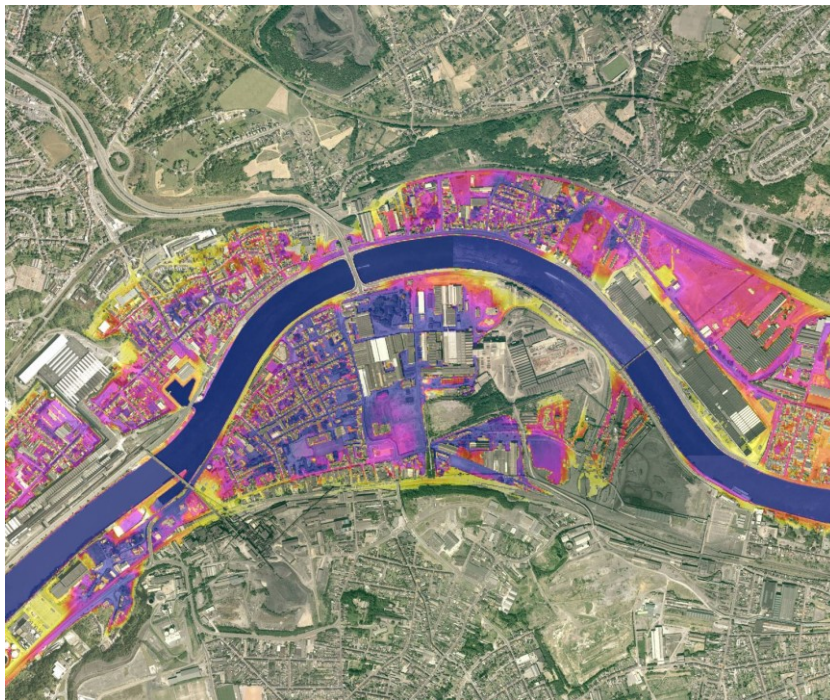


UNIVERSITÉ DE LIÈGE
Faculté des sciences
Sciences Géographiques

Les inondations en région liégeoise : approche basée sur les archives du démergement



Mémoire de DEA en Sciences
Jean Van Campenhout

Année académique
2005-2006

UNIVERSITÉ DE LIÈGE
Faculté des sciences
Sciences Géographiques

Les inondations en région liégeoise : approche basée sur les archives du démergement

Mémoire de DEA en Sciences
Jean Van Campenhout

Année académique
2005-2006

Remerciements

J'exprime mes plus vifs remerciements à mon promoteur, M. François Petit pour m'avoir permis de mener à bien ce travail, notamment grâce aux nombreux documents recueillis à cet effet tout au long de la période d'étude et aux conseils apportés au fil du travail. Je remercie aussi M. Jérôme Brixko, géomaticien au service Exploitation de l'Association Intercommunale pour le Démergement et l'Epuration des communes de la province de Liège (AIDE). Les conseils et les informations qu'il m'a transmis ont été indispensables pour concevoir l'analyse des archives d'exploitation de l'AIDE. Je remercie également les membres de la Direction pour m'avoir confié les dossiers dont ils disposaient par rapport aux événements étudiés.

Je témoigne également toute ma gratitude aux membres du jury qui ont accepté de lire avec intérêt le fruit de mon travail.

Enfin, je remercie Sophie Marischal pour m'avoir soutenu et aidé durant chaque phase de ce travail et au cours des recherches qu'il a nécessité.

Table des matières

1.	Introduction.....	4
2.	Présentation des données acquises et du cadre de l'étude	5
2.1.	Rappel des principes de fonctionnement du réseau de démergement et considérations pratiques utiles à ce travail.....	6
2.2.	Simulation de l'inondation créée par la crue de 1925-1926 dans la plaine alluviale de la Meuse.....	8
2.3.	Validation du modèle de submersion sur base du levé topographique	10
3.	Evaluation de la précision de localisation des interventions dans le mémoire de licence – utilisation du PICC	14
4.	Analyse de la répartition des interventions par rapport aux hauteurs de submersion simulées	18
5.	Analyse des données fournies par les enregistrements des paramètres de fonctionnement des stations principales et secondaires du réseau de démergement de l'AIDE.....	24
5.1.	Critique de l'utilisation des données et de la méthodologie appliquée à leur analyse ...	25
5.2.	Analyse des données des stations disponibles pour les orages conservés en archives à l'AIDE en relation avec la base de données des interventions de l'IILE encodée en 2004.....	28
5.3.	Analyse des débits des stations de l'AIDE	31
5.4.	Distribution temporelle des appels relatifs aux 3.049 interventions localisées	33
5.5.	Méthodologie de l'étude chronospatiale des appels émis par la population pour chaque événement orageux	36
5.6.	Analyse de l'événement pluvio-orageux du 19 août 1994	36
5.7.	Analyse de l'événement pluvio-orageux du 11 juillet 1995	38
5.8.	Analyse de l'événement pluvio-orageux du 3 au 5 octobre 1995.....	38
5.9.	Analyse de l'événement pluvio-orageux du 24 août 1997	45
5.10.	Analyse de l'événement pluvio-orageux du 4 au 5 juillet 1999	45
5.11.	Analyse de l'événement pluvio-orageux du 2 juillet 2000	50
5.12.	Les événements pluvieux récents et l'impact des précipitations intenses en région liégeoise	55
6.	Conclusion.....	57
7.	Bibliographie.....	58

1. Introduction

A l'issue du mémoire présenté en seconde licence en sciences géographiques et intitulé « Analyse des inondations en région liégeoise sur base des relevés des services d'intervention », nous avons entrepris de poursuivre la tâche initiée quant à l'analyse géographique des phénomènes pluvieux extrêmes recensés dans la région de Liège. Dans le cadre de ce mémoire de DEA, nous aborderons les phénomènes étudiés précédemment via une approche différente, à savoir l'étude des archives de l'AIDE (Association Intercommunale de Démergement et d'Epuration des eaux). Ceci fait suite à l'analyse cartographique de l'ensemble des appels émis par la population auprès du service d'incendie de Liège qui avait été entreprise en 2004. Dans ce cas-ci, il s'agira de tenir compte et d'étudier les données disponibles, à savoir, les volumes d'eau pompés par les différentes stations qui constituent le réseau de démergement mis en place suite à la subsidence des terrains situés sur d'anciennes concessions minières, et qui n'ont pas été remblayées lorsque cette exploitation a cessé.

Une recherche a également été menée au sujet de la localisation des inondations actuelles par rapport aux zones ayant été les plus touchées lors des crues historiques. La crue de 1925-1926 a été prise comme référence, elle est en effet la crue débordante la plus importante pour laquelle nous disposons de nombreux documents d'archives, la seule crue plus intense encore remontant en effet au 14 janvier 1643 (LEJAXHE, 2006). Ceci a permis de reconstituer l'allure du plan d'eau au pic de crue, et dès lors de mesurer les hauteurs théoriques de submersion. Une corrélation entre la localisation des zones théoriquement les plus inondables et celle des interventions sera recherchée.

La base de données créée suite à l'encodage des archives des pompiers de l'IILE sera également réutilisée afin de poursuivre l'analyse des informations existantes, en tentant de corréler notamment la localisation et l'heure des appels émis par la population aux précipitations qui ont affecté la région liégeoise durant la période d'étude.

Enfin, l'utilisation des données issues de l'exploitation du réseau de démergement aura pour but l'étude des corrélations entre les moments de déclenchement des différentes pompes et les intensités de précipitations mesurées au sein de l'agglomération liégeoise. Pour chaque événement pour lequel nous disposons d'archives de pompage, la situation météorologique sera analysée afin de définir les causes d'inondations à répétition au sein de la région de Liège. L'évolution des précipitations extrêmes au cours de la période d'étude sera finalement abordée.

2. Présentation des données acquises et du cadre de l'étude

Les archives qui nous ont été transmises concernent quelques épisodes pluvio-orageux exceptionnels ayant touché la région liégeoise. Cependant, il n'est pas possible de récupérer l'ensemble des données sur toute la période d'étude. Nous nous cantonnerons dès lors à l'analyse des dossiers qui nous ont été fournis. Ces épisodes pluvieux se sont produits aux dates suivantes :

- le 23 juin 1989
- le 19 août 1994
- le 11 juillet 1995
- les 3 et 4 octobre 1995
- le 24 août 1997
- le 4 juillet 1999
- le 2 juillet 2000

Comparons à présent les périodes présentées ci-dessus aux pics de précipitations et d'interventions des services d'incendie (voir figure 1). Il faut remarquer ici que la période couverte par le mémoire de licence s'étendait du 1^{er} janvier 1993 au 3 juin 2004. Nous ne disposons dès lors pas de données concernant les interventions des pompiers pour le phénomène du 23 juin 1989. Les données de précipitations journalières présentées ici sont celles de la station de Bierset. Remarquons cependant qu'en temps d'orage, la variabilité spatiale des précipitations affectant un territoire donné est très importante.

Figure 1. Nombre d'interventions effectuées par l'IILE du 01/01/1993 au 03/06/2004

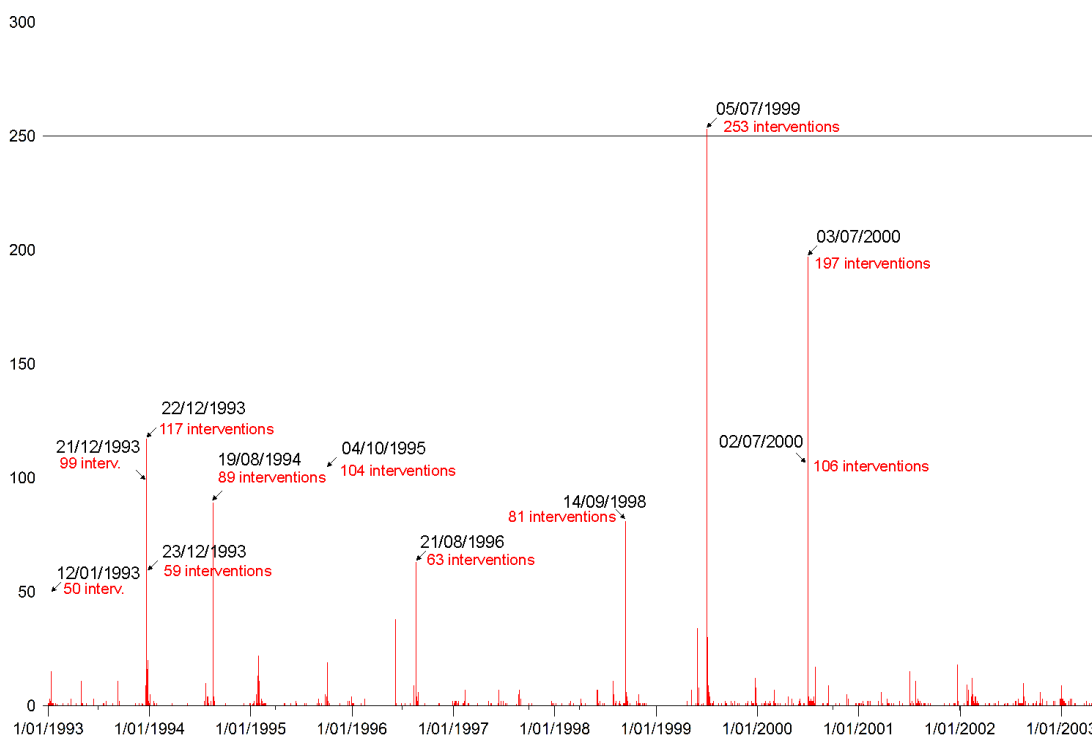
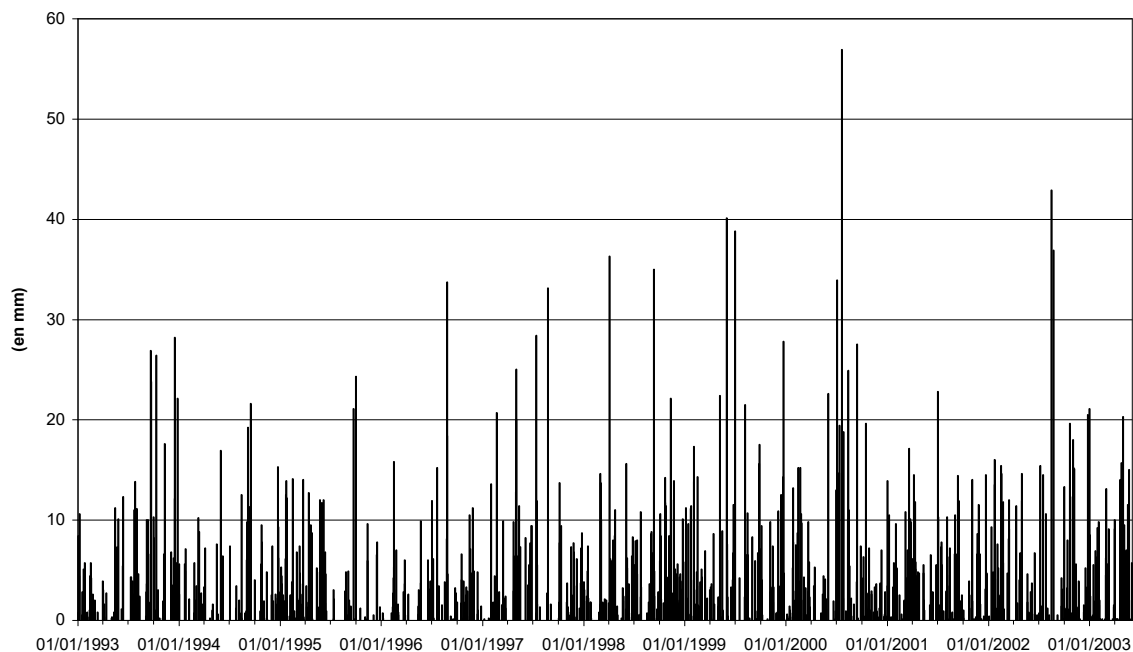


Figure 2. Précipitations journalières mesurées à Bierset entre le 01/01/1993 et le 31/07/2003



2.1. Rappel des principes de fonctionnement du réseau de démergement et considérations pratiques utiles à ce travail

L'origine du démergement remonte à 1928 alors que la catastrophe de l'inondation de la plaine alluviale de la Meuse en 1925-26 était présente dans tous les esprits. Suite à l'exploitation des veines de charbon dans le sous-sol liégeois, le sol a subi en de nombreux endroits un affaissement important (à titre d'exemple, entre 1877 et 1977 : 5,25 m d'affaissement au point bas de la rue Philippe de Marnix à Seraing ; 3,60 m au point bas de la rue Bouïon à Flémalle-Grande ; 5 m au point bas de la rue des Mineurs à Jemeppe et 5,30 m au point bas du quartier Sous-les-Vignes à Sclessin). Le phénomène s'est accentué depuis la fin de l'exploitation minière suite à l'absence de remblaiement à l'absence de remblaiement des galeries d'extraction (AIDE, 2004). Les causes de cette absence de remblaiement des veines exploitées sont essentiellement liées aux difficultés techniques et financières de colmatage de couches à structure géologique complexe, voire chaotique. La profondeur des sites d'extraction rendait en outre cette manœuvre d'autant plus laborieuse, les couches exploitées se situaient entre la surface et 1.250 m de profondeur, dans le Houiller supérieur (Westphalien), car les 250 m de Houiller inférieur situés en dessous ne renferment que du charbon de faible qualité¹.

Au fil du temps, la menace d'inondation n'a pu être que croissante pour les zones bâties sous lesquelles du charbon avait été extrait puisque le lit de la Meuse en tant que tel n'a pas subi de subsidence. En effet, les concessions minières ne s'aventuraient pas à son aplomb.

¹ <http://www.terrils.be/fr/Terrils/Histoire/liege/index.php>

Notons aussi que le centre de l'agglomération liégeoise, schématiquement entre le pont de Rénory et la commune de Herstal, n'était pas, lui non plus, sujet à une exploitation minière de son sous-sol. Un territoire d'environ 200 hectares y a été préservé de toute excavation. La présence d'épaisses couches de graviers, liée au site de confluence avec l'Ourthe, empêchait l'exploitation à l'origine. Ensuite, lorsque les procédés pour traverser ces couches perméables ont été découverts, la ville était déjà trop importante pour que l'on puisse exploiter le charbon se trouvant dans son sous-sol (LECOUTURIER, 1930). Cependant, la plaine alluviale sur laquelle le centre historique de Liège s'est construit n'était pas pour autant à l'abri de tout risque d'inondations. Preuve en est l'inondation de 1925-26. Ce cas ne s'est pas reproduit depuis lors, mais des niveaux d'eau élevés ont été atteints en 1993 et 1995 (le 22 décembre 1993, la cote de la Meuse avait atteint 64,35 m au Pont de Seraing, et 64,30 m le 31 janvier 1995). C'est uniquement grâce à la rectification du lit, la destruction de nombreux obstacles dans le cours du fleuve (anciennes écluses, déversoirs, barrages et dragage effectués pour assurer la navigation à plus grand gabarit) et surtout à l'aménagement de murs anti-crues que l'impact des crues a pu être réduit, tout au moins dans les parcelles situées le plus en contrebas de la plaine alluviale.

La protection de la région liégeoise vis-à-vis de la Meuse par ce système de digues a certes un effet bénéfique sur les inondations puisque la hauteur nécessaire au débordement a été considérablement augmentée par ce biais. Mais il ne faut pas omettre que ceci a également eu pour effet de créer deux compartiments distincts : la plaine alluviale et le lit mineur du fleuve. Or, d'importantes masses d'eau doivent être évacuées en Meuse pour éviter une inondation exogène par l'intermédiaire des eaux de pluie, de ruissellement ainsi que de remontées phréatiques dans la plaine alluviale et pour débarrasser la ville des flux d'eaux usées après leur passage en station d'épuration.

Notons d'abord que l'ensemble des parties sommitales des sous-bassins hydrographiques démergés, ce qui représente une surface collectrice de 7.500 hectares, sont reliés par des collecteurs de ceinture vers l'aval afin d'évacuer en Meuse l'ensemble des eaux récoltées en amont, par l'intermédiaire de 11 bassins d'orage si l'intensité des précipitations le nécessite. Ceci s'effectue par gravité, quel que soit le niveau de la Meuse et passe par l'intermédiaire de conduites étanches dans la plaine alluviale. Il s'agit du premier principe directeur du démergement.

Le second principe directeur est l'utilisation de deux types de réseau de collecte des eaux dans la plaine alluviale :

- un réseau *supérieur*, constitué de collecteurs à grande section et situé le plus près possible de la surface du sol ; il récolte les eaux de pluie et les eaux usées de la population et des industries ;
- un réseau *inférieur*, constitué de collecteurs de petite section (diamètre intérieur : 0,40 à 0,50 m) et enfouis à grande profondeur (3 à 7,5 m), récoltant les eaux d'infiltration.

C'est ici qu'interviennent les stations de pompage primaires et secondaires, mises en place par l'AIDE. Les eaux de pluie dans la plaine alluviale, les eaux provenant des toitures des habitations ainsi que les eaux usées sont également récoltées dans plusieurs canalisations et évacuée en Meuse via les stations de pompage principales. Un second réseau, dans la partie amont de la plaine, prend en charge les eaux d'infiltrations de la nappe phréatique dans les caves des nombreuses habitations qui y sont raccordées. Cela a pour objectif de récolter tous les suintements des parois qui rendraient les fondations des habitations humides voire insalubres. Notons toutefois que le système unitaire, récoltant les eaux de pluie et les eaux d'infiltration de la nappe, n'est possible que dans les parties du tissu urbain où la densité de bâtiments est réduite et où la pose à grande profondeur d'une canalisation de diamètre important est réalisable. Ceci n'a pu être effectué qu'en aval de Liège pour les questions d'ordre technique et d'aménagement du territoire évoquées ci-dessus. Lorsque le système dual a été mis en œuvre, des stations secondaires, situées nettement plus bas dans la plaine alluviale, ont pour objectif de rehausser les eaux d'infiltration de la nappe (situées donc au niveau des soubassements des caves) vers la conduite principale la plus proche.

L'ensemble des eaux sera ensuite évacué en Meuse, par gravité lorsque le niveau d'eau atteint par le fleuve le permet, et par pompage quand la différence de pression hydrostatique aurait pour effet non seulement d'empêcher l'évacuation des eaux vers la Meuse mais provoquerait surtout un reflux par le principe des vases communicants depuis le lit du fleuve vers la plaine alluviale. De manière à éviter cette situation problématique, des vannes étanches séparent les deux compartiments et un « col de cygne » faisant office de siphon inversé à la sortie des pompes empêche l'eau de la Meuse de refouler dans la plaine alluviale. Il n'est dès lors pas étonnant de constater que ce col de cygne se situe au-dessus de la cote maximale de crue connue par le passé, avec une certaine marge de sécurité. L'ensemble du réseau d'évacuation des eaux est dédoublé pour prévenir tout dommage. L'alimentation électrique des pompes à eau et des pompes à vide qui permettent leur amorçage est redondante de manière à assurer une sécurité optimale.

2.2. Simulation de l'inondation créée par la crue de 1925-1926 dans la plaine alluviale de la Meuse

A partir des données disponibles auprès de l'AIDE, et notamment des cotes de crue atteinte durant l'hiver 1925-1926, il est possible de reconstituer globalement l'étendue de la zone inondée. Afin de faciliter la simulation, nous ne tiendrons pas compte de l'affaissement du sol qui a pu se produire depuis lors. Par après, nous l'évaluerons de manière à reconstituer la situation telle qu'elle se présentait en 1925-1926, d'après les données disponibles. Le cheminement de cette modélisation est présenté à la carte 1A. Cette procédure a pour objet d'évaluer les hauteurs et les emprises de submersion dans l'ensemble de la plaine alluviale

étudiée. Les seules données cartographiques disponibles se limitent en effet au centre-ville de Liège, entre le Val Benoît et Vivegnis au niveau de la délimitation des zones inondées tandis que les hauteurs de submersion ne sont connues que ponctuellement dans ce même secteur. Le modèle numérique de terrain (MNT) utilisé est le modèle numérique de terrain des lits majeurs des principaux cours d'eau, réalisé par la société Sodiplan pour le MET – DG2 – Direction générale des Voies Hydrauliques. Les levés ont été achevés le 30 avril 2004. Ce MNT a été créé par altimétrie laser avec une mesure des premiers et derniers échos. Le premier écho permet de construire un modèle numérique de surface (MNS) qui englobe la végétation tandis que le dernier écho aboutit à la création d'un modèle numérique de terrain proprement-dit puisque la végétation a été gommée par rapport au modèle précédent. Remarquons cependant que le dernier écho est parfois renvoyé par la végétation elle-même et non par le sol situé sous le couvert forestier. Cela se traduit sur le MNT par des pics d'altitude plus élevée que les points voisins. La résolution spatiale est de 1 point par mètre carré, ce qui aboutit à une grille dont la maille mesure 1 m. La précision altimétrique moyenne est de 11 cm.

Parmi les données transmises par l'AIDE, nous disposons de plusieurs cotes de la crue de 1925-1926 en divers points de l'agglomération liégeoise :

- | | |
|---|---------|
| - à l'ancienne écluse de Jemeppe ² : | 66,51 m |
| - au pont des Arches à Liège : | 63,43 m |
| - à l'ancien barrage d'Hermalle-sous-Argenteau ³ : | 58,90 m |

Par ailleurs, les crues dont niveaux atteints le 22/12/1993 et le 31/01/1995 ont atteint un niveau respectif de 64,35 m et de 64,30 m au pont de Seraing.

