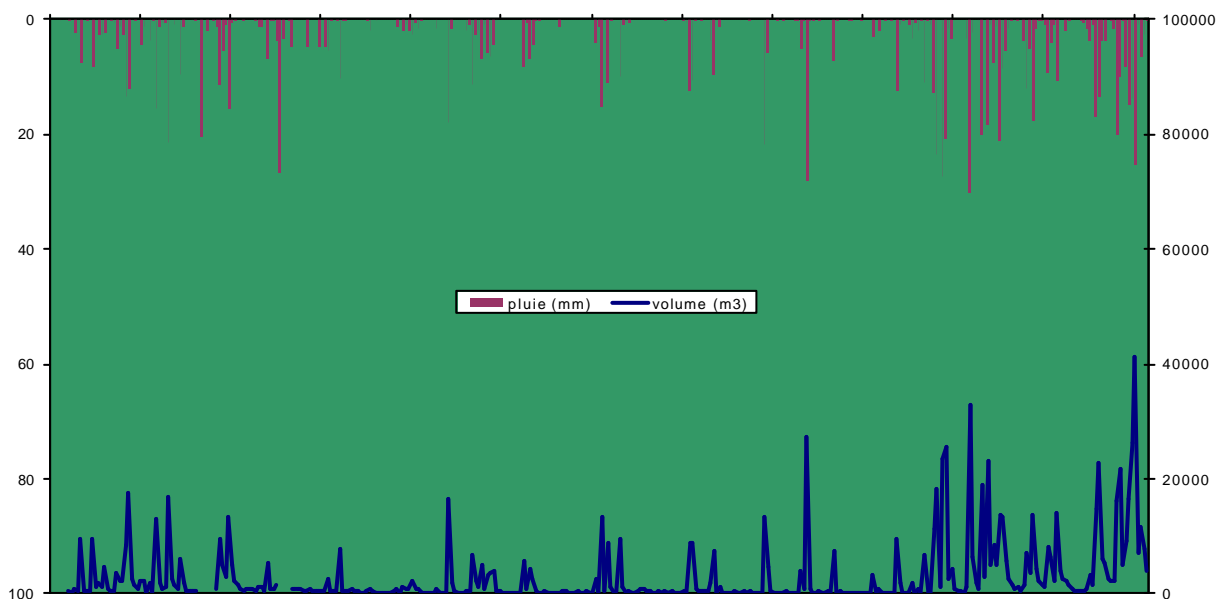
Pluie journalière validée 2003



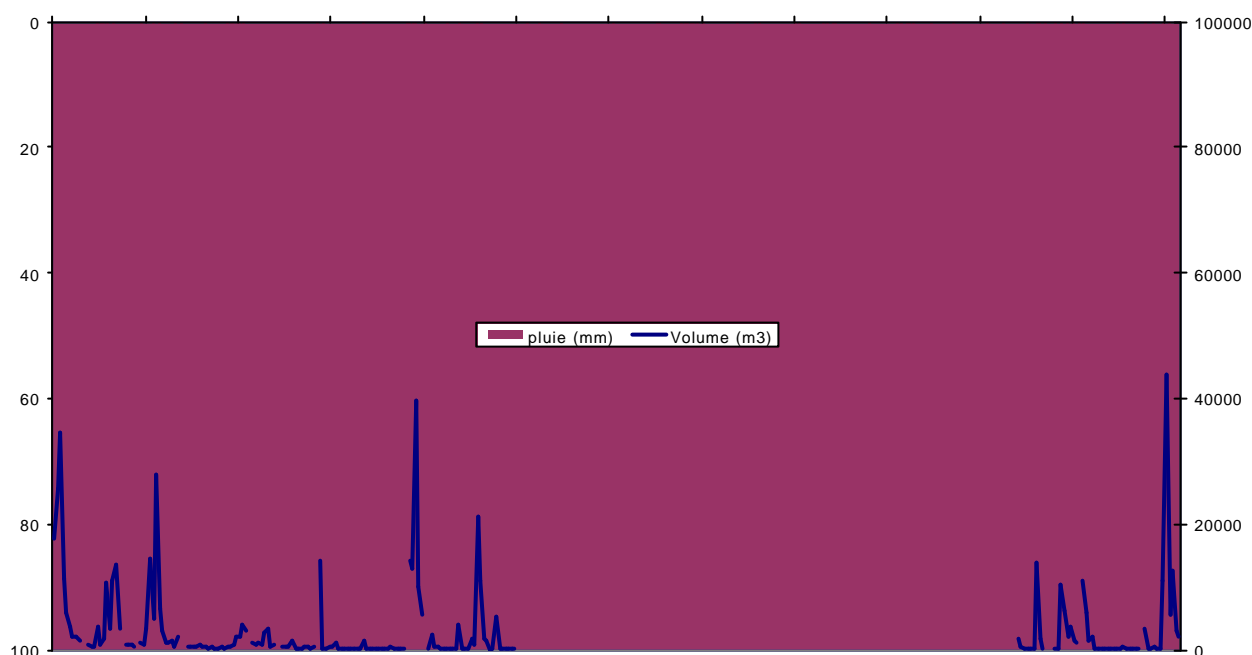
La période du début janvier 2003 n'a pu être validée faute de moyen de contrôle : tous les bidons servant à mesurer le cumul de la pluie entre deux relevés ont été victimes du gel et la comparaison des pluviomètres entre eux est trop erratique. Il manque un événement pluvieux du 1^{er} au 4 janvier qu'il faudra tenter de valider si les mesures du pluviomètre de la Communauté Urbaine situé près du bassin sont disponibles.

Le Débitmètre des Gohards

Installé depuis l'été 1998, cet appareil mesure la hauteur d'eau dans le collecteur par pression hydrostatique et la vitesse des particules par effet Doppler. Il n'a connu jusqu'en mai 2003 que des incidents mineurs liés à la connectique ou à des pannes d'alimentation n'entraînant pas de perte significative de données. L'analyse 2002 par Marie-Laure Mosini permis la validation des données de pluie et de débit.



En revanche, un biais sur la mesure de hauteur n'a été détecté qu'en octobre 2003, la vérification du capteur n'ayant pas été systématique pour diverses raisons : peu d'encrassement en fond de collecteur, accès acrobatique par une échelle peu ergonomique, changements dans l'équipe de maintenance. Un gravillon s'est introduit sous la membrane du capteur et l'a endommagée. La dérive résultante n'étant pas quantifiable, la mesure de hauteur n'est pas valide entre la fin mai et le début octobre 2003. Or, si le débit peut être obtenu à partir de la seule mesure de hauteur via le tarage réalisé avec les mesures disponibles depuis 1998, Karin Wunderlich a montré que la donnée vitesse seule ne permet pas d'obtenir une estimation correcte du débit. Il en résulte l'absence de l'information ruissellement pour une dizaine d'événements significatifs parmi la quarantaine détectée en 2003.



Les autres discontinuités apparaissant sur la courbe sont liées à des incidents ponctuels ou bien au choix de l'échelle journalière : le résultat est rejeté par insuffisance de mesures valides.

Le Débitmètre de l'Aubinière

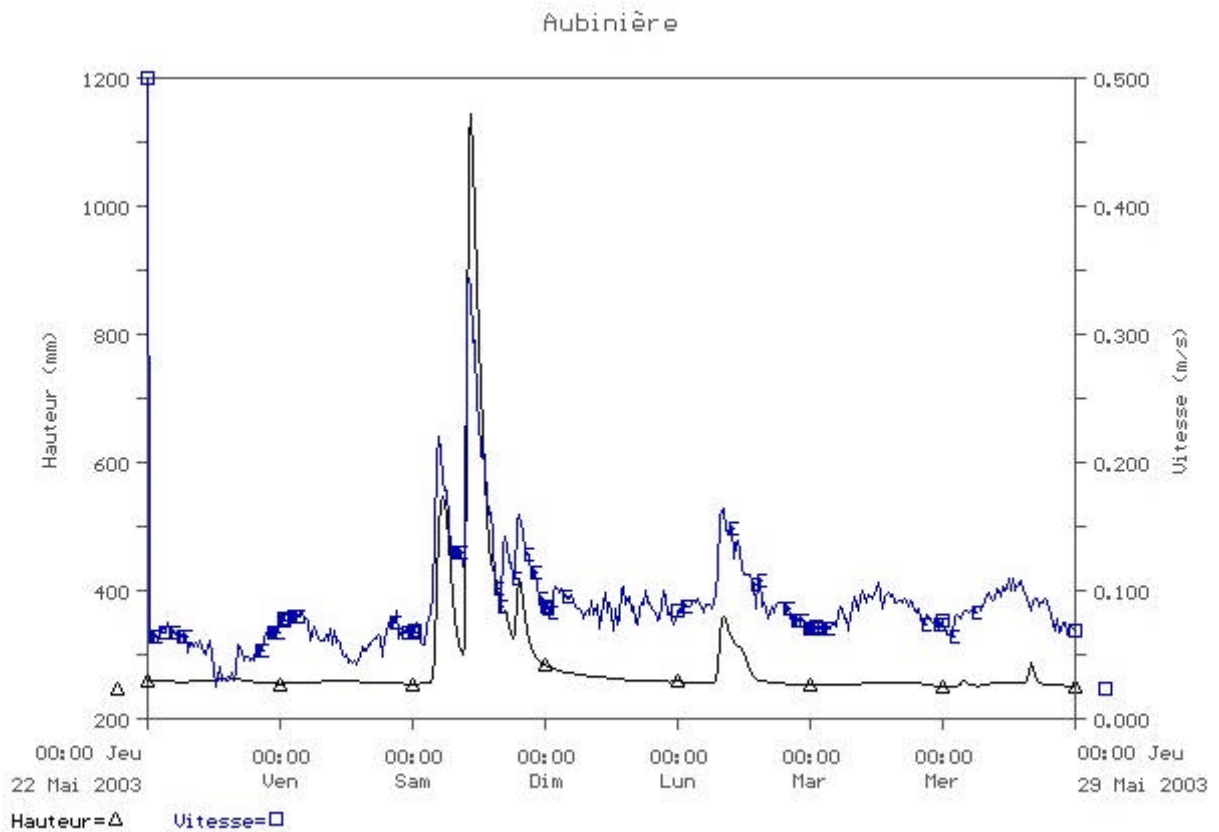
L'appareil mis en service en juillet 2002 a été choisi pour son aptitude à fournir un profil de vitesses d'écoulement dans un collecteur afin d'obtenir une meilleure estimation du débit. Le principe et les essais préalables sont décrits dans le rapport joint en Annexe. Malheureusement, les conditions de son fonctionnement et de sa maintenance se sont dégradées pour des raisons liées à la fois au matériel et au site de mesure.

Le débitmètre ayant été modifié pour fonctionner sous 12 V et la sensibilité du site au vandalisme excluant l'usage de panneaux solaires, il a fallu trois batteries au plomb de 72 Ah pour atteindre l'autonomie de deux semaines correspondant à l'intervalle de maintenance des autres appareils des sites nantais. Outre la manutention compliquée en période hivernale par la difficulté d'accès au site (chaînage du véhicule faute d'engin tout-terrain), la durée de vie des accumulateurs s'est vue amputée suite aux décharges excessives dues à la consommation de l'appareil dépourvu de protection pour ce type d'alimentation.

Un autre problème est apparu dans le fonctionnement du débitmètre même lorsqu'il était correctement alimenté : le profil des vitesses est réduit pour les fortes hauteurs d'eau alors qu'on pourrait raisonnablement espérer le contraire. Une réunion dont le compte-rendu est joint a eu lieu avec le fournisseur en juillet 2003 et les propositions restent en attente.

Ces dysfonctionnements nous ont amenés à déposer l'appareil et le remplacer par un débitmètre Doppler disponible en février 2003. Celui-ci, de même type que celui du bassin des Gohards, a fonctionné normalement jusqu'en août. Ensuite, la hauteur d'eau a été mesurée correctement mais pas la vitesse. Il a été remplacé en novembre quand la panne s'est avérée permanente par un modèle plus ancien mais qui donne satisfaction.

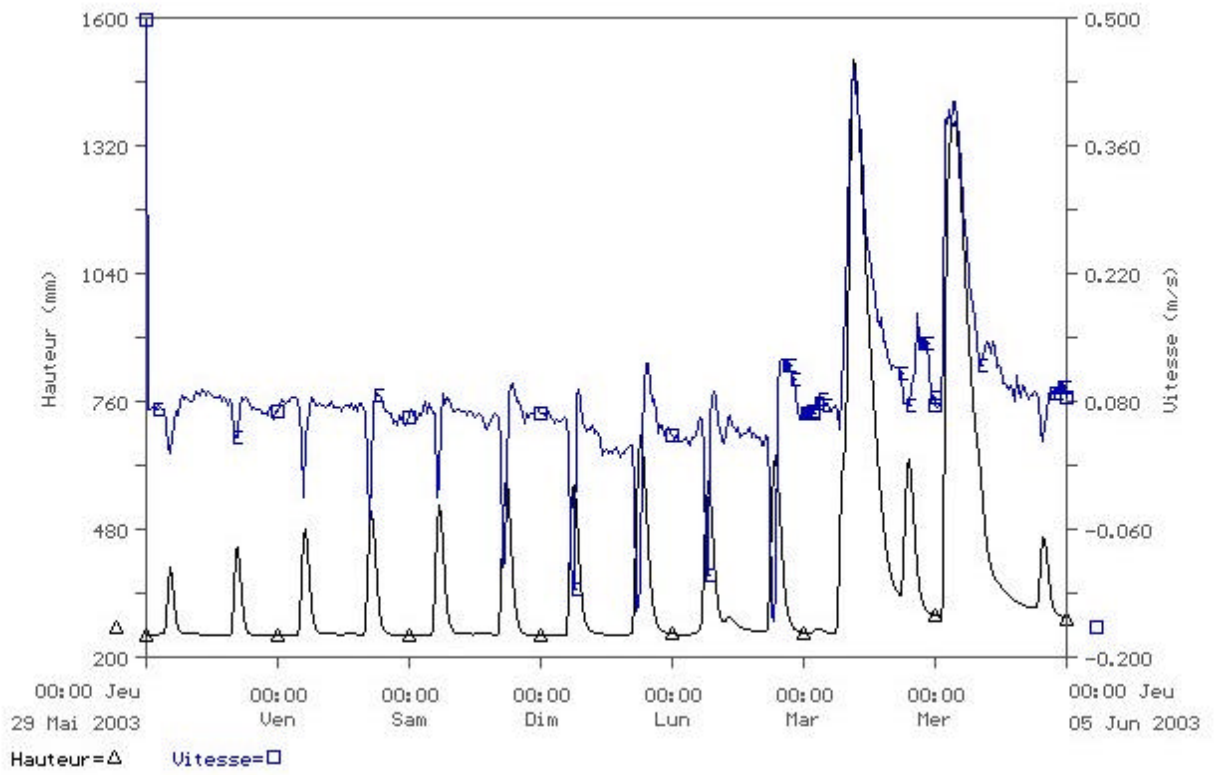
Enfin, la validation des mesures reste délicate. Les absences de mesures de vitesses peuvent être palliées via les jaugeages réalisés préalablement à l'instrumentation du site mais le ruisseau est soumis à l'influence aval de la Loire lors de fortes marées ou de crues. Il faut donc appliquer une méthode différente pour les événements avec ou sans cette contrainte.



Sur cette configuration où l'influence aval est minimale, l'obtention du débit ne pose pas de problème lors du ruissellement.

En revanche, le cas suivant ne permet pas directement de discerner la partie de l'écoulement sur le bassin de celle induite par le mouvement en aval avec des vitesses parfois négatives à marée montante et des hauteurs atteignant presque la passerelle de l'ouvrage lorsque la crue de la Loire vient renforcer le phénomène.

Aubinière



3. EXPERIMENTATION RADAR

Mis à disposition pour une durée d'un an par le L.T.H.E. de l'Université de Grenoble, le radar est de type "bande X", opérant à la fréquence de 9,375 GHz. Après une prise de contact au L.T.H.E. sous la conduite du spécialiste Frédéric Cazenave, le système a été installé début octobre 2002 : radar sur le toit-terrasse du bâtiment principal du L.C.P.C. Nantes et postes de commande et d'acquisition deux étages plus bas dans les locaux du service informatique.

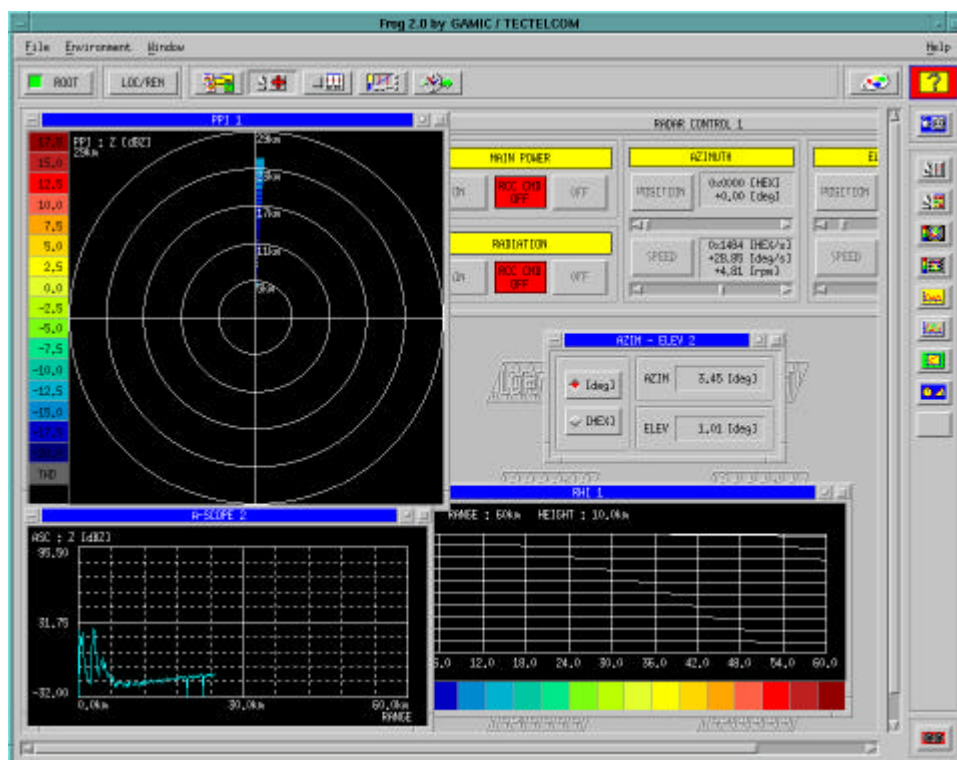


Le paramétrage géographique effectué ainsi que les adaptations au réseau nantais, la mesure devait pouvoir débuter puisque les démarches relatives à l'émission étaient en ordre. Par mesure de précaution envers le personnel travaillant à proximité de l'installation, il a fallu se contenter du fonctionnement en dehors des heures de travail et le week-end jusqu'à la production par la société Kenta du document joint en annexe précisant les conditions d'utilisation du radar au vu des mesures effectuées. L'utilisation normale du système a pu débuter fin janvier 2003 à la réception de ce rapport.

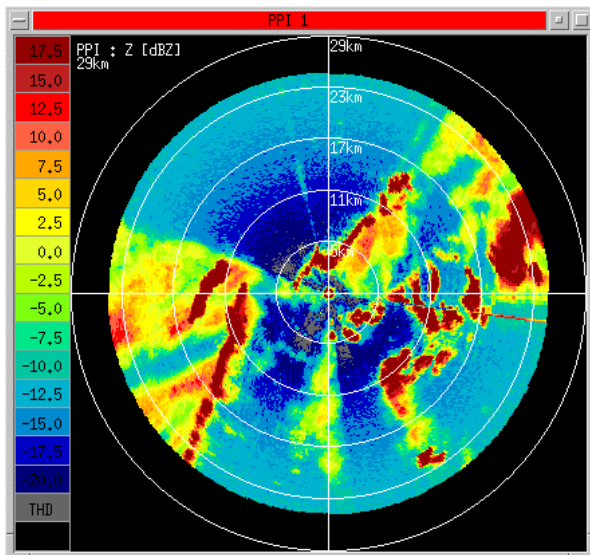
L'ergonomie du logiciel de commande et d'acquisition d'image a permis sa prise en main rapide par l'équipe du projet Aubinière-Radar. Deux principaux espaces de travail donnent accès l'un à la visualisation en cours d'acquisition ou en commande directe (images en surface conique dites PPI, coupes verticales dites RHI, diagramme des tirs, angles et vitesses, ...) et l'autre au paramétrage de l'enregistrement (types PPI et/ou RHI, angles, vitesse de rotation, portée, résolution spatiale, ...). Petite ombre à ce tableau : la mémorisation des paramètres ne fonctionnait pas ainsi que la détection de la clé de protection mais l'équipe s'en est très bien sortie sur ce point.

Les quelques ennuis rencontrés ont plus été liés aux arrêts inopinés du système avec des redémarrages parfois difficiles ainsi que, pour l'anecdote, à l'organisation de la maintenance le week-end, le gardiennage de l'établissement étant à ce moment-là quelque peu étrange.