Initialement, l'axe hydraulique de la crue de 1926 n'était pas disponible, les trois cotes de crues concernant l'événement de 1925-26 ont donc été positionnées sur carte. Il s'agit ensuite, suivant la sinuosité du cours d'eau, de reconstituer le plan incliné passant par ces trois points et dont la pente est perpendiculaire à l'axe de la Meuse. Nous devons malheureusement faire une simplification au niveau des éventuels seuils et mouilles du fleuve et soustraire l'influence des barrages, écluses et autres aménagements présents le long du cours d'eau. Les affaissements miniers depuis 1925-1926 n'ont pu être envisagés. Cette simulation simplifiée du point de vue géométrique sera comparée avec un plan existant pour une partie de la plaine alluviale inondée en 1925-1926 (voir carte 1B). D'autres repères de crue sont également visibles à plusieurs endroits de la ville (cathédrale, grande poste, université, église Saint-Denis, ...). Les anciennes cartes postales et photographies d'époque ont permis de valider le modèle établi (voir point 2.3)

Afin d'effectuer une propagation du plan d'eau d'après les cotes enregistrées en 1925-26,

² Ouvrage aujourd'hui détruit, mais dont la localisation a pu être obtenue sur d'anciennes cartes

³ Idem

nous avons digitalisé l'axe de la Meuse et positionné sur celui-ci des points à un intervalle de 100 m. Les trois cotes ont été attribuées aux points les plus proches correspondants. Ensuite, une simple règle de trois a été appliquée pour interpoler les valeurs aux points intermédiaires. Pour le tronçon situé en amont de la première cote et pour celui situé en aval de la dernière cote, nous avons utilisé la même pente que sur les tronçons les plus proches.

- pente moyenne en amont de l'ancienne écluse de Jemeppe : 0,31 m/km (extrapolée)
- pente moyenne entre Jemeppe et le pont des Arches : 0,31 m/km (interpolée)
- pente moyenne entre le pont des Arches et Hermalle: 0,42 m/km (interpolée)
- pente moyenne en aval d'Hermalle : 0,42 m/km (extrapolée)

Cette approximation résulte initialement du manque de données de contrôle dont nous disposions au moment de l'élaboration de la première simulation. Ensuite, des profils perpendiculaires à cet axe ont été créés, ils mesurent 1 km de part et d'autre du point central, ce qui correspond à la largeur maximale sur laquelle s'étend le MNT laser. Cependant, suite à la sinuosité de la Meuse, il a été nécessaire de réduire aux endroits de forte concavité la longueur des perpendiculaires afin d'éviter leur chevauchement, qui aurait entraîné par la suite des incohérences altitudinales aux points de courbure maximale. La mosaïque compte 22.000 x 20.000 mailles ayant chacune 1 mètre de côté.

X min : 222.000 m X max : 244.000 m

Y min : 138.000 m Y max : 158.000 m

Cependant, pour des soucis de rapidité d'exécution des procédures de calcul et d'affichage, nous avons réduit la résolution à 5 m en x et en y, ce qui est amplement suffisant pour mettre en évidence les détails tels que les habitations et autres obstacles situés en plaine alluviale. Enfin, nous avons calculé la profondeur de submersion en chaque maille de la zone inondée telle qu'elle a été définie par l'intersection du plan simulé et du MNT de lit majeur.

Afin de valider le modèle établi uniquement sur base de trois points pour l'ensemble de l'agglomération liégeoise, nous disposons d'un levé topographique précis de la zone inondée le 1^{er} janvier 1926. Ce plan a été dressé par l'ingénieur Lekenne du Ministère des Travaux Publics. Le matin du 1^{er} janvier, au pic de crue, on a estimé que le débit du fleuve devait être de 2.950 m³/s (AIDE, 2004). Le territoire inondé représentait alors, pour la ville de Liège uniquement, 425 hectares : 215 en rive gauche et 210 en rive droite (LECOUTURIER, 1930).

2.3. Validation du modèle de submersion sur base du levé topographique

Le levé topographique n'a été réalisé que pour le centre-ville de Liège. La comparaison entre modèle et réalité ne pourra dès lors se faire qu'entre le Val Benoît et l'extrémité sud de l'île Monsin. Dans les limites du MNT disponible, nous pouvons constater une bonne adéquation des limites de crue simulées par rapport à l'extension relevée sur le terrain. Cependant, une

bande de terrain d'environ 300 m est simulée comme étant inondée dans le prolongement de la rue Saint-Léonard, vers Herstal, alors que cela n'était pas le cas d'après le levé. Dans la partie est de la plaine alluviale, l'extension du MNT est insuffisante pour couvrir l'ensemble de la zone inondée. Nous ne pouvons dès lors pas y vérifier les limites. Dans la partie ouest de la plaine, dans le quartier de Fragnée, l'inondation était sous-estimée d'environ 50 m au niveau de son emprise au sol. La jonction entre le boulevard d'Avroy et le boulevard de la Sauvenière n'est pas inondée dans la simulation alors qu'elle l'était en réalité, d'après les photographies d'époque disponibles (voir figure 3, LEJAXHE, 2006).

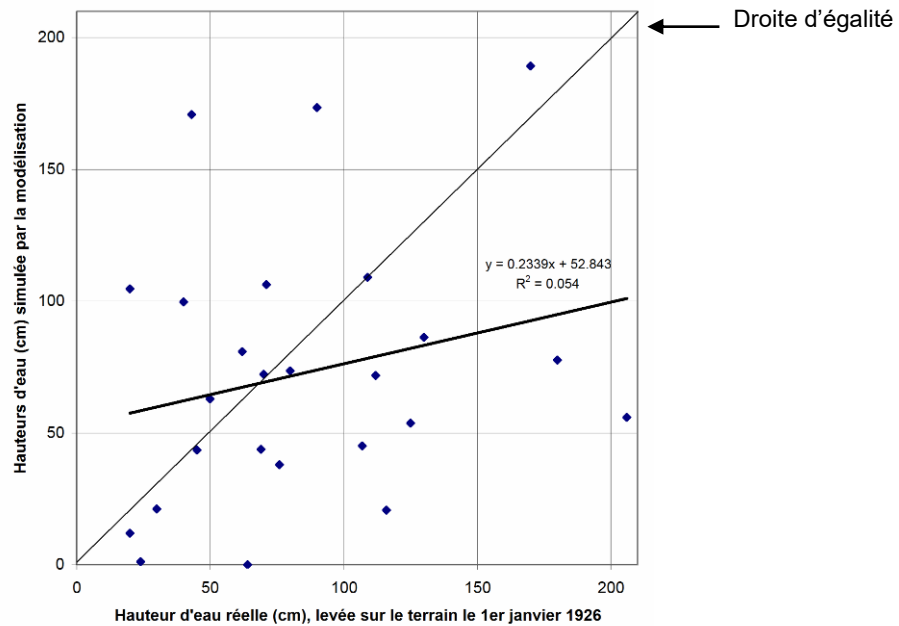
Figure 3. La jonction du boulevard d'Avroy et du boulevard de la Sauvenière en 1926



Source : LEJAXHE J.-L. 2006. 1925-1926, Inondations au Pays de Liège, p. 105

Comme on peut le constater sur la figure 4, la précision du premier modèle au niveau des hauteurs de submersion n'est pas bonne. Il se basait, rappelons-le sur seulement 3 points entre Seraing et Hermalle. Cependant, l'adéquation des limites de crue à la réalité semble correcte.

Figure 4. Comparaison des hauteurs de submersion simulées et observées d'après la reconstitution du plan d'eau basée sur 3 points de contrôle



Dans un second temps, nous avons pu obtenir le profil⁴ en long de l'axe hydraulique de la Meuse pour la crue du 1^{er} janvier 1926. Cette source de données nous a fourni 30 points de contrôle au lieu des 3 points utilisés dans la première simulation. Un second plan d'eau a été reconstitué, son emprise et la comparaison des hauteurs de submersion par rapport à la réalité et au premier modèle ont été évaluées. La carte 1C indique les différences altimétriques relevées entre le plan d'eau simulé avec 3 points et celui basé sur 30 points. Nous pouvons scinder la zone modélisée en cinq secteurs d'anomalies variables ; d'amont en aval, les secteurs sont présentés ci-dessous quant à leur localisation et leurs caractéristiques :

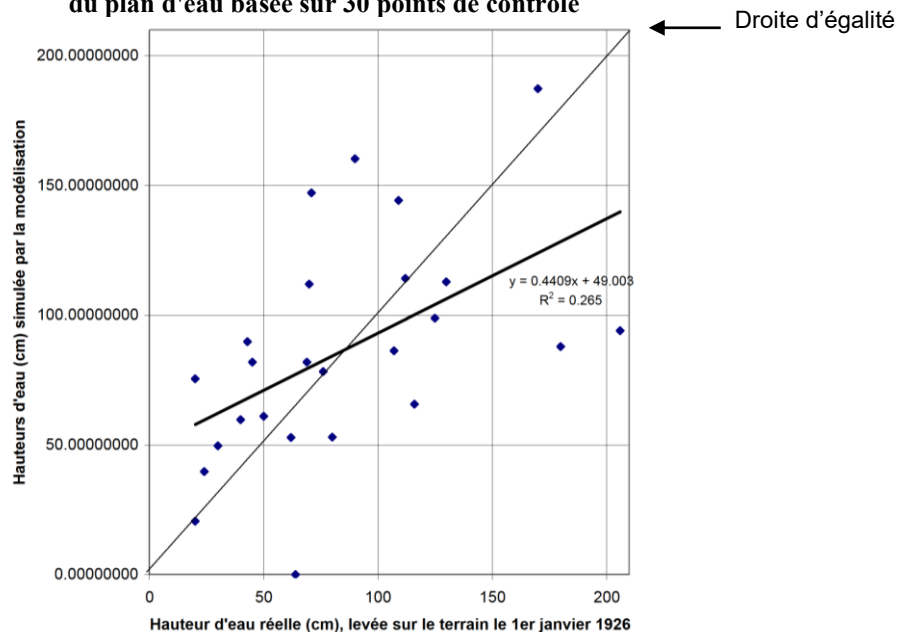
- en amont de Jemeppe : l'altitude du plan d'eau créé avec 3 points est surestimée (entre + 20,00 et + 60,00 cm) par rapport au plan d'eau créé avec les 30 points de contrôle du profil hydraulique ;
- à Jemeppe, et dans le méandre situé entre Jemeppe et Seraing, les altitudes correspondent, elles sont comprises dans la gamme de valeur allant de -19,99 à + 20,00 cm ;
- entre Seraing et le pont des Arches à Liège, deux zones montrent clairement une sous-estimation de l'altitude du plan d'eau basé sur 3 points par rapport à l'autre. En conséquence, les zones inondées ont dès lors été sous-estimées dans ces secteurs, ainsi que les hauteurs de submersion des espaces concernés ;
- le méandre suivant le pont des Arches et sur une distance d'environ deux kilomètres vers l'aval, la différence d'altitude entre les deux modèles est comprise entre -19,99 et + 20,00 cm ;
- à partir du quartier de Vivegnis vers l'Île Monsin, les différences altimétriques

⁴ Profil en long et axe hydraulique – Direction des Voies Hydrauliques de Liège – E³ n°4949, dressé par Ir. N. Schiepers, 01/1994

deviennent importantes, de l'ordre de + 130,00 à + 140,00 cm, ce qui a engendré une surestimation importante de l'emprise spatiale des inondations à partir du plan créé sur base des trois points de contrôle. En aval de la bifurcation du canal Albert, les surestimations diminuent pour atteindre + 20,00 à + 40,00 cm au niveau de Visé.

Par ailleurs, la comparaison des hauteurs de submersion avec les cotes de crue indiquées sur le plan de Lekenne est présentée à la figure 5. Les emprises spatiales des zones inondées théoriquement à partir des 30 points de contrôle et en réalité sont comparées à la carte 2, les zones inondées basées sur le modèle à 3 points de contrôle n'ont pas été reprises ici vu leur inadéquation à la réalité.

Figure 5. Comparaison des hauteurs de submersion simulées et observées d'après la reconstitution du plan d'eau basée sur 30 points de contrôle



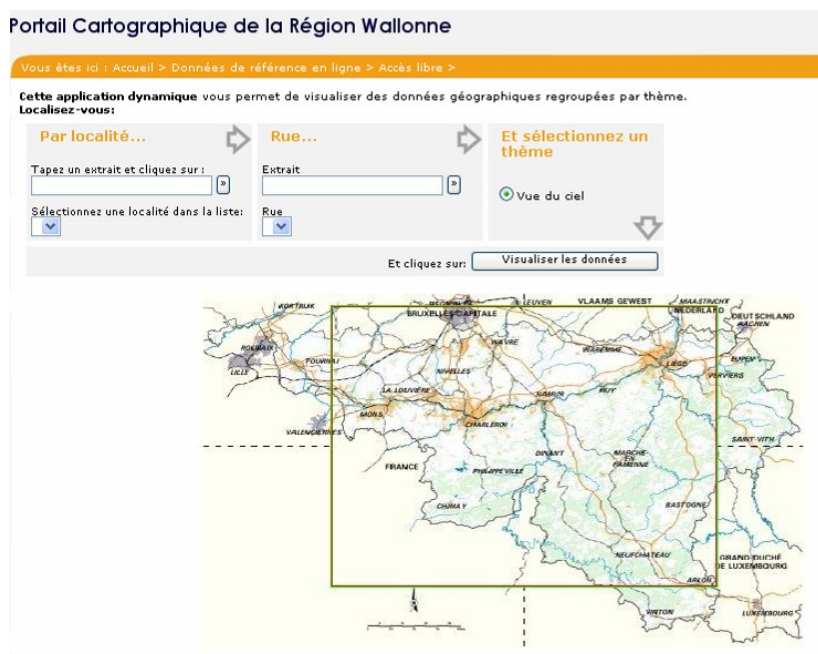
En comparaison avec la figure 4, l'ajustement est meilleur sur base des 30 points de contrôle, mais n'est pas exempt d'imperfections. La précision relative du MNT utilisé, du relevé topographique effectué en 1926, de la localisation précise des cotes mesurées ainsi que la pertinence de la méthode utilisée pour reconstituer le plan d'eau de manière simplifiée sont probablement à l'origine de la variabilité constatée ici. Cependant, les limites d'extension du plan d'eau dans les quartiers du centre-ville correspondent maintenant de manière plus adéquate au levé, notamment à Fragnée et Vivegnis. En revanche, la jonction du boulevard d'Avroy avec le boulevard de la Sauvenière reste émergée d'après le modèle à 30 points de contrôle, la cause de cette anomalie n'a pas été élucidée.

Dans ce chapitre, la simulation simplifiée de la crue de 1926 avait pour but de mettre en exergue les principales zones concernées par le démergement, et de comparer leur hauteur de submersion théorique en l'absence de système de démergement avec la densité d'interventions des services d'incendie recensées dans ces zones. Nous avons pu constater que la précision de modèle utilisé était suffisante pour permettre les comparaisons de distribution spatiale des interventions et des hauteurs de submersion théoriques qui seront abordées au point 4.

3. Evaluation de la précision de localisation des interventions dans le mémoire de licence – utilisation du PICC

A l'occasion du mémoire de licence, nous avons converti les adresses où s'étaient produites les interventions des pompiers de la région liégeoise par l'intermédiaire des bases de données disponibles à l'époque de sa rédaction. Cependant, la précision de la localisation était inconnue, puisqu'elle était basée essentiellement sur la répartition des habitations le long des linéaires de rues pour lesquels seuls les numéros situés aux extrémités étaient disponibles. Les communes de Liège et de Seraing semblaient cependant offrir une meilleure précision de localisation dans la base de données disponible (Microsoft Autoroute Express 2004). Dans le cadre de ce mémoire de DEA, et pour le territoire pour lequel nous disposons du modèle numérique de terrain des lits majeurs, il nous a semblé essentiel d'effectuer une vérification de la localisation. Ceci a été possible grâce à l'élaboration du PICC (Plan informatique de cartographie continue) par la Région Wallonne et à sa mise à disposition auprès du public et des administrations. Au 01/08/2006, les fichiers sous forme vectorielle n'étaient pas encore disponibles pour l'entité de Liège et ses environs immédiats. Cependant, une version quasi complète du PICC (dans l'état actuel de son avancement) est accessible sur le portail cartographique de la Région Wallonne⁵ (voir figure 6). Seules manquent les informations relatives à l'altitude.

Figure 6. Présentation du portail cartographique de la Région Wallonne



En outre, ce site permet d'effectuer des requêtes spatiales directement sur base de la commune et du nom de la rue. Il s'agit ensuite de naviguer au sein de la carte afin de déterminer les coordonnées des bâtiments souhaités, d'après leur numéro de police.

Les coordonnées sont directement exprimées en Lambert belge 72, et non plus en latitude, longitude comme cela avait été le cas

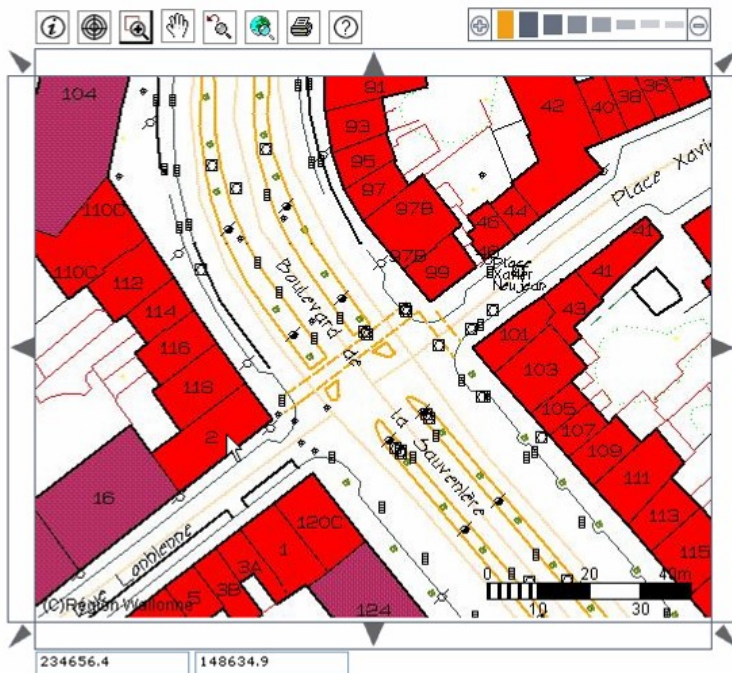
dans la précédente base de données utilisée.

L'exemple ci-dessous nous donne les coordonnées du numéro 2 de la rue Lonhienne à Liège (voir figure 7). Les valeurs retenues ont été arrondies au mètre et repérées au centroïde du

⁵ <http://carto3.wallonie.be/wallonie/index.jsp?choice=AccesLibre>

bâtiment. La précision est équivalente à celle du MNT utilisé.

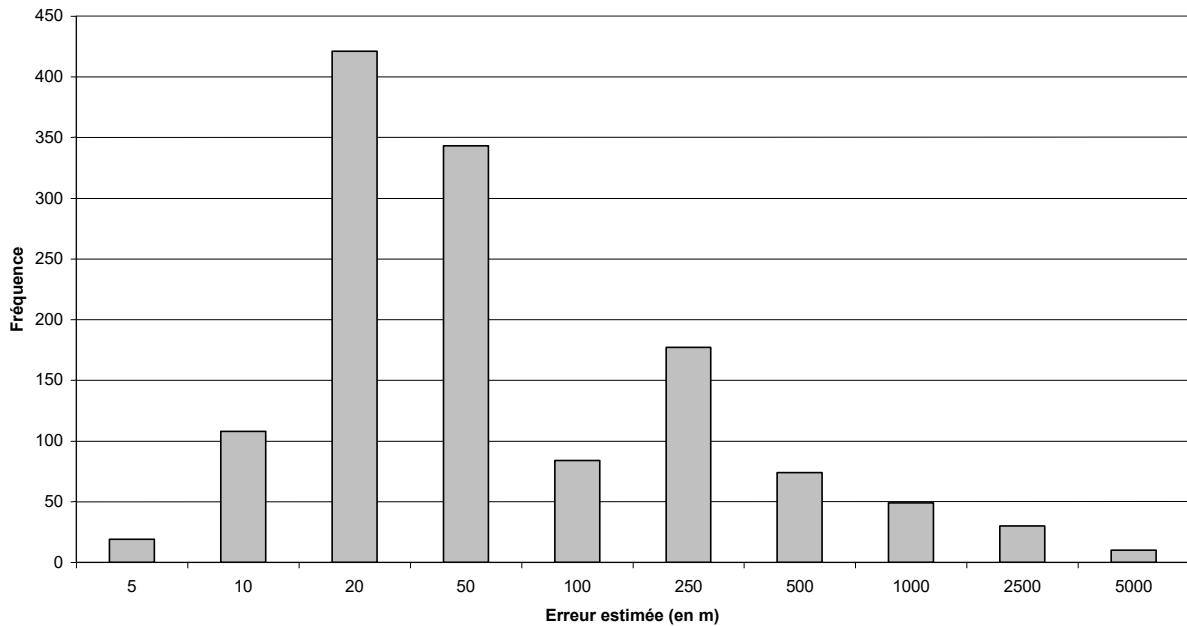
Figure 7. Méthode de relevé des coordonnées des bâtiments



Sur base de cette méthode, la localisation exacte de 1442 points a été recherchée. Parmi ceux-ci, 127 bâtiments n'ont pas pu être localisés avec précision sur le PICC. Ces omissions proviennent sans doute du PICC en lui-même pour une part et, dans une moindre mesure, d'incohérences au niveau de la rédaction des fiches d'intervention des services d'incendie.

Les 1315 points qui ont pu être identifiés sur le PICC ont été comparés à leur localisation déterminée précédemment sur base des données existant en 2004. En x et en y, les erreurs de localisation ont été mesurées, ainsi que la distance entre le point déterminé par la première méthode et le point déterminé via le PICC ($d = \sqrt{x^2 + y^2}$). L'histogramme suivant nous montre la distribution des erreurs de localisation, pour x et y, sur l'ensemble des points réédités. L'erreur minimale est de 1 m tandis que l'erreur maximale atteinte est de 4974 m. Cette erreur importante touche quelques points, et est due à l'existence de noms de rues identiques dans certaines parties de l'agglomération liégeoise. Seule la vérification sur le PICC a permis de déterminer la présence ou l'absence de maisons comportant les numéros recherchés dans l'une ou l'autre rue. En outre, le long des grands axes routiers (avenues, voiries sur quai, ...), l'erreur a pu être importante en considérant l'étendue du segment de route portant un nom unique sur plusieurs kilomètres. Etant donné la forte dissymétrie de la distribution, les limites de classes ont été adaptées en conséquence, afin de pouvoir observer clairement la répartition des erreurs estimées.

Figure 8. Distribution de la fréquence des erreurs de localisation des bâtiments inondés (période 1993 - 2004)



Nous pouvons constater que la majorité des erreurs sont comprises entre 10 et 100 mètres. La dissymétrie de la distribution ne permet pas de se fier à la moyenne pour caractériser les erreurs de positionnement ($\mu = 149$; $\sigma = 433,25$). Il est aisé de constater dès lors qu'il était nécessaire de préciser la localisation quand cela était faisable étant donné le différentiel de précision atteint par le modèle numérique de terrain (résolution = 1 m).

Dans un second temps, l'analyse de la distribution spatiale des erreurs de localisation a pu être permise grâce à la réalisation des cartes 3A, 3B et 3C. Des symboles proportionnels ont été appliqués aux points afin d'indiquer leur erreur de localisation respective, et ceci en fonction des mêmes classes de fréquence que celles de l'histogramme ci-dessus. Etant donné l'intervalle de valeur important, il n'était pas envisageable de représenter les symboles de manière strictement proportionnelle à leur rayon. On constate que les localisations les plus précises (1 à 20 m d'erreur maximale, ceci concerne 567 bâtiments) se retrouvent globalement au centre de la commune de Liège (axe boulevard d'Avroy / boulevard de la Sauvenière), dans les quartiers de Féronstrée et Hors-Château, en Outremeuse ainsi que le long de la rive droite de la Dérivation de la Meuse. Les habitations jouxtant le Pont de Renory étaient également bien localisées pour la plupart d'entre-elles.