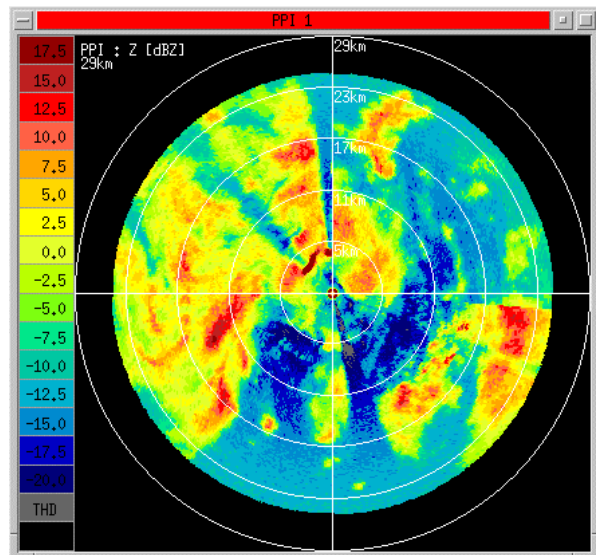
Les captures d'écrans qui suivent illustrent l'espace de commande et visualisation, un exemple de deux PPI consécutifs à des élévations différentes avec un RHI pris quelques instants après dans la direction du bassin étudié.



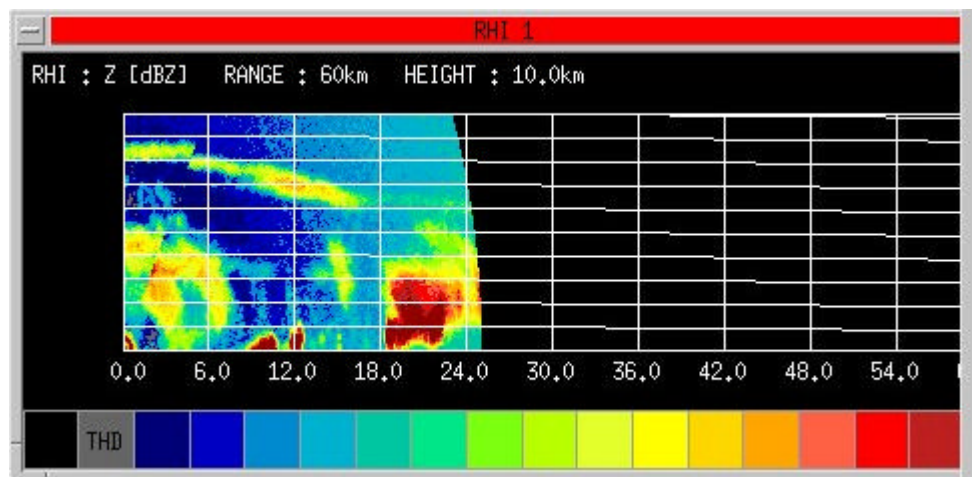
Espace de visualisation et/ou de commande directe.



angle d'élévation 3,5°



angle d'élévation 15°



coupe verticale (avec exagération des altitudes)

La procédure choisie a consisté à enregistrer des «images» de type PPI pour simplifier les choses à la plus faible élévation permettant d'éviter les phénomènes d'échos fixes et de masquage et à une vitesse angulaire réalisant un compromis entre une bonne résolution polaire et la fréquence d'acquisition des pluviomètres et débitmètres du bassin versant. On a pu en extraire des grilles cartésiennes avec une maille de 125 mètres de côté recouvrant la zone étudiée.

L'archivage, la transformation et l'exploitation des enregistrements ont été compliqués par plusieurs facteurs :

- les deux machines sous Linux assurant le pilotage du radar et l'acquisition des données ayant des capacités réduites, le stockage n'y était possible que temporairement, avec de fréquents et volumineux transferts vers d'autres plateformes,

- les scripts et programmes de conversion développés pour les applications grenobloises ont dû être révisés pour les types de balayages enregistrés à Nantes, et il a fallu réimplanter les fichiers par quantités gérables sur la machine linux pour ne pas jongler avec les différences des compilateurs C, fortran et des shells utilisés sur les autres stations du laboratoire (sous Unix),
- La première visualisation des images en différé s'est faite via Matlab sur station Unix mais avec un temps d'exécution limitant le nombre d'images traitées.

Enfin, l'électronique et la mécanique ayant aussi leur mot à dire, deux pannes sont intervenues. La première, s'est produite mi-avril 2003, causée par un court-circuit entre pistes du contact multiple rotatif monté à la base du radar : le remplacement de l'élément défectueux a eu lieu fin mai 2003.

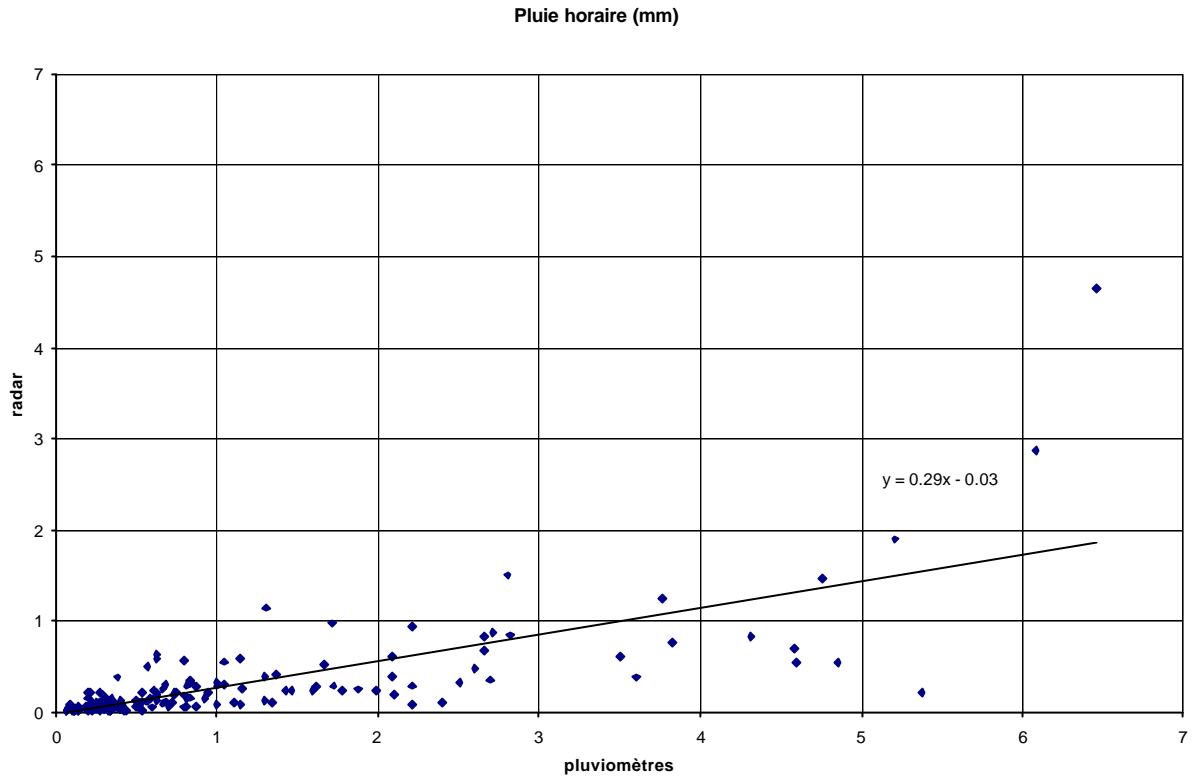


Le diagnostic de la panne d'avril 2003

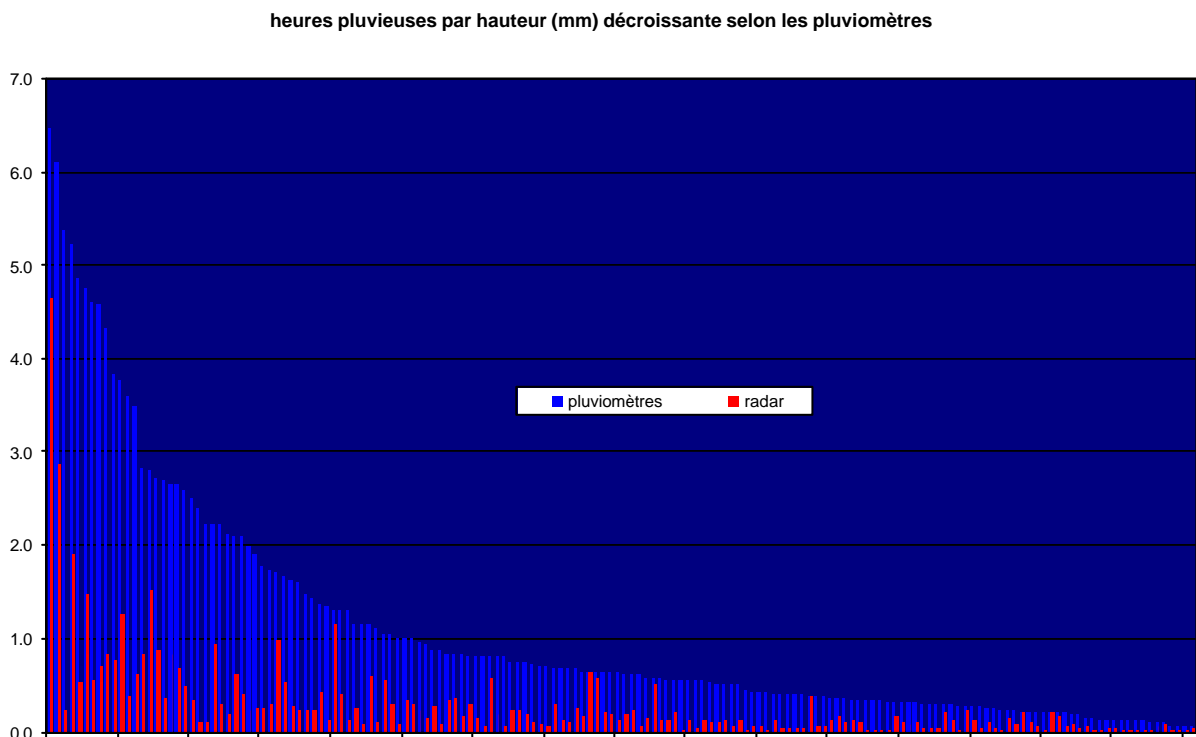
La seconde survenue mi-septembre 2003 n'a pu être résolue via la « hot-line » entre Nantes et Grenoble avec Frédéric Cazenave : les conditions d'accès et d'opération sur la toiture-terrasse étaient parfois aggravées par la météo et les redémarrages souvent infructueux ont induit de nombreuses (et vaines) navettes entre le radar et la salle de contrôle. L'option déplacement du spécialiste n'a pas été retenue pour des raisons d'organisation matérielle (et sans doute le syndrome du « chat échaudé » n'y est-il pas étranger) mais la perspective d'accéder aux images du Radar de Météo-France situé au nord de l'agglomération nantaise et à une distance équivalente s'est ouverte à ce moment.

Malgré cette aventure mouvementée, le système a enregistré une cinquantaine d'événements pluvieux entre novembre 2002 et septembre 2003, avant la panne définitive. Pour les derniers d'entre eux, soit depuis mi-juillet, un spectropluviomètre optique était présent sur le bassin (à côté du pluviomètre Perray).

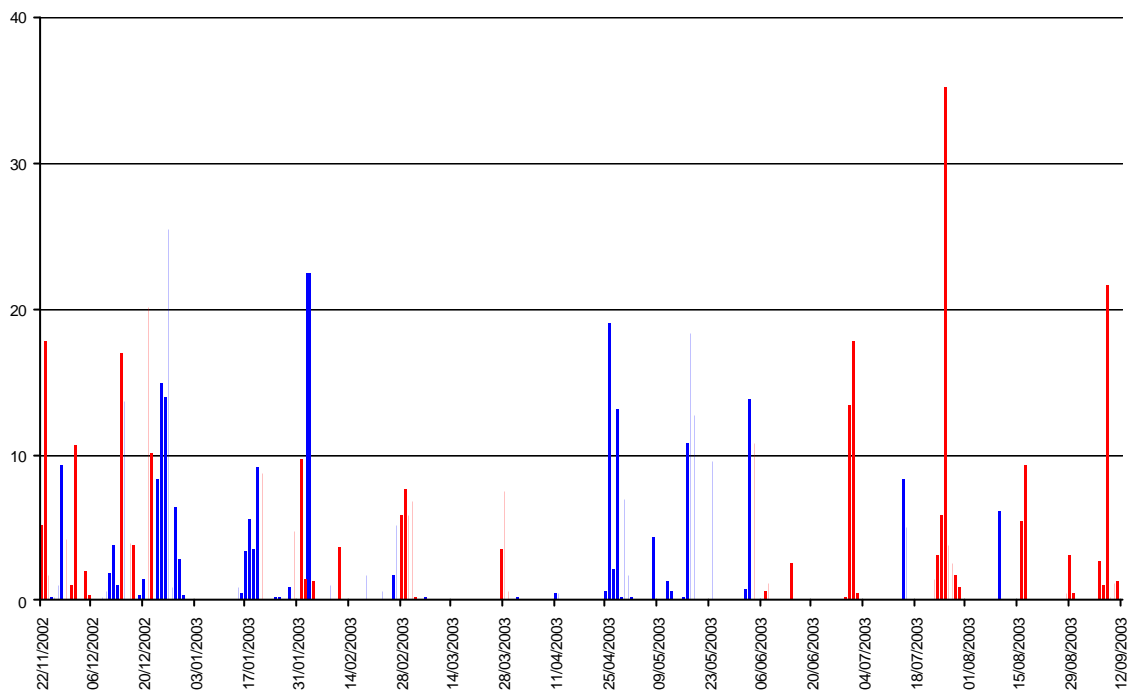
La première analyse des données (rapport en annexe) pour la période de novembre 2002 à février 2003, confirmée par les données enregistrées jusqu'en juillet 2003, montre une nette sous-estimation de l'intensité pluvieuse par le radar. Le rapport des mesures radar/pluviomètres se situe en moyenne à 30% et est très variable à l'échelle de 6 minutes, de l'heure ou de l'événement pluvieux. La dispersion est du même ordre que l'on regarde autour de chaque pluviomètre ou bien sur l'ensemble du bassin.



La première piste de correction envisagée était de relever la courbe de réponse $Z=f(V)$ du radar, liant la réflectivité au signal mais aucune tendance ne s'affirme comme l'indique le graphe suivant.



Le graphe ci-dessous reprend la pluie journalière (mm) vue par les pluviomètres avec, en rouge, les périodes où la mesure radar est disponible. Les premières absences de données correspondent à l'attente de l'autorisation d'émettre en présence du personnel du laboratoire. La trop courte et aléatoire autonomie du système en termes de stockage et de reprise sur panne n'a pas non plus permis son fonctionnement lors de la fermeture de l'établissement fin décembre. La période avril-mai correspond à la panne du contact rotatif. Enfin, les absences plus ponctuelles sont liés aux arrêts intempestifs du logiciel de pilotage ou à l'exclusion de données trop erratiques.



Il est donc nécessaire, après avoir complété la série par les dernières pluies d'août et septembre, de revenir sur les images brutes avec une correction plus complète. Les acquisitions radar par temps sec permettront d'éliminer les quelques échos fixes sur l'agglomération nantaise. Il convient ensuite de s'intéresser à l'atténuation du signal. Une première correction liée à l'atmosphère est déjà paramétrée dans le logiciel Frog : Il faut la vérifier et au besoin la redresser. La seconde est à faire pour chaque tir en redressant la mesure des portes situées derrière des cellules pluvieuses car l'atténuation du signal émis et réfléchi est sensible avec ce type de radar. On pourra alors de façon plus précise revenir à la comparaison avec les pluviomètres localement ou sur le bassin ainsi qu'avec le spectropluviomètre optique lorsque ses mesures granulométriques sont disponibles et valides. Si un tel processus converge, la courbe de réponse du radar pourra être recalibrée.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'objectif de l'étude qui était de constituer une banque de données expérimentale hydrologique incluant des données radar à haute résolution spatiale est atteint, malgré les inévitables difficultés qui surviennent durant de telles expérimentations de longue durée. Il s'agit maintenant de tirer parti de cette banque de données. Cette étape a été engagée avec la poursuite des recherches consacrées au rôle de la variabilité des précipitations sur les

incertitudes de bilan hydrologique. Le développement d'un modèle hydrologique urbain distribué et la réflexion théorique sur l'influence de la variabilité spatiale de la pluie sur la réponse d'un bassin versant urbain (thèse de F. Morena) se situent résolument dans ce cadre. Les données regroupées dans la banque de données serviront à valider le modèle hydrologique distribué et l'approche théorique proposée par F. Morena. Ces données permettront en outre de procéder à une analyse fine de la variabilité des précipitations aux échelles de l'hydrologie urbaine.

ANNEXE 1
BASSIN VERSANT DE L' AUBINIÈRE – ETUDE HYDROLOGIQUE ET
INSTRUMENTATION

1. INTRODUCTION GENERALE

L'urbanisation croissante au XIX^e siècle a conduit à une augmentation de la population urbaine, à un essor des grandes villes et par là même, à une modification du cycle de l'eau. La nécessaire gestion de l'eau dans la ville a engendré la construction de canalisations afin de collecter et évacuer les eaux des villes. Ces réseaux, à l'origine unitaires, puis séparatifs, ont provoqué une pollution brutale des milieux récepteurs. Ainsi, suite à cette démarche hygiéniste et avec l'arrivée des préoccupations environnementalistes, il s'est avéré nécessaire de prévoir le traitement des eaux usées sanitaires mais aussi celui des eaux pluviales, également polluées, notamment lors de leur ruissellement sur les surfaces imperméabilisées. Cependant, le traitement des eaux pluviales n'est réalisable et adapté qu'avec la connaissance précise des débits mis en jeu.

L'étude du comportement hydrologique d'un bassin versant afin d'appréhender son débit se fait en conjuguant expérimentation et modélisation. Le développement de modèles mathématiques se généralise en hydrologie urbaine. Ces modèles tentent de représenter la réponse en débit d'un bassin versant à un événement pluvieux donné. Le LCPC développe un modèle détaillé prenant en compte les caractéristiques physiques du milieu urbain et basé sur l'exploitation des banques de données urbaines à l'aide des SIG (Systèmes d'Information Géographiques). Ce modèle mathématique a été appliqué à un certain nombre de bassins versants nantais de petites tailles (de 4.6 ha à 180 ha) et a été validé grâce aux mesures réalisées sur ces bassins. Ces travaux se poursuivent donc avec l'instrumentation et la modélisation d'un bassin versant de plus grande taille. Il s'agit du bassin versant de l'Aubinière, ruisseau situé à l'est de l'agglomération nantaise, sur les communes de Nantes et de Sainte Luce sur Loire. L'étude de ce bassin versant constitue l'objet de ce stage et permettra une nouvelle application du modèle hydrologique. En parallèle à cette modélisation, il est envisagé de décrire de façon détaillée un certain nombre d'événements pluvieux sur ce bassin à l'aide d'un radar météorologique. En effet, l'utilisation d'un radar permettra de disposer d'une représentation spatialisée de la quantité d'eau tombée au sol. Le radar présente donc un intérêt en comparaison des pluviomètres actuellement utilisés qui ne donnent qu'une connaissance ponctuelle du volume d'eau précipité.

Ainsi, le bassin sera tout d'abord décrit physiquement à partir des données géographiques urbaines (topographie, parcelles cadastrales, voirie, réseaux d'eau pluviale) afin de délimiter et de caractériser l'occupation du bassin versant. Par la suite, le modèle hydrologique pourra être appliqué à ce bassin. Par ailleurs, un moyen de mesure du débit du ruisseau sera retenu et installé, en choisissant un point de mesure pertinent en fonction des conditions d'écoulement et des possibilités d'intervention sur ce site. La pluie sera également mesurée par un réseau de pluviomètres et par un radar météorologique

2. CONTEXTE DE L'ETUDE

L'urbanisation croissante a eu pour conséquence de modifier le cycle de l'eau. En effet, l'augmentation des surfaces imperméabilisées (voirie, bâti, etc.) a favorisé le ruissellement*

au détriment de l'infiltration*. Le ruissellement étant considéré comme la principale source de débit en milieu urbain, il est indispensable d'en connaître les mécanismes pour mieux comprendre la formation du débit et ainsi maîtriser la gestion des réseaux d'assainissement et des cours d'eau. C'est dans cette optique que l'utilisation des banques de données s'avère intéressante. La numérisation des renseignements concernant le cadastre, le bâti, les réseaux d'assainissement, la topographie, etc., ainsi que le développement des SIG (Systèmes d'Information Géographiques) qui permettent de traiter facilement ces données ont permis des applications en hydrologie des milieux urbanisés. Ainsi, au sein de la section Hydrologie en Milieu Urbain du LCPC, l'exploitation des informations issues des banques de données urbaines ont conduit à de multiples travaux :

- ?? Description précise du milieu urbain ;
- ?? Estimation des coefficients d'imperméabilisation ;
- ?? Délimitation automatique des bassins versants* ;
- ?? Modélisation à base physique de la réponse hydrologique des bassins ;
- ?? Etude de l'influence du développement de l'urbanisation ;

Définitions

Une donnée géographique est composée de deux éléments : l'objet géométrique et des renseignements alpha-numériques qui lui sont associés, également appelés attributs. Ces informations sont généralement regroupées dans des banques de données.

L'objet géométrique peut être de type polygone (c'est le cas des parcelles, du bâti, de l'emprise des voiries), polyligne (réseaux d'assainissement, axe des voies), ou point (points topographiques, exutoire* du bassin versant).

Les attributs qui lui sont associés peuvent concerner le nom des rues, la cote topographique, le diamètre des réseaux d'assainissement, etc.

Les Systèmes d'Information Géographiques ou SIG sont des logiciels informatiques capables de traiter, d'exploiter et de visualiser des données géographiques. Il existe plusieurs types de SIG, mais celui utilisé au sein du LCPC et lors de ce stage est le logiciel Mapinfo.

Données géographiques utilisées

Les données géographiques sont regroupées par tables (parcelle, voirie, bâti, réseaux EP, etc.). Les tables disponibles à la ville de Nantes et intéressantes du point de vue hydrologique sont :

- ?? Les parcelles cadastrales ;



NUMPAR

Les mots suivis de * sont définis en Annexe 2

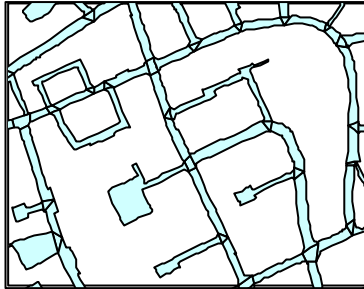
<input type="checkbox"/>	CL25
<input type="checkbox"/>	CI337
<input type="checkbox"/>	BR212
<input type="checkbox"/>	BR211
<input type="checkbox"/>	BO121
<input type="checkbox"/>	BO120

- ?? Les bâtis ;



NUMOBJ	
<input type="checkbox"/>	batCAR1
<input type="checkbox"/>	batCAR2
<input type="checkbox"/>	batCAR3
<input type="checkbox"/>	batCAR4
<input type="checkbox"/>	batCAR5
<input type="checkbox"/>	batCAR6
<input type="checkbox"/>	batCAR7
<input type="checkbox"/>	batCAR8

?? Les tronçons surfaciques de voirie qui représentent l'emprise de la voirie ;



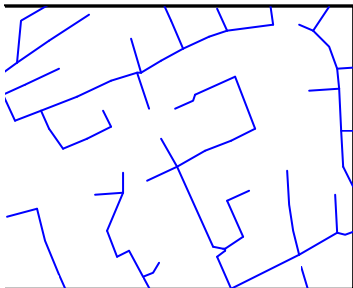
	NUMOBJ	LIBELLE
<input type="checkbox"/>	trCAR1	Rue de Grande Bretagne
<input type="checkbox"/>	trCAR2	Rue de Grande Bretagne
<input type="checkbox"/>	trCAR13	Rue Hélios
<input type="checkbox"/>	trCAR14	Rue Hélios
<input type="checkbox"/>	trCAR15	Rue Hélios
<input type="checkbox"/>	trCAR16	Rue Hélios
<input type="checkbox"/>	trCAR17	Rue Hélios
<input type="checkbox"/>	trCAR18	Rue Hélios

?? Les filaires de voie qui représentent l'axe de la voie ;



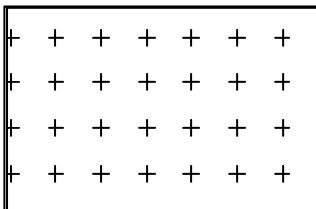
	NUMOBJ	xd	yd	xa	ya	ZAMO	ZAVA
<input type="checkbox"/>	fvCAR1	309 540,11	258 317,58	309 297	258 171,51	25,89	24,4
<input type="checkbox"/>	fvCAR2	309 629,36	258 527,58	309 540,11	258 317,58	27,46	25,8
<input type="checkbox"/>	fvCAR26	311 290,7	260 330,42	311 291,62	260 357,34	30,21	2
<input type="checkbox"/>	fvCAR27	310 940,93	260 176,67	310 902,2	260 169,79	29,14	28,7
<input type="checkbox"/>	fvCAR28	309 771,08	259 639,57	309 793,3	259 676,12	26,49	24,7
<input type="checkbox"/>	fvCAR29	310 210,1	260 252,28	310 188,45	260 231,54	25,83	25,6
<input type="checkbox"/>	fvCAR30	310 164,27	260 163,83	310 141,36	260 187,09	26,54	25,6
<input type="checkbox"/>	fvCAR31	310 097,25	260 187,09	310 118,33	260 208,52	25,46	25,2

?? Les réseaux d'eau pluviale ;

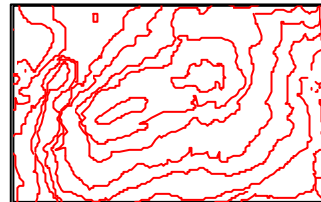


	NUMOBJ	xd	yd	xa	ya	ZAMO	ZAVA	diamètre
<input type="checkbox"/>	EP3189	308 944	258 235,4	308 973	258 255,2	27,5	26,8	40
<input type="checkbox"/>	EP3193	308 973	258 255,2	309 009,6	258 280	26,8	26,1	40
<input type="checkbox"/>	EP3194	309 009,6	258 280	309 032,4	258 283,3	26,1	25,4	40
<input type="checkbox"/>	EP3422	309 118,4	258 403,6	309 093,2	258 368	26,1	25,9	40
<input type="checkbox"/>	EP3424	309 093,2	258 368	309 071,9	258 342,2	25,9	25,65	40
<input type="checkbox"/>	EP3426	309 071,7	258 342	309 033,5	258 342,2	25,65	25,5	40
<input type="checkbox"/>	EP3423	309 033,5	258 303,3	309 032,4	258 283,3	25,5	25,4	40
<input type="checkbox"/>	EP3188	309 032,4	258 283,3	309 087,8	258 212,2	25,4	24,4	50

?? La topographie qui se trouve sous deux formes : les points cotés et les iso-lignes de niveau.

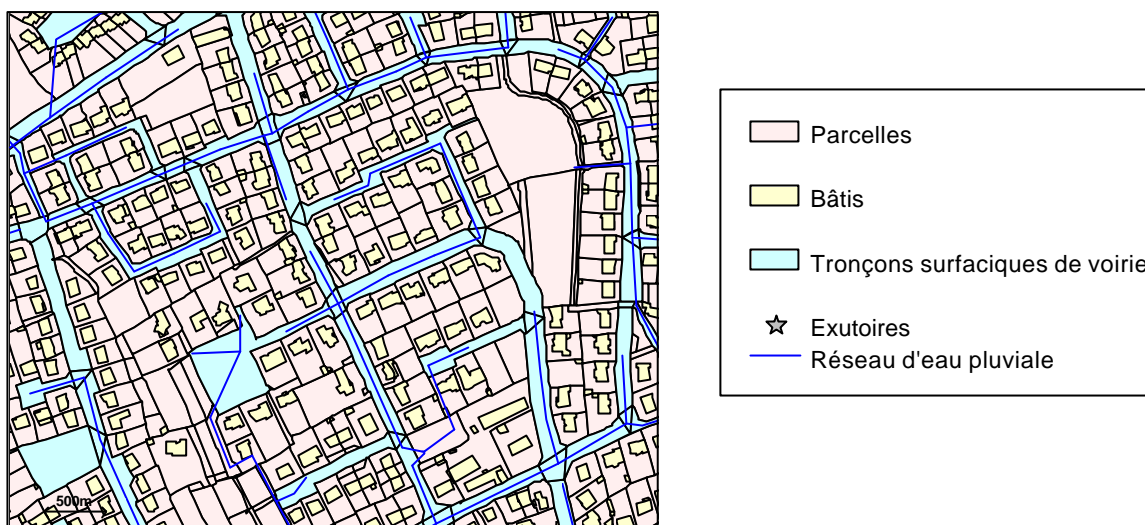


	CoordX	CoordY	Alti
<input type="checkbox"/>	307 320	250 680	20,5408
<input type="checkbox"/>	307 340	250 680	20,1168
<input type="checkbox"/>	307 360	250 680	21,3876
<input type="checkbox"/>	307 380	250 680	15,6952
<input type="checkbox"/>	307 400	250 680	20,9597
<input type="checkbox"/>	307 420	250 680	21,2348
<input type="checkbox"/>	307 440	250 680	21,0298
<input type="checkbox"/>	307 460	250 680	21,0688



	Z
<input type="checkbox"/>	26
<input type="checkbox"/>	26
<input type="checkbox"/>	26
<input type="checkbox"/>	26
<input type="checkbox"/>	24
<input type="checkbox"/>	24
<input type="checkbox"/>	24

Les objets géométriques de chaque table sont superposables aux autres afin de reconstituer le milieu urbain.



3. ANALYSE HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE L'AUBINIÈRE

Le ruisseau de l'Aubinière se jette dans la Loire, rive droite, juste en amont de Nantes. Ce cours d'eau, essentiellement urbain, prend sa source sur la commune de Carquefou dans la Zone Industrielle, puis coule en direction de la Loire en limite communale de Nantes et de Sainte-Luce-sur-Loire. Il a une longueur d'environ 4450 m et est busé sur toute la commune de Carquefou ainsi qu'au passage des voies de communication (autoroute, périphérique, routes, chemins, voies ferrées, etc.). Deux ruisseaux se déversent dans l'Aubinière :

?? Les Gohards, situé sur la commune de Nantes ;

?? Le Plessis Maillard, situé sur la commune de Sainte-Luce-sur-Loire.

Deux bassins versants ayant pour exutoire le ruisseau des Gohards ont déjà fait l'objet d'études au sein de la Section Hydrologie en Milieu Urbain. Un premier bassin versant a été déterminé en prenant comme exutoire une canalisation de diamètre 1600 mm qui se déverse directement dans le ruisseau de Gohards. Ce bassin, appelé bassin des Gohards a une superficie de 180 ha. Il est instrumenté par un débitmètre placé dans la canalisation et par deux pluviomètres. Un deuxième bassin versant a ensuite été étudié. L'exutoire choisi se situe plus en aval du ruisseau de façon à étendre la superficie du bassin qui atteint alors 460 ha. Il s'agit du bassin versant des Grands Gohards qui englobe le bassin versant de Gohards, mais qui n'a pas été instrumenté. Le bassin versant de l'Aubinière va être instrumenté. Son exutoire correspondra donc au site de mesure choisi pour implanter un débitmètre ou réaliser des jaugeages .

L'urbanisation rencontrée sur le bassin versant de l'Aubinière est variée. Le bassin présente des zones très imperméabilisées telles la Zone Industrielle de Carquefou, ou le centre de Gros, Zone d'Activité située au nord de Nantes, mais aussi des zones pavillonnaires, et des zones maraîchères qui occupent des parcelles de plus grandes tailles. Plusieurs voies de communication telles que le périphérique, l'autoroute A11, la voie ferrée et de grands boulevards traversent également le bassin.

Collecte des données géographiques

Les données géographiques concernant le cadastre, la voirie, les bâtis et la topographie ont été transmises par le service Géomatique de la Direction des Informations Géographiques (ou DIG) de la Communauté Urbaine de Nantes. Une convention a été signée entre le LCPC et la Communauté Urbaine de Nantes afin d'officialiser ces échanges d'informations. Cependant, le service Géomatique n'a pas été en mesure de nous fournir le tracé des réseaux d'eau pluviale des communes de Carquefou et de Sainte-Luce-sur-Loire. En effet, la Communauté Urbaine de Nantes a été créée il n'y a que deux ans si bien que le service Géomatique, qui doit centraliser et homogénéiser les informations, se trouve encore en phase de collecte et de numérisation des données de certaines communes de la Communauté Urbaine de Nantes, notamment Sainte-Luce-sur-Loire et Carquefou. C'est pourquoi il a fallu directement traiter avec les pôles locaux de la Communauté Urbaine de Nantes qui, avant la diffusion auprès du service Géomatique, ont centralisé les informations existantes au sein des communes elles-mêmes. Finalement, après plusieurs rencontres avec les intervenants locaux, les plans des tracés des réseaux d'eau pluviale qui existaient ont été obtenus sous forme papier.

Traitement des données

En ce qui concerne la topographie, un maillage précis 20 m ? 20 m des points altimétriques nous a été fourni. Ce maillage a été réalisé à partir de photos aériennes. Cette table n'a nécessité aucun travail de correction. Il a suffi de vérifier que les points avaient été repérés dans le même référentiel que les autres tables, à savoir le référentiel terrestre, Lambert II Paris. Pour les tables des parcelles et des tronçons surfaciques de voirie, il a fallu vérifier que toute la superficie était entièrement décrite, et éliminer les superpositions d'objets. La majeure partie du travail a concerné les tables de filaires (filaires de voie et filaires des réseaux d'assainissement). Il a consisté à vérifier que les filaires étaient de type polyligne, que les extrémités étaient connectées les unes aux autres, et que les intersections correspondaient à des extrémités de filaires. Pour les filaires de voie, le programme informatique de modélisation des bassins versants (Rodriguez, 1999) nécessite en entrée les cotes amont et aval des extrémités des filaires. Pour cela, une interpolation a été menée à partir des points du maillage topographique. Cette opération a été réalisée avec le logiciel de calcul mathématique, Matlab. La table des filaires des réseaux d'eau pluviale de la commune de Nantes était en général complète, les cotes de fond de radier et les diamètres des canalisations étant fournis dans les attributs. Il a tout de même fallu vérifier la cohérence des renseignements fournis, au niveau des diamètres et du cheminement gravitaire de l'eau, et ainsi éventuellement rectifier les données. Pour les communes de Carquefou et de Sainte Luce, un travail de digitalisation du tracé et des informations concernant le réseau d'assainissement a été nécessaire. Les erreurs décelées dans les cotes radier ont été corrigées et les cotes manquantes ont été calculées à l'aide du maillage topographique, en partant du principe que les réseaux d'assainissement suivent le plus souvent la topographie du sol. Le programme informatique ne reconnaissant que les canalisations circulaires, il a également fallu convertir les fossés et les collecteurs ovoïdes en leurs équivalents circulaires. Pour cela, l'utilisation de tables indiquant la pente et le débit en fonction du type de canalisation a paru judicieuse afin de conserver les mêmes conditions d'écoulement (voir annexe 4). Le travail le plus conséquent a concerné la mise au point du réseau de la commune de Sainte Luce. Les plans de recollement mis à notre disposition présentaient plusieurs manques (des canalisations ne se jetant dans aucun cours d'eau ou canalisation) et incohérences (essentiellement pour les cotes de fond de radier), ou suscitaient des interrogations (diamètres des fossés,

fonctionnement des bassins d'orage). Les rencontres avec le personnel du Service Assainissement des pôles locaux ainsi que de nombreuses visites sur le terrain ont permis de répondre à ces interrogations et de compléter les plans qui avaient été prêtés.

Le programme mis au point par F. Rodriguez permet la modélisation hydrologique des bassins versants urbanisés. Cependant, avant de procéder à cette modélisation de la transformation de la pluie en débit, plusieurs étapes intermédiaires sont nécessaires :

?? La caractérisation des Eléments Hydrologiques ;

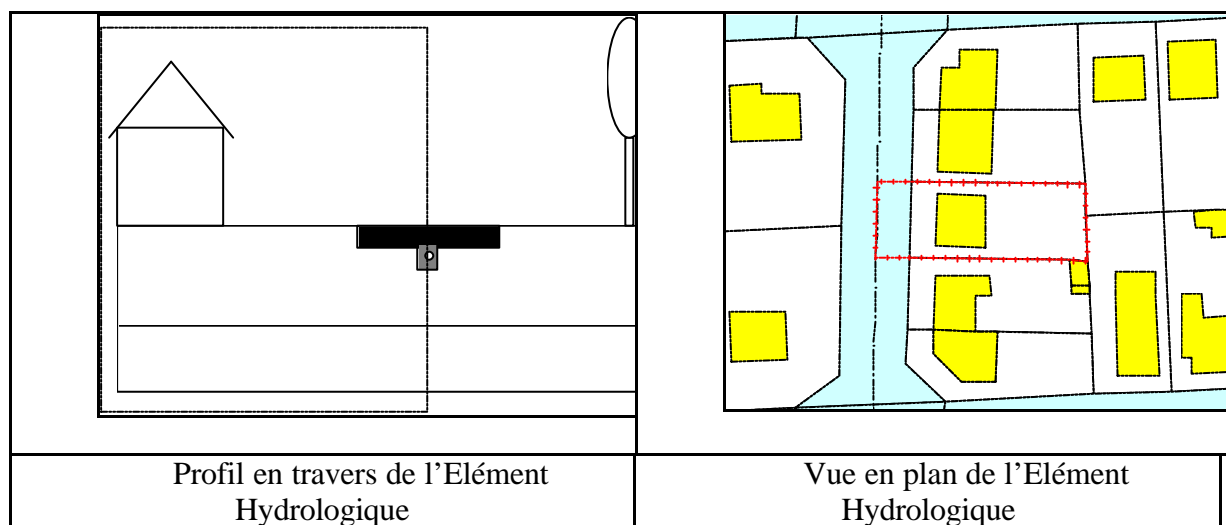
?? La construction du graphe hydrologique qui indique le cheminement de l'eau en surface puis dans les réseaux ;

?? La délimitation du bassin versant.

Caractérisation des Eléments Hydrologiques

La discrétisation du milieu étudié dépend du type de modélisation choisie. Afin d'appréhender au mieux le comportement des bassins versants urbains, il est cependant nécessaire d'opter pour une discrétisation fine. C'est pourquoi la méthode utilisée repose sur un élément unitaire appelé Elément Hydrologique.

L'Elément Hydrologique comporte une parcelle cadastrale à laquelle est associée l'éventuelle portion de voirie qui lui est adjacente et la partie sous-jacente du collecteur du réseau d'eau pluviale.



Chaque Elément Hydrologique est décrit par un certain nombre de caractéristiques :

- Le centre de gravité C_g qui correspond au centre de gravité du plus grand bâtiment de la parcelle cadastrale si elle est bâtie ou au centre de gravité de la parcelle cadastrale si elle est nue ;

- Le point de connexion P_c qui correspond à la projection orthogonale de C_g sur le filaire de voie adjacent. P_c permet de relier l'Elément Hydrologique au graphe hydrologique sur lequel repose la modélisation de la fonction de transfert ;

- La surface totale de l'Elément Hydrologique $S_{tot} = S_{parcelle} + S_{voie\ adjacente}$. Ainsi, la surface du bassin versant correspond exactement à la somme des surfaces totales de tous les Eléments Hydrologiques ;

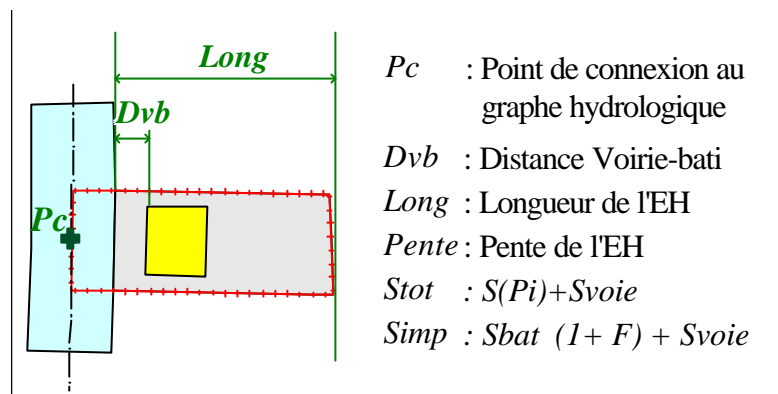
- La surface bâtie $S_{bâti}$ qui représente la somme des surfaces de tous les bâtiments présents sur la parcelle cadastrale ;

- La surface imperméabilisée $S_{imp} = S_{voie\ adjacente} + (1+F) S_{b\grave{a}ti}$ où F est un facteur représentant les surfaces imperméabilisées autres que la voirie et les bâtiments (parkings, terrasses, chemin bitumé, etc.). Ce coefficient est déterminé par des enquêtes de terrain et prend des valeurs plus fortes pour l'habitat collectif (par rapport à l'habitat individuel). Pour le bassin de l'Aubinière, ce coefficient F a été estimé à 0.55, en référence aux valeurs prises pour d'autres bassins versants de l'agglomération (Rodriguez, 1999).