La seconde tranche d'imprécision est déterminée entre 21 et 250 m. A ce niveau, l'imprécision peut déjà avoir une influence sensible sur les conditions locales d'écoulement et de microtopographie. Les bâtiments concernés par cette erreur de localisation initiale sont au nombre de 595 et sont situés dans les zones suivantes : en amont de la zone d'étude, au niveau d'Engis, la plupart des bâtiments étaient positionnés à 200 m près ; dans le centre de Seraing ainsi que la partie aval d'Ougrée également. Dans le centre-ville, quelques bâtiments appartiennent à cette classe, mais les erreurs étaient plutôt de l'ordre de 50 m. Enfin, vers l'aval et notamment Herstal, Cheratte et Vivegnis, la base de données de type « itinéraires

routiers » utilisée en 2004 a entraîné des erreurs de localisation de l'ordre de 150 à 250 m suivant les cas.

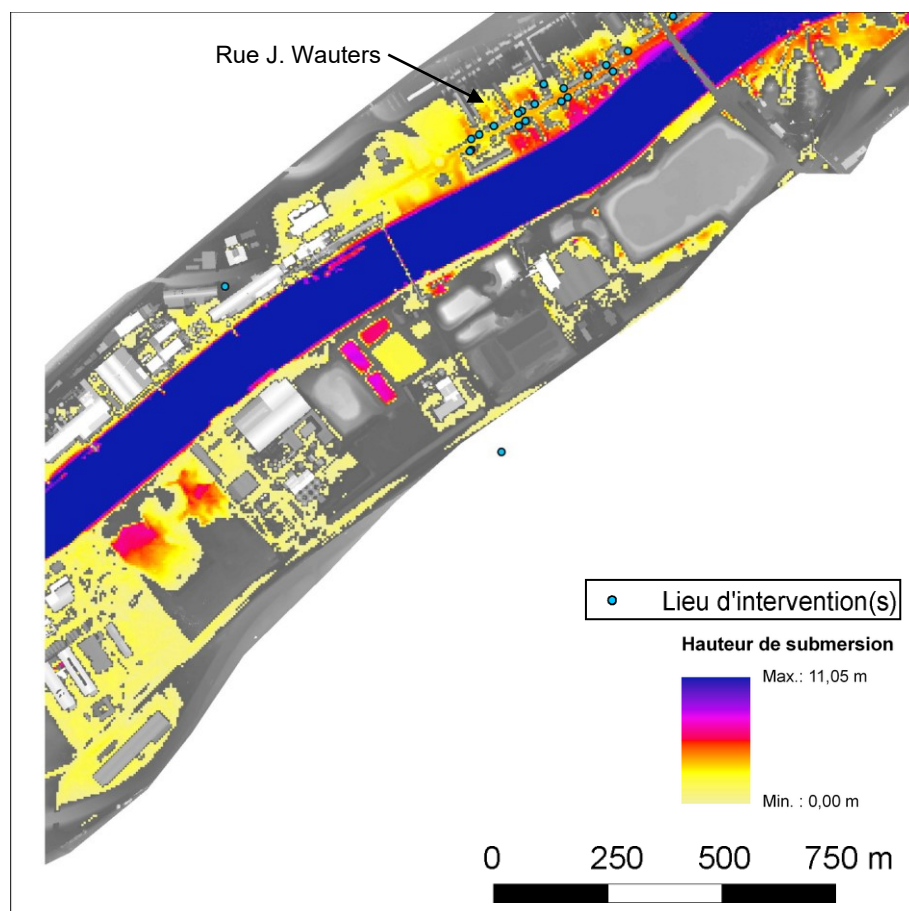
Enfin, au-delà d'une erreur de 251 m, les hypothèses élaborées dans le cadre du mémoire précédent ne peuvent être retenues, étant donné la variation du milieu physique résultant de cette imprécision. On retrouve les 163 bâtiments concernés aux endroits suivants : à Engis, certaines localisations de bâtiment étaient entachées d'une erreur allant jusqu'à 500 m ; en amont de Seraing, le long de certaines rues fort étendues, l'erreur a pu atteindre le kilomètre, ainsi qu'en amont de Liège, au niveau de Kinkempois. Ponctuellement au sein du centre-ville liégeois, on retrouve quelques anomalies de localisation, mais globalement la précision y est meilleure que dans le reste de l'agglomération. Cependant, à Angleur, la base de données initiale nous a renseigné des erreurs très importantes (> 1 km), dont l'origine n'est pas déterminée. Enfin, en aval de Herstal, quelques bâtiments présentent des erreurs de localisation de l'ordre de 750 m.

A partir des informations géographiques récentes, ce chapitre avait pour objectif d'estimer la précision de la localisation des interventions renseignées dans le mémoire de licence. Hormis les bâtiments des communes de Liège et Seraing qui présentent une excellente précision, les autres adresses ont parfois été localisées avec une imprécision importante. La correction de celle-ci permettra dans les développements suivants d'affiner les analyses de localisation. Sur base de la relocalisation précise qui a été établie précédemment, nous allons ensuite comparer le nombre et la densité des interventions enregistrées auprès des services d'incendie avec la hauteur théorique de submersion de la plaine alluviale dans l'hypothèse d'une absence de protection du tissu urbain par le démergement. Ceci permettra de séparer les interventions liées à un affleurement des eaux souterraines (notamment dans la traversée de Liège, non protégée par démergement) et les interventions liées à des phénomènes de site tels que les ruissellements en bordure de versant ou les accumulations très localisées d'eau sur des points en relief dans la plaine alluviale.

4. Analyse de la répartition des interventions par rapport aux hauteurs de submersion simulées

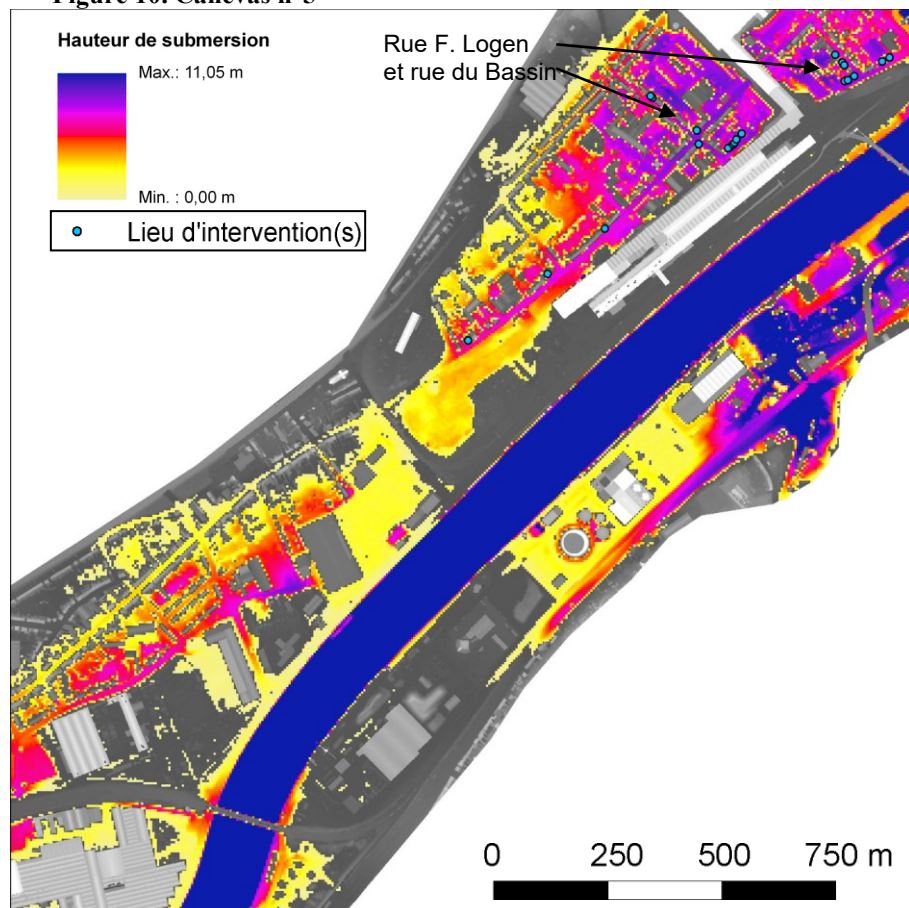
La portion de la plaine alluviale, pour laquelle nous disposons du modèle numérique de terrain, est couverte par 18 canevas de 4 km². Seuls les canevas intéressants seront représentés ici. Les canevas non représentés contiennent trop peu d'interventions pour y trouver une quelconque relation entre la hauteur de submersion et le nombre d'interventions. Le découpage du territoire de la plaine alluviale en canevas ainsi que la légende se rapportant aux hauteurs de submersion sont schématisés sur la carte 1C. Chacun des points illustrés sur les canevas correspond à une adresse où une ou plusieurs interventions ont eu lieu au cours de l'ensemble de la période d'étude, à savoir du 01/01/1993 au 03/06/2004. Les hauteurs de submersion sont celles calculées *via* le modèle utilisant 30 points de contrôle le long du profil de la crue de 1926. Elles représentent donc une simulation des hauteurs d'eau qui seraient atteintes aujourd'hui si une même crue se présentait, sans tenir compte des ouvrages de démergement, ni des affaissements du sol qui ont affecté de manière différentielle certains quartiers de l'agglomération. Les points situés hors des limites du MNT sont relatifs à des interventions effectuées hors de la plaine alluviale.

Figure 9. Canevas n°1



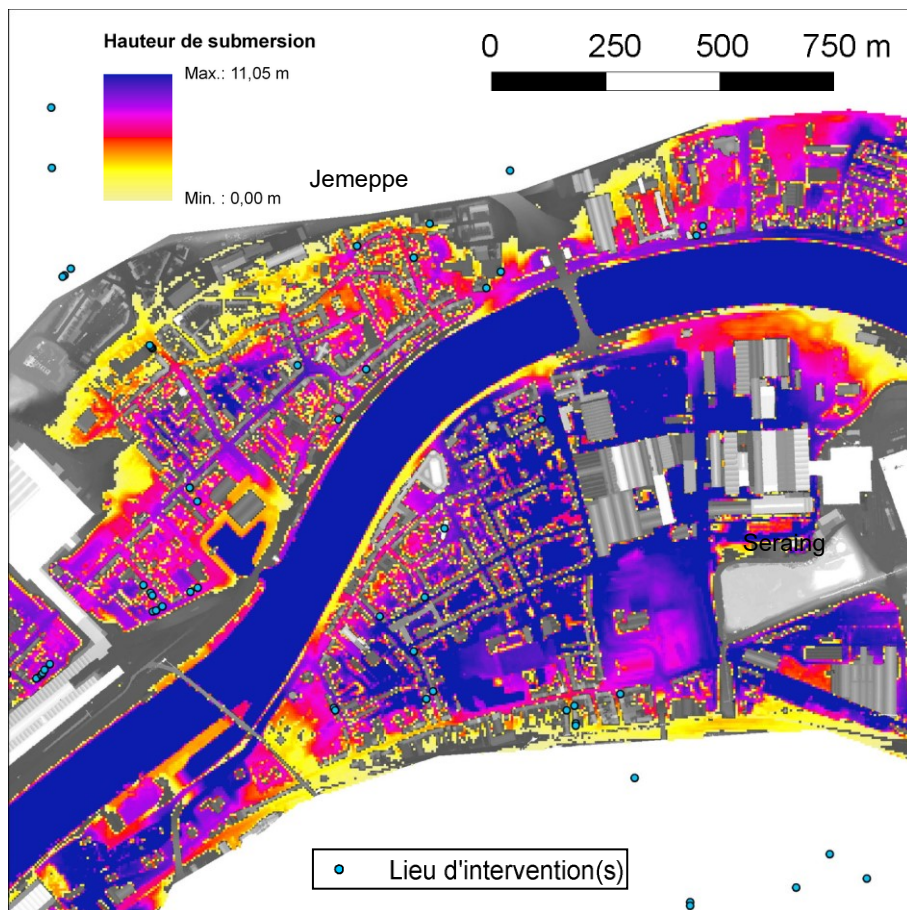
En amont de la zone d'étude, à Engis, les interventions enregistrées se situent exclusivement en rive gauche. Seules les habitations de la rue Joseph Wauters ont été inondées au cours de la période 1993-2004. Cette zone correspond à des hauteurs de submersion moyenne d'après la simulation. Cependant, en rive droite, des submersions de même ordre auraient pu être atteintes théoriquement, mais on n'y retrouve pas d'interventions. La densité de l'habitat y est nettement plus faible. En effet, en rive droite d'Engis, l'affectation du sol est liée aux industries extractives. L'habitat n'y est pas présent.

Figure 10. Canevas n°5



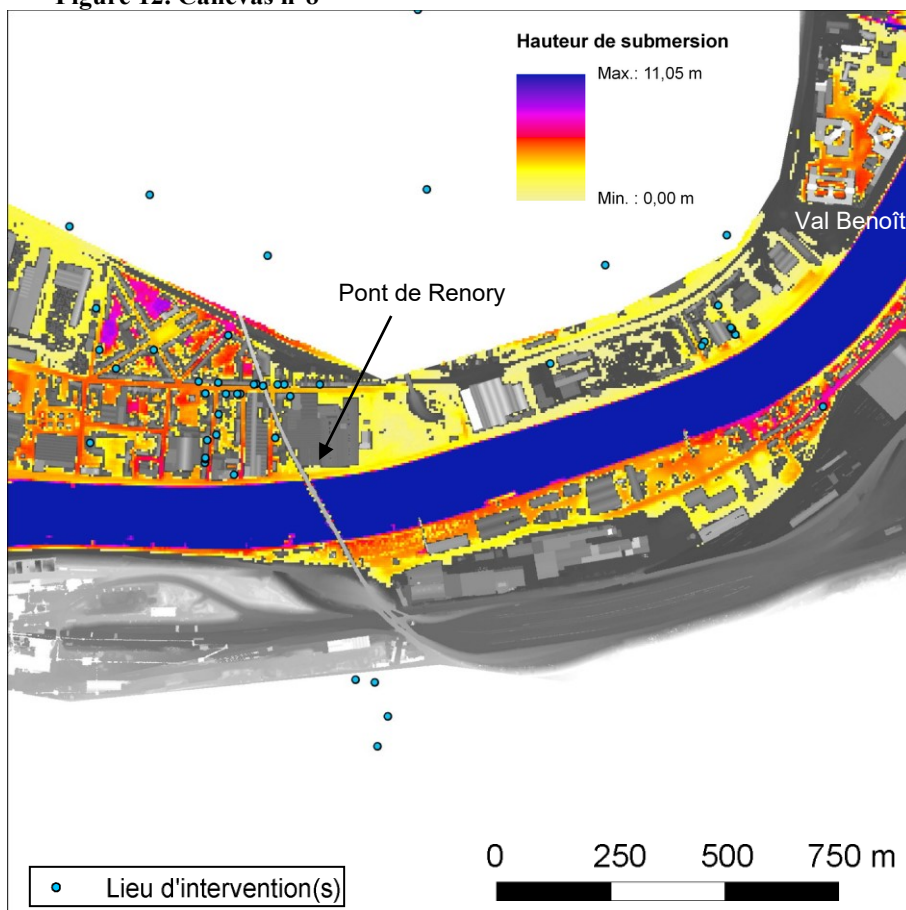
Les interventions relevées sur ce canevas correspondent à la partie amont de l'entité de Jemeppe, à hauteur de la passerelle de l'Espérance. De la même manière que dans le cas précédent, seule la rive gauche présente des interventions, au niveau de la rue de Flémalle et des rue François Logen et du Bassin. Ceci correspond également aux zones les plus basses du canevas, à l'exception d'un réseau routier privé situé en dépression sur la rive droite. A nouveau, cette zone est industrielle. En cas d'inondation, il est possible que les services d'incendie ne soient pas appelés dans ce cas.

Figure 11. Canevas n°6



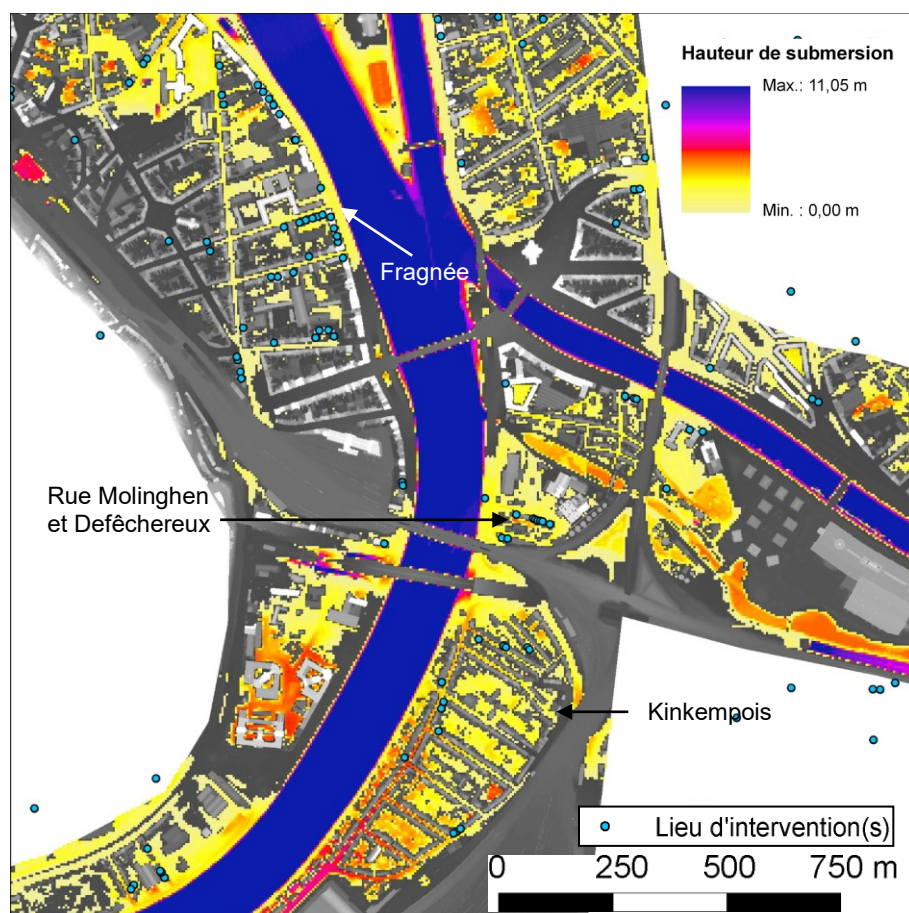
Le centre-ville de Jemeppe et celui de Seraing sont présentés ci-contre. On remarque à nouveau que les interventions enregistrées sont situées quasi exclusivement en rive gauche. Il n'y a pas de localisation privilégiée par rapport aux hauteurs de submersion simulées. A Seraing, c'est plutôt la zone de bas-de-versant qui est affectée par les inondations, tandis qu'à Jemeppe, la plaine alluviale ainsi que le bas-de-versant sont concernés. On peut en déduire qu'il ne s'agit que d'accumulations d'eau à l'échelle locale ou de dépassements de la capacité du réseau d'égouttage urbain.

Figure 12. Canevas n°8



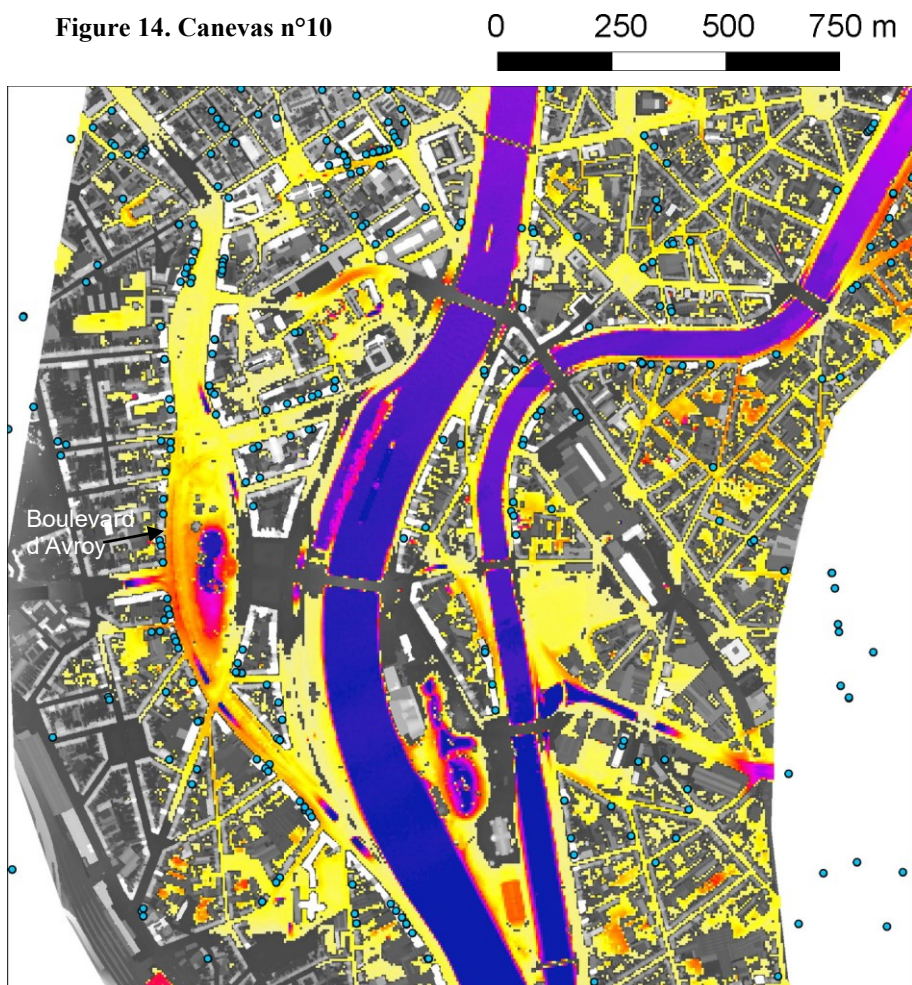
Ce canevas s'étend en aval du pont d'Ougrée jusqu'au site du Val Benoît à Liège. Les interventions, relativement nombreuses, ont eu lieu préférentiellement à proximité du Pont de Renory. La rive gauche est également plus représentée à ce niveau que la rive opposée. L'explication résulte encore une fois de l'affectation du territoire réservée à l'industrie en rive droite. Nous n'observons pas dans les parcelles où des interventions ont été enregistrées, de lien entre la hauteur de submersion théorique et la distribution spatiale des interventions recensées.