- La distance voirie-bâti D_{vb} ;
- Le point de fond de parcelle P_f défini comme le point de la parcelle le plus éloigné du point de connexion ;
- La longueur $Long$, distance entre le point de fond de parcelle P_f et le point de connexion P_c ;
- La pente ;



Elément Hydrologique



Caractéristiques des Eléments Hydrologiques

Ce programme nécessite donc en entrée les tables des parcelles cadastrales, des bâtis, des tronçons surfaciques de voirie et des filaires de voie.

Construction du graphe hydrologique

La construction du graphe hydrologique consiste à déterminer le cheminement de l'eau à partir de l'endroit où elle tombe jusqu'à l'exutoire. L'eau va tout d'abord s'écouler en surface de la parcelle jusqu'à la voirie, où elle est injectée au point de connexion défini lors de la caractérisation des Eléments Hydrologiques. L'eau va ensuite cheminer le long de la voirie jusqu'à un avaloir par lequel elle rejoindra le réseau d'assainissement. Son écoulement devient alors souterrain et se poursuit dans les canalisations d'eau pluviale ou dans les ruisseaux, jusqu'à l'exutoire du bassin versant.

Le programme de construction du graphe hydrologique se décompose en trois étapes :

- ?? L'élaboration du graphe de la voirie ;
- ?? La réalisation de l'interface entre la voirie et le réseau d'assainissement ;
- ?? L'élaboration du graphe de l'assainissement.

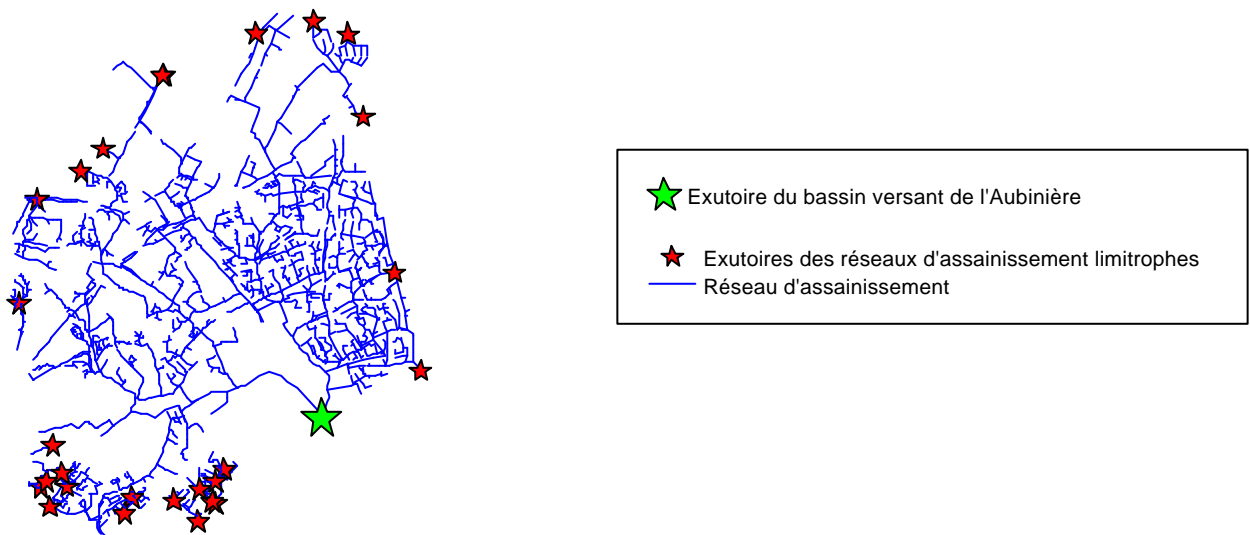
Pour cela, le programme nécessite en entrée les filaires de voie et les filaires du réseau d'eau pluviale.

Pour l'élaboration des deux graphes, le filaire aval de chaque filaire est déterminé en fonction des coordonnées et des cotes des extrémités des filaires, en retenant le filaire aval correspondant à la plus grande pente si un choix entre deux filaires se présente.

L'interface entre la voirie et le réseau d'assainissement consiste à associer à chaque filaire de voirie, un filaire du réseau d'assainissement. L'eau ruisselle le long de la voirie jusqu'à un avaloir qui lui permet de rejoindre le réseau d'assainissement. Cependant, la position exacte des avaloirs n'est pas connue. Il est donc admis qu'un filaire de voie est directement relié à un filaire du réseau d'eau pluviale si leurs extrémités sont suffisamment proches. Ainsi, chaque filaire est associé à un filaire aval, et le cheminement de l'eau peut être déterminé de proche en proche jusqu'à l'exutoire.

Délimitation du bassin versant

Délimiter un bassin versant consiste à déterminer les surfaces qui contribuent au ruissellement c'est à dire à la formation du débit en un point connu, appelé exutoire. Pour notre modélisation, les surfaces sont constituées des Eléments Hydrologiques. La délimitation est possible grâce aux deux étapes réalisées précédemment, à savoir la caractérisation des Eléments Hydrologiques puis la construction du graphe hydrologique. Pour chaque exutoire, le programme détermine les filaires de voie et les filaires du réseau d'assainissement qui sont directement reliés à l'exutoire. A partir du graphe hydrologique, les filaires de voie associés aux filaires du réseau d'assainissement sélectionnés précédemment sont déterminés, puis les Eléments Hydrologiques connectés à ces filaires de voie. Pour délimiter avec précision un bassin versant, l'exutoire du bassin étudié ne suffit pas. Il est indispensable de créer des exutoires pour les réseaux limitrophes afin d'entourer le bassin versant étudié par d'autres bassins versants fictifs, ce qui permet d'affiner la délimitation et d'éviter une surestimation des limites du bassin étudié.



Réseaux d'eau pluviale et exutoires du bassin versant et des bassins limitrophes

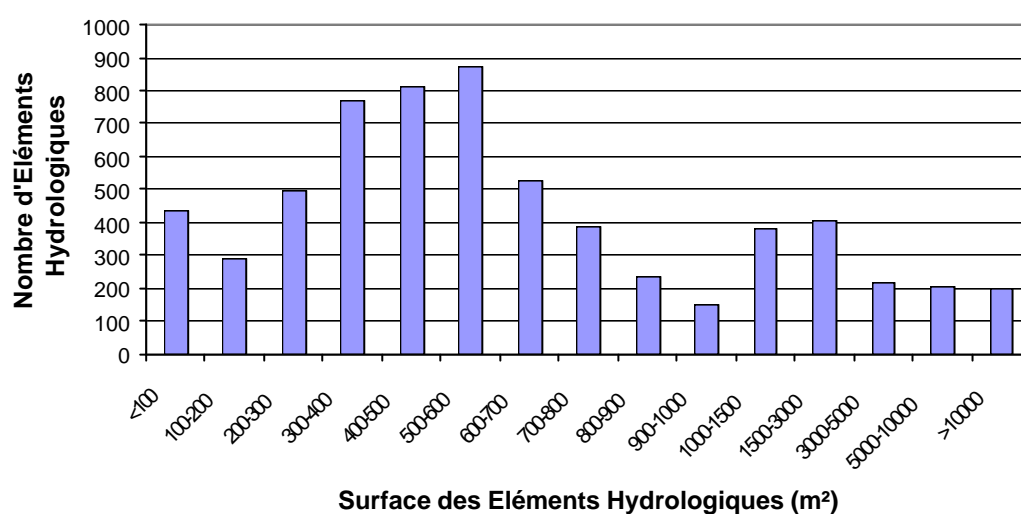
Limites et caractéristiques du bassin versant de l'Aubinière

Après plusieurs essais suivis de la correction des données géographiques, les limites du bassin versant de l'Aubinière ont été obtenues. Le bassin versant a une superficie de 1095 ha et s'étend sur trois communes : Nantes, Sainte-Luce-sur-Loire, et Carquefou. Cependant, la

majeure partie du bassin se situe sur la commune de Nantes. En ce qui concerne Carquefou, seule la zone Industrielle située au sud de la commune fait partie du bassin. Les caractéristiques du bassin versant ont pu être déterminées à partir des résultats obtenus suite à la caractérisation des Eléments Hydrologiques (EH) et à la construction du graphe hydrologique :

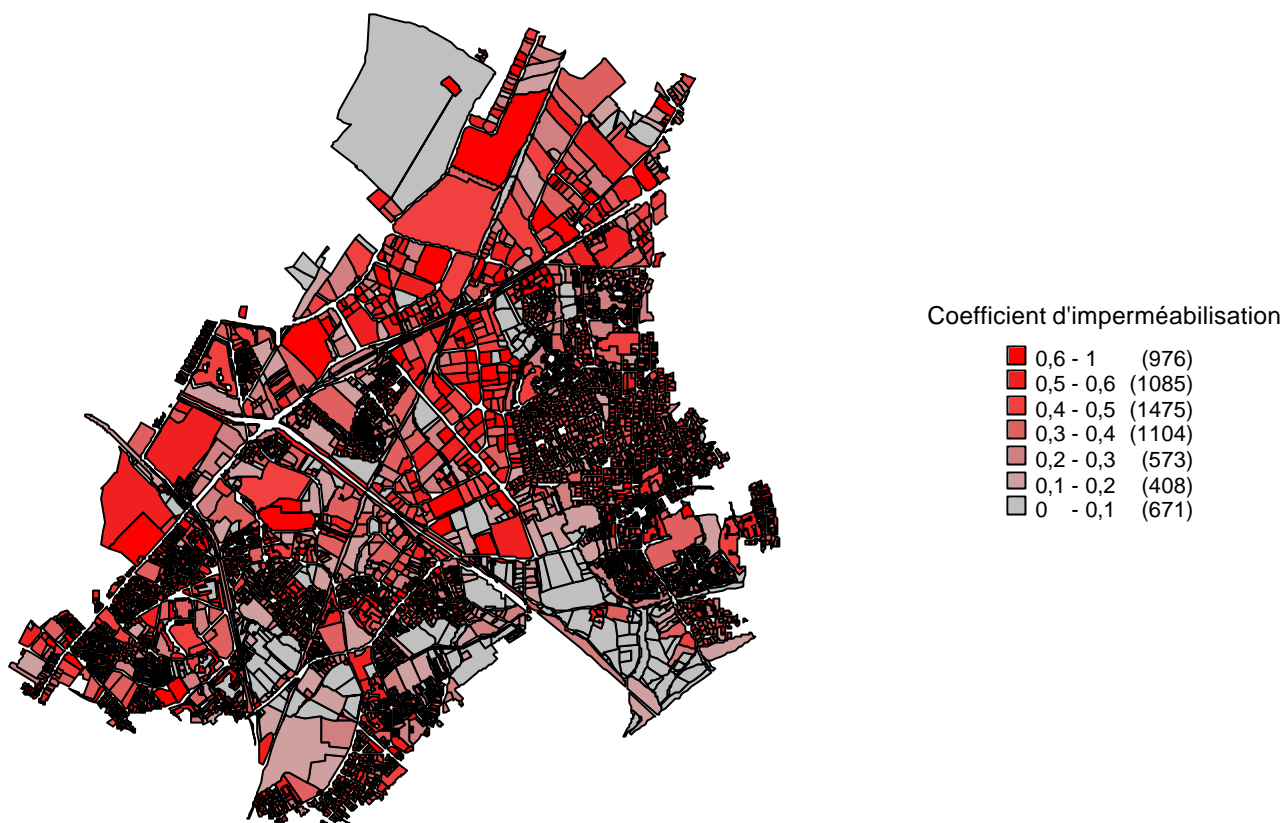
Nombre de parcelles du bassin versant	Surface totale (m ²)	Surface imperméabilisée totale (m ²)	Coefficient d'imperméabilisation moyen	Surface moyenne des EH (m ²)
6227	10 953 613	4 096 531	0.416	1 759

Distribution des surfaces



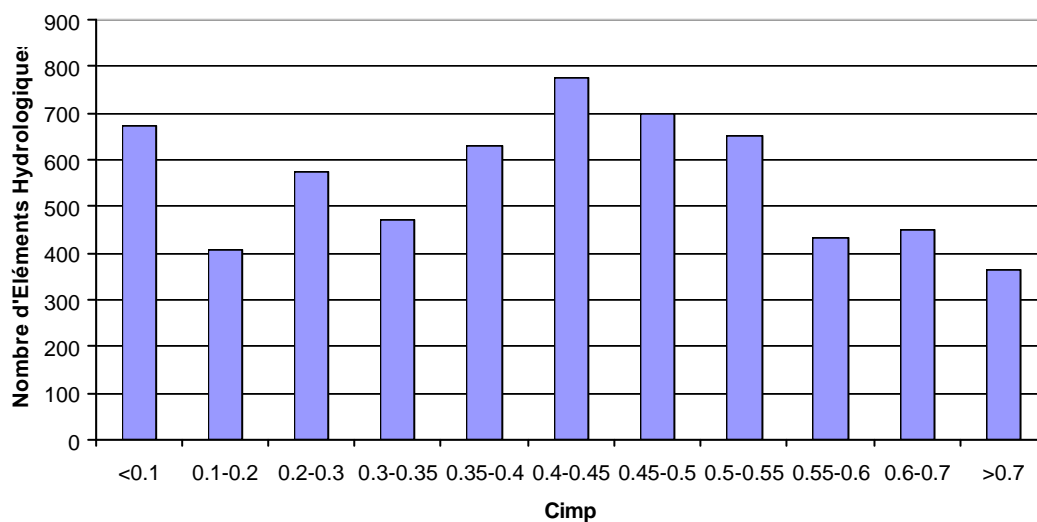
La plupart des Eléments Hydrologiques ont une surface comprise entre 200 et 700 m², alors que la surface moyenne des Eléments hydrologiques est de 1754 m². Cette surface moyenne est calculée en divisant la superficie totale du bassin versant par le nombre d'Eléments Hydrologiques qui le compose. Ainsi, certaines parcelles ayant une grande superficie (supérieure à 3000 m²) et bien qu'étant moins nombreuses, contribuent largement à augmenter la superficie moyenne des Eléments Hydrologiques. Cet histogramme traduit bien l'occupation très diversifiée du bassin versant.

Le coefficient d'imperméabilisation* du bassin versant de l'Aubinière est donc de 0.42, ce qui est légèrement supérieur à celui du bassin des Gohards qui est de 0.38. En effet, les parcelles du bassin versant de l'Aubinière qui n'appartenaient pas à celui des Gohards sont fortement urbanisées (Zone Industrielle de Carquefou, centre ville de Sainte Luce) et présentent donc des surfaces imperméabilisées importantes, d'où un G_{imp} plus élevé. Cette explication est confirmée par l'étude de la distribution spatiale des coefficients d'imperméabilisation qui a mis en évidence la présence des coefficients les plus élevés (de 0.55 à 0.65) au nord du bassin au niveau de la Zone Industrielle de Carquefou. En revanche, le sud du bassin étant très peu urbanisé (présence de bois, de parcelles nues ou marécageuses, etc.), les coefficients d'imperméabilisation sont quasiment nuls.



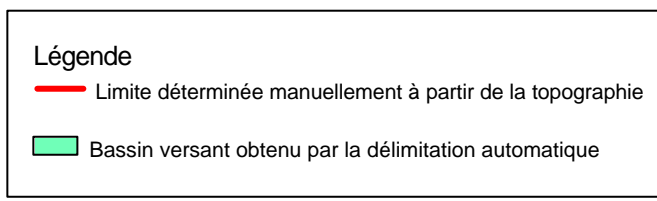
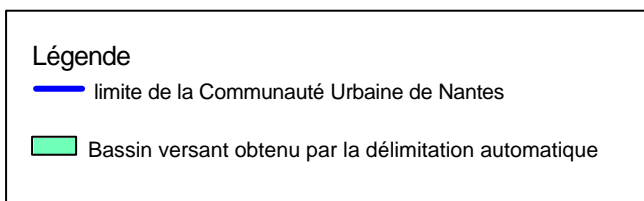
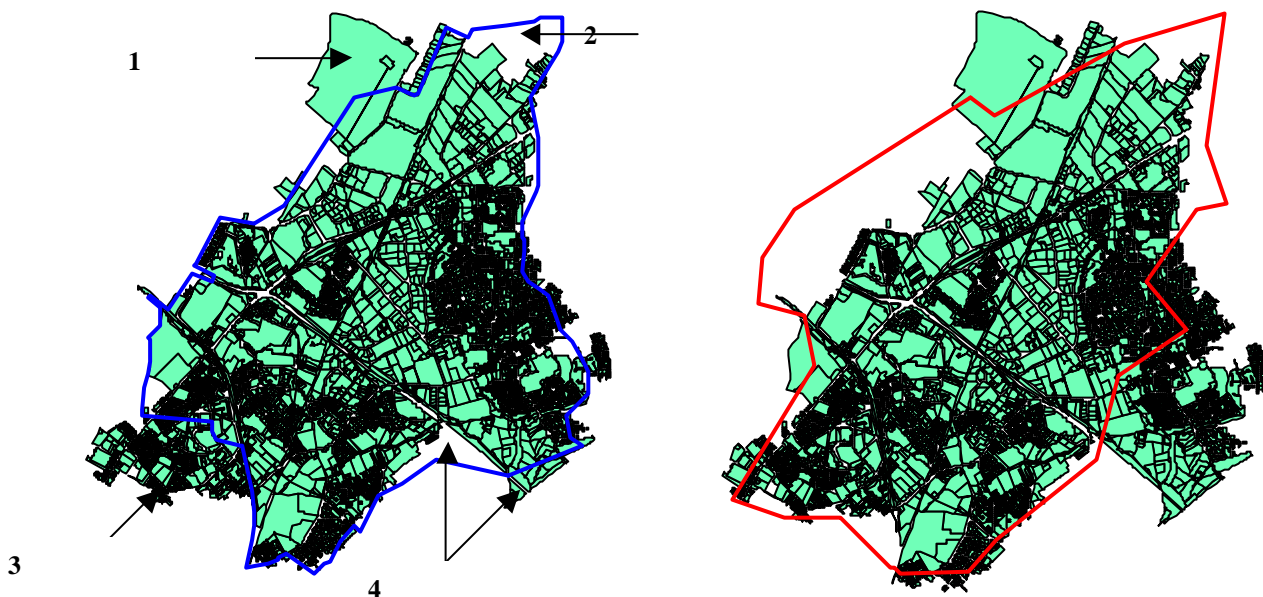
Distribution spatiale du coefficient d'imperméabilisation

Distribution du coefficient d'imperméabilisation



On remarque que la distribution des coefficients d'imperméabilisation est très étalée, entre 0 et presque 1, ce qui confirme l'occupation variée du bassin, avec des zones fortement urbanisées et des zones plus rurales. On retrouve cependant un pic pour des valeurs comprises entre 0.4 et 0.45, ce qui correspond au coefficient d'imperméabilisation moyen de 0.42. On peut également noter un nombre important de parcelles au coefficient d'imperméabilisation faible (<0.1). Ces parcelles correspondent aux zones peu urbanisées.

Une comparaison entre les limites du bassin versant obtenu par la délimitation automatique et celles obtenues manuellement (voir dessin de droite) montre des différences importantes. Cependant, la délimitation manuelle donne des résultats satisfaisants quant à la forme générale et à la superficie (on trouve 1082 ha lors de la délimitation manuelle) du bassin versant. Les différences sont dues à la non prise en compte du réseau d'assainissement. La comparaison entre les limites du bassin versant fournies par la Communauté Urbaine de Nantes et les limites résultant de la délimitation automatique mise au point par F. Rodriguez donne de meilleurs résultats (voir dessin de gauche). En effet, suite à diverses études sur l'Aubinière, la Communauté Urbaine de Nantes a délimité le bassin versant de l'Aubinière manuellement à partir de la topographie et du réseau d'eau pluviale.

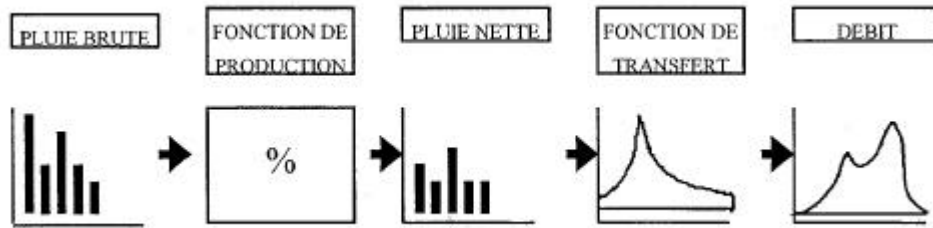


4. MODELISATION DU COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE L'AUBINIÈRE

Introduction

Modéliser le comportement hydrologique d'un bassin versant consiste à reproduire la transformation de la pluie brute tombée sur le bassin en débit à l'exutoire. Les processus qui interviennent sont classiquement traduits par :

- ?? La fonction de production ;
- ?? La fonction de transfert.