Figure 13. Canevas n°9



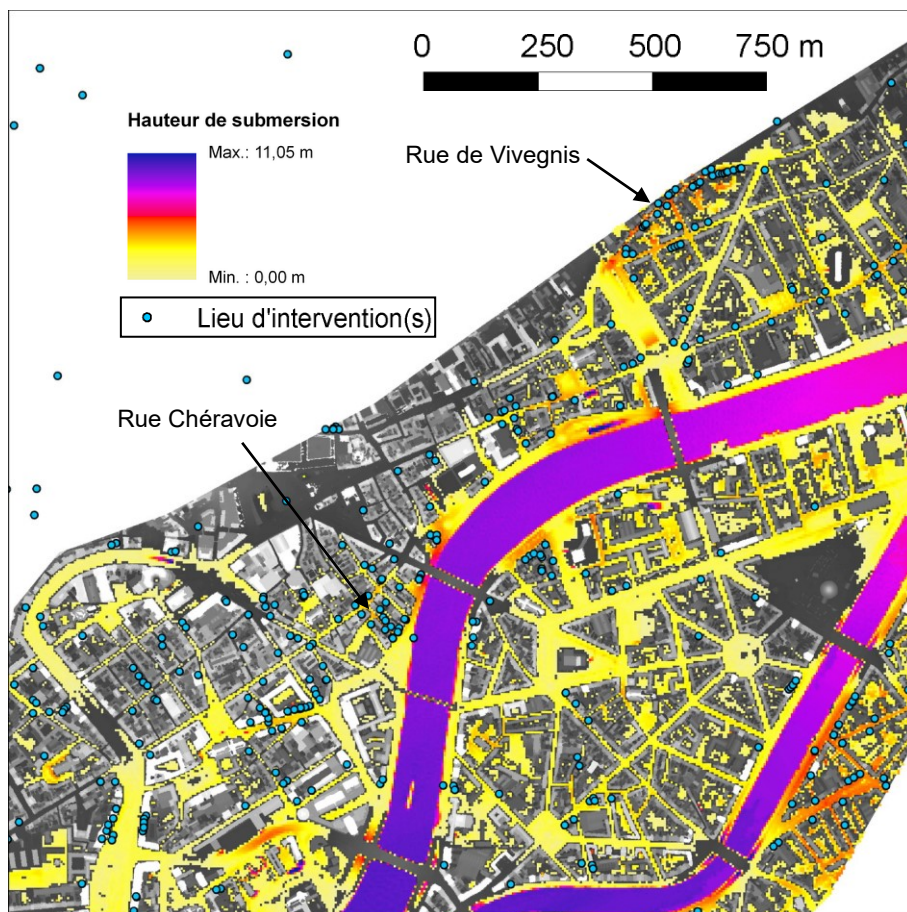
Ce canevas, compris entre Kinkempois en amont et Fragnée et Fétine en aval, est marqué par des hauteurs de submersion plus réduites. Dans le quartier de Kinkempois, en rive droite, les interventions ont eu lieu dans la partie nord. Les rues Molinghen et Defêchereux, en aval du pont ferroviaire, sont également inondées. En rive gauche, les interventions ont surtout eu lieu dans la partie proche de la Meuse. On y soupçonne l'influence des refoulements d'égout, car la zone n'est pas démergée. La limite des interventions correspond très bien à la simulation de la zone submergée par la crue de 1926.

Figure 14. Canevas n°10



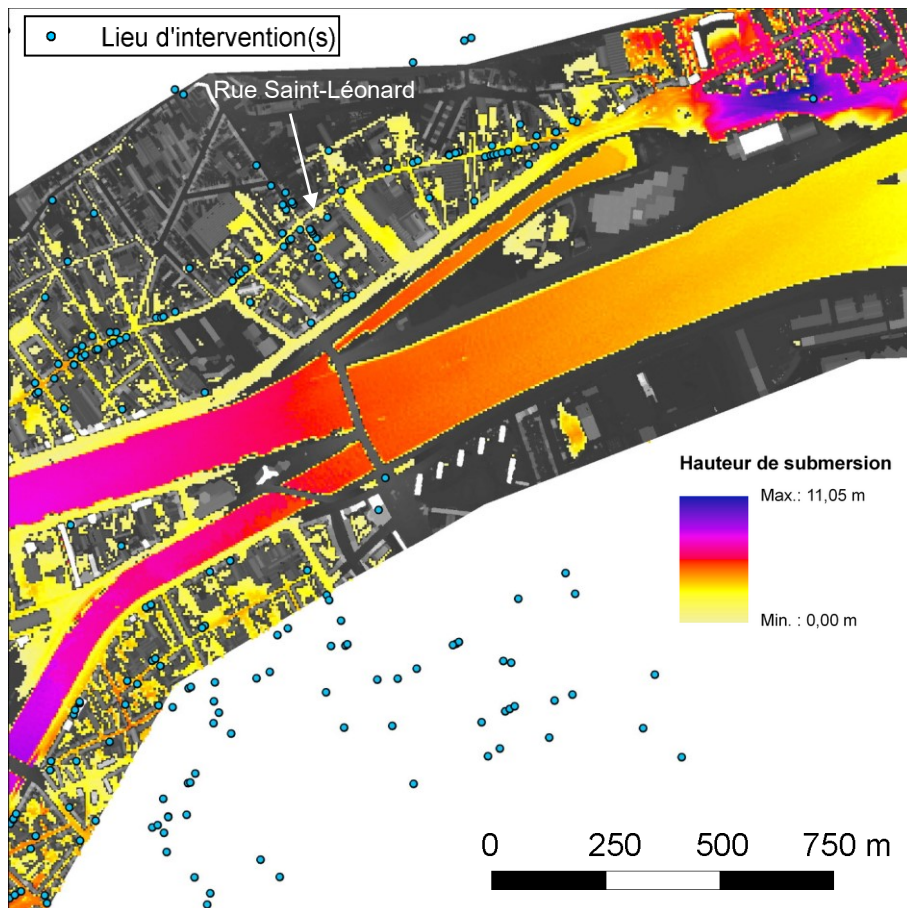
Ce canevas s'étend de Fragnée à la passerelle d'Outremeuse. Les interventions semblent corrélées à la hauteur de submersion, notamment au boulevard d'Avroy, au boulevard Piercot et dans le rue Charles Magnette. Les inondations ont donc une composante d'infiltration et une composante de débordement des réseaux d'égouttage. Le ruissellement en rue intervient également à ce niveau. En Outremeuse et en rive droite, cette corrélation est moins évidente. Notons également que les trémies modernes semblent être submergées par plus de 5 m d'eau, mais ces aménagements routiers n'existaient pas en 1925-1926.

Figure 15. Canevas n°11



La plaine urbanisée comprise entre le pont des Arches et le quartier de Vivignis est représentée ici. En rive gauche, deux zones à haute densité d'interventions sont corrélées à des hauts niveaux de submersion : la rue Chéravoie près du pont des Arches et la rue Vivignis au pied des coteaux de la Citadelle. L'accumulation d'eau doit y être importante, favorisant l'inondation des caves des habitations. En Outremeuse, le quai des Tanneurs est également un point bas et les interventions y sont concentrées. En rive droite, le quai Bonaparte et la rue Sotiau sont aussi en position basse par rapport aux autres quartiers.

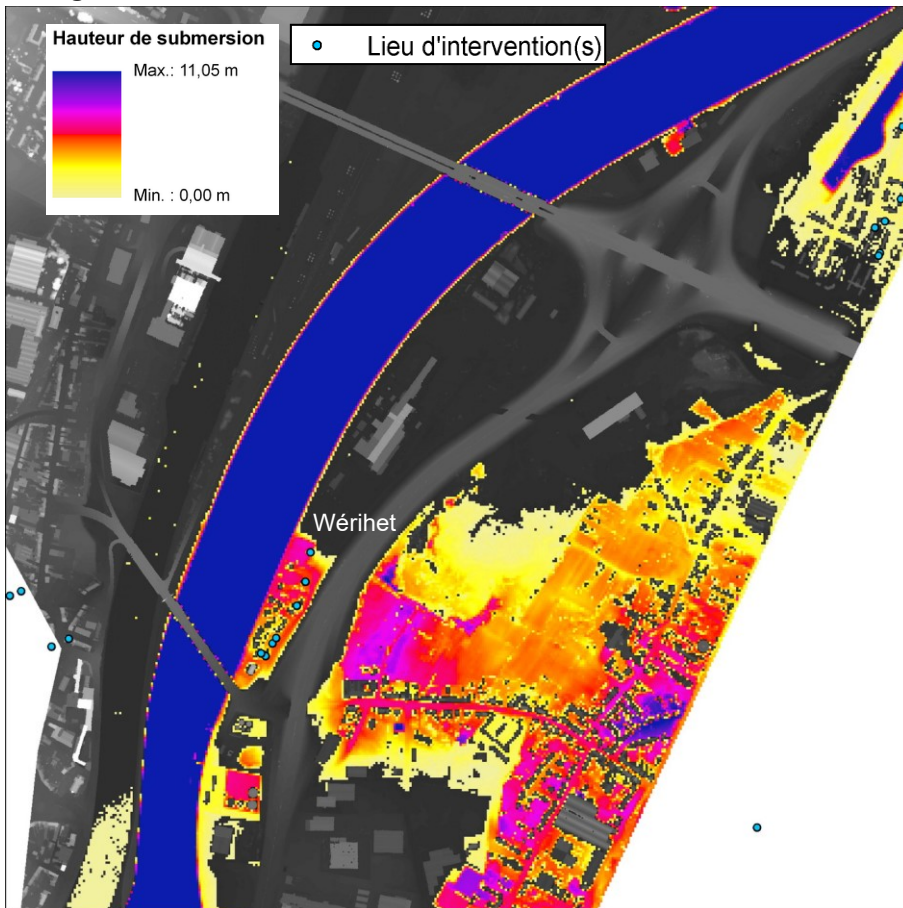
Figure 16. Canevas n°12



De la rue Saint-Léonard dans le quartier de Vivignis au quartier de Coronmeuse, ce canevas montre essentiellement des interventions tout au long de la rue Saint-Léonard, des deux côtés de la voirie, ainsi que dans quelques rues perpendiculaires allant vers les quais (notamment la rue des Bayards). Le quartier de Coronmeuse est exempt d'interventions alors que la simulation montre une forte submersion. En rive droite, l'extension du MNT est insuffisante pour rendre compte de la corrélation entre hauteur de submersion et concentration d'interventions.

0 250 500 750 m

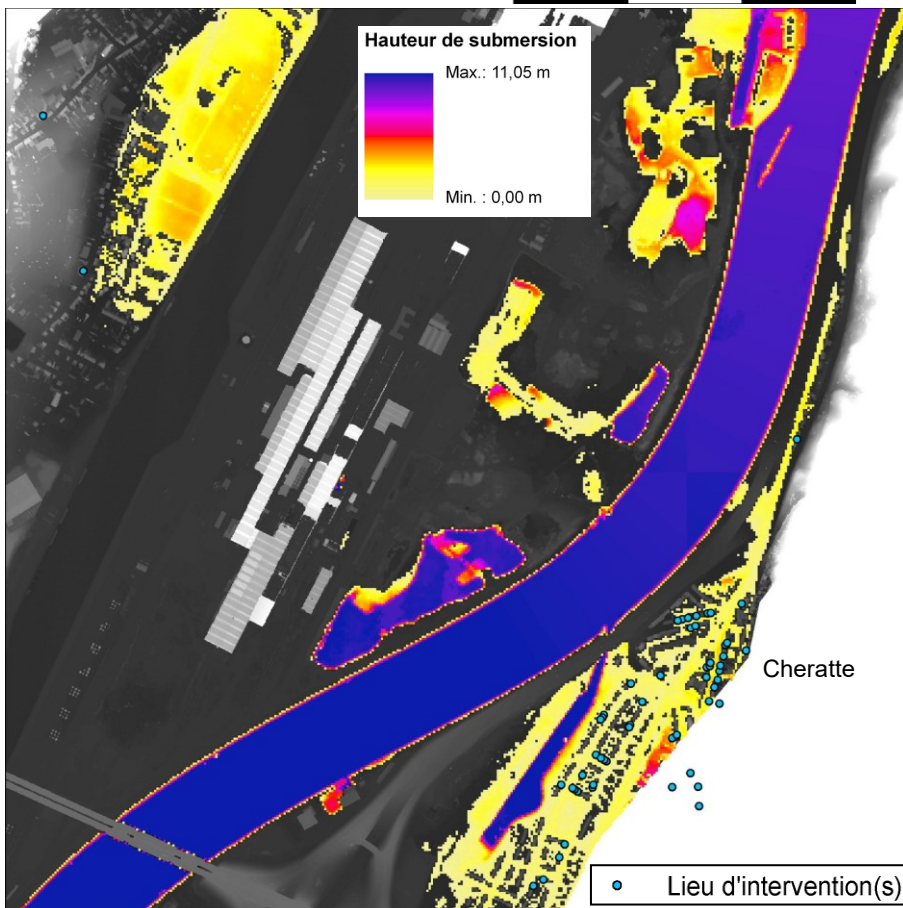
Figure 17. Canevas n°15



Entre le pont de Wandre et l'échangeur de Cheratte, deux quartiers sont sujets aux inondations en rive droite. Le quartier du Wérihet, en aval immédiat du pont de Wandre est inondé et correspond à des submersions importantes. Le second quartier se situe au nord-est de l'échangeur de Cheratte. Les hauteurs de submersion sont faibles et les interventions ne se localisent pas à proximité immédiate des quais, comme c'est le cas le long du halage du quartier du Wérihet.

Figure 18. Canevas n°16

0 250 500 750 m



Ce dernier canevas reprend uniquement des interventions dans l'entité de Cheratte. Il existe une bonne corrélation entre la densité d'interventions et la hauteur de submersion théorique. Les rues les plus touchées par les inondations sont les points bas de Cheratte, à savoir la rue Pierre Andrien et la rue Entre les Maisons. Dans le premiers cas, le nombre d'interventions est plus grand sur le flanc nord de la rue. Dans le second, il s'agit de la façade est. En complément du canevas précédent, précisons que le quartier résidentiel de Cheratte a été sujet à quelques interventions. La submersion théorique y était faible.

Au terme de cette analyse, il a été montré que la localisation des interventions était partiellement corrélée avec les hauteurs de submersion, évaluées à partir de la crue de 1925-26. Cette mise en évidence des points bas à l'échelle microtopographique au sein de la plaine alluviale permet d'expliquer la fréquence d'inondation de certaines habitations (rue J. Wauters à Engis, rue Saint-Léonard et boulevard d'Avroy à Liège, place du village et quartier du Wérihet à Cheratte, ...). Il est alors envisageable de considérer les interventions situées hors de ces points bas à l'échelle locale comme sujettes à des inondations liées au ruissellement de surface des eaux de pluie et non à leur accumulation dans la plaine alluviale.

5. Analyse des données fournies par les enregistrements des paramètres de fonctionnement des stations principales et secondaires du réseau de démergement de l'AIDE

Dans chaque dossier transmis par l'AIDE et pour lequel les données enregistrées par les systèmes de mesure de hauteur d'eau et de moments de déclenchement des pompes aux stations concernées, nous disposons d'une ou plusieurs bandes de papier gradué sur lesquelles les paramètres ont été enregistrés de manière mécanique, à l'aide d'un stylet encreur. Ces données analogiques fournissent la hauteur d'eau dans chacun des puisards situés sous ou au même niveau que les pompes (selon leur mode de fonctionnement) à chaque instant durant les orages conservés en archives. En outre, la durée de fonctionnement est également conservée sous cette forme grâce à l'existence d'un déclenchement binaire de la position du stylet sur le papier selon la marche ou l'arrêt de la machine dans le temps.

Cependant, les bandes de papier, parfois d'une longueur importante et modérément déformées suite à leur stockage, ne permettent pas de mesurer facilement et avec précision les hauteurs d'eau ou les durées de fonctionnement de manière numérique. Leur échantillonnage temporel sous cette forme est dès lors relativement imprécis. Une solution a été mise en œuvre afin de permettre l'analyse précise et la numérisation des hauteurs et des moments exacts de déclenchement des pompes principales ou secondaires.

Pour ce faire, la méthode de géoréférencement a été détournée de son utilisation classique afin de l'adapter à ce cas particulier. En effet, quelle que soit la déformation du papier sur lequel sont enregistrées les diverses courbes, il est possible d'attribuer, dans le logiciel ArcMap de ESRI ©, des coordonnées aux différents points du quadrillage. Il est ensuite possible de rendre la planéité originelle aux documents étudiés en effectuant une transformation géométrique d'ordre 1 ou d'ordre 2 si cela se justifie afin de minimiser l'erreur de géoréférencement liée à la déformation du papier. En outre, un choix cohérent des nouvelles coordonnées attribuées aux points d'intersection du quadrillage du graphique permet ensuite d'obtenir directement par affichage sur l'écran les hauteurs et les heures précises telles qu'elles sont stockées de manière analogique sur le papier préalablement scanné.

Cette méthode a été jugée suffisamment précise et efficace pour permettre l'analyse et le stockage sous forme numérique de chacun des graphiques disponibles dans les dossiers obtenus auprès de l'AIDE pour les orages les plus importants recensés dans l'agglomération liégeoise durant la période d'étude retenue dans le cadre du mémoire de licence. Par ailleurs, une fois l'opération de géoréférencement effectuée pour chacun des graphiques, quel que soit leur état de conservation, une numérisation vectorielle des courbes qu'ils présentaient a été entreprise. Ceci a pour but de récupérer de manière semi-automatique les valeurs de hauteur d'eau dans les puisards en état de marche ainsi que les séquences de déclenchement des pompes afin d'en déduire les durées de fonctionnement des pompes principales ou secondaires sous forme d'un tableau de type Excel ©. Cette digitalisation des courbes a été réalisée comme s'effectue habituellement la digitalisation d'une polygline sur un fond de carte. Un plug-in d'extension des fonctionnalités d'ArcView 3.2 a été utilisé pour positionner de manière automatique un point à chaque vertex créé lors de la numérisation des courbes (plug-in *Give me Points*, pour ArcView 3.2). Cette méthode, préférée à celle de l'échantillonnage selon un intervalle de temps régulier, permet de cibler exactement les minima et maxima présentés par les différentes courbes. Un échantillonnage régulier aurait souvent manqué l'enregistrement des pics de hauteur d'eau maximale atteinte dans les puisards ou l'heure exacte de déclenchement des pompes à partir d'un seuil de niveau d'eau bien défini pour chaque installation de pompage. Enfin, l'extraction des coordonnées, qui représentent en x la hauteur ou le déclenchement des pompes et en y le temps, a été réalisée de manière également semi-automatique en récupérant les coordonnées des points définis par le plug-in précédent.

Les résultats obtenus ont l'immense avantage de pouvoir être superposés pour toutes les stations, pour lesquelles des données sont disponibles lors d'un orage donné, puisque l'axe des ordonnées est identique et représente le temps, selon une même échelle de mesure, respectée pour chaque numérisation.

5.1.Critique de l'utilisation des données et de la méthodologie appliquée à leur analyse

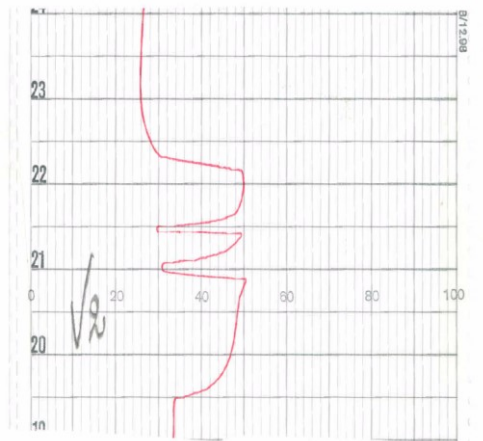
L'utilisation de cette méthode de référencement temporel et contenant une variable donnée n'est pas exempte d'approximations. Cependant, celles-ci sont essentiellement liées aux données-sources utilisées. En effet, lors de l'enregistrement sur papier par des horloges mécaniques, certaines pannes ou approximations peuvent apparaître et occasionner par la suite des erreurs d'analyse. Passons en revue, de la manière la plus exhaustive possible, les différentes causes de dysfonctionnement des enregistreurs et les effets que cela provoque sur l'interprétation ultérieure des données :

- erreur de synchronisation de l'horloge du mécanisme par rapport à l'heure légale ;

ceci peut affecter une seule horloge ou l'ensemble des installations selon des degrés divers. Cependant, en raison de la variabilité qui peut exister dans la localisation spatio-temporelle des précipitations génératrices d'inondations en milieu urbain, il sera difficile d'identifier ces erreurs de synchronisation, à moins qu'elles ne dépassent un laps de temps relativement important ou que cela n'ait été indiqué sur le relevé par le personnel de l'AIDE (voir figure 21).

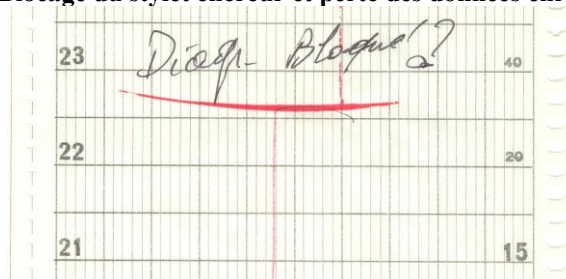
- Méconnaissance exacte de l'échelle de hauteur d'eau dans les puisards. En effet, il arrive que l'étalonnage des échelles ne nous fournisse pas avec exactitude le minimum et le maximum de la valeur enregistrée sur papier (voir figure 19). Lorsque ces données sont indisponibles, notamment pour certaines stations plus anciennes et pour lesquelles le matériel a été remplacé depuis lors, les données seront comparées de manière relative et non absolue afin de déterminer des ordres de grandeur de propagation de la lame d'eau en tissu plutôt que de tenter de définir les débits exacts ayant transité par les réseaux de démergement.

Figure 19. Etalonnage inconnu de l'échelle des hauteurs



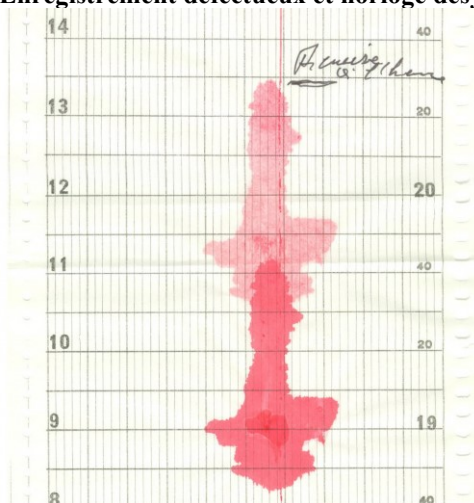
- Pour une raison inconnue, le stylet mécanique peut se bloquer à un instant t et éliminer ainsi une partie des informations suivantes tout en décalant dans le temps les enregistrements une fois la panne résolue, à moins qu'une synchronisation ne soit effectuée par le personnel de maintenance de la station. En conséquence, sans informations sur la durée de la panne, il est impossible de repositionner correctement les valeurs temporelles après un blocage généralement bien identifiable sur le papier (voir figure 20). En revanche, si les données d'une station voisine existent pour un même phénomène météorologique, il est alors possible de récupérer des points de calage communs de manière à rétablir la translation temporelle nécessaire à l'utilisation correcte des graphiques disponibles.

Figure 20. Blocage du stylet encreur et perte des données enregistrées



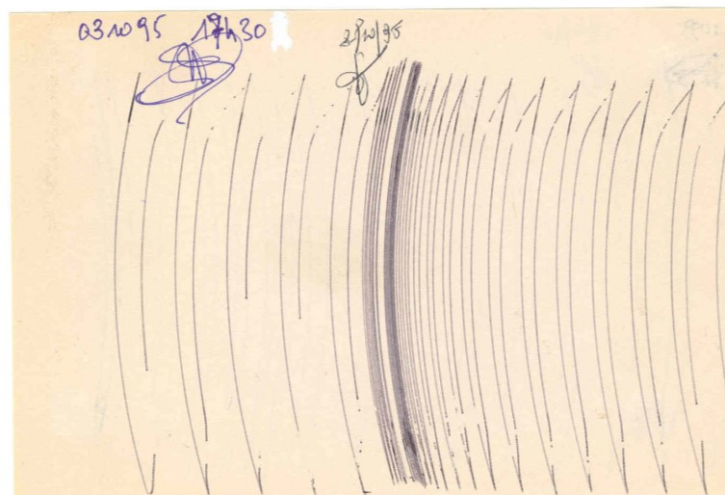
- Une autre panne, liée à la dissémination d'encre sur le papier, existe également lorsque le réservoir alimentant le stylet n'a pas été suffisamment étanche pour empêcher l'épanchement de l'encre sur le papier. Lorsque la tache qui en résulte est petite (et s'étend par exemple sur moins d'une demi-heure lors d'une période calme météorologiquement parlant), il est possible d'interpoler l'allure de la courbe durant la panne. En revanche, si la tache est plus importante et qu'elle a lieu lors d'une phase d'activité intense au niveau de la station de pompage, nous ne pourrions pas reconstituer précisément l'évolution de la hauteur d'eau ou des durées de déclenchement de chacune des pompes. Par chance, ce problème se présente rarement parmi les périodes retenues (voir figure 21).