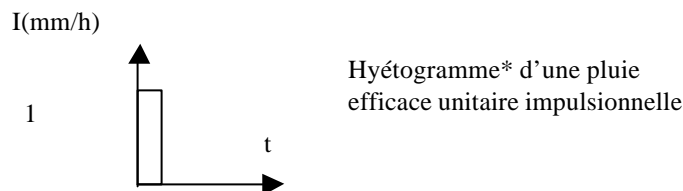


La fonction de production est la fonction mathématique permettant de déduire la pluie efficace de la pluie brute. La pluie brute correspond aux précipitations mesurées au sol par le pluviomètre ou le radar météorologique. La pluie efficace est la pluie disponible au ruissellement. La fonction de production correspond donc à une estimation des différentes pertes telles l'interception*, l'évapotranspiration* et l'infiltration*. Actuellement, la fonction de production est modélisée très simplement, et les différents types de pertes ne sont pas explicitement calculés. L'hypothèse adoptée est :

$$P_{eff} = C_{imp} \cdot P_{brute}$$

avec P_{eff} : Pluie efficace, C_{imp} : Coefficient d'imperméabilisation, et P_{brute} : Pluie brute. Cette hypothèse est justifiable car le coefficient d'imperméabilisation représente la part imperméabilisée de la surface de l'Elément Hydrologique, qui est la principale source du ruissellement en milieu urbain. On considère alors que les gouttes d'eau qui tombent sur une surface non imperméabilisée sont infiltrées dans le sol ou s'évaporent. Il s'agit donc d'une hypothèse simplificatrice mais qui est communément admise en hydrologie urbaine.

La fonction de transfert représente la transformation de la pluie efficace en un débit à l'exutoire. Les variations dans le temps de ce débit sont représentées par un hydrogramme*. La fonction de transfert se traduit par un l'hydrogramme unitaire qui représente la réponse hydrologique du bassin versant à une pluie efficace unitaire et impulsionnelle.



Ainsi, connaissant l'hydrogramme unitaire, le débit résultant d'une pluie non unitaire peut être calculé (Lechat, 1999) :

$$Q(t) = u(t) \cdot P_{eff}(t) \cdot S$$

avec $Q(t)$: débit à l'instant t , $u(t)$: hydrogramme unitaire, $P_{eff}(t)$: pluie efficace et S : surface du bassin versant

Dans le programme de modélisation utilisé, la fonction de transfert correspond à la distribution des temps de parcours, c'est à dire à la répartition des temps mis par les gouttes d'eau pour s'écouler depuis les Elément Hydrologique jusqu'à l'exutoire. Le temps de transfert est donc égal à

$$t = \frac{d}{v}$$

avec t : temps de transfert, d : longueur du cheminement, v : vitesse de l'écoulement.

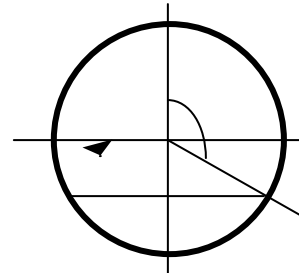
Les longueurs des cheminements hydrologiques depuis chaque Elément Hydrologique ont été déterminées précédemment lors de la caractérisation des Eléments Hydrologiques et de la construction du graphe hydrologique

La vitesse est calculée par la formule de Manning-Strickler :

$$v = KR_h^{2/3} p^{1/2}$$

avec K : coefficient de rugosité, R_h : rayon hydraulique, p : pente ;

$$R_h = \frac{\text{section mouillée}}{\text{périmètre mouillé}} = \frac{R}{2} \frac{\sin \theta \cos \theta}{1 + \sin \theta}$$



On distingue trois modes de calcul des vitesses :

1) la vitesse d'écoulement sur les Eléments Hydrologiques entre le centre de gravité de l'Elément Hydrologique et le point de connexion P_c ;

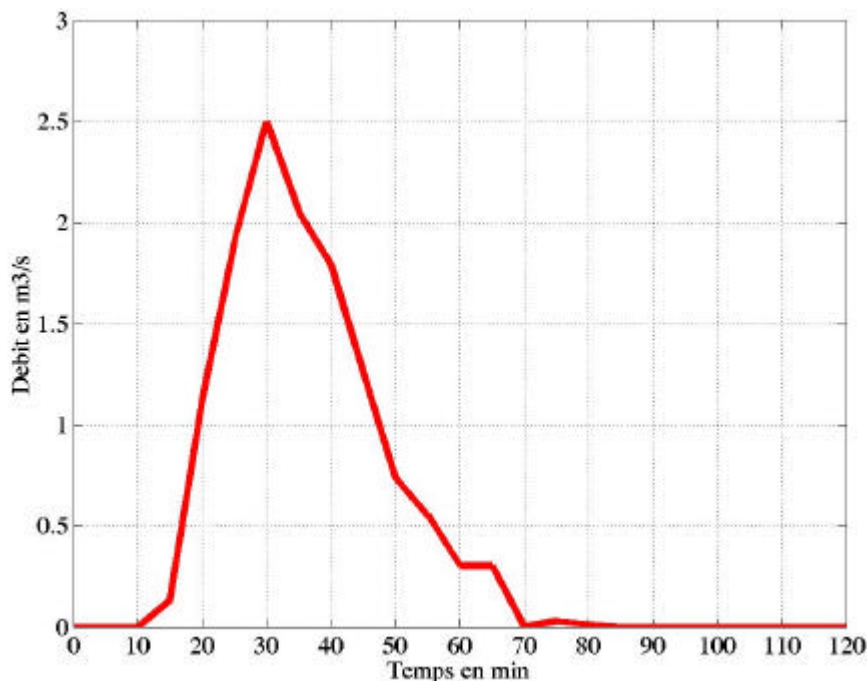
2) la vitesse d'écoulement en surface sur la voirie. Dans ce cas, les hypothèses retenues sont : l'eau s'écoule dans les caniveaux ; les caniveaux sont assimilés à des canalisations circulaires de diamètre 250 mm ; le taux de remplissage de la canalisation est de 0.5 (1/2) et est considéré comme uniforme pour tous les caniveaux ; la rugosité est : $K=62.5$.

3) la vitesse d'écoulement dans le réseau d'assainissement ou dans les fossés : le diamètre est connu pour chaque filaire ; $K=66.7$ pour les canalisations, $K=40$ pour les fossés ;

Dans cette étude, le taux de remplissage est choisi uniforme et égal à 0.5, ce qui correspond à des conditions pluviométriques déjà assez importantes (les collecteurs sont remplis à moitié).

Résultats de modélisation

L'hydrogramme unitaire du bassin versant est représenté par la figure ci-dessous



Une comparaison des hydrogrammes unitaires des bassins versants des Gohards, des Grands Gohards et de l'Aubinière peut être faite (voir graphique).

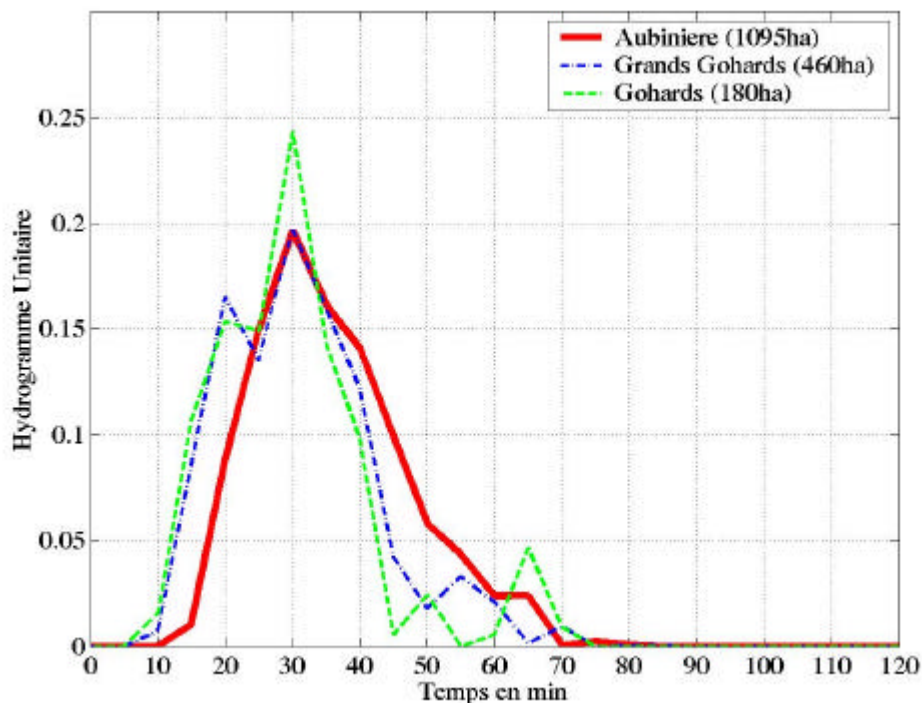
- Les sous-bassins répondent plus vite que celui de l'Aubinière, avec un premier pic à 20 min ;

- Le pic principal se produit pour les trois bassins au même instant, à 30 min. En effet, la zone du bassin versant située sur la commune de Sainte Luce se trouve approximativement à la même distance de l'exutoire que le bassin des Grands Gohards. L'eau provenant de ces deux sous-bassins de l'Aubinière se retrouve donc au même instant à l'exutoire ;

- Le pic principal du petit bassin versant des Gohards est plus fort que ceux des deux autres bassins versants. La distribution des distances à l'exutoire est plus resserrée sur un petit bassin versant, donc la distribution des temps de parcours est également plus resserrée. L'hydrogramme unitaire est donc moins étalé, avec un pic plus fort.

- L'écart au niveau de la queue de l'histogramme est dû à la contribution des Eléments Hydrologiques situés sur la commune de Carquefou. Ces Eléments Hydrologiques sont les plus éloignés de l'exutoire. Une goutte qui tombe sur cette zone mettra donc plus de temps à rejoindre l'exutoire, ce qui explique le temps de concentration*du bassin versant de l'Aubinière plus long que celui des bassins des Gohards et des Grands Gohards ;

Ces résultats indiquent un temps de concentration du bassin versant de l'Aubinière de 70 min.



Les travaux de modélisation pourront être poursuivis à partir des hydrogrammes de pluie brute mesurés par les pluviomètres ou le radar. Les débits simulés pourront alors être comparés aux débits mesurés expérimentalement.

5. INSTRUMENTATION DU BASSIN VERSANT

Ce travail s'inscrit donc dans le cadre des travaux consacrés à la modélisation hydrologique des bassins versant urbains et à l'étude de l'influence de la variabilité de la pluie. Il s'agit notamment d'appliquer le modèle hydrologique mis au point par F. Rodriguez. Pour cela, il faut pouvoir comparer le débit simulé par application du modèle hydrologique au débit réel mesuré in-situ, d'où l'intérêt d'instrumenter le bassin versant de l'Aubinière de façon à mesurer la pluie et le débit et d'effectuer un suivi des précipitations afin de les associer aux mesures de débits réalisées simultanément.

Pluviométrie

Actuellement, deux techniques de mesure de la quantité de pluie précipitée sont classiquement utilisées : le pluviomètre et le radar météorologique. Malgré le développement de l'utilisation du radar météorologique pour connaître l'intensité pluvieuse, la technique la plus couramment utilisée reste celle du pluviomètre.

Le pluviomètre le plus répandu en France est le pluviomètre à augets basculeurs (Hammouda, 1995). Il s'agit d'un appareil de mesure du cumul des précipitations atmosphériques atteignant le sol. Il est composé d'un cône de réception qui canalise l'eau provenant des précipitations. L'eau s'écoule ensuite à l'intérieur du pluviomètre dans un petit entonnoir, puis à travers un filtre pour finalement se déverser dans l'un des deux augets. L'eau remplit alors alternativement les deux augets symétriques qui basculent sous le poids de l'eau. Chaque basculement provoque la fermeture d'un circuit électrique, produisant une impulsion électrique qui est enregistrée et qui permet de déterminer la hauteur d'eau précipitée pendant un intervalle de temps. Les augets les plus courants sont réglés pour basculer à 20 g, ce qui correspond à la présence de 0.2 mm d'eau dans l'auget, pour un cône de réception de 1000 cm.

Le problème majeur du pluviomètre concerne le site d'implantation, notamment en milieu urbain. En effet, en ville, il est difficile de satisfaire les critères d'implantation imposés par l'OMM (Organisation Météorologique Mondiale), à savoir un emplacement situé à plus de deux fois la hauteur des obstacles qui l'entourent, à l'abri du vent mais loin de tout obstacle interceptant les précipitations, à l'abri du vandalisme, etc. En pratique, le pluviomètre est généralement installé sur la toiture terrasse d'un bâtiment public, dans un endroit dégagé, loin des arbres ou des bâtiments plus hauts qui pourraient intercepter la pluie. Il est également nécessaire que le site soit facilement accessible pour permettre une maintenance régulière de l'appareil et pour collecter les données enregistrées. Pour finir, le pluviomètre ne donne qu'une mesure ponctuelle de la hauteur d'eau précipitée, or la pluie n'est pas spatialement uniforme. On peut alors minimiser l'erreur en installant plusieurs pluviomètres sur le bassin versant et en réalisant la moyenne des hauteurs d'eau mesurées, mais cette technique est souvent limitée par des considérations économiques. Ainsi, l'erreur liée à l'hétérogénéité spatiale des précipitations reste présente lors de l'utilisation des pluviomètres.

Cas du bassin versant de l'Aubinière

Le bassin versant des Gohards (180 ha) – ruisseau se jetant dans celui de l'Aubinière – a déjà fait l'objet d'une étude et est donc instrumenté. Deux pluviomètres sont implantés sur le site. Il s'agit du pluviomètre du Perray, installé sur une cantine et du pluviomètre de Halvèque, mis en place sur le toit d'une bibliothèque. Les données d'un pluviomètre de la Communauté Urbaine de Nantes sont également disponibles. Ce pluviomètre se trouve rue des Canaris, donc bien qu'à proximité, il se situe en dehors du bassin versant de l'Aubinière. Ces trois pluviomètres se trouvent donc dans la partie ouest du nouveau bassin versant étudié. Il était donc intéressant de trouver un quatrième site plus à l'est pour mettre en place un autre pluviomètre. Nos recherches dans la ville de Sainte Luce ont abouti au choix de l'école de musique, rue d'Alsace Lorraine. Il s'agit d'un bâtiment à toiture terrasse, parfaitement dégagé donc loin de tout arbre ou construction. L'inclinaison d'une partie de la toiture apporte un abri contre les vents. Une rencontre avec un responsable des services techniques de la mairie de Sainte Luce suivie d'une demande d'autorisation envoyée au maire de Sainte Luce sur Loire

ont été nécessaires. Le pluviomètre pourra vraisemblablement être installé en septembre. Le pluviomètre qui sera installé est un pluviomètre à augets basculeurs de 0.2 mm, alimenté par des batteries qui lui confère une autonomie suffisante entre deux relevés, à savoir quinze jours (voir photo). Il est relié à un réservoir en aval des augets de façon à collecter la totalité de l'eau de pluie captée. Cette installation permet de vérifier que le nombre total de basculements enregistrés correspond bien au cumul d'eau recueillie.

Radar météorologique

Le radar météorologique permet la détection et la mesure des intensités pluvieuses. Son principe repose sur la diffusion, par les gouttelettes de pluie, des ondes électromagnétiques émises par le radar et qui se propagent dans l'atmosphère (Andrieu, 1998). L'aptitude de la cible (ici, les gouttes d'eau) à diffuser l'énergie incidente s'exprime par le facteur de réflectivité Z que l'on déduit de la relation :

$$p \propto \frac{cZ}{r^2} \text{ avec } p : \text{puissance de l'onde rétrodiffusée en direction du radar}$$

r : distance radar-cible

c : constante caractéristique du radar

L'intensité pluvieuse R est ensuite déterminée par la relation :

$$Z \propto AR^b \text{ avec } A \text{ et } b : \text{paramètres dépendant du type de précipitations}$$

Les principales sources d'erreur – outre la relation Z - R qui n'est valable que sous certaines conditions très strictes rarement parfaitement vérifiées – proviennent des obstacles que l'onde émise peut rencontrer. Lorsque le faisceau émis est intercepté par le relief (ou un bâtiment), il se produit alors un écho de sol. Dans ce cas, la réflectivité mesurée ne provient pas des précipitations mais du relief. Les échos de sol sont facilement détectables par une mesure par temps sec. Dans le cas d'échos de sol, les précipitations situées derrière l'obstacle ne reçoivent qu'une partie du faisceau et sont donc sous-évaluées. On parle d'effet de masque.

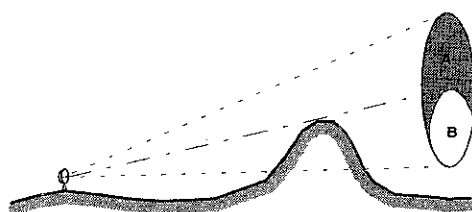


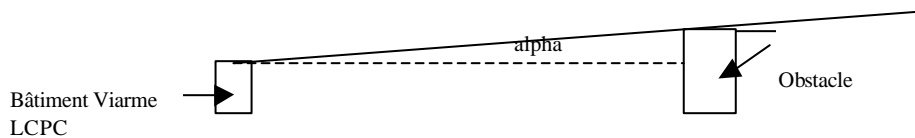
Illustration de l'interception de l'onde et de l'effet de masque (partie blanche)

Enfin, le fait d'orienter le radar vers le haut et donc de lui imposer un angle de tir θ afin d'éviter au maximum les échos de sol et les effets de masque entraîne une erreur dans l'estimation de l'intensité pluvieuse. En effet, le radar météorologique donne alors une valeur moyenne des intensités à une certaine hauteur dans l'atmosphère, or les précipitations subissent des modifications durant leur chute (évaporation, interception, intensification), modifications qui ne sont pas prises en compte.

Cas du bassin versant de l'Aubinière

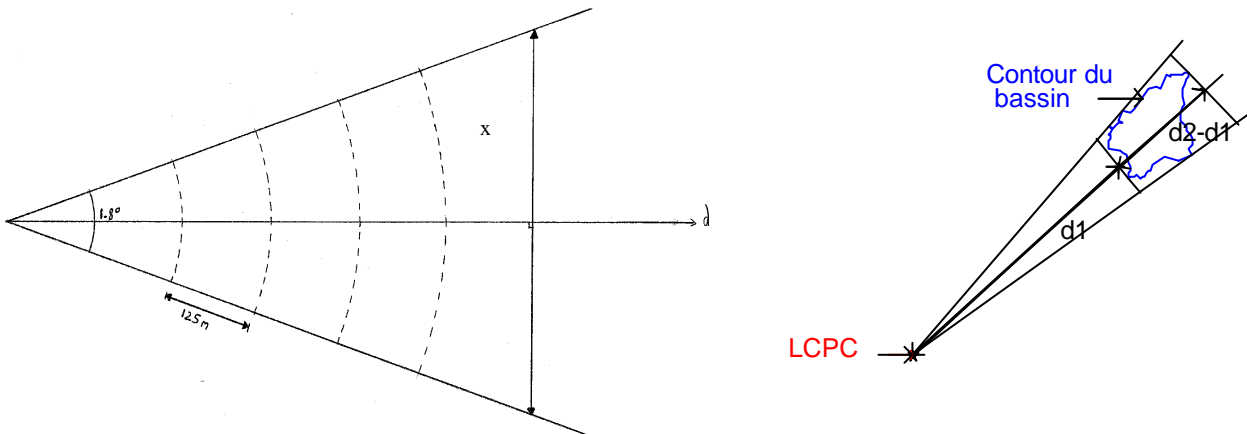
Le travail préparatoire à l'installation du radar a été réalisé. Il a tout d'abord fallu trouver un endroit pour implanter le radar. Par mesure de sécurité et par commodité, il a été choisi de l'installer sur le toit d'un bâtiment du LCPC. Deux possibilités étaient envisageables : le

bâtiment Viarme et le bâtiment Darcy (voir croquis annexe 5). Afin de faire un choix, les coordonnées (dans le système Lambert II) et les cotes des bâtiments ont été déterminées. Une simulation sur le logiciel Mapinfo a ensuite été réalisée afin de trouver le positionnement du radar le plus adéquat. En effet, à l'aide d'une table représentant tous les bâtiments de l'agglomération de Nantes et leurs cotes, nous avons calculé l'angle de tir α minimal pour ne rencontrer aucun obstacle (voir schéma). Ces simulations et une visite sur place ont conduit au choix du bâtiment Viarme, qui correspond au bâtiment le plus haut, et donc à l'angle de tir le plus petit à savoir 0.76° . Il s'agit de l'angle minimal à imposer au faisceau du radar pour ne pas être intercepté par la tour Anne de Bretagne qui a une hauteur de 159.5 m et qui se situe à une distance de 9110 m du LCPC.



Au point de vue de l'installation, la toiture-terrace du bâtiment Viarme supportera les 250 kg que pèse le radar, et la faisabilité du grutage a été étudiée. Il y a également des réservations, de diamètre 100mm, qui serviront à faire passer les câbles jusqu'à un local dans lequel sera installé le système de pilotage du radar ainsi que l'ordinateur qui collectera toutes les données. Une fois le choix du site effectué, il est intéressant de calculer la taille des mailles qui représenteront le bassin versant de l'Aubinière afin de déterminer la précision de la discrétisation. Sachant que l'angle d'un faisceau est de 1.8° et qu'une mesure est réalisée tous les 125m, on obtient la relation suivante :

$$x \approx 2 \cdot (d \cdot \tan \frac{1.8}{2})$$



Avec $d_1=12.49$ km et $d_2=17.70$ km, on obtient comme plus petite maille 392.42×125 m et comme plus grande maille 556.11×125 m, ce qui est relativement petit comparé aux maillage proposé par Météo France qui est de 1000×1000 m. En considérant une taille de maille moyenne, le bassin versant de l'Aubinière sera représenté par 170 mailles le bassin versant des Gohards par 32 mailles.