Figure 21. Enregistrement défectueux et horloge désynchronisée



- Certains graphiques disponibles dans les dossiers d'archives ne disposent ni d'échelle de temps, ni d'échelle de hauteur. Il est évident que ces graphiques ne pourront être utilisés pour cette étude. Après analyse des quelques cas de ce type se présentant dans les différents dossiers, nous avons constaté qu'il s'agissait probablement d'autres types d'enregistreurs, plus anciens, et qu'aucun point de correspondance ne pouvait être trouvé avec les données des autres stations. En effet, ces graphiques se présentent sous la forme d'un enregistrement de type « sismomètre », c'est-à-dire avec un stylet oscillant autour de sa position centrale d'équilibre suivant une trace semi-circulaire (voir figure 22).

Figure 22. Enregistrement inexploitable concernant la station n°3 de Seraing pour l'orage du 3 au 4 octobre 1995



- Enfin, pour certaines stations, les données disponibles et notamment celles qui concernent les durées de pompage, ne se présentent pas sous la forme de graphiques, mais sous une disposition de type « listing ». Le traitement à appliquer à ces données nécessite dès lors un encodage manuel des instants de début et de fin des pompages afin d'accéder aux données sous une forme équivalente aux autres graphiques existants. Cette méthode est bien entendu nettement plus lente que la procédure de référencement mise au point pour traiter la grande majorité des archives.

5.2. Analyse des données des stations disponibles pour les orages conservés en archives à l'AIDE en relation avec la base de données des interventions de l'IILE encodée en 2004

La méthodologie qui précède avait pour but de permettre la superposition temporelle des informations de hauteur et de mise en marche des stations de pompage. L'objectif de ce chapitre est de rechercher l'existence d'une ou plusieurs relations entre les moments précis de déclenchement des pompes, les seuils de hauteurs d'eau atteints et les appels émis par la population auprès des services de secours. Rappelons ici qu'un tri préalable avait effectué lors de l'encodage des rapports d'intervention des pompiers de l'Intercommunale d'Incendie de Liège et Environs pour ne conserver que les éléments relatifs à des problèmes d'inondation.

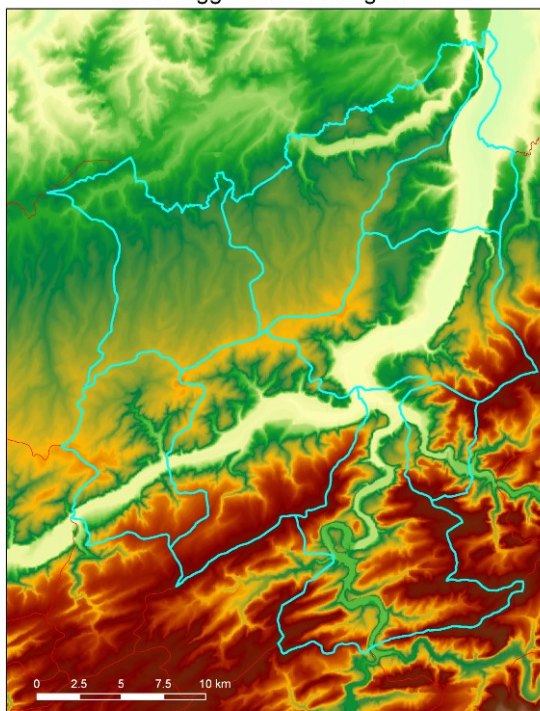
Remarque méthodologique : lors de l'analyse des données encodées en rapport avec le mémoire de licence, il apparaît que pour certains épisodes pluvio-orageux intenses, une heure arrondie (8:00 ou 8:30) généralement située en début de journée a été renseignée. Nous supposons alors que ceci est probablement dû à l'afflux considérable d'appels au central 100 pendant une période de temps très réduite et durant laquelle l'information horaire a pu être

négligée lorsque l'encodage se faisait de manière manuelle. En effet, il est très peu probable, vu le nombre de lignes disponibles, qu'un nombre aussi considérable d'appels ait été enregistré simultanément. Dès lors, l'interprétation et les tentatives de corrélation de ces données avec les archives de l'AIDE devront être effectuées précautionneusement.

En outre, il est important de noter que nous ne disposons que d'une mesure horaire des précipitations à l'aéroport de Bierset et de mesures journalières pour quatre autres stations météorologiques proches de l'agglomération liégeoise (Liège-Monsin, Thimister, Herstal, Angleur). Ce seul point de référence concernant les volumes de précipitations horaires est, d'une part, fort éloigné de la zone où se concentrent la plupart des interventions étant donné la distribution spatiale de la densité de population. Ceci a évidemment une influence considérable sur l'estimation des quantités de précipitations affectant sur les sous-bassins hydrographiques étudiés. D'autre part, la résolution temporelle des données disponibles pour l'ensemble de la période étudiée est insuffisante pour permettre de caractériser correctement les pics d'intensité pluviométrique spécifiques aux orages violents. En effet, d'après la littérature ayant déjà traité ce sujet sur d'autres bassins versants mais dans une problématique similaire d'hydrologie urbaine (BERNE *et al.*, 2004), il est possible d'estimer la résolution spatiale (c'est-à-dire l'espacement) et la résolution temporelle (l'intervalle de temps à l'issue duquel la quantité de précipitations cumulée sur ce laps de temps est enregistrée) des stations pluviographiques requises pour une étude urbaine précise. Ces valeurs idéales ont été estimées dans la littérature pour des sous-bassins hydrographiques urbains en climat tempéré tels que ceux qui nous occupent ici.

La nécessité d'utiliser un hyétogramme de résolution fine et une distribution dense et

Délimitation des sous-bassins hydrographiques dans l'agglomération liégeoise



Sources : MNT IGN résolution 30 m; shapetfile OGRNE - RW

homogène des stations pluviométriques a été étudiée par BERNE *et al.* (2004). Le modèle mis au point par ces auteurs permet de définir approximativement la résolution spatiale et la résolution temporelle optimale en fonction de la superficie des bassins concernés. En règle générale, il semble que la résolution temporelle la mieux adaptée aux zones urbaines varie d'une à 15 minutes.

$$\Delta t = 0,75 S^{0,3} \quad \text{avec}$$

Δt résolution temporelle requise (en minutes)

S superficie du bassin versant étudié (en ha)

$$\Delta r = 1,5 \Delta t^{0,5} \quad \text{avec}$$

Δr résolution spatiale requise (en km)

Dans le cas de l'agglomération liégeoise, la superficie moyenne des sous-bassins hydrographiques, tels qu'ils ont été définis par la DGRNE - RW⁶, est de l'ordre de 8.000 ha. La résolution temporelle requise s'établit dès lors à 11 minutes tandis que les stations de mesure devraient être espacées d'une distance proche de 5 km.

Il en résulte que seule une multitude de pluviographes idéalement répartis au sein du tissu urbain liégeois serait à même de représenter sans approximations grossières la dynamique spatio-temporelle des quantités de précipitations affectant une région donnée. Il n'existe évidemment pas de réseau pluviographique aussi densément fourni et avec une telle résolution temporelle de mesure des intensités de précipitations. Cependant, une autre source de données pourrait résoudre une partie du problème, à savoir la mesure des quantités de précipitations par réflexion des ondes radar sur les gouttes de pluie présentes dans l'atmosphère. Pour la région liégeoise, il existe trois radars permettant d'obtenir des informations pluviographiques. Dans le cadre de cette étude, le choix a été effectué d'après leurs caractéristiques :

- le radar de Wideumont (dans la province de Luxembourg) : portée de 240 km (et situé à moins de 100 km de Liège), mais dont les archives ne sont pas accessibles librement ;
- le radar de Belgocontrol, situé à Bruxelles, d'une meilleure résolution, mais dont l'accès aux archives est également réglementé ;
- le radar de Rotterdam, d'une résolution moindre, tant sur le plan temporel que quantitatif, mais dont les archives sont accessibles librement de décembre 1999 à aujourd'hui.

Nous utiliserons dès lors à titre d'essai, les images concernant l'orage du 2 au 3 octobre 2000, le plus important en termes de nombre d'interventions effectuées par le service d'incendie de Liège et environs (303 interventions en 2 jours). La résolution temporelle est égale à 15 minutes, la résolution spatiale comprise entre 1 et 2 km tandis que les intensités de précipitations sont regroupées en 5 classes (0 à 2 mm/h ; 2 à 5 mm/h, 5 à 10 mm/h, 10 à 100 mm/h et > 100 mm/h)

N'omettons pas de signaler que ces mesures indirectes des intensités et des quantités de précipitations affectant une région peuvent être entachées d'erreurs plus ou moins conséquentes, notamment liées à des discontinuités atmosphériques de réflexion et de réfraction des ondes radio par les zones de pluie (EINFACT *et al.*, 2004). Cependant, nous nous attacherons ici à une mesure semi-quantitative des précipitations et de leur répartition spatiale dans la zone d'étude (voir point 5.10).

⁶ Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement – Région Wallonne

5.3. Analyse des débits des stations de l'AIDE

Dans un premier, il avait été projeté de se consacrer à l'étude des débits des stations de pompage et de rechercher des corrélations entre ces débits et les précipitations d'une part, et avec le nombre d'intervention et leur concentration dans un sous-bassin donné d'autre part. Afin de mettre en œuvre cette analyse, nous avons procédé au dépouillement des données disponibles au niveau des débits. En l'occurrence, les statistiques journalières de pompage sont disponibles pour les stations ayant fonctionné lors de l'orage du 2 juillet 2000 (voir ci-dessous). Nous pouvons constater que chaque pompe a un débit moyen constant, à quelques approximations près. Dans une même station, les pompes semblent, la majorité du temps, identiques également.

Débits moyens par pompe pour 8 stations – orage du 2 juillet 2000

Herstal 1 :				
P2 :	6 démarrages	1:38:32	3.842 m ³	débit moyen : 2.339 m ³ /h
P3 :	1 démarrage	0:53:32	2.087 m ³	débit moyen : 2.339 m ³ /h
P4 :	1 démarrage	0:53:13	2.075 m ³	débit moyen : 2.339 m ³ /h
Total	8 démarrages	3:25:17	8.006 m³	débit moyen : 2.339 m ³ /h

Herstal 3 :				
P1 :	1 démarrage	0:12:10	839 m ³	débit moyen : 4.137 m ³ /h
P2 :	5 démarrages	1:43:59	7.174 m ³	débit moyen : 4.139 m ³ /h
P3 :	1 démarrage	1:08:31	4.727 m ³	débit moyen : 4.139 m ³ /h
P4 :	1 démarrage	1:08:07	4.700 m ³	débit moyen : 4.139 m ³ /h
Total	8 démarrages	4:12:47	17.442 m³	débit moyen : 4.139 m ³ /h

Vivegnis 1 :				
P1 :	0 démarrage	0:00:00	0 m ³	débit moyen : 0 m ³ /h
P2 :	3 démarrages	1:10:54	1.973 m ³	débit moyen : 1.669 m ³ /h
P3 :	1 démarrage	0:31:54	888 m ³	débit moyen : 1.670 m ³ /h
P4 :	0 démarrage	0:00:00	0 m ³	débit moyen : 0 m ³ /h
Total	4 démarrages	1:42:48	2.862 m³	débit moyen : 1.649 m ³ /h

Vivegnis 2 :				
P1 :	1 démarrage	0:15:55	1.241 m ³	débit moyen : 4.678 m ³ /h
P2 :	1 démarrage	0:35:19	2.754 m ³	débit moyen : 4.678 m ³ /h
P3 :	1 démarrage	0:04:43	367 m ³	débit moyen : 4.668 m ³ /h
P4 :	0 démarrage	0:00:00	0 m ³	débit moyen : 0 m ³ /h
P5 :	0 démarrage	0:00:00	0 m ³	débit moyen : 0 m ³ /h
P6 :	3 démarrages	0:49:23	2.074 m ³	débit moyen : 2.519 m ³ /h
Total	6 démarrages	1:45:20	6.438 m³	débit moyen : 3.667 m ³ /h

Wandre 2 :				
P1 :	2 démarrages	0:31:50	830 m ³	débit moyen : 1.564 m ³ /h
P2 :	1 démarrage	0:32:29	847 m ³	débit moyen : 1.564 m ³ /h
P3 :	4 démarrages	1:09:05	1.803 m ³	débit moyen : 1.565 m ³ /h
Total	7 démarrages	2:13:24	3.481 m³	débit moyen : 1.565 m ³ /h

Wandre 3 :				
P1 :	2 démarrages	0:22:52	878 m ³	débit moyen : 2.303 m ³ /h
P2 :	17 démarrages	3:16:56	7.562 m ³	débit moyen : 2.303 m ³ /h
P3 :	3 démarrages	0:40:40	1.561 m ³	débit moyen : 2.303 m ³ /h
Total	22 démarrages	4:20:28	10.001 m³	débit moyen : 2.303 m ³ /h

Wandre 5 :				
P1 :	1 démarrage	0:09:12	496 m ³	débit moyen : 3.234 m ³ /h
P2 :	0 démarrage	0:00:00	0 m ³	débit moyen : 0 m ³ /h
P3 :	0 démarrage	0:00:00	0 m ³	débit moyen : 0 m ³ /h
P4 :	37 démarrages	0:25:07	1.356 m ³	débit moyen : 3.239 m ³ /h
P5 :	2 démarrages	0:42:44	2.307 m ³	débit moyen : 3.239 m ³ /h
P6 :	1 démarrage	0:00:04	3 m ³	débit moyen : 2700 m ³ /h
P7 :	15 démarrages	8:25:00	3.787 m ³	débit moyen : 449 m ³ /h
P8 :	15 démarrages	8:33:36	3.852 m ³	débit moyen : 450 m ³ /h
Total	71 démarrages	18:15:43	11.803 m³	débit moyen : 646 m ³ /h

Cheratte 1 :				
P1 :	0 démarrage	0:00:00	0 m ³	débit moyen : 0 m ³ /h
P2 :	0 démarrages	0:00:00	0 m ³	débit moyen : 0 m ³ /h
P3 :	3 démarrages	0:48:04	1.730 m ³	débit moyen : 2.159 m ³ /h
P4 :	1 démarrage	0:12:00	432 m ³	débit moyen : 2.160 m ³ /h
Total	4 démarrages	1:00:04	2.162 m³	débit moyen : 2.159 m ³ /h

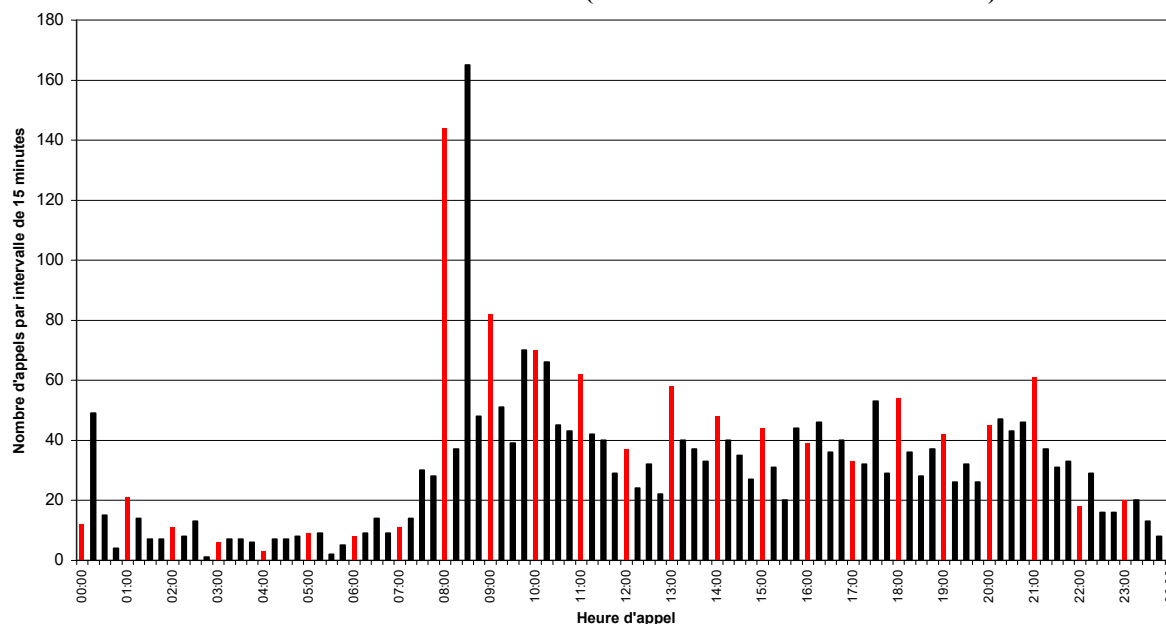
La corrélation des volumes d'eau pompés lors de cet événement du 2 juillet 2000 est réalisée au point 5.11. La localisation des différentes installations de pompage est quant à elle présentée à la carte 5.

5.4. Distribution temporelle des appels relatifs aux 3.049 interventions localisées

En complément du mémoire de licence, nous avons analysé la distribution temporelle des appels émis par la population auprès des services de l'IILE. Sur chaque fiche d'intervention est précisée cette heure d'appel. L'homogénéisation des données encodées est une phase fastidieuse, étant donné la quantité de données à traiter. La figure 23 présente l'histogramme du nombre d'appels par intervalle de 15 minutes pour l'ensemble de la période d'étude (01/01/1993 au 03/06/2004).

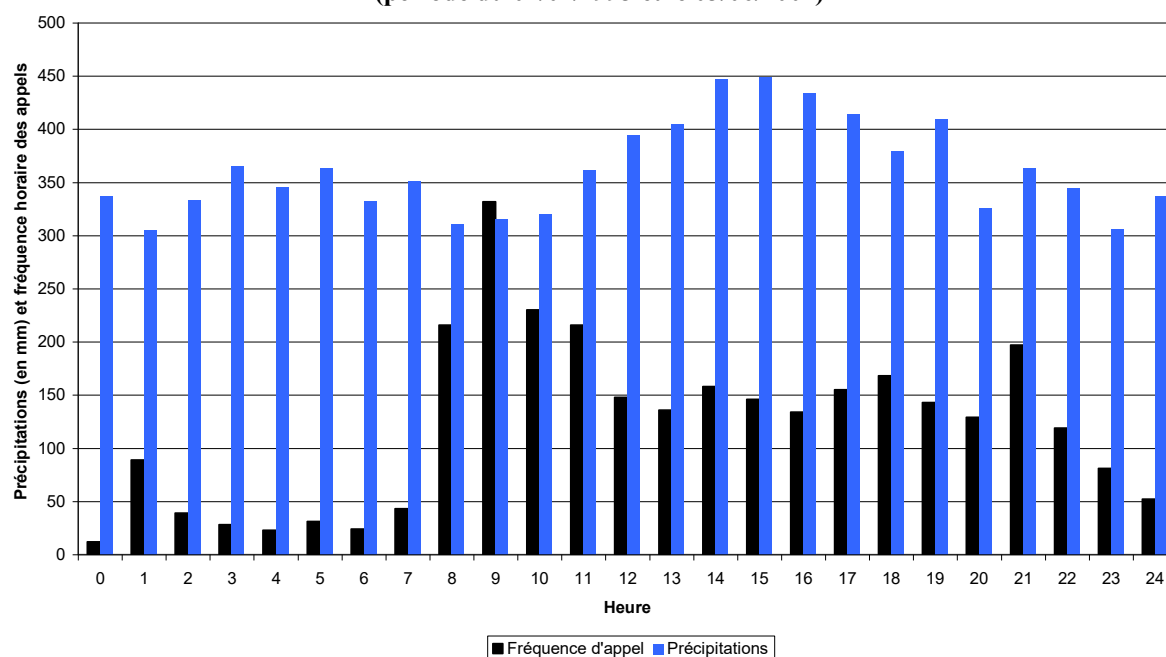
Plusieurs faits peuvent être repérés sur l'histogramme. La distribution est multimodale avec deux pics importants présents dans les intervalles 08:00 – 08:15 et 08:30 – 08:45. Ceci correspond évidemment aux personnes ayant constaté des inondations à leur réveil ou au tout début de leur journée. Il n'y a donc pas forcément de lien direct avec les précipitations, puisqu'un certain temps de retard est très clairement visible. Même si un phénomène orage a lieu la nuit, les appels ne se manifestent qu'au petit matin (entre 01:30 et 06:30, le nombre d'appels par quart d'heure est d'ailleurs inférieur à 10). Après le pic matinal, le nombre d'appels décroît lentement jusqu'à 12:45. Cependant, nous pouvons constater une surreprésentation des heures « pleines ». Les données sont plus nombreuses à 09:00, 10:00, 11:00 et 12:00 qu'aux heures intermédiaires. Ceci s'explique sans doute l'arrondi effectué lors de l'enregistrement de l'heure sur les fiches les plus anciennes de la base de données papier. Par contre, les appels enregistrés automatiquement dans la base de données informatisée *Abifire*, mise en place le 15/04/1999, reprennent l'heure exacte de l'appel. A 13:00, un nouveau pic est présent. Il correspond probablement aux personnes qui constatent une inondation après une matinée d'activité. A 17:30 et 18:00, le constat est le même après la journée de travail. Le nombre d'appels croît. Deux derniers pics seront enregistrés vers 21:00 et 00:15. Ceci ne correspond pas vraiment à des heures particulières. Une corrélation avec les précipitations recueillies à ces instants sur la même période pourrait éventuellement élucider l'origine de ces pics.

**Figure 23. Distribution temporelle des appels relatifs
aux 3.049 interventions localisées (entre le 01/01/1993 et le 03/06/2004)**



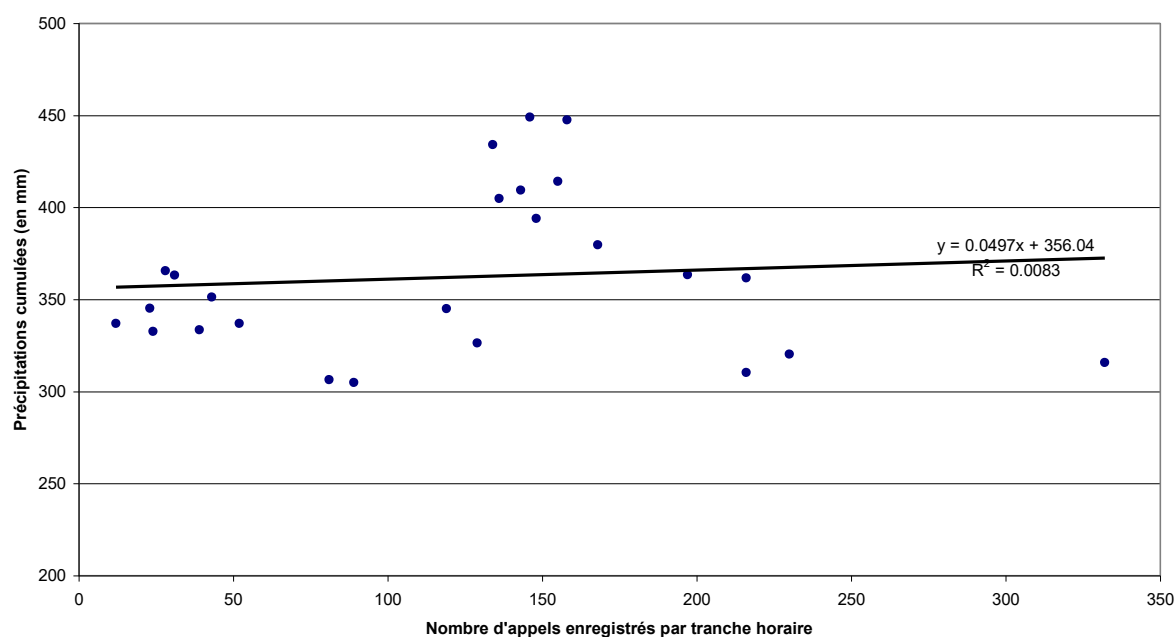
Afin de séparer l'influence du rythme circadien de la population de l'influence des précipitations, nous avons étudié la répartition temporelle des précipitations à Bierset (voir figure 24). Il faut d'abord noter que nous ne disposons pas des données horaires après le 31/07/2003. Ceci ne représente dans la base de données que 57 interventions et ne devrait pas trop perturber l'analyse. En outre, certaines lacunes existent au sein de l'enregistrement pluviographique de la station de Bierset, ce qui sous-estimerait légèrement les volumes de précipitations enregistrés. Par exemple, les données du mois de juin 1999 sont manquantes, ainsi que celles du 4 au 5 juillet de la même année. Ceci correspond à un orage violent étudié ici. Faute d'autres pluviographes horaires à proximité de la zone d'étude, il n'est pas possible de compléter les données pour ces périodes lacunaires.

Figure 24. Précipitations cumulées sur 10 ans, par tranche horaire (Temps Universel), toutes saisons confondues et nombre d'appels enregistrés (période du 01/01/1993 et le 03/06/2004)



La figure 24 présente simultanément le nombre d'appels enregistrés (reclassés par intervalles d'une heure) et les précipitations cumulées par tranche horaire pour toute la période d'étude. Durant ce laps de temps, les précipitations ne semblent pas se répartir de manière aléatoire. En effet, deux modes se présentent sur le graphique : à 03:00 TU⁷ et aux environs de 15:00 TU. La variation est relativement importante, puisque le cumul enregistré sur 10 ans dans la tranche située entre 01:00 TU et 01:59 TU est de 305 mm tandis que la tranche horaire de 15:00 TU à 15:59 TU montre un total de 449 mm enregistrés sur 10 ans.

Figure 25. Relation entre les précipitations horaires cumulées sur 10 ans et le nombre d'appels enregistrés par tranche horaire



⁷ Les heures de référence du pluviographe de Bierset sont exprimées en Temps Universel (heure légale = TU + 1 en hiver ; TU + 2 en été) tandis que les heures d'interventions et de pompage sont exprimées en heure légale.

On distingue aisément sur la figure 25 l'absence de relation mathématique entre la quantité de précipitations cumulées sur 10 ans pour une tranche horaire donnée et le nombre d'appels enregistrés. On peut cependant émettre l'hypothèse d'un déphasage temporel de cette relation, due au temps de réaction nécessaire à l'inondation pour se créer et au délai existant entre le constat d'inondation et l'appel aux pompiers.

Dans les points suivants, nous tenterons de décrire chaque événement pluvio-orageux, au niveau de son extension spatiale et de son intensité. Ensuite, nous recenserons l'ensemble des données enregistrées aux stations de pompage afin d'établir d'éventuelles corrélations spatiales entre les durées de fonctionnement des stations de pompage et le nombre d'interventions enregistrées.

5.5.Méthodologie de l'étude chronospatiale des appels émis par la population pour chaque événement orageux

La base de données comporte pour chaque intervention la date et l'heure de l'appel émis. Nous avons entrepris ici une cartographie chronospatiale des interventions afin de mettre en évidence une éventuelle propagation de la « ligne de crue ». Ceci ne peut apparaître que dans le cas de ruissellement urbain ou de débordement. Ces cartes sont jointes aux autres données utilisées pour chaque événement pluvieux.

5.6. Analyse de l'événement pluvio-orageux du 19 août 1994

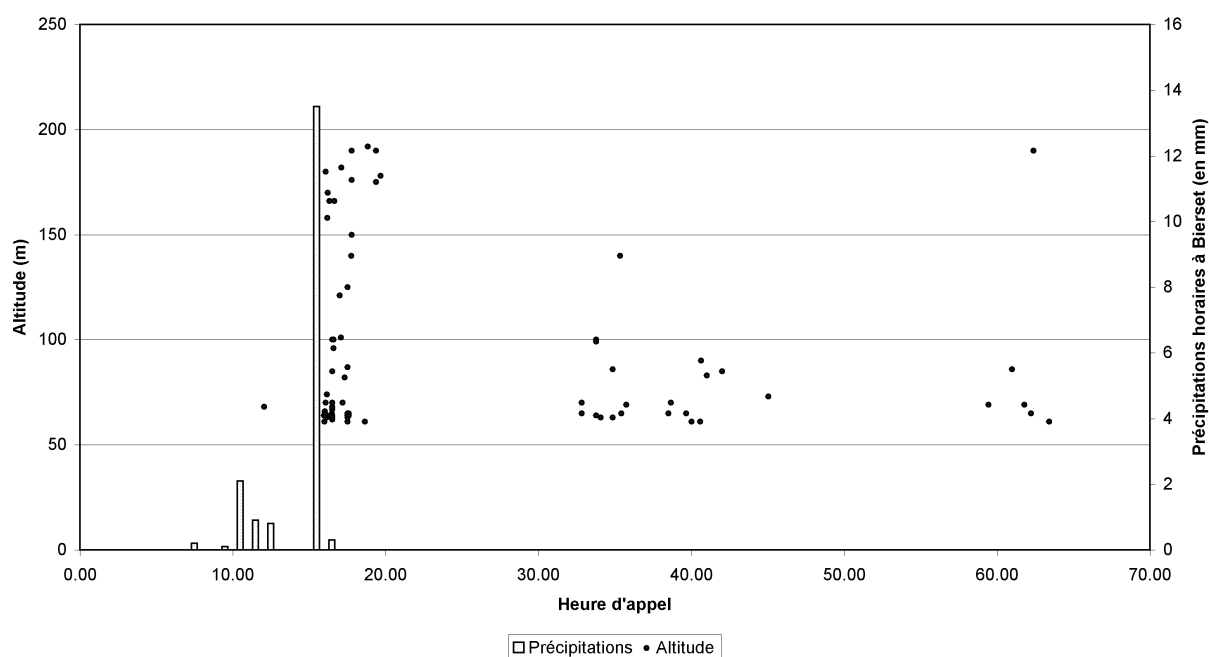
Les mesures effectuées au pluviographe de Bierset ne sont pas significatives pour cet épisode-ci. Les précipitations qui ont touché la vallée de la Meuse sont deux fois plus importantes que celles mesurées sur le plateau hesbignon. Leur répartition temporelle s'est effectuée comme suit : les premières averses ont touché Bierset à partir de 08:00 TU le 19 août. Jusqu'à 11:00 TU, 3,9 l/m² y ont été enregistrés. Ensuite, entre 14:00 TU et 15:00 TU, un second orage plus important a affecté la région. Les précipitations enregistrées durant ce laps de temps sont de 13,8 l/m².

Station	Précipitations (mm) Le 19 août 1994
Visé	7,8
Angleur	11,8
Thimister	39,4
Bierset	17,7
Liège-Monsin	31,9

Lors de cet orage, les stations de pompage de Herstal 1, Herstal 2, Herstal 3, Wandre 1, Wandre 3 et Wandre 5 se sont mises en route. Les seuils d'alerte ont été dépassés dans ces zones, ce qui a justifié la mise en marche des circuits de pompage.

Pour l'événement du 19 août 1994, nous prendrons en compte les interventions allant du 19 au 22 août inclus, afin de prendre en compte tous les appels liés à cet événement, même si des inondations se sont produites avec un certain temps de retard ou que la population a réagi moins rapidement. L'événement du 19 août concerne dès lors au total 115 interventions. Pour obtenir une échelle quantitative continue des heures d'appel, nous cumulerons les heures d'appel à partir du 19 août 1994 : 0 h le 19 à minuit, 24 h le 20 à minuit, 48 h le 21 à minuit et 72 h le 22 à minuit.

Figure 26. Altitude des interventions en fonction du temps et des précipitations – 0.00 = 19 août 1994 à minuit



Comme l'indique également la carte 4A, les appels émis par la population ont été nombreux dès la 16^{ème} heure, sur les plateaux et dans la plaine alluviale. Trois concentrations spatiales et temporelles sont bien visibles sur la carte : l'axe de la côte d'Ans, le quartier de Bressoux et le quartier de Saint-Léonard. Tous ces appels ont été enregistrés aux alentours de 16 h le 19 août 1994. Une seconde phase d'appels est bien visible sur le graphique, à partir de H+33. Sur la carte, ces interventions se localisent au pied du versant de la côte d'Ans ainsi que dans les quartiers de Vivegnis et de Saint-Léonard. On peut imaginer que la progression des ruissellements urbains s'est fait préférentiellement en pied de pentes relativement raides (côte d'Ans, coteaux de la Citadelle). Enfin, une dernière activité est enregistrée à H+60, essentiellement dans le quartier Saint-Laurent et au centre-ville de Liège. Le nombre de points est trop faible pour en faire l'analyse.

5.7. Analyse de l'événement pluvio-orageux du 11 juillet 1995

Le 11 juillet 1995, il s'agit essentiellement d'un front orageux ayant touché le nord du pays. Les quantités journalières de précipitations recueillies en Flandre s'échelonnent de 79 mm à Moerbeke à 119 mm à Brasschaat. La région liégeoise a été partiellement affectée par des averses moins intenses. A Bierset, seuls 8 mm ont été enregistrés entre 14:00 TU et 16:00 TU.

Station	Précipitations (mm) Le 11 août 1995
Bierset	8,6
Liège-Monsin	8,5
Angleur	4,4
Visé	0,7
Thimister	5,2

Le dossier transmis par l'AIDE ne mentionne que quelques pompes en fonctionnement ce jour-là, à savoir les stations de Wandre 1, Wandre 3 et Wandre 5. Les deux stations de Huy et celle de Tihange ont également été mises en route, mais elles se situent hors de la zone étudiée ici. Pour l'événement du 11 juillet 1995, aucune intervention pour inondation n'a été enregistrée à l'IILE. La cartographie

chronospatiale n'a donc pas pu être réalisée.

5.8. Analyse de l'événement pluvio-orageux du 3 au 5 octobre 1995

Du 3 au 5 octobre 1995, 46,2 mm ont été recueillis au pluviographe de Bierset. Les averses se sont propagées en plusieurs vagues espacées dans le temps. Le 3 octobre entre 04:00 TU et 05:00 TU, 5,6 l/m² ont été recueillis. Entre 21:00 TU et 22:00 TU ce même jour, 5,7 l/m² ont été enregistrés. Mais c'est surtout le 4 octobre que les averses ont été les plus intenses. Du 4 octobre 1995 à 21:00 TU au lendemain à 01:00 TU, la première vague d'averses apporta 16,7 l/m². La seconde vague, la plus importante, s'est donnée le 5 octobre au matin ; entre 05:00 TU et 09:00 TU, 17,4 l/m² ont encore été mesurés à Bierset.

Vu l'importance des quantités de précipitations recueillies à l'issue de cette courte période, le

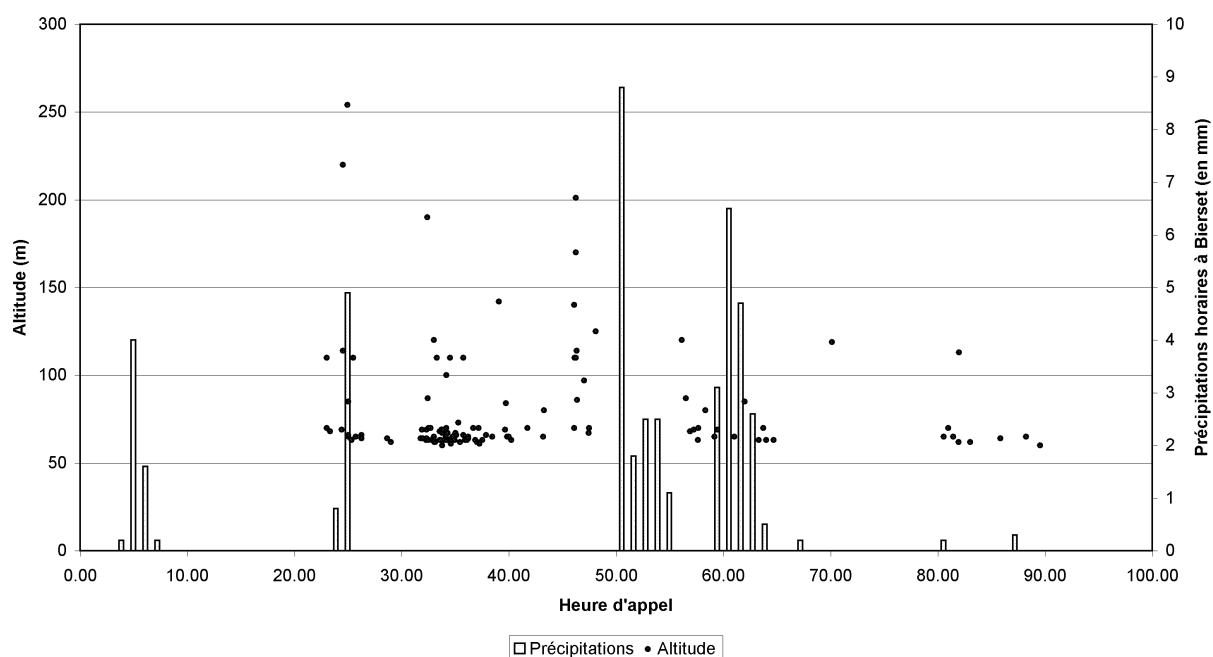
Station	Précipitations (mm) Le 3 au 5 octobre 1995 Cumul sur les 3 jours
Angleur	70,0
Liège-Monsin	57,3
Bierset	40,5
Visé	38,5
Thimister	38,4

nombre de stations ayant été mises en fonctionnement est élevé : à Herstal, les stations 1, 2 et 3 ont fonctionné, à Seraing, les stations 2, 3, 5 et 6 ; à Vivegnis, les stations 1 et 2, la station des Awirs à Ivoz-Ramet et à Wandre les stations 1, 3 et 5. En dehors de la zone d'étude, à Huy et environs les stations de Huy gauche et Huy droite et la station de Tihange ont fonctionné également.

Pour l'événement du 3 au 5 octobre 1995, nous avons tenu compte également du 6 octobre dans la base de données, afin de mentionner les inondations se produisant avec un délai plus

important dans des sous-bassins à plus faible dynamique. Au total, 129 interventions ont été enregistrées.

**Figure 27. Altitude des interventions en fonction du temps
et des précipitations – 0.00 = 3 octobre 1995 à minuit**



Au tout début de l'épisode pluvieux (voir figure 27), les interventions ont été enregistrées au sommet des plateaux de Boncelles et de Fléron ainsi que dans les bas de versants d'Ougrée et de Seraing. A partir de H+32, un grand nombre d'interventions sont recensées dans le centre-ville, le long de l'axe du boulevard d'Avroy et dans son prolongement vers le boulevard de la Sauvenière. Il y a très peu d'interventions enregistrées à des altitudes supérieures à 100 m. Après la 55^{ème} heure, des appels proviennent encore une fois de la plaine alluviale, et cela se reproduit une trentaine d'heures plus tard. On peut supposer que la quantité de précipitations a contribué à saturer le réseau d'égouttage, plutôt qu'à créer des *flash-floods* dans les rues pentues de l'agglomération liégeoise.

Les 4 figures suivantes montrent les durées de fonctionnement des différentes pompes en action à cette date. On constate que la majorité d'entre elles ont fonctionné à plein régime entre 23:00 et 00:00 dans la nuit du 3 au 4 octobre 1995. A Seraing, Herstal, Wandre et Vivegnis, les temps de pompage de chaque installation a été de l'ordre d'une heure à une heure et demi. En considérant un débit moyen d'environ 2.000 m³/h pour chaque pompe, une trentaine de pompes ayant été en fonctionnement intensif durant cet orage, on peut déduire qu'environ 60.000 m³ ont été évacués en Meuse. Le chiffre est approximatif car nous ne disposons pas avec précision du débit moyen de chaque pompe installée dans chaque station. Cependant, nous pouvons constater que les pompes de Herstal et de Wandre se sont déclenchées avant celle de Seraing, ce qui contredit la hausse du niveau d'amont vers l'aval.

Ceci est lié au passage successif de plusieurs vagues d'averses dont l'intensité a montré une forte variabilité spatiale.

Les débits enregistrés correspondent aux micro-bassins hydrographiques associés à chaque station de pompage. Ils n'englobent pas les parties amont des versants où les précipitations sont directement évacuées en Meuse par gravité *via* les exutoires. En considérant une superficie moyenne de 40 ha pour chacun des micro-bassins, une durée de fonctionnement d'une heure et un nombre de stations en fonctionnement égal à 12 (pour un total d'environ 30 pompes) ; nous pouvons en déduire la hauteur de la lame d'eau relative à cet événement : 60.000.000 l pour 12 stations drainant 40 ha chacune soit une lame d'eau de l'ordre de 12,5 mm/h durant l'averse. Cette valeur est à comparer avec les précipitations nocturnes enregistrées à Bierset, à savoir 16,7 mm/h, tout en gardant à l'esprit la grande variabilité spatiale des précipitations à l'échelle de l'agglomération durant les épisodes orageux (EPRICUM, 1977).

Figure 28. Durée de fonctionnement des pompes – le 3 et 4 octobre 1995 : partie 1

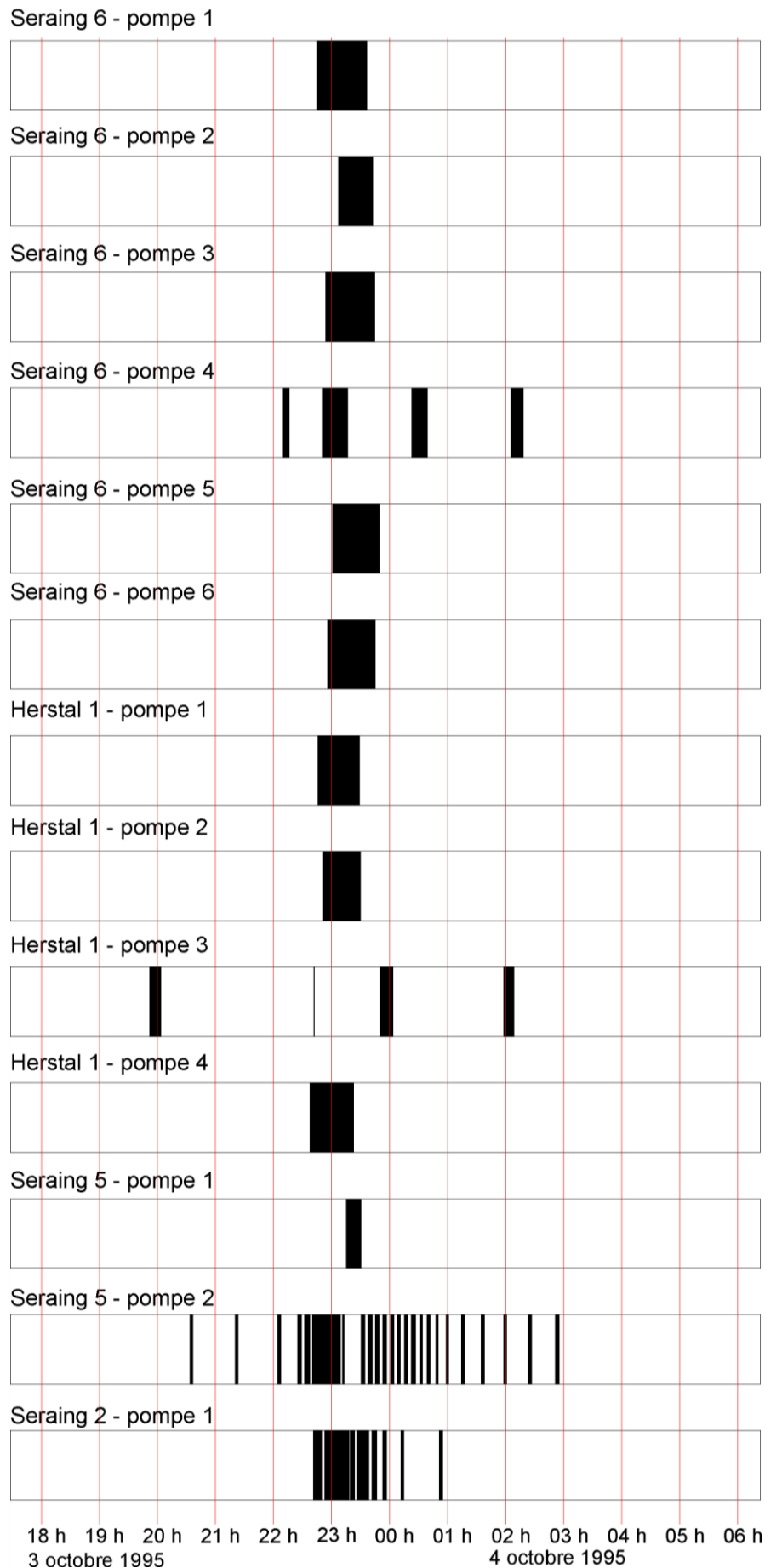


Figure 29. Durée de fonctionnement des pompes – le 3 et 4 octobre 1995 : partie 2



Figure 30. Durée de fonctionnement des pompes – les 3 et 4 octobre 1995 : partie 3