Débitmétrie

Mesure de débit

La mesure d'un débit ne se fait pas de manière directe. Il existe deux méthodes afin d'obtenir le débit :

?? Une mesure de la hauteur d'eau, qui permet d'obtenir le débit grâce à un dispositif pré-étalonné ou à l'aide de tables de correspondances hauteur/débit appelées courbes de tarage ;

?? Une mesure simultanée de la hauteur d'eau et de la vitesse d'écoulement qui donne le débit, produit de la vitesse par la section mouillée :

$$Q = S.V \text{ avec } Q : \text{débit (m}^3/\text{s)}$$

S : surface mouillée (m²)

V : vitesse moyenne (m/s)

On peut envisager la débitmétrie sous deux formes, à savoir la mesure de débit en continu ou le jaugeage instantané. La mesure en continu, permet d'obtenir des valeurs périodiquement (en général, toutes les 5 minutes). Le jaugeage est une mesure ponctuelle utilisée généralement pour l'établissement de la courbe de tarage (ou courbe d'étalonnage), pour l'étude d'un écoulement particulier par temps de pluie, ou à l'étiage (période des basses eaux).

Au sein de la section Hydrologie en Milieu Urbain, plusieurs bassins versants sont déjà instrumentés. Dans la plupart des cas, la débitmétrie se fait en mesurant en continu la hauteur d'eau et la vitesse de l'écoulement. Dans le cas du bassin versant des Gohards, sous bassin du bassin versant de l'Aubinière, le débit est mesuré au sein d'un collecteur circulaire de diamètre 1600mm. Un capteur à effet Doppler mesurant la vitesse moyenne de l'écoulement sur une section déterminée est couplé à une sonde ultra-sons qui mesure la hauteur d'eau. La vitesse est généralement mesurée avec une sonde Doppler. La hauteur, quant à elle, est mesurée suivant 3 techniques :

?? A l'aide d'un capteur de pression immergé ;

?? A l'aide d'une sonde ultra-sons immergée ;

?? A l'aide d'une sonde ultra-sons émergée.

Cependant, d'autres techniques sont également utilisées. C'est le cas des deux bassins versants de Rezé (de 4.6 ha et 13.6 ha) pour lesquels deux canaux jaugeurs ont été construits. Ils ont été réalisés conformément aux dispositions constructives de la société NEYRTEC pour l'implantation d'un seuil épais. La mesure des hauteurs est faite par deux sondes ultra-sons immergées placées au fond des canaux. Le débit est obtenu par application de la loi de transformation hauteur-débit déterminée en fonction de la courbe de tarage du seuil fourni par NEYRTEC.

Des courbes de tarage sont éventuellement mises en place grâce aux valeurs acquises par les techniques citées précédemment. Cependant, aucun débit n'est déterminé uniquement à l'aide de la mesure de la hauteur et de la courbe de tarage.

Cas du bassin versant de l'Aubinière

Le choix d'un site de mesure est défini dans la Charte Qualité de l'Hydrométrie par plusieurs critères. En théorie, l'écoulement au droit du site doit être uniforme et permanent, le site doit être accessible en toute sécurité et en toutes circonstances, notamment en crue. Les mesures

de débit effectuées par la Division Eau du LCPC se font toujours dans des collecteurs, donc, afin de bénéficier de l'expérience acquise dans ce domaine, le débit de l'Aubinière sera mesuré dans un des quatre ouvrages qui canalisent le ruisseau lors de son passage sous des voies de communication. Ainsi, un critère de sélection peut être rajouté, à savoir que le collecteur doit être de forme simple (rectangulaire, circulaire, etc.). Les quatre ouvrages sont :

?? L'ouvrage sous l'autoroute qui est inaccessible ;

?? L'ouvrage permettant de franchir un chemin qui est composé de deux collecteurs en tôle ondulée de forme ovoïde (voir photo annexe 3, p.8). De plus, cet endroit présente un risque de dégradation élevé ;

?? L'ouvrage situé sous la voie ferrée qui est un collecteur en béton de section rectangulaire (voir photo annexe 3, p.8). Cependant, en amont de cette canalisation, le ruisseau présente un coude, un changement de direction brutale qui crée des turbulences dans l'écoulement. Les mesures de débit réalisées à cet endroit seraient donc difficiles ;

?? L'ouvrage situé sous le périphérique est une canalisation semi-circulaire d'environ 4.50 m de diamètre. Un autre avantage de ce collecteur est qu'il possède une passerelle située à environ 2.50 m du fond, ce qui permet des jaugeages par temps de pluie en toute sécurité.

C'est donc ce dernier site qui a été retenu pour réaliser la mesure de débit, et qui sera ainsi l'exutoire du bassin versant. Plusieurs bassins versants expérimentaux sont déjà instrumentés à l'aide d'un capteur Doppler couplé à un capteur de pression qui mesurent simultanément la vitesse et la hauteur d'eau (bassins versants des Gohards et de St Joseph). Il a donc été décidé de suivre ce même principe en mesurant à la fois hauteur d'eau et vitesse d'écoulement. Cependant, avant de pouvoir choisir le matériel le plus adapté et faire des demandes de devis, il a fallu étudier la géométrie de la canalisation et le comportement du cours d'eau à cet endroit. Nous avons, dans un premier temps, déterminé le profil de la canalisation qui est constituée d'un demi-cercle de 4.50 m de diamètre en partie supérieure et de trois trapèzes dans sa partie inférieure (le fond du radier ayant une largeur de 2.82 m) (voir photo et croquis). La canalisation mesure 59 m de long et présente une pente faible de 0.068%. Le fond du radier, qui est plat, est relativement peu encrassé, même si on remarque la présence d'accumulation de dépôts à certains endroits.

Ensuite, pour mieux appréhender la mesure, il faut avoir une idée du comportement hydrologique et hydraulique du ruisseau à cet endroit. Il est notamment intéressant d'estimer les débits et hauteurs d'eau atteints fréquemment ou pour des événements plus rares. Les traces laissées dans la canalisation et sur les abords naturels par les derniers événements pluvieux ne nous fournissant pas de renseignements suffisants, il a fallu approfondir cette étude. Nos diverses rencontres au sein du Service Assainissement de la Communauté Urbaine de Nantes nous ont appris que des études ont été demandées à des bureaux d'études suite à l'inondation répétée d'une zone située en amont du ruisseau. Cependant, aucune de ces études n'a pu nous renseigner sur le comportement de l'Aubinière. Il a donc été décidé de procéder à un suivi expérimental du ruisseau (mesure des hauteurs d'eau, des vitesses, observations diverses). Pour cela, une échelle de hauteur a été tracée dans la canalisation et les mesures de vitesses ont été effectuées à partir de trois appareils différents :

?? Un courantomètre PVM-PD de la marque NIVUS, utilisant le principe de l'effet Doppler ;

?? Un courantomètre électromagnétique Nautilus C 200 de la marque OTT ;

?? Un micro-moulinet Beauvert de type 81s de la marque NEYRTEC. Moins précis mais plus fiable, il servait de vérification de l'ordre de grandeur des vitesses mesurées à l'aide des courantomètres.

Ces mesures réalisées par temps sec ainsi qu'à chaque événement pluvieux ont permis de mettre en place le début d'une courbe de tarage et de donner une indication sur les débits et

les hauteurs d'eau en été (voir comptes rendus de jaugeage et courbe de tarage en annexe 3, p.9). Ainsi, par temps sec, on mesure un débit d'environ $0.07\text{m}^3/\text{s}$ pour une hauteur d'eau d'environ 30cm, le cours d'eau semble donc ne jamais s'assécher à l'étiage.

Il a également été remarqué que le ruisseau réagissait rapidement et fortement aux pluies. Par exemple, le niveau d'eau est monté jusqu'à 1 m lors d'un petit événement pluvieux de l'ordre de 10 mm en 6 heures (le 05/07/2002), ce qui est compris entre une pluie de période de retour d'un mois (8 mm en 6 h) et une pluie d'une période de retour de 2 mois (13.6 mm en 6 h).

Le comportement du ruisseau par temps sec étant connu et, les délais imposés associés à une météo plutôt clémente, ne permettant pas d'avoir des indications expérimentales supplémentaires dans d'autres conditions (orages, hautes eaux hivernales, etc.), l'étude du ruisseau a été approfondie par une simulation sur le logiciel CANOE afin d'estimer la hauteur d'eau de l'Aubinière correspondant à une pluie décennale (pluie d'une période de retour de 10 ans). La pluie décennale est un événement pluvieux de forte intensité qui a une chance sur 10 d'être observée chaque année. Cette pluie est souvent prise comme référence, notamment pour le dimensionnement des canalisations des réseaux d'assainissement, si bien qu'un débitmètre capable de mesurer ce type d'événement peut être considéré comme adapté pour l'intervalle de mesures que l'on souhaite couvrir.

Le logiciel CANOE permet, à partir des caractéristiques de la canalisation et du débit à écouler, de déterminer la hauteur d'eau et la vitesse de l'écoulement dans le collecteur. Dans ce cas, le seul paramètre variable est le coefficient de rugosité K qui dépend de la nature de la canalisation (béton, maçonnerie, terre, etc.). Le débit maximum injecté a été estimé à l'aide de la méthode rationnelle qui utilise les formules classiques de dimensionnement.

?? Dans un premier temps, le temps de concentration* a été déterminé par application de la formule de Passini. Le temps de concentration correspond au temps mis par une goutte qui se trouve au point le plus éloigné (en temps) pour parvenir à l'exutoire.

$$t_c \approx 0.14 \sqrt[3]{SL} P^{0.5} \quad \text{avec } S : \text{aire du bassin versant (ha)}$$

L : longueur du parcours correspondant au temps de concentration (m)

P : pente du bassin versant (m/m)

$$\text{Dans notre cas, } t_c \approx 0.14 \sqrt[3]{1009.6 \cdot 5003.3} \cdot 0.00745^{0.5}$$

$$t_c \approx 278.86 \text{ min} = 4\text{h } 38 \text{ min}$$

?? L'intensité pluvieuse est ensuite calculée par la formule de Montana :

$$I(D,F) \approx a(F) D^{b(F)} \quad \text{avec } I : \text{intensité pluvieuse (mm/min)}$$

$$D = t_c \text{ (min)}$$

a(F), b(F) : constants dépendant de la région et de

la période de retour de l'événement pluvieux (dans notre cas, région I, T=10ans)

$$\text{ici, } I(D,F) = 5.9 \cdot 278.86^{-0.59}$$

$$I(D,F) = 0.213 \text{ mm/min}$$

?? Enfin, la formule de la méthode rationnelle donne le débit de pointe :

$$Q_p \approx K \cdot C \cdot I \cdot A \quad \text{avec } K = 0.00278 : \text{constante}$$

$$C = \frac{S_{\text{impermeable du BV}}}{S_{\text{totale du BV}}} : \text{coefficient d'imperméabilisation}$$

I : intensité pluvieuse (mm/h)

A : surface du bassin versant (ha)

$$Q_p \approx 0.00278 \cdot 0.32 \cdot 0.213 \cdot 60 \cdot 1009.6$$

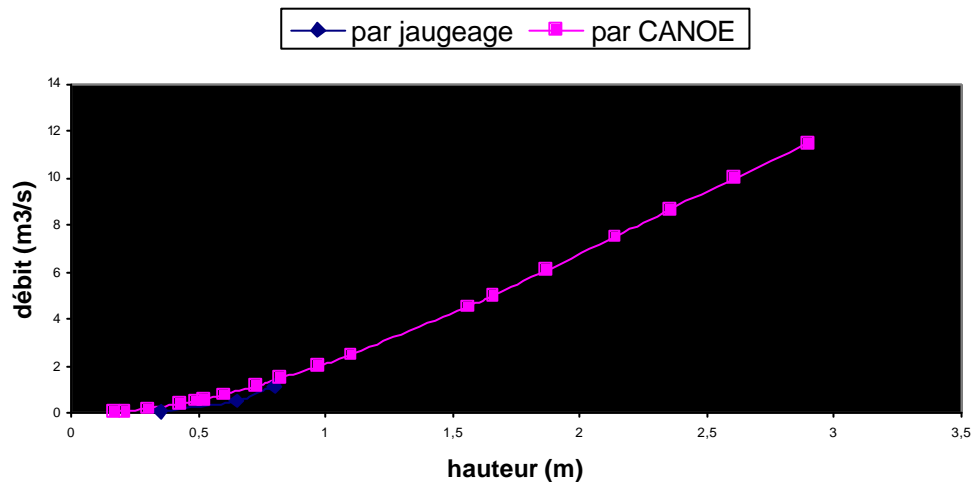
$$Q_p \approx 11.48 \text{ m}^3/\text{s}$$

Le coefficient de rugosité, seul paramètre variable, a été déterminé en essayant de se caler avec les points hauteur-débit obtenus lors des jaugeages. Il est apparu qu'avec un coefficient de rugosité $K=25$, qui correspond à un canal naturel composé de galets - donc à une valeur très faible rarement rencontré - les points obtenus par le logiciel CANOE se rapprochaient de ceux obtenus in-situ malgré une surestimation, notamment pour les faibles débits. Cette faible valeur de K à imposer afin d'approcher les conditions réelles peut s'expliquer par des erreurs survenues lors des mesures des dimensions de la canalisation et/ou de sa pente, mesures effectuées à l'aide de règles et d'un niveau.

Courbe de tarage

Appliquer directement le débit en entrée de CANOE permet de se concentrer uniquement sur les caractéristiques hydrauliques de la canalisation et ainsi de se détacher des hypothèses concernant les fonctions de production et de transfert qui auraient été rencontrées dans le cas d'injection en entrée d'une pluie. Une fois le coefficient de rugosité déterminé, il a été possible de réaliser la courbe de tarage, qui sera donc une courbe uniquement basée sur l'hydraulique. Pour cela, une série de débits arbitraires allant de $0.065 \text{ m}^3/\text{s}$ à $11.48 \text{ m}^3/\text{s}$ (débit correspondant à une pluie décennale) a été injectée. Les hauteurs calculées par CANOE et les débits qui leur sont associé permettent ensuite de créer une courbe de tarage simulée (voir courbe de tarage page suivante et en annexe 3). D'après le logiciel CANOE, ce débit de pointe engendre une hauteur d'eau de 2.90m . On peut donc considérer que la hauteur d'eau ne dépassera qu'exceptionnellement cette valeur.

Courbe de tarage - Aubinière



Choix du débitmètre

Les difficultés à instrumenter le ruisseau venaient d'une part de sa taille et d'autre part de la nécessité d'avoir un appareil d'une autonomie d'au moins deux semaines. En effet, la vitesse est en général mesurée au milieu du collecteur, ce qui donne une valeur acceptable dans le cas de petites canalisation. Dans le cas de l'Aubinière, la vitesse n'étant pas uniforme sur toute la largeur de la canalisation, l'idéal aurait été de mettre en place trois capteurs de vitesse (un au milieu et un sur chaque bord) de façon à avoir une meilleure appréciation de la vitesse. Cependant, dans un souci d'économie, on considérera comme valide la valeur donnée par le

seul capteur de vitesse placé au milieu du collecteur. Des mesures de vitesses réalisées in-situ seront faites pour appuyer cette hypothèse. En ce qui concerne l'autonomie, il est impossible d'amener le secteur sur le site, et, le changement de batteries se faisant toutes les deux semaines lors du relevé des données, il faut que l'appareil ait une autonomie suffisante.

Descriptif	Appareil proposé	Mesure de vitesse		Mesure de hauteur		Coût en euros
		Technique employée	Intervalle de mesure	Technique employée	Intervalle de mesure	
ISCO	ISCO 4150	Capteur à effet Doppler	-1.5 à 6.1m/s	Capteur de pression immergé	0 à 3m	6938.03
NIVUS	OCM Pro	Corrélation par ultrasons	-1 à 4m/s	Sonde à ultrasons émergée	0.3 à 6m	7660.33

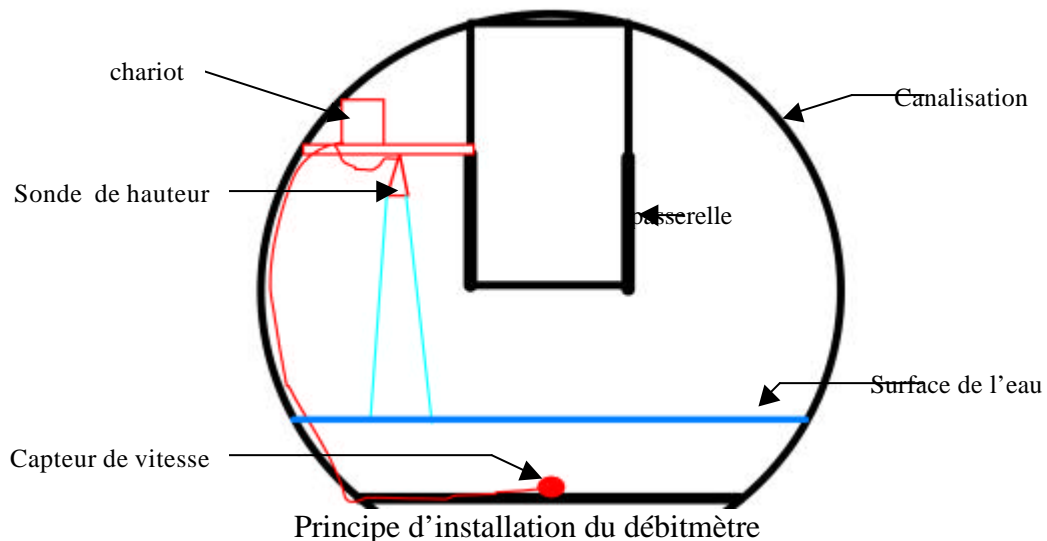
Afin de comprendre le fonctionnement de l'OCM Pro, des essais ont été réalisés dans un canal conçu par le LCPC pour simuler les conditions d'écoulement d'un cours d'eau. Plusieurs mesures ont été effectuées avec l'OCM Pro en faisant varier le débit, la hauteur d'eau et la vitesse de l'écoulement. Chacune de ces mesures a été vérifiée par un courantomètre à effet Doppler de la marque NIVUS qui a servi de référence. On constate que les valeurs de vitesses et de hauteurs d'eau obtenues par l'OCM Pro sont toujours inférieures aux valeurs données par le courantomètre. Un étude menée précédemment au LCPC sur le débitmètre OCM Pro a confirmé cette tendance de l'OCM Pro à sous-estimer les vitesses. Cependant, il s'agit de différences de l'ordre du cm/s pour la vitesse et du mm pour la hauteur d'eau. Les valeurs obtenues ont donc été jugées satisfaisantes. Lors de l'étude plus approfondie du profil des vitesses, il a été remarqué que l'OCM Pro ne mesurait pas les vitesses correspondant à des hauteurs d'eau proches de la surface, or la vitesse maximale d'un écoulement se situe dans cette zone. Les vitesses maximales ne sont donc jamais mesurées, ce qui fausse le calcul de la vitesse moyenne et explique en partie la sous-estimation des vitesses.

Installation du débitmètre

L'installation de l'OCM Pro et des batteries a été réalisée suivant deux objectifs :

- ?? faciliter la manutention lors du relevé des données et du changement des batteries ;
- ?? prévenir le risque de vandalisme.

Un chariot contenant la centrale d'acquisition et les trois batteries a été conçu et installé sur des rails de façon à être fixé en hauteur sous la voûte, hors de portée de main, et à être ramené facilement jusqu'à la main courante de la passerelle pour la maintenance. La sonde aérienne est fixée sur les rails à une distance suffisante de la canalisation pour que le faisceau soit toujours réfléchi par l'eau, même pour une très faible hauteur d'eau (voir annexe 6, p.25). Cependant, il était également nécessaire qu'elle soit suffisamment éloignée de la passerelle pour être hors de portée de main afin de prévenir le vol ou les dégradations. La sonde de vitesse est fixée dans le fond du collecteur, parallèlement à l'écoulement et orientée vers l'amont, dans une zone peu encrassée.