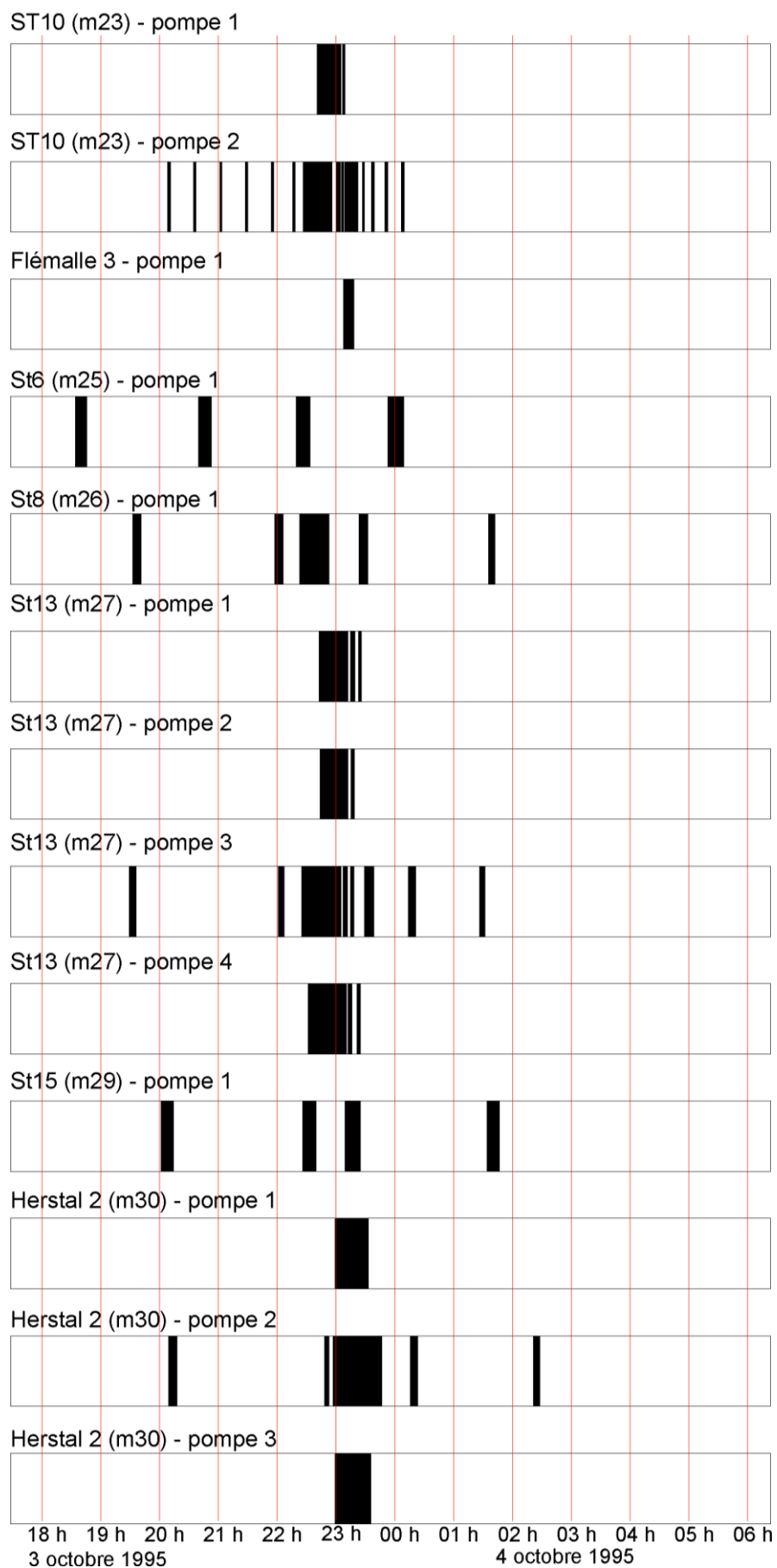
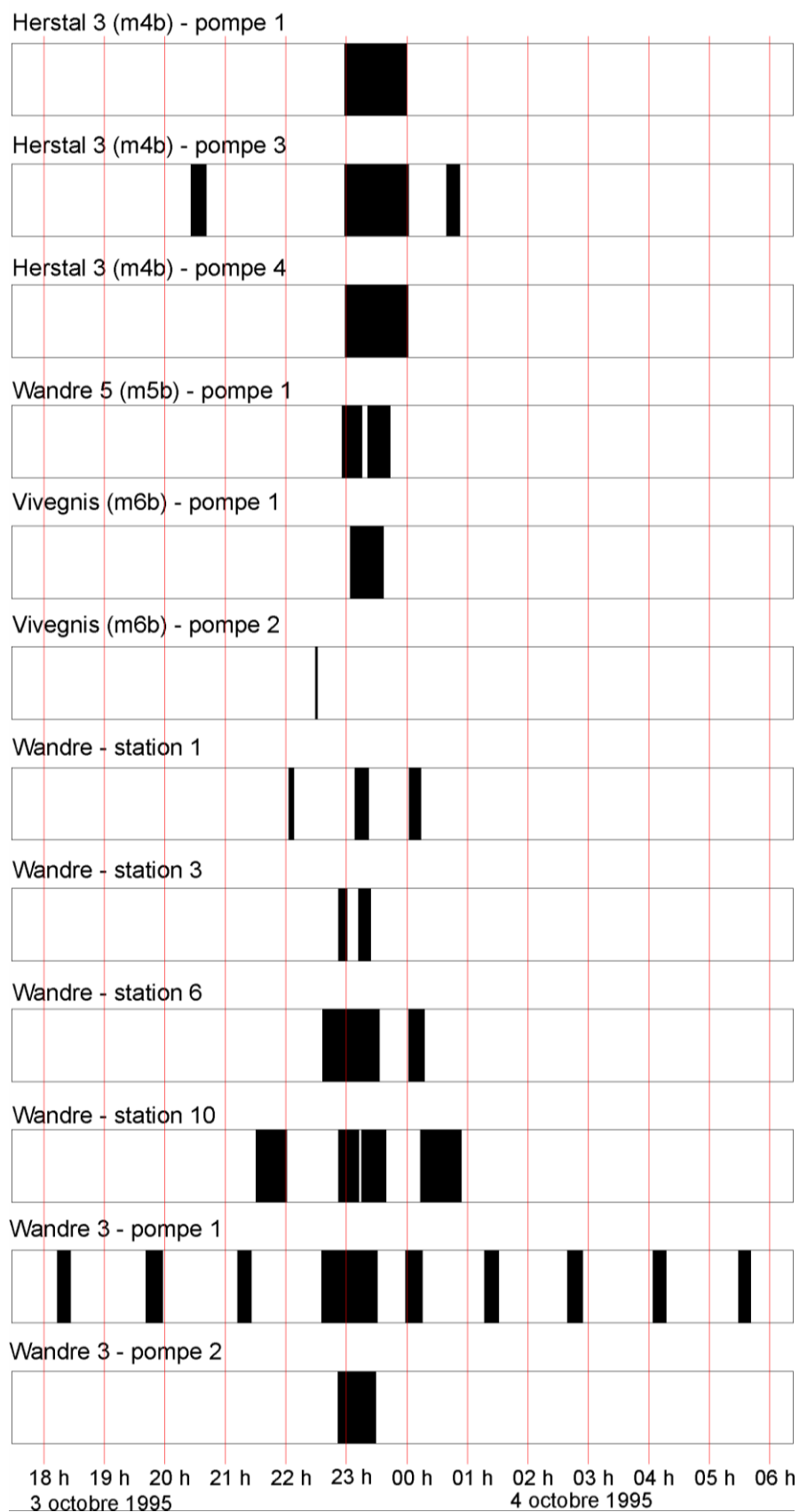


Figure 31. Durée de fonctionnement des pompes – les 3 et 4 octobre 1995 : partie 4



5.9. Analyse de l'événement pluvio-orageux du 24 août 1997

Le 24 août 1997, bien que nous disposions d'un dossier relatif à des pompages intensifs à Herstal et à Cheratte notamment, aucune précipitation n'a été enregistrée à Bierset durant la même période. Nous voyons ici l'impact de la variabilité spatiale des précipitations qui entrave l'analyse hydrologique en milieu urbain lorsque le nombre de pluviographes disponibles est insuffisant. Les quantités journalières de précipitations recueillies dans les stations de la région liégeoise sont les suivantes, pour le 24 août 1997 :

Station	Précipitations (mm) Le 24 août 1997
Visé	9,2
Angleur	0,5
Thimister	1,0
Bierset	0,0
Liège-Monsin	0,0

Ceci correspond dès lors très bien avec les pompes pour lesquelles les mises en marche ont été fréquentes cette journée-là. La liste des enregistrements de pompes transmis par l'AIDE sont les suivantes : Cheratte 1, Herstal 1, Herstal 2, Herstal 3, Vivegnis 2 et Wandre 3. Le 24 août 1997, seules deux interventions ont été effectuées, une à Visé et l'autre à Oupeye.

5.10. Analyse de l'événement pluvio-orageux du 4 au 5 juillet 1999

Du 4 au 5 juillet 1999, 254 interventions ont été effectuées. Les images radar n'étant pas disponibles avant décembre 1999, nous devons nous satisfaire d'un résumé météorologique⁸ émis par l'IRM concernant cet orage de juillet 1999. En provenance du sud-ouest, les orages ont atteint la frontière belge vers 19h le 4 juillet 1999. La bande orageuse s'est ensuite déplacée vers la frontière néerlandaise. Entre 23 :30 et 00:30, la province de Liège a été soumise à d'importantes averses ainsi qu'à plus de 400 décharges de foudre par minute. Une seconde zone orageuse a touché la Belgique entre 04:00 et 07:30 le 5 juillet 1999. On a relevé, pour l'ensemble de la période orageuse, une densité de 9 éclairs par km² au dessus de Liège et au sud de la ville. Les quantités de précipitations recueillies à Liège-Monsin étaient de 68 l/m² pour la nuit du 4 au 5 juillet 1999. Le pluviographe de Bierset ne nous fournit pas de données pour cet événement, un problème technique ou une saturation du dispositif n'ont pas permis de valider les quantités de précipitations enregistrées. Les dossiers de l'AIDE mentionnent cependant cet orage a provoqué des averses dépassant fortement toutes les normes de calcul prises en compte pour le dimensionnement des installations de démergement (collecteurs, bassins d'orage, exutoires, siphons, déversoirs, stations de pompage, ...). La norme simplifiée utilisée par l'AIDE pour caractériser un orage de très forte intensité est de 135 l.ha⁻¹.s⁻¹ pendant 20 minutes ou de 200 l.ha⁻².s⁻¹ pendant 10 minutes. Ceci correspond aux intensités pluviométriques suivantes : respectivement 48,6 mm/h durant

⁸ <http://www.kmi.be/francais/pages/Klimatologisch/orage.htm>

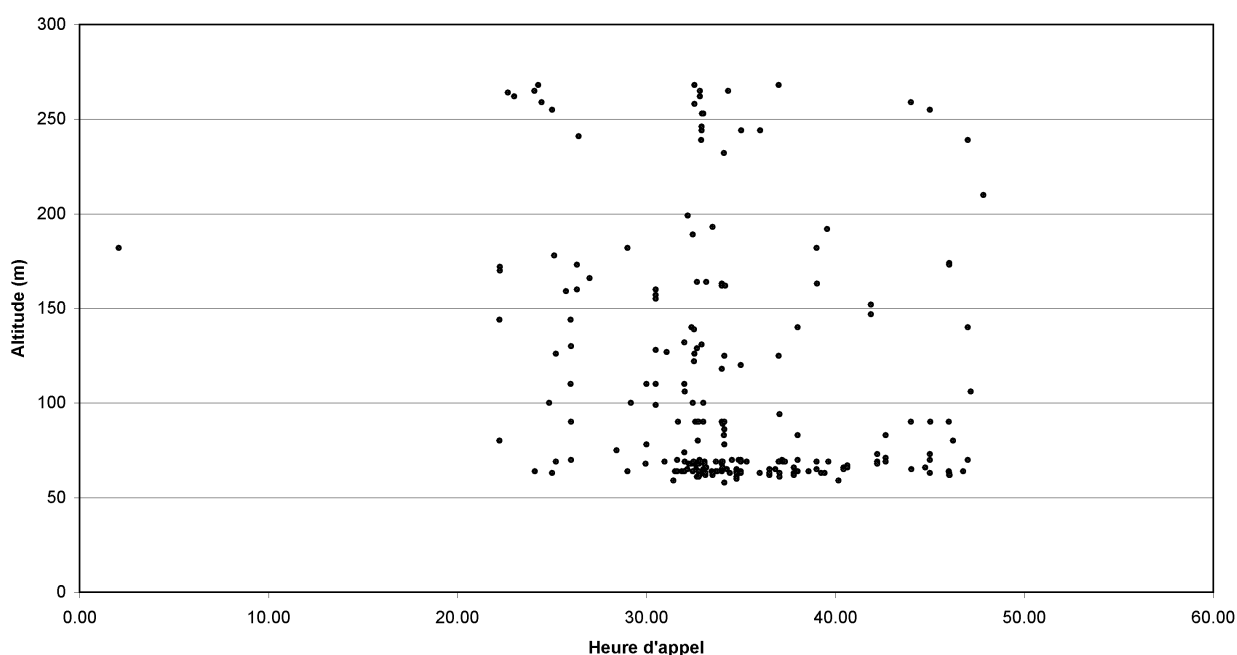
20 minutes ou 72 mm/h durant 10 minutes. En l'occurrence, les agents du démergement ont constaté un dépassement de ces hypothèses de calcul durant la nuit du 4 au 5 juillet 1999. Malgré le fonctionnement optimal des stations de pompage, on a pu relever des dégâts importants à Liège : saturation des grilles de collecte en voirie, mise en charge de nombreux collecteurs, refoulements dans certaines caves, inondations des sous-sols par les rampes de garage et les soupiraux et détachement de pavés ou du revêtement hydrocarboné dans certaines rues.

Station	Précipitations (mm) Le 4 et 5 juillet 1999 Cumul sur les 2 jours
Angleur	71,0
Liège-Monsin	68,1
Visé	43,3
Bierset	40,1
Thimister	24,3

L'événement du 4 au 5 juillet 1999 est, de loin, celui qui a mobilisé le plus grand nombre de stations de pompage du réseau de l'AIDE. Les stations sollicitées sont les suivantes : Seraing 2, 3, 5 et 6 ; Wandre 1, 2, 3 et 5 ; Angleur 10, Ougrée 13, Herstal 1, 2 et 3 ; Vivegnis 1 et 2 ; Tilleur 11, Cheratte 1 et Flémalle 8. En amont de la zone étudiée, les stations de Tihange, Huy gauche, Huy droite et des Awirs ont également

été sollicitées.

Figure 32. Altitude des interventions en fonction du temps – 0.00 = 3 juillet 1999 à minuit



Ce cas s'apparente à celui du 3 octobre 1995. Dans un premier temps, des appels sont émis depuis le plateau et la plaine alluviale, selon une répartition équitable entre ces deux provenances (voir figure 32). Par après, à partir de la 30^{ème} heure, le nombre d'interventions demandées a été nettement plus important dans la plaine alluviale, et surtout le long de l'axe du boulevard d'Avroy, du boulevard de la Sauvenière ainsi que dans leur prolongement vers la rue Saint-Léonard (voir carte 4C). Ici aussi, la quantité de précipitations recueillies semble avoir saturé le réseau d'égouttage dans ces zones que nous savons maintenant être situées en dépression par rapport aux autres quartiers de la plaine alluviale.

Figure 33. Durée de fonctionnement des pompes – les 4 et 5 juillet 1999 : partie 1

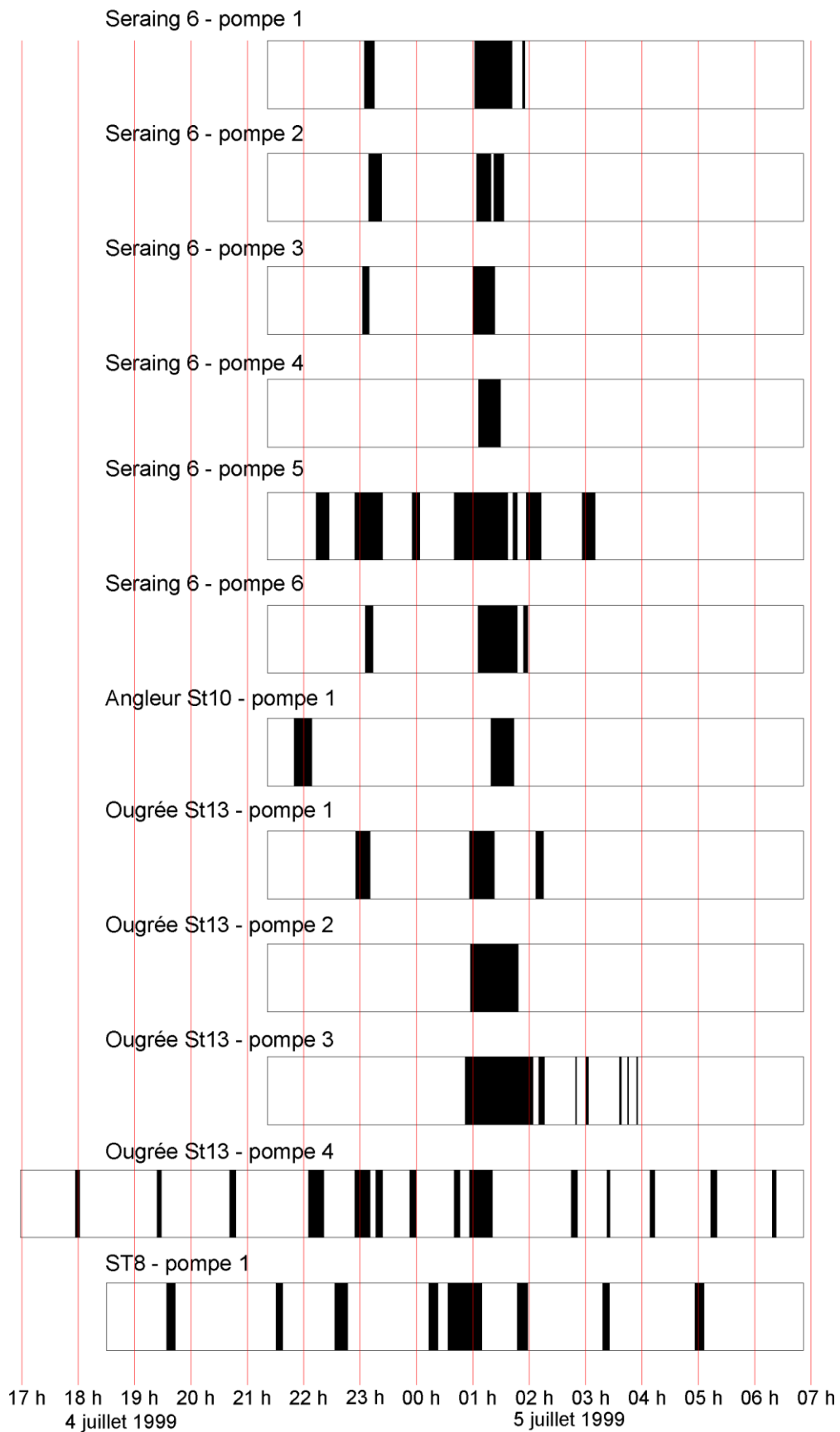


Figure 34. Durée de fonctionnement des pompes – les 4 et 5 juillet 1999 : partie 2

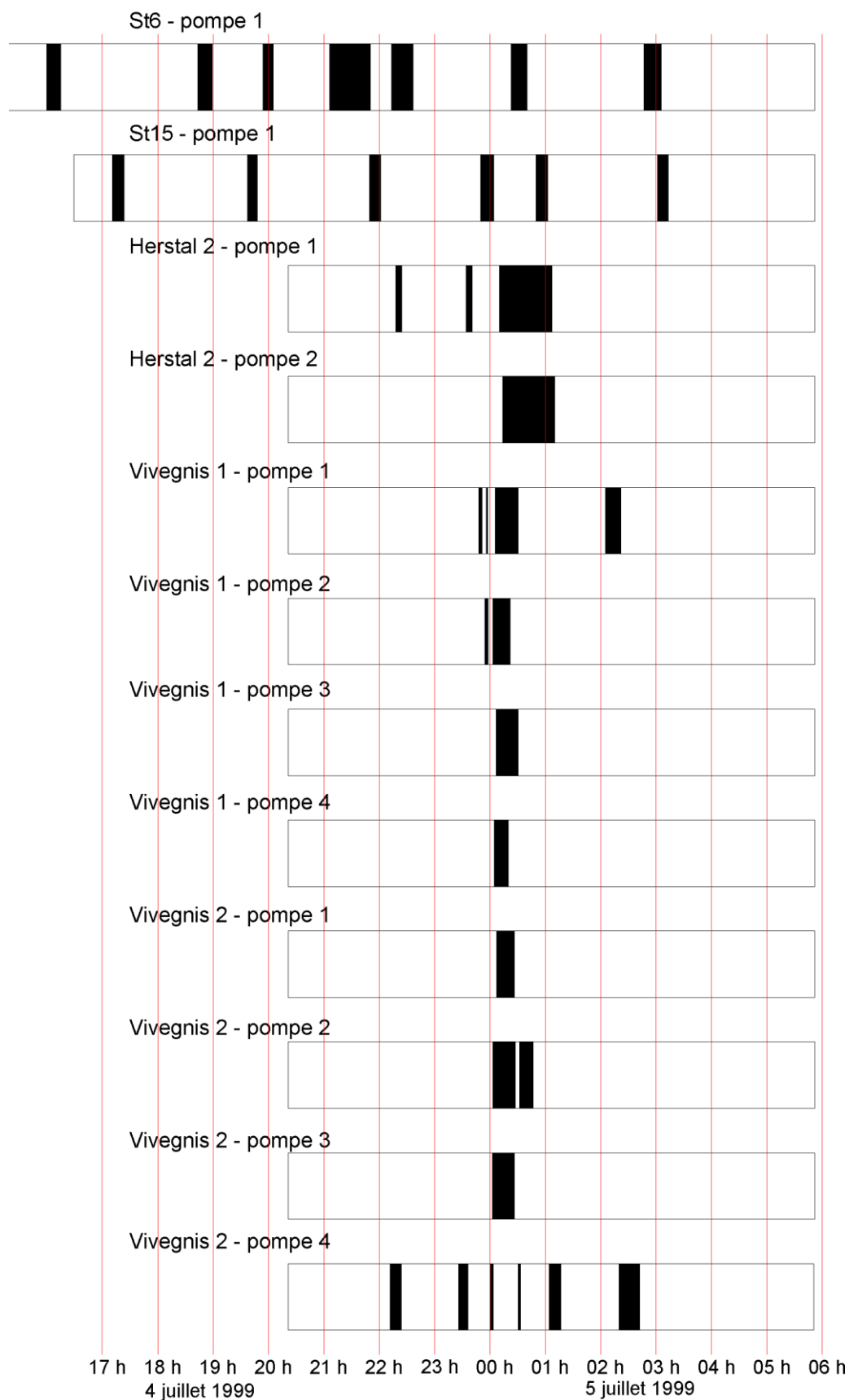
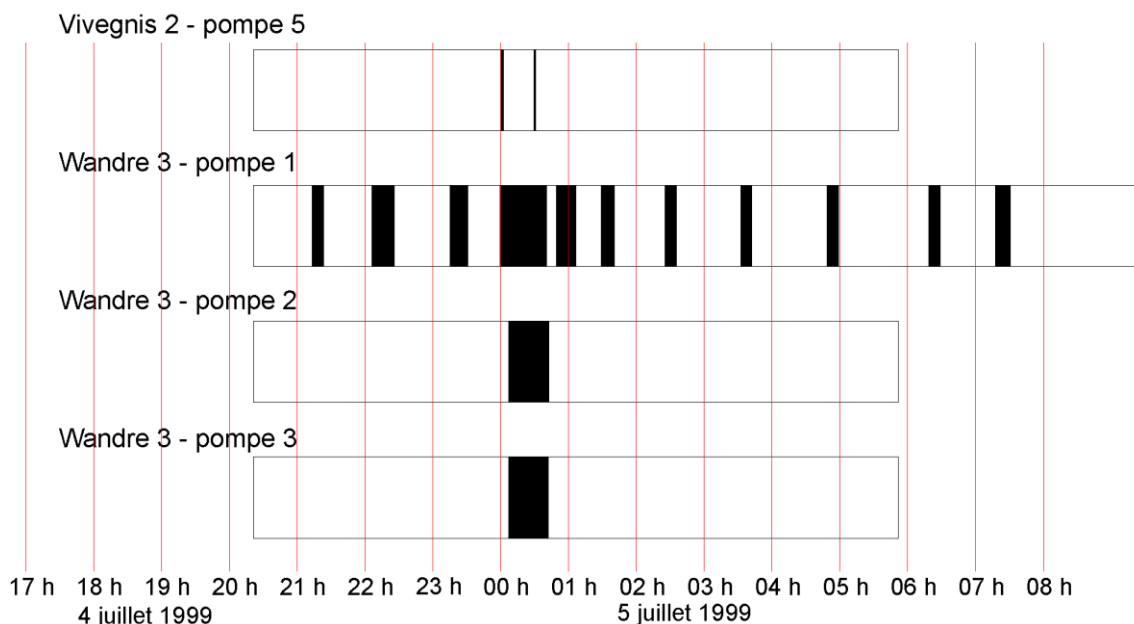


Figure 35. Durée de fonctionnement des pompes – les 4 et 5 juillet 1999 : partie 3



Les 3 figures qui précèdent nous montrent l'évolution dans le temps des diagrammes de pompage par station pour l'ensemble des installations qui étaient en fonctionnement durant l'orage du 4 au 5 juillet 1999. Remarquons tout d'abord que la majorité des stations de pompage se sont mises en route entre 01:00 et 02:00 du matin le 5 juillet 1999 à Ougrée et Seraing tandis que les stations de Herstal et Vivegnis se sont déclenchées entre 00:00 et 01:00. Nous notons dès lors un décalage d'une à deux heures entre les pics d'intensité de précipitations relevé durant cette nuit et les moments de déclenchement des stations de pompage. La seconde zone active ayant traversé la région liégeoise cette nuit-là, entre 04:00 et 07:30, ne transparait pas dans l'analyse des diagrammes de fonctionnement. Il est probable que les durées de déclenchement soient systématiquement arrêtées après un laps de temps plus grand que celui réellement nécessaire à l'évacuation des eaux, afin de préparer anticipativement d'éventuelles averses à court terme sur la région. L'événement exceptionnel de ce 4 juillet a occasionné plusieurs dépassements de cotes d'alarme : à la station n°3 de Herstal, le seuil d'alerte a été franchi pendant près d'une heure. A la station n°13 de Sclessin, le plancher de la station de pompage a été inondé ; cela ne s'était jamais produit en plus de 60 ans de fonctionnement. Comme on l'a vu précédemment, nombreuses sont les stations qui ont été mises en fonction durant un laps de temps important. La capacité de pompage de toutes les stations principales permanentes de démergement de Sclessin, de Herstal, de Wandre et de Vivegnis, a été dépassée.