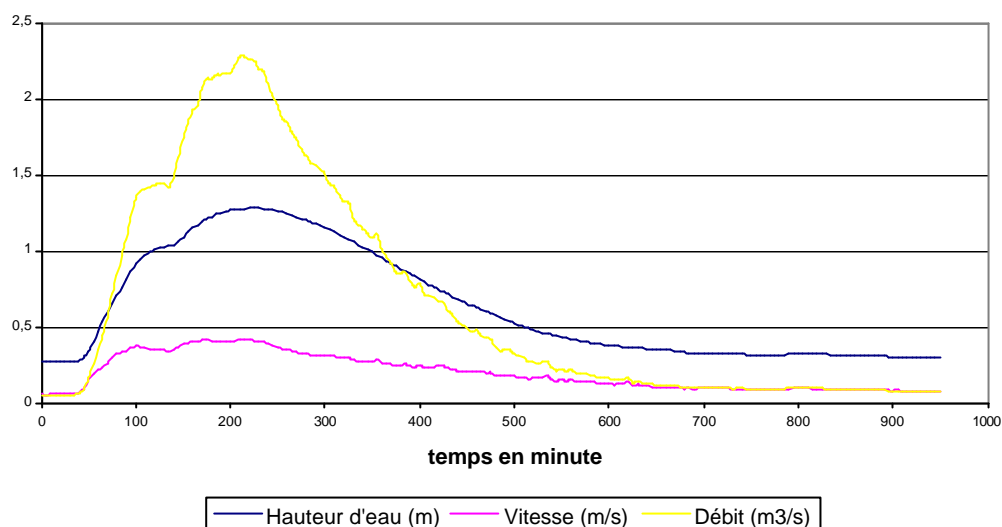
Premières mesures

Deux événements pluvieux ont pu être enregistrés. Une visite sur le terrain lors de l'un de ces événements a permis de comparer la hauteur d'eau réelle à celle mesurée par le débitmètre. Ainsi, au même instant, l'OCM Pro a enregistré un hauteur d'eau de 1.19 m alors que la hauteur réelle était d'environ 1.30m (voir graphique ci-dessous). La différence entre ces deux hauteurs peut être expliquée par le fait que :

- ?? la hauteur d'eau réelle a été lue sur l'échelle tracée dans la canalisation, d'où des imprécisions lors de la création de l'échelle et lors de la lecture depuis la passerelle ;
- ?? la sonde de hauteur a été étalonnée pour une faible hauteur d'eau (29cm). Un nouvel étalonnage peut s'avérer nécessaire.

Le profil de vitesse est réalisé grâce à dix mesures de vitesses à des hauteurs imposées par l'utilisateur. Cependant, lors des deux événements pluvieux, aucune mesure de vitesse n'a été enregistrée pour des hauteurs supérieures à 56cm, c'est à dire pour des coefficients α supérieurs à 0.5, alors que le niveau d'eau a atteint 1.20m. Il semble donc que la vitesse moyenne ait été calculée à partir des vitesses mesurées jusqu'à la hauteur d'eau de 56cm, alors que le niveau d'eau a atteint 1.20m, mais il ne s'agit plus de la vitesse moyenne sur toute la hauteur de l'écoulement. Cependant, le représentant de la société NIVUS a affirmé que le problème survenait lors de l'enregistrement des données et non pas lors de la mesure des vitesses. Ainsi, la vitesse moyenne et le débit calculés seraient exacts. Le représentant a alors conseillé de revenir au mode d'enregistrement des 10 à 16 vitesses mesurées à des hauteurs déterminées par l'OCM Pro. Afin de connaître la position exacte des fenêtres de mesures, une option de l'OCM Pro permet de faire abstraction de la hauteur d'eau totale mesurée par le capteur et d'imposer une hauteur d'eau fixe. Cette manipulation a alors été réalisée en imposant des hauteurs d'eau entre 0 à 1.50 m par pas de 10 cm. La lecture directe sur l'écran de l'OCM Pro a permis de connaître la position des fenêtres de mesure. Ainsi, grâce à cette table de correspondance hauteur d'eau totale – position des fenêtres, lors du traitement des données enregistrées, les hauteurs pour lesquelles les 10 à 16 vitesses sont mesurées sont connues. Suite à cette manipulation, il a été constaté que l'enregistrement des mesures s'est correctement effectué lors des événements pluvieux. Ce type d'enregistrement sera donc conservé par la suite.

Evenement pluvieux du 02/08/2002



6. CONCLUSION

Cette étude s'est décomposée en deux parties menées parallèlement. La première partie, plus théorique a débuté par la lecture d'ouvrages généraux concernant l'hydrologie urbaine et de thèses plus ciblées sur la modélisation hydrologique des bassins versants urbanisés. Le but de cette bibliographie était de me familiariser avec les notions du programme de modélisation hydrologique d'un bassin versant développé par F. Rodriguez avant de l'utiliser sur un cas concret, le bassin versant de l'Aubinière. Cette partie s'est poursuivie par la collecte, la correction et la mise en forme des données géographiques nécessaires aux programmes de caractérisation des Eléments Hydrologiques, de construction du graphe hydrologique et de délimitation, et s'est achevée par la modélisation et l'interprétation des résultats obtenus. La seconde partie, plus pratique, concernait la mise en place de l'instrumentation du bassin versant afin d'obtenir des mesures de pluie et de débit. Ces mesures permettront par la suite la comparaison du comportement hydrologique modélisé du bassin versant avec son comportement réel. Pour cela, une partie bibliographie a également été nécessaire afin de connaître les différentes techniques utilisées en débitmétrie et de choisir la plus adaptée au cas du ruisseau de l'Aubinière. Cette découverte théorique de la débitmétrie s'est accompagnée de visites sur le terrain avec des professionnels afin d'appliquer les techniques utilisées.

BIBLIOGRAPHIE

ANDRIEU H., 1998. Interprétation de la mesure radar météorologique pour l'hydrologie – Modélisation des bassins versants urbanisés. Mémoire de Recherche, LCPC.

BRETECHE N., 1996. Etude de la transformation pluie-débit en milieu urbain : approche expérimentale et modélisation. Rapport de stage, D.E.A. Dynamique des fluides et des transferts.

CHOCAT B. 1997. Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement. Techniques et Documentation, Lavoisier, Paris, Collection Euridyce.

COSANDEY C., ROBINSON M., Hydrologie Continentale, édition Armand Colin.

CREUTIN J.D., 1997. Réflexion prospective sur les besoins en recherche sur le thème de l'hydrologie à petites échelles et notamment en zones urbaines. Rapport «Hydrologie en milieu urbain », Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement.

GUILLET B., 2002. Essais de mise en service et tests d'un profilomètre ultrasonore. Rapport de stage, Institut Universitaire de Technologie de Saint-Nazaire

HAMMOUDA A., 1995. Connaissance et modélisation des précipitations pour l'hydrologie urbaine à travers l'exemple de l'agglomération nancéienne. Thèse, Université des Sciences et Technologies de Lille.

LECHAT M., 1999. Estimation de la pluie nette par inversion de la fonction de transfert. Rapport de stage, D.A.A. Physique des surfaces naturelles et génie rural.

MapInfo Professionnal- Manuel de référence, 1993.

RODRIGUEZ F., 1999. Intérêt des banques de données urbaines pour l'analyse hydrologique – Détermination de la fonction de transfert d'un bassin versant urbain. Thèse, Institut National Polytechnique de Grenoble.

QUINN P., BEVEN K., CHEVALLIER P. & PLANCHON O., 1991. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological processes, Vol.5. p.59-79

ANNEXE 2

EXPERIMENTATION RADAR HYDROLOGIQUE

1. INTRODUCTION

En hydrologie, la détermination des intensités pluvieuses revêt une importance majeure. Ainsi, les premières installations de radars météorologiques ont pour objectif le suivi en temps réel des intensités pluvieuses affectant les bassins versants. Qu'elle soit rurale ou urbaine, l'hydrologie a pour données d'entrée les précipitations. Ainsi le radar météorologique peut y jouer un grand rôle. Le présent rapport est divisé en trois parties. La première partie traite les pluviométriques des hauteurs de pluies précipitées sur les bassins versants. Cette mesure de pluie est faite avec des pluviomètres à augets basculeurs disposées sur des toits de bâtiments bien dégagés. Suivant les intensités pluvieuses, des événements pluvieux sont déterminés sur la période d'étude. Ensuite la deuxième partie est consacrée à la détermination des cumuls de pluies détectées par le radar météorologique sur un rayon de 20 km. Enfin dans la dernière partie, les mesures pluviométriques sont comparées avec le cumul des hauteurs de pluie

2. DESCRIPTION DES BASSINS VERSANTS

Dans cette partie, seules les principales caractéristiques des bassins versants de la zone d'étude seront décrites. Ces bassins ont déjà fait l'objet d'étude dans des recherches hydrologiques (Rodriguez, 1999 ; Dagan 2002 ; Mosini,). Ils sont au nombre de trois et se situent dans la ville de Nantes, en Loire Atlantique. Deux bassins versants sont emboîtés (Aubinière et les Gohards) et le bassin de Saint-Joseph est proche de L'Aubinière.

Les Gohards

Situé à l'Est de Nantes, le ruisseau des Gohards se déverse dans la rivière de l'Aubinière, qui constitue la limite entre les communes de Nantes et de Sainte - Luce sur Loire. L'exutoire choisi correspond à une canalisation de diamètre 1600 mm se déversant dans le ruisseau des Gohards. Le bassin versant a une superficie d'environ 180 ha et est équipé d'un réseau d'assainissement séparatif. Le bassin versant des Gohards a une urbanisation assez variée. Sa forme est très allongée avec une longueur de 2.5 km sur une largeur de 900m. Sa pente moyenne est estimée à 1.1%. Le coefficient d'imperméabilisation est environ 38%, valeur estimée à partir des banques de données urbaines (Rodriguez, 1999).

Saint Joseph

Saint Joseph de Poterie est une zone péri-urbaine située au Nord de Nantes. La zone couvre une superficie de 88 ha. Saint Joseph de Poterie a un habitat, constitué de constructions individuelles et collectives, dans l'ensemble plutôt récent ; cependant il reste encore quelques zones maraîchères. Le bassin versant de Saint Joseph a une urbanisation vouée à s'étendre dans un avenir proche. Actuellement le taux de la surface imperméable représente 30% de la surface du bassin versant. Sa pente moyenne est d'environ 1.5%. La figure 2 présente le bassin versant de Saint-Joseph.

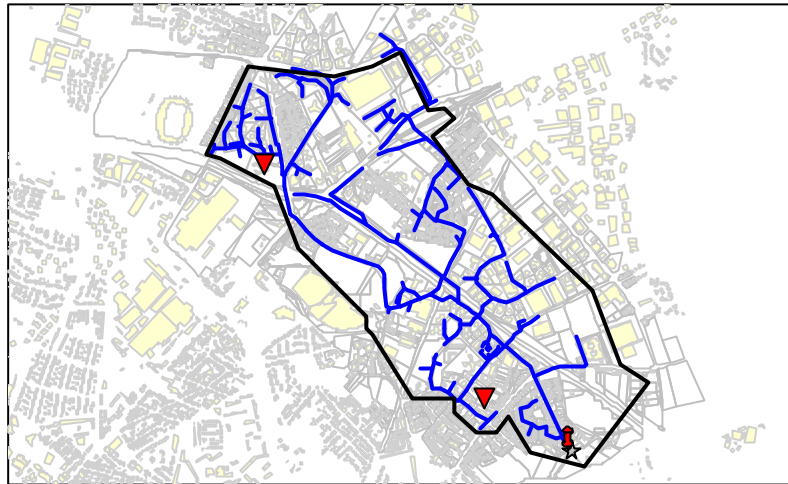
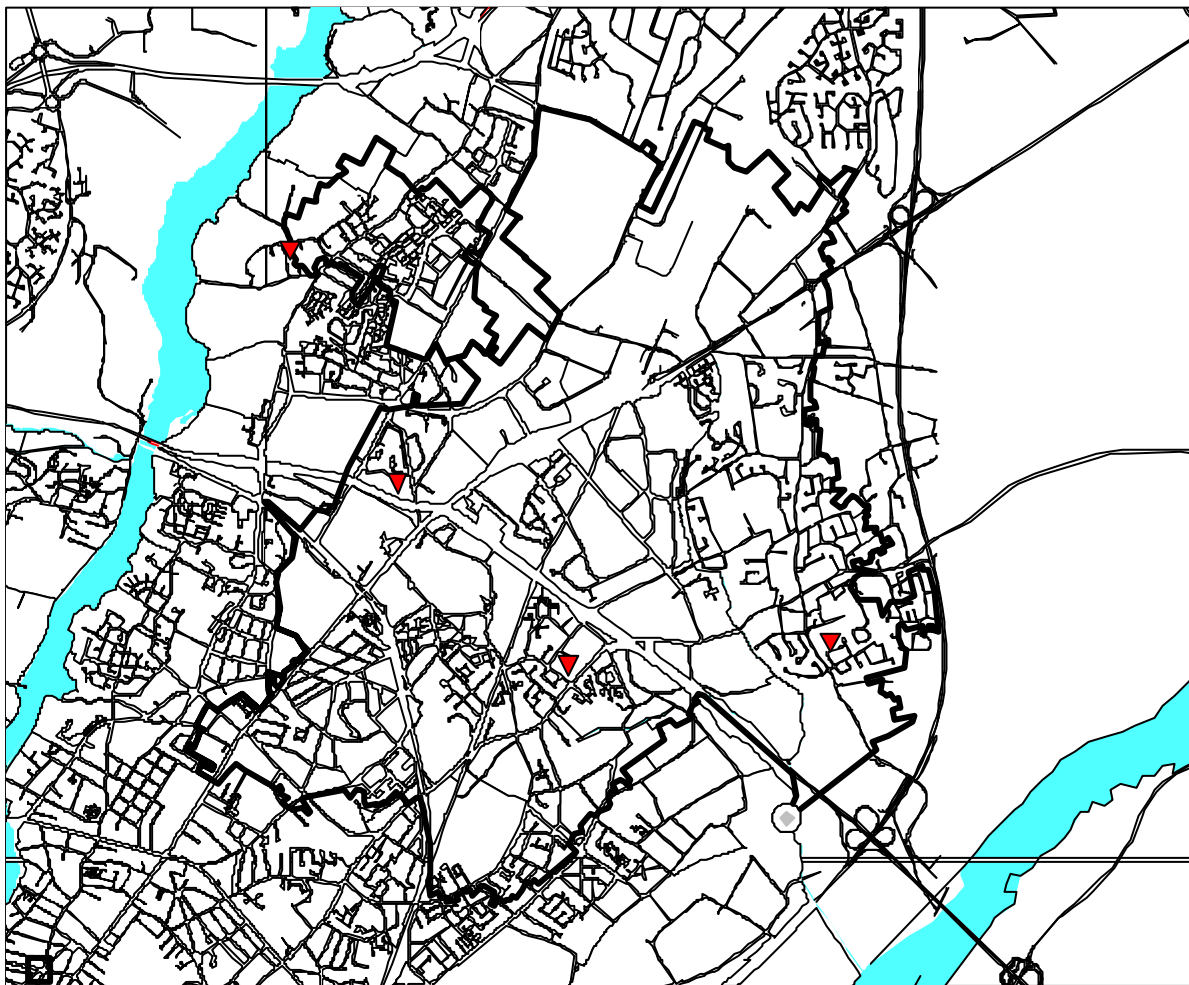


Figure 1-1 : Bassin versant des Gohards

L'Aubinière

Le bassin versant de l'Aubinière s'étend sur les 3 communes suivantes : Nantes, Sainte-Luce sur Loire et Carquefou. Cependant la majeure partie du bassin versant se trouve sur la commune nantaise et sur Carquefou, seule la zone industrielle située au sud de cette commune fait partie du bassin. Il couvre une superficie de 1095 ha avec un coefficient d'imperméabilisation moyen de 42%.



Bassin versant de l'Aubinière

3. ETUDE PLUVIOMETRIQUE

L'étude pluviométrique est basée sur les mesures effectuées durant la période du 1^{er} octobre 2002 au 28 février 2003. Les pluviomètres, appareils de mesure de la pluie, donnent des indications ponctuelles sur les précipitations. Les pluviomètres utilisés sont à augets basculeurs de 0.2 mm. L'eau, captée par un entonnoir, remplit un auget qui bascule lorsqu'il est plein ; le deuxième auget se remplit alors. Le nombre de basculements indique la quantité de pluie précipitée pendant un intervalle de temps donné. Les pluviomètres sont reliés à une centrale d'acquisition, alimentée par des batteries qui leur confèrent une autonomie suffisante entre deux relevés d'environ quinze jours. Ainsi ils sont reliés à un réservoir en aval des augets de façon à collecter la totalité de l'eau de pluie captée. Ceci permet de vérifier si le nombre total de basculements enregistrés correspond au cumul d'eau recueillie.

La zone d'étude comporte 4 pluviomètres : Halvèque, Perray, Pergaud et Sainte-Luce. Ils sont répartis sur les différents bassins versants et situés sur les toits de bâtiments bien dégagés (Rodriguez, 1999). Sur le bassin versant des Gohards se trouvent les pluviomètres Halvèque situé au Nord Ouest du bassin et Perray à proximité de l'exutoire. Pergaud se trouve sur le bassin versant de Saint Joseph et Sainte-Luce sur l'Aubinère. La pluie précipitée sur le bassin versant de l'Aubinère est donc bien représentée par ces quatre pluviomètres. Le logiciel appelé HYDRON, permet d'obtenir une série de données validées sur la période d'étude. Ces données sont celles des différents pluviomètres implantés sur les bassins versants. Les événements pluvieux sont sélectionnés en utilisant une procédure automatique. Leur identification se fait selon 3 étapes (Mosini, septembre 1999):

- ?? La détection des précipitations qui nécessite l'utilisation des valeurs de seuils de détections
- ?? La définition de la fin des événements pluvieux et le calcul du volume d'eau mesuré à l'exutoire.
- ?? La recherche de la période intense.

A l'issue de cette identification, les événements pluvieux sont caractérisés par : leur durée, les dates de début et fin, l'intensité maximum, la hauteur précipitée...Le tableau présenté en annexe montre les mesures de hauteur précipitée des différents événements pluvieux obtenues durant la période comprise entre le 1^{er} octobre 2002 et le 28 février 2003 ainsi que les dates de début et de fin de pluie. Un pas de temps de 6 minutes a été utilisé pour la détermination des événements pluvieux ainsi que leur quantité de pluie. Les figures ci-dessous présentent les différentes mesures de hauteur précipitée des quatre pluviomètres.

La valeur de la pluie totale obtenue est pratiquement la même pour les différents pluviomètres. Sur quelques rares événements pluvieux, les résultats présentent des différences assez remarquables de pluie recueillie. Ces variations passent souvent du simple au double. Une variation est illustrée avec l'événement 49 à la figure 2-3.

4. LE RADAR METEOROLOGIQUE

Le radar météorologique est doté d'un émetteur et d'une antenne, généralement parabolique. Il focalise l'onde sous forme d'un faisceau fin dont une partie essentielle de l'énergie se

trouve dans un cône caractérisé par son angle au sommet. Les diffuseurs de toute nature présents dans ce volume (gouttes, neige,...) diffusent et absorbent la puissance incidente.

Principe de mesure

Avec le Radar météorologique, les données obtenues permettent la localisation et le suivi des précipitations. Pour des besoins hydrologiques, les données radar sont maintenant largement utilisées pour la prévision et l'annonce des crues. Le principe de mesure des précipitations consiste en la détection et la mesure des intensités pluvieuses fondées sur la diffusion, par des gouttelettes de pluie, des ondes électromagnétiques se propageant dans l'atmosphère (Andrieu, 1992). Le facteur de réflectivité radar Z décrivant l'aptitude de la cible à diffuser l'énergie incidente est déduit par la relation suivante :

$$p \propto \frac{cZ}{r^2}$$

Avec p : puissance rétrodiffusée ;
 c : constante caractéristique du radar ;
 r : distance entre radar et cible

Pour l'étude des précipitations, des relations semi – empiriques reliant la réflectivité à l'intensité de la pluie sont utilisées.

$$Z \propto A.R^b$$

Où A et b représentent deux paramètres dépendant du type de précipitations.

Position du radar météorologique

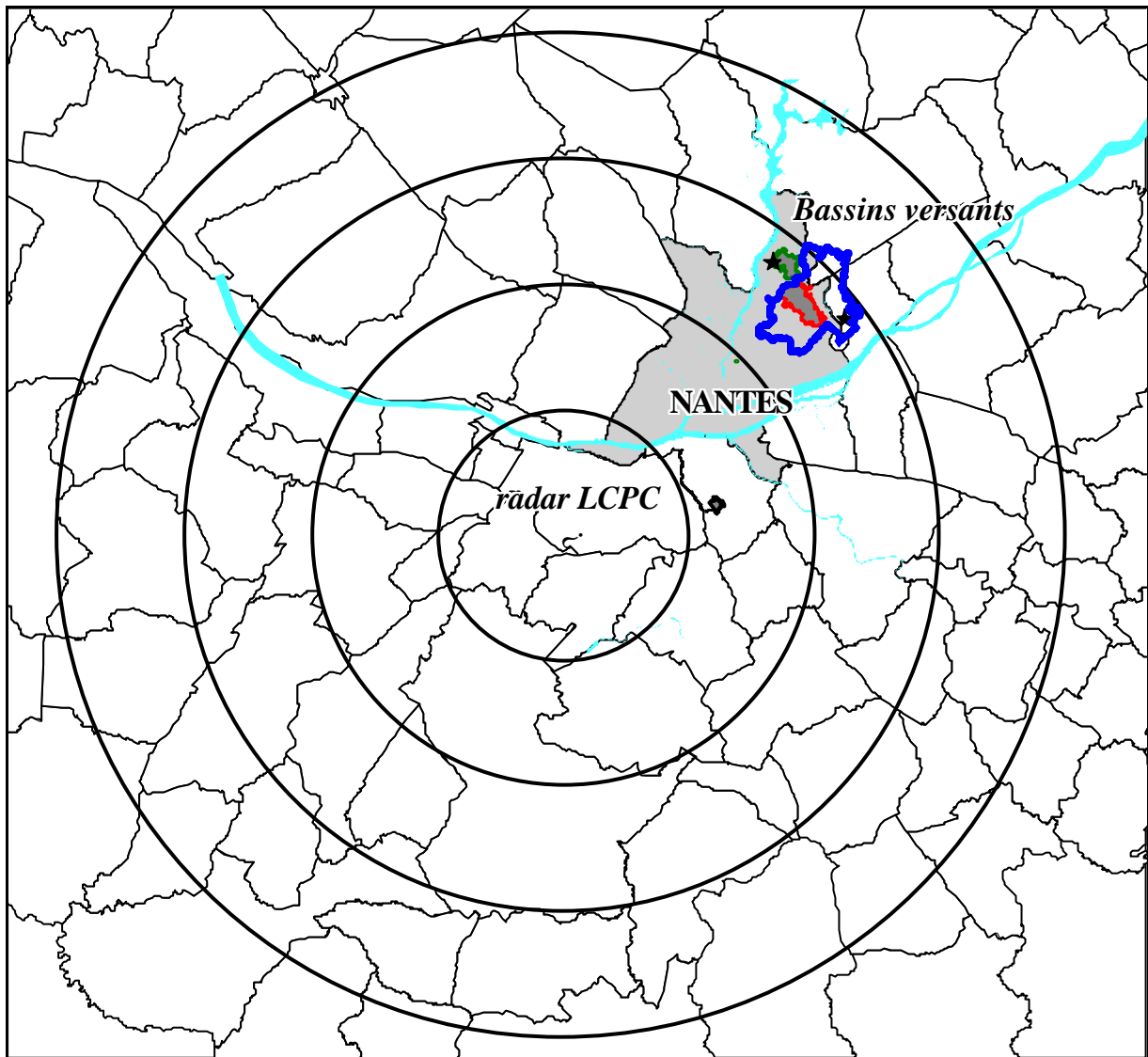
Le radar météorologique est placé sur le toit du bâtiment Viarme au LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) de Nantes. Ainsi, le radar météorologique mesure la pluie sur les bassins versants expérimentaux situés à Nantes. Ils sont situés à 15 km environ du LCPC.

Traitement des données Radar

Les données mesurées par le radar sont stockées sous forme polaire (angle θ , distance r) sur un rayon de 20 km. Une conversion de ces données a été tout d'abord réalisée afin de disposer des données de réflectivité sous forme cartésienne (x , y). Ainsi, les données de réflectivité radar utilisées pour ce travail sont stockées dans des matrices de taille 320 sur 320, chaque pixel représentant un carré de 125 m de côté. Pour ces images radar, les valeurs (z) contenues dans les matrices sont exprimées en dbz (décibels). Elles seront converties en mm^6/m^3 par la relation :

La formule empirique Z-R (équation 2) est utilisée, où les constantes A et b ont pour valeurs respectives 300 et 1.56. La relation devient ainsi :

$$Z \propto 300.R^{1.56}$$

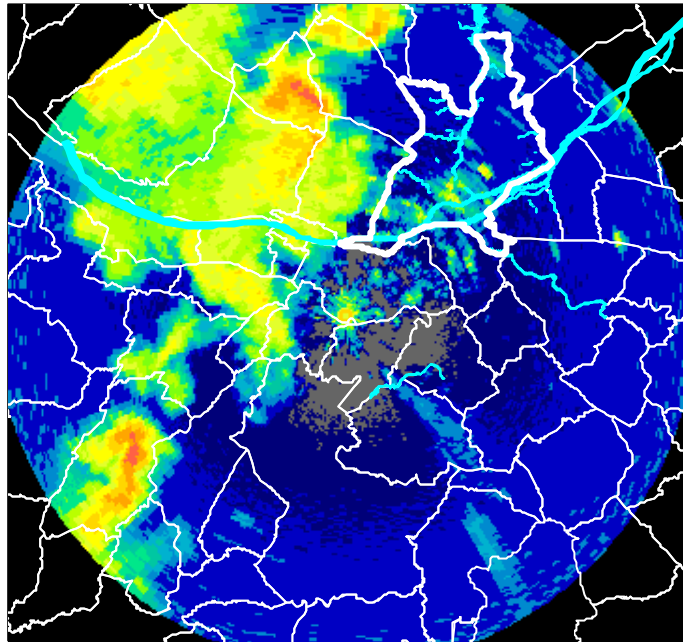


Position du radar par rapport à l'agglomération nantaise

Le radar météorologique enregistre des images avec un pas de temps d'environ 2 minutes. Un événement pluvieux contient n images. Le cumul de pluie des différentes images pour un même événement est calculée par la formule :

$$P_t = \sum_{i=1}^n R_i \cdot dt$$

Avec P_t : Cumul de pluie de l'événement,
 R_i : l'intensité pluvieuse de l'image i ,
 dt : le pas de temps ;
 n : nombre d'images de l'événement pluvieux.



Exemple d'Image radar

Le cumul de pluie est sous forme matricielle de 320 colonnes et 320 lignes et représente la pluie totale obtenue pour chaque pixel. La progression de la pluie au cours d'un événement pluvieux peut être également visualisée avec les images radar. Ces images permettent de faire la distinction entre les zones à fortes pluies des zones où la quantité de pluie détectée est moindre.

Analyses des pluies détectées par le radar

L'image de cumul pluvieux présente une forte variabilité d'un point à un autre. Ainsi l'analyse des résultats obtenus dans la détermination des intensités pluvieuses par le radar météorologique permet de constater :

- ?? La présence des échos de sol
- ?? L'atténuation de la pluie

Les échos de sol

Les images radar présentent des zones de fortes réflectivité. La zone étant d'une urbanisation assez dense, il existe des zones où le faisceau du radar est partiellement masqué. Cette rencontre du faisceau principal ou des lobes secondaires avec le sol entraîne des valeurs parasites inexploitable et également pour les plus hauts bâtiments de la ville. Généralement la localisation de ces anomalies s'effectue par temps clair.

Phénomène d'atténuation

Le traitement des données pluviométriques des images radar montre un phénomène d'atténuation. En effet plus la distance entre la cible et le radar météorologique est grande moins la quantité de pluie détectée est importante. L'étude de ce phénomène d'atténuation est effectuée sur les cumuls de pluie pour quelques événements pluvieux. Les courbes suivantes

montrent la décroissance de la quantité de pluie totale détectée au fur et à mesure de l'augmentation de la distance séparée entre le radar et la cible.

Distance par rapport au radar (km)	ev48	ev50	ev51	ev52	Somme des 4 événements
1,77	1,3703	0,7108	0,2763	1,2849	3,6423
3,54	1,2691	1,0733	0,231	1,1241	3,6975
7,07	1,1969	0,9704	0,2754	1,0824	3,5251
15,91	1,0491	0,136	0,2159	1,0915	2,4925
24,75	7,19E-08	1,12E-08	3,9447E-08	6,63E-08	1,8884E-07

Cumul de pluie sur bassin versant de l'Aubinière

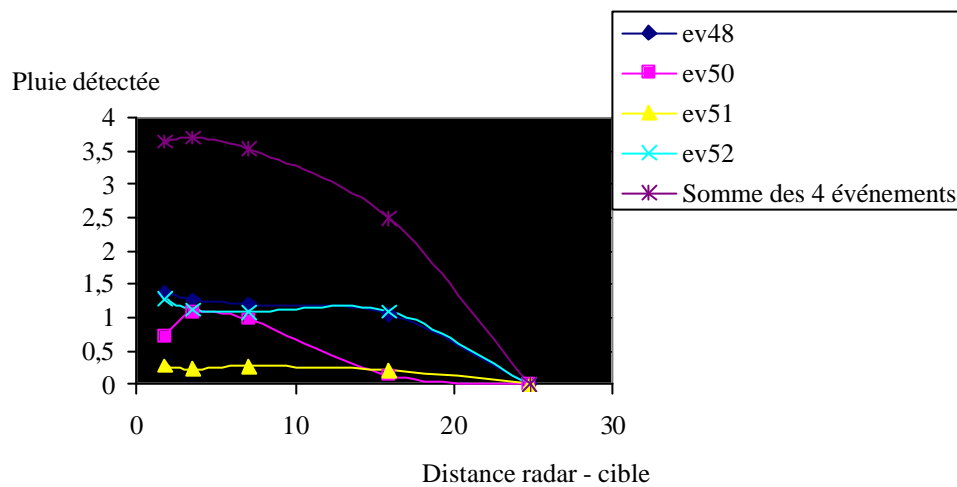


Illustration de l'atténuation

Les mesures de cumul de pluie sur le bassin versant de l'Aubinière figurent sur le tableau suivant. Ces valeurs sont inférieures à celles mesurées sur l'ensemble du champ de radar. Cette zone présentant moins d'échos de sol entraîne une diminution de la moyenne du cumul de pluie.

Evenements pluvieux	Pluviomètres				Radar météorologique	
	St_Luce	Halvéque	perray	Pergaud	Rayon 20km	Bassin
ev33		4,31		1,67	0,184	0,029828
ev34		1,35		3,34	0,005	0,046283
ev37		1,08			0,040	
ev48	2,05	3,85			0,962	0,42067
ev50	6,14	1,71			0,226	0,066466
ev54	4	2,4		2,8	0,209	0,2161

Cumul de pluie sur le bassin de l'Aubinière

5. COMPARAISON DES DONNEES RADAR ET PLUVIOMETRIQUES

L'étude comparative des précipitations entre les pluies recueillies par les pluviomètres et les résultats obtenus par le radar météorologique est présentée au tableau suivant. Cette comparaison montre des différences assez remarquables. Comparées aux hauteurs de pluies recueillies par les quatre pluviomètres installés sur les trois différents bassins versants, ces valeurs sont insignifiantes sur l'ensemble des événements pluvieux étudiés. D'après ce tableau, le radar météorologique minimise la quantité de précipitations.

La représentation graphique de la pluie recueillie par les pluviomètres en fonction de la pluie détectée par le radar météorologique montre que les courbes sont bien loin de correspondre à la première bissectrice. La valeur de la pluie détectée par le radar météorologique restant inférieure à celle de la pluie recueillie par les pluviomètres, des corrections sont ainsi

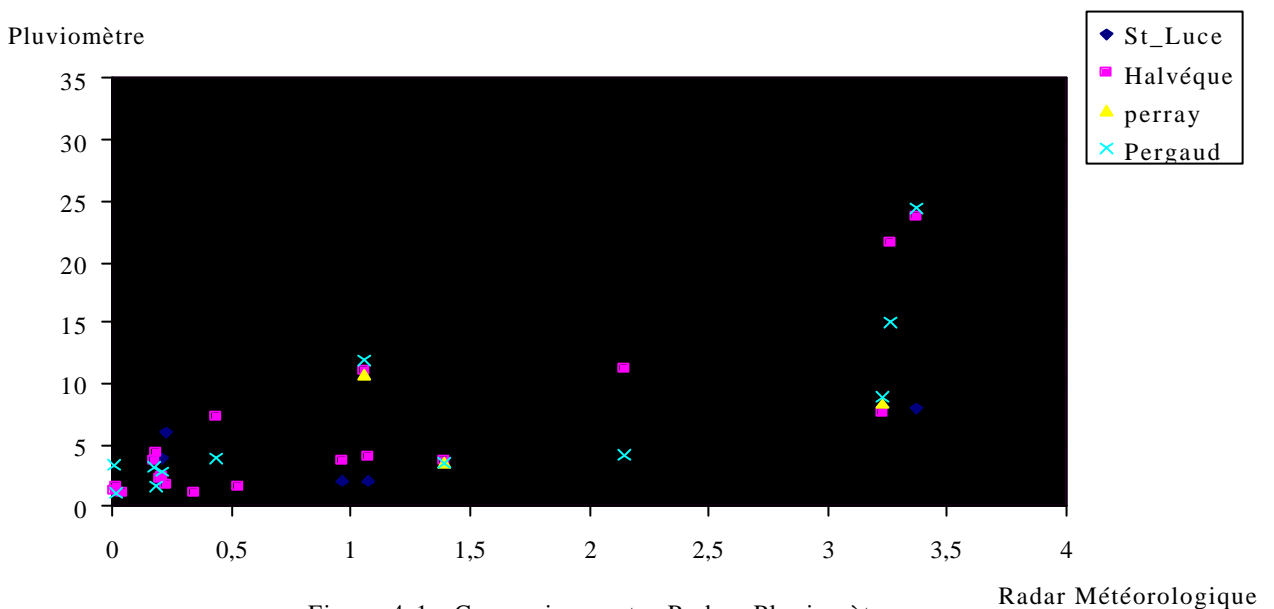


Figure 4-1 : Compraison entre Radar- Pluviomètre

appliquées sur la valeur de la réflectivité dbz obtenue par le radar météorologique.

Calibrage du radar

Afin d'avoir un bref aperçu sur la sensibilité du radar météorologique, quelques corrections sont faites au niveaux des variables caractéristiques du radar. Ces corrections sont faites surtout au niveau des constantes et des variables d'étalonnage du radar météorologique.

1^{er} calibrage : La réflectivité en décibels dbz est estimée par la conversion de la tension digitalisée captée par le radar. Cette conversion nécessite l'utilisation de constantes de calibrage du radar notées c_1 et c_2 et est définie par la relation suivante :

$$dBZ = c_1 V + c_2$$

Avec V : tension digitalisée
 c_1 est la pente du récepteur

et c_2 est la valeur de la réflectivité pour une tension nulle.

Pour le radar l'équation de calibrage originelle est :

$$dBZ = 0.3333 * V + 34.18$$

2^{ème} calibrage : Avec les coefficients de calibrage du premier étalonnage, la valeur de la pluie détectée reste très inférieure à la pluie précipitée. Ainsi la relation liant la réflectivité à la tension digitalisée devient :

$$dBZ = 0.41 * V + 27.1$$

Mais cette modification des constantes entraîne des valeurs de pluie très importantes.

3^{ème} calibrage : Il est fait en tenant compte des deux premiers. Ainsi par interpolation l'expression de la réflectivité devient :

$$dBZ = 0.95 * dBZ_{-} + 5.5$$

Où dBZ représente la valeur de la réflectivité détectée par le radar pour $ev(i)$

dBZ_{-} est la valeur corrigée correspondant à $ev(i)_{-}$

Correction d'un évènement pluvieux

Les corrections sont appliquées sur l'évènement pluvieux 68. Celles-ci agissent directement sur les valeurs des quantités de pluies détectées. Suivant les corrections appliquées, on obtient pour le même évènement pluvieux $ev68$, $ev68_{-}$ et $ev68_{-}$. Ces derniers obtiennent différentes valeurs au niveau de la quantité de pluie détectée par le radar. La variation des différents résultats pluviométriques est non négligeable. Ce pendant la pluie détectée présente environ la moitié de la quantité de pluie recueillie alors que la durée de la pluie tenue en compte par le radar météorologique est beaucoup plus importante que celle présentée par le relevé pluviométrique. Ces résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Mesures pluviométriques durée = 01 h 36 mn				Radar météorologique durée = 02 h 01 mn		
St_Luce	Halvéque	perray	Pergaud	ev68	ev68 ₋	ev68 ₋
	5,39	4,79	4,74	0,777	2,450	19,363

Choix de la correction

Comparés aux quantités de pluies recueillies par les pluviomètres, le résultat de l'évènement $ev68_{-}$ semble le mieux adapté. Ce résultat est plus proche de la valeur de la quantité de pluie recueillie par les pluviomètres. Cette même correction sera appliquée pour quelques évènements pluvieux afin d'avoir une meilleure appréciation des résultats et faire une bonne interprétation sur les quantités de pluies détectées.

Applications sur des événements pluvieux

Les résultats obtenus sur quelques événements pluvieux sont présentés au tableau suivant :

Evenements pluvieux	Pluviomètres				Radar météorologique	
	St_Luce	Halvéque	perray	Pergaud	ev(i)	ev_(i)
ev30		21,56		15,04	3,262	2,006
ev33		4,31		1,67	0,184	0,043
ev34		1,35		3,34	0,005	0,022
ev37		1,08			0,040	0,037
ev39		7,28		3,9	0,439	0,174
ev41		1,62			0,524	0,127
ev48	2,05	3,85			0,962	1,313
ev50	6,14	1,71			0,226	0,420
ev51	2,05	2,35			0,200	0,334
ev52	2,05	4,07			1,072	1,073
ev54	4	2,4		2,8	0,209	0,305

Le graphe suivant présente les quantités de pluies recueillies par les pluviomètres en fonction de celles détectées par le radar météorologique avec l'application de la correction.

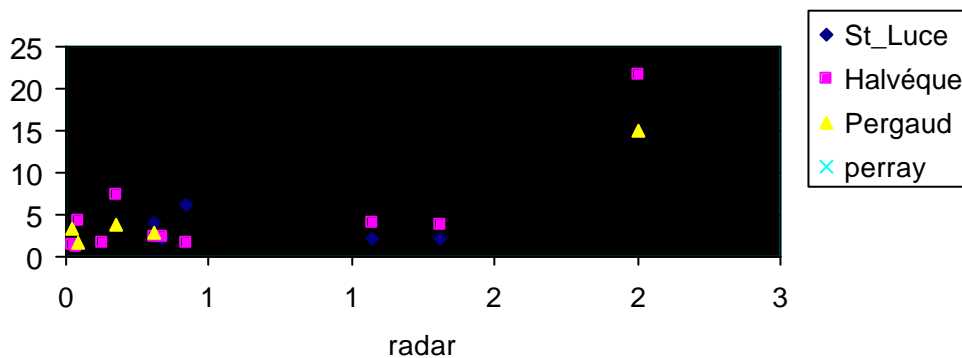


Figure 4-2 . : Evenements corrigés : radar- pluviomètres

Cette courbe montre que la correction de l'évènement pluvieux $ev(i)$ en $ev_(i)$ n'implique pas un grand changement sur les quantités de pluie détectées par le radar. La régression linéaire de la droite présente un coefficient de corrélation de l'ordre de $R = 0.9133$.

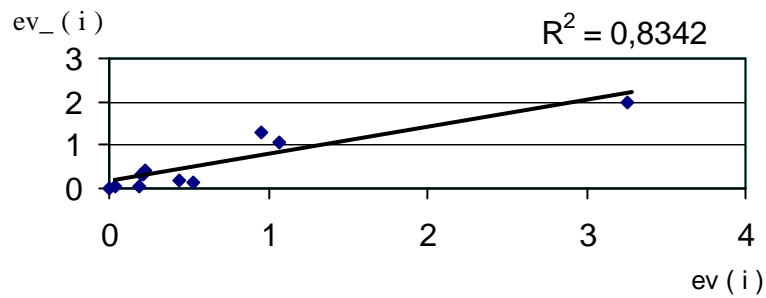


Figure 4-3. : Comparaison entre $ev (i)$ et $ev_ (i)$

6. CONCLUSION

Les pluies ont souvent la particularité d'être très variables dans le temps et dans l'espace. Fort heureusement, les météorologues disposent d'une gamme d'outils qui les aident à mieux prévoir les perturbations. Le radar constitue un outil indispensable pour la surveillance, la détection des zones pluvieuses et l'élaboration des prévisions météorologiques à courte échéance. Il permet de fournir, après traitement approprié, une estimation des cumuls de précipitations. L'estimation correcte des intensités pluvieuses passe par un bon étalonnage des paramètres caractéristiques du radar météorologique. Celle-ci conduit également à la détermination de la variabilité spatiale de la pluie.

BIBLIOGRAPHIE

ANDRIEU H., 1992 Le radar météorologique : un outil pour l'hydrologie.

DAGAN C., 2002 Etude de la réponse hydrologique du bassin versant de l'Aubinière.

BALAC S., 1999 Débuter avec Matlab

MOSINI M. L.,

?? 1999 Analyse statistique des données hydrologiques et première évaluation du logiciel canoë.

?? 2002, Projet de St Joseph de Poterie : état d'avancement du suivi des eaux pluviales.

Nicol, J. C., G. Delrieu and F. Cazenave, Radar calibration using the comparaison of measured and simulated ground clutter using a digital terrain model.

RODRIGUEZ F., 1999 Intérêt des banques de données urbaines pour l'analyse hydrologique – Détermination de la fonction de transfert d'un bassin versant urbain. Thèse , Institut National Polytechnique de Grenoble.