5.11. Analyse de l'événement pluvio-orageux du 2 juillet 2000

Suite à l'observation des images radar⁹ du 02/07/2000, nous pouvons constater qu'il s'agissait d'un front pluvieux d'environ 200 km d'extension dans le sens nord-sud et plus large que la Belgique dans le sens est-ouest. La masse pluvio-orageuse se déplace du sud-ouest au nord-est. Les premières averses d'intensité faible ont touché la région liégeoise entre 17:45 TU et 18:00 TU. De nombreux foyers orageux, liés à des précipitations intenses, se sont ensuite développés dans toute la partie centrale de la Belgique. Les averses les plus intenses sont enregistrées sur l'image radar de 19:30 TU, touchant le Brabant, le Limbourg et la partie nord de la province de Liège. L'activité orageuse s'est ensuite amoindrie jusque 20:30 TU sur Liège et ses environs, après quoi, les averses ont cessé (21:00 TU). Le pluviographe de Bierset a enregistré entre 19:00 TU et 20:00 TU un total de 24,7 l/m².

Station	Précipitations (mm) Le 2 au 5 juillet 2000 Cumul sur les 4 jours
Thimister	74,6
Bierset	66,1
Liège-Monsin	53,8
Angleur	52,8
Visé	35,3

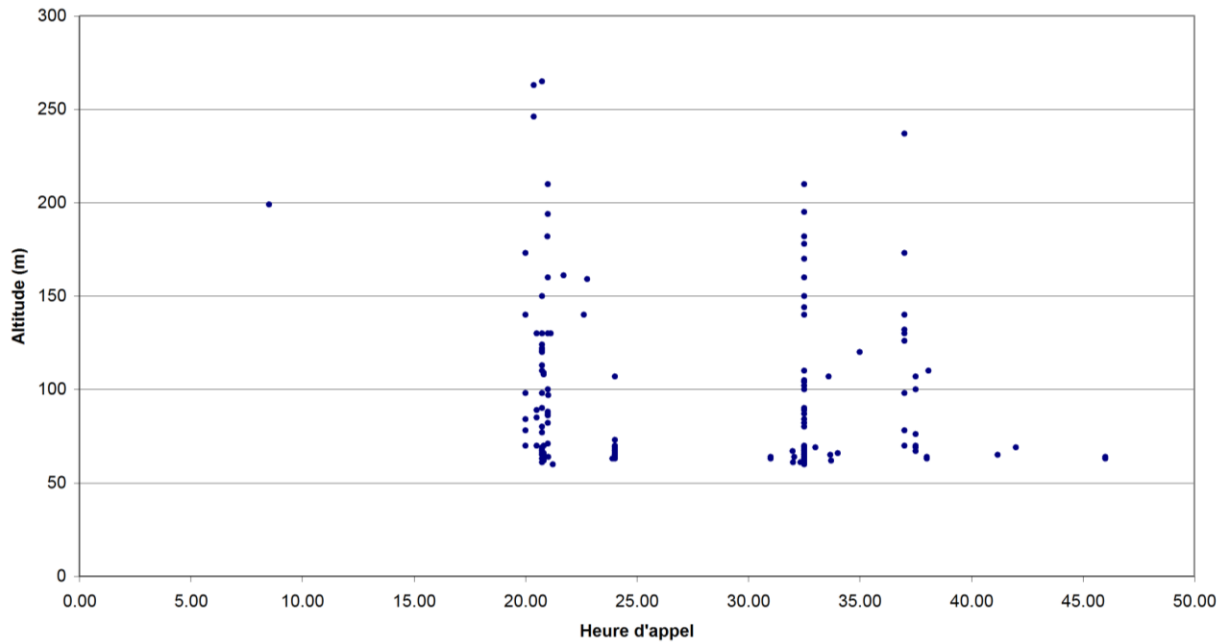
Le tableau ci-contre reprend également les précipitations des 3, 4 et 5 juillet, qui ont fortement accentué les possibilités d'inondations en région liégeoise. De nombreuses stations de pompage ont été mises en fonctionnement suite à cette période d'intenses précipitations. Les stations de Seraing 6, Tilleur 11, Sclessin 13, Herstal 1 et 3, Vivegnis 1 et 2, Wandre 2, 3 et 5 ainsi que Cheratte 1 sont reprises

dans le dossier transmis par l'AIDE.

Le 2 juillet 2000 et le lendemain, 293 interventions ont été effectuées par les pompiers de l'IILE. Il s'agit de l'événement le plus important de la période d'étude.

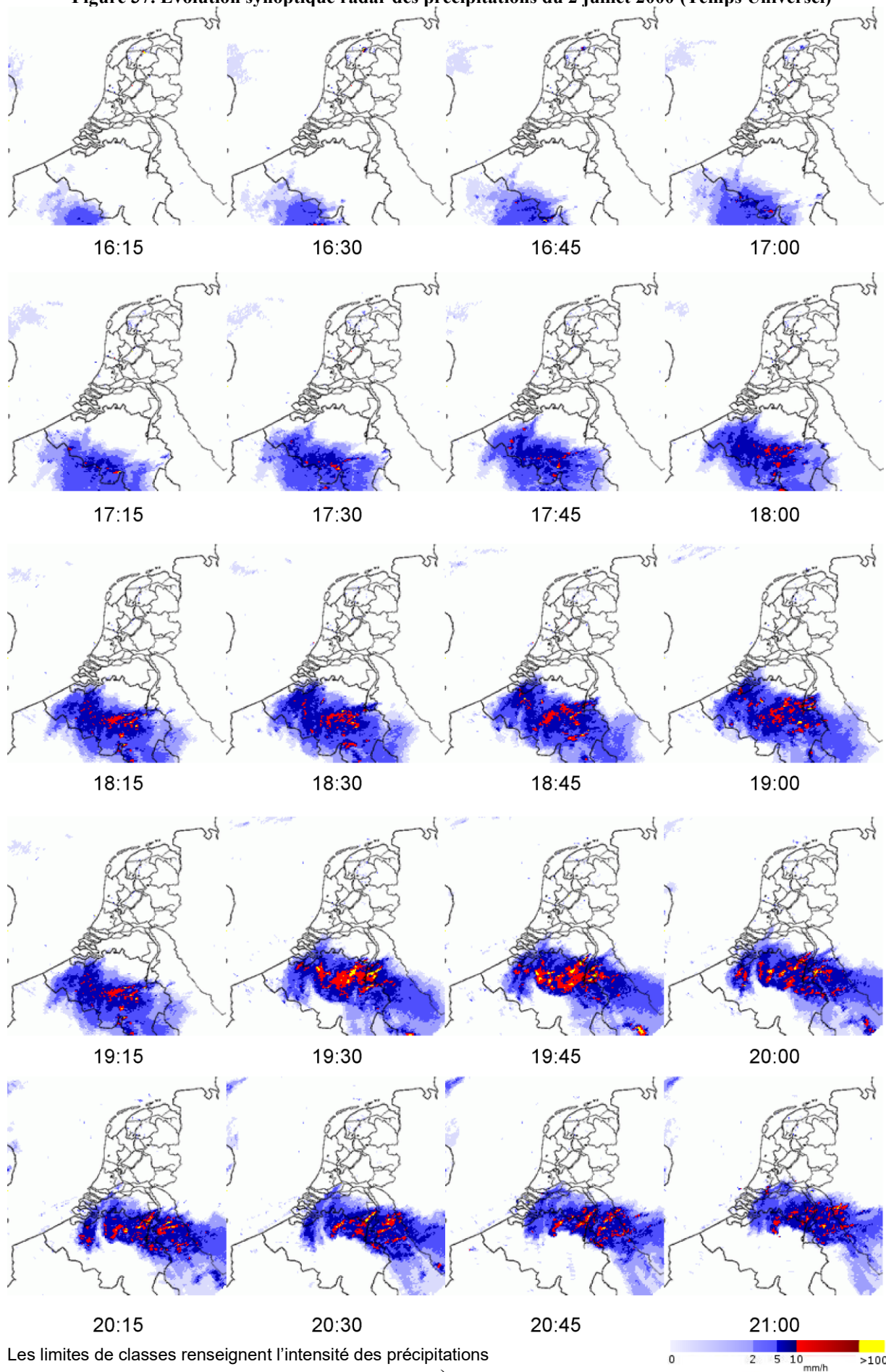
⁹ <http://www.weersite.net/?archief&radarbeelden>

Figure 36. Altitude des interventions en fonction du temps - 0.00 = 2 juillet 2000 à minuit



La figure 36 nous montre une répartition fortement concentrée sur 3 pics de demandes d'interventions. A H+20, H+32 et H+37, des interventions sont demandées, la répartition est plus conséquente dans la plaine alluviale que sur les plateaux, mais cela est également lié à la densité de population relative de ces deux secteurs. La carte 4D montre essentiellement des interventions à H+20 situées en milieu de versant, dans le secteur de Jupille, de Grivegnée et d'Ougrée. La majorité des autres interventions sont concentrées dans la plaine alluviale, et toujours le long de l'axe principal Avroy / Sauvenière, mais selon une moindre grande linéarité que dans le cas précédent (voir carte 4C).

Figure 37. Evolution synoptique radar des précipitations du 2 juillet 2000 (Temps Universel)



Les limites de classes renseignent l'intensité des précipitations
(source : <http://www.weersite.net/?archief&radarbeelden>)

Figure 38. Durée de fonctionnement des pompes - les 2 et 3 juillet 2000 : partie 1

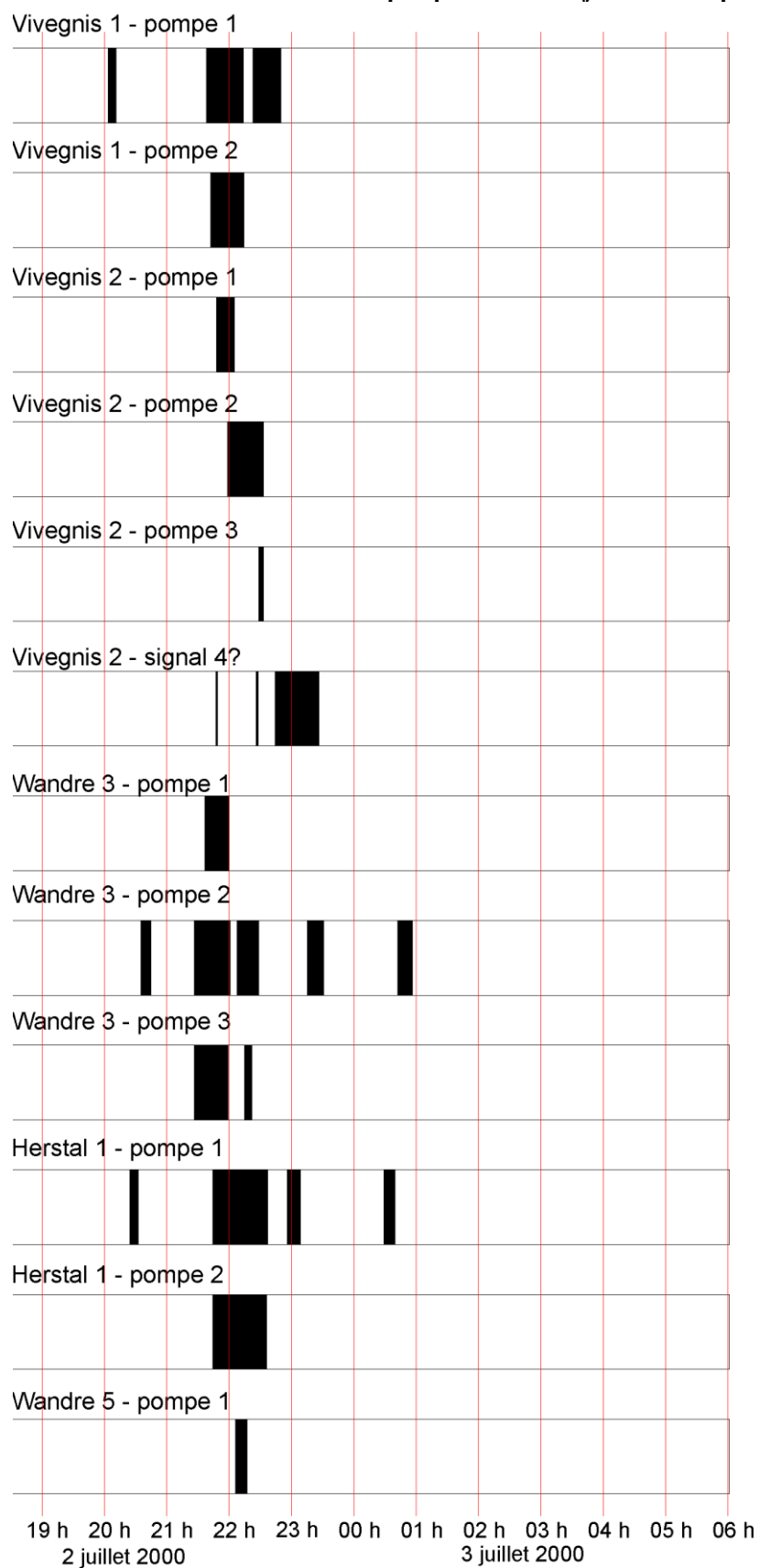
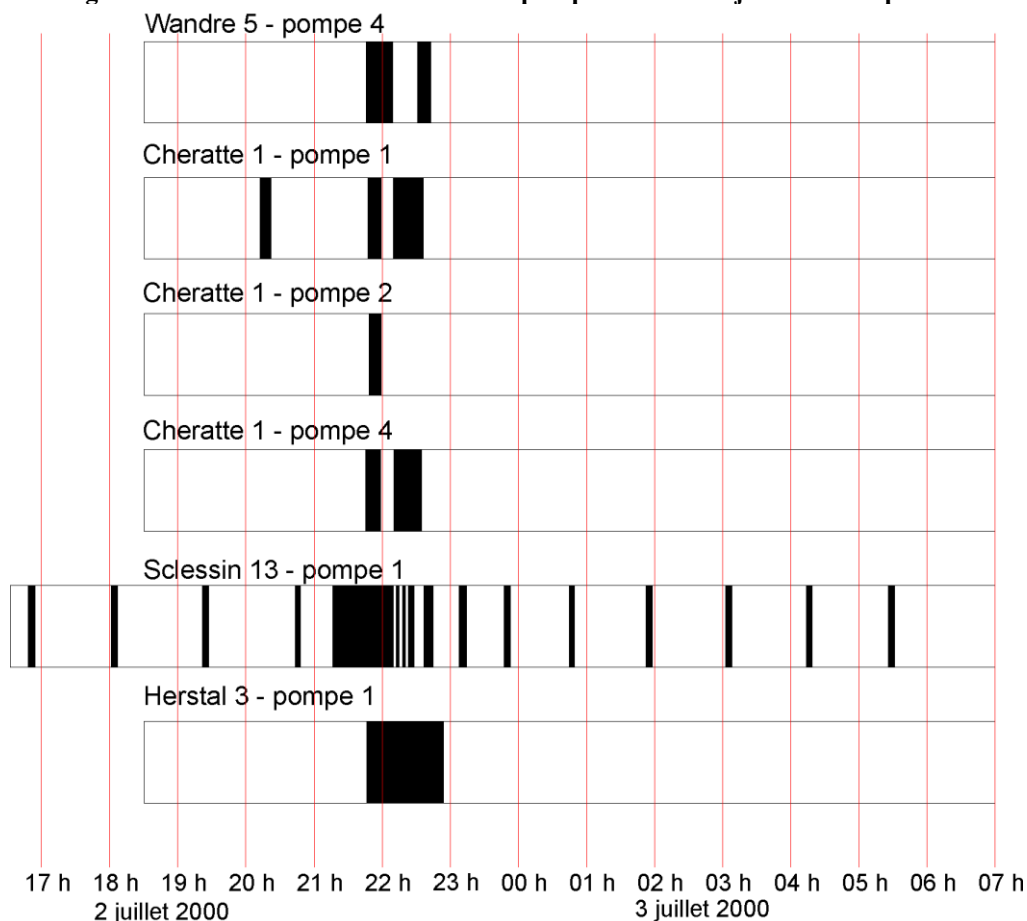


Figure 39. Durée de fonctionnement des pompes - les 2 et 3 juillet 2000 : partie 2

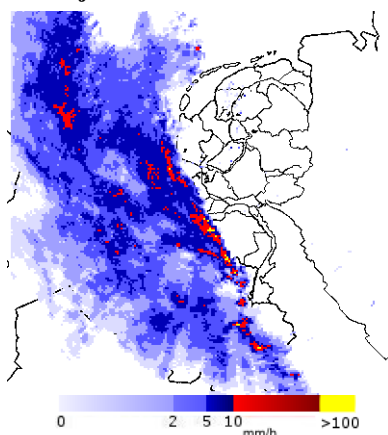


Les données mesurées précisément et indiqués au point 0 reprennent le volume d'eau total pompé au cours de la journée du 2 juillet 2000. Ils sont conséquents, en raison de l'intensité des précipitations ayant affecté la région à cette date, comme indiqué ci-dessus. L'analyse des graphes de mises en marche des pompes, indiqués ci-dessus, révèle qu'il y a eu un décalage dans le temps des déclenchements des pompes. En premier lieu, les pompes de Sclessin et de Wandre ont commencé à pomper, via les stations principales, à partir de 21:30 dans les deux cas. Par la suite, les stations de Cheratte se sont mises en route, vers 21:45. Elles ont été suivies de celles de Vivegnis, à partir de 22:00. Et enfin, les pompes de Herstal ont pompé entre 22:00 et 22:45 globalement. La progression ne suit pas non plus ici de logique stricte, bien que l'on puisse déduire un effet d'aval vers l'amont pour la séquence de déclenchement Wandre – Cheratte – Vivegnis – Herstal. Le volume d'eau pompé a atteint environ 60.000 m³ au cours de cet orage. La lame d'eau correspondante, en tenant compte de la mise en fonction de 8 stations, chacune drainant un bassin de 40 ha en moyenne durant 45 minutes, est estimée à 18,7 mm ; l'intensité associée s'élève quant à elle à 25 mm/h. La hauteur d'eau récoltée à Bierset au cours de la période de pompage est de 24,7 mm. Par rapport à l'événement d'octobre 1995, la variabilité spatiale des précipitations semble s'être accrue, mais le seul pluviographe enregistreur situé à Bierset ne suffit pas pour l'affirmer.

5.12. Les événements pluvieux récents et l'impact des précipitations intenses en région liégeoise

Depuis le recueil systématique des données d'interventions effectuées par les services d'incendie de Liège, arrêté le 3 juin 2004, plusieurs épisodes orageux ont encore affecté la région liégeoise et provoqué des inondations d'ampleur parfois importante.

Figure 40. Image radar du 4 juillet 2005 – 09:15 TU



Le 4 juillet 2005, les intenses averses qui ont surtout affecté le Tournaisis et le nord du pays ont provoqué l'inondation de quelques caves dans l'agglomération liégeoise. Le front orageux a atteint Liège vers 09:00 TU (voir figure 40)¹⁰.

enregistré 250 requêtes d'interventions, essentiellement pour des caves inondées. Les plus fortes intensités de précipitations ont été mesurées vers 19:45 TU sur le centre-ville (voir figure 41).

Figure 41. Image radar du 29 juillet 2005 – 19:45 TU

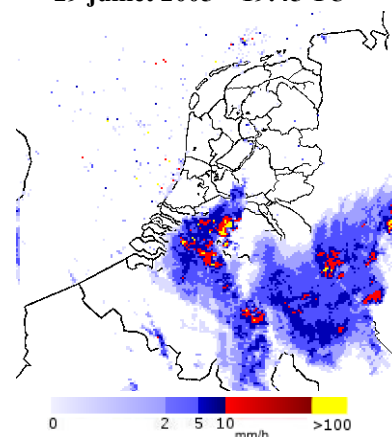
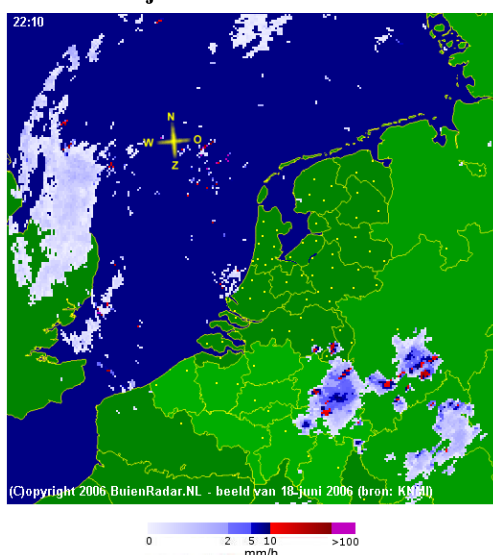


Figure 42. Image radar du 18 juin 2006 – 22:10 TU



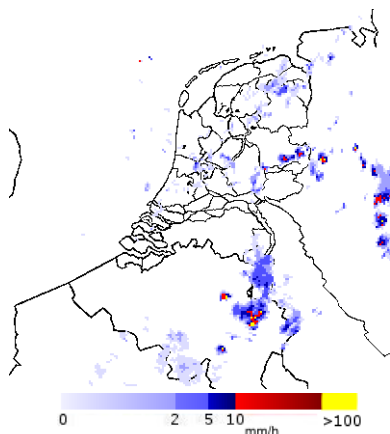
Les 18 et 19 juin 2006, l'agglomération a, une nouvelle fois, été touchée par plusieurs orages violents (voir figure 42). Ils ont provoqué l'inondation de nombreuses caves à Liège, Flémalle et Crisnée. La Place Saint-Lambert ainsi que les galeries commerçantes ont été inondées par 20 à 25 cm d'eau, suite au dépassement de la capacité d'évacuation du réseau d'égouttage. 600 appels ont été enregistrés par les pompiers de l'IILE. A la station du Thier à Liège, les cumuls pluviométriques ont atteint 27 mm le 18 juin 2006 et 42 mm le lendemain¹¹.

¹⁰ Source des images radar : <http://www.buienradar.nl/historie.aspx> et <http://www.weersite.net/?archief&radarbeelden>

¹¹ <http://www.meteobelgium.be/forums/index.php?showtopic=6355>, pluviographe privé situé au Thier-à-Liège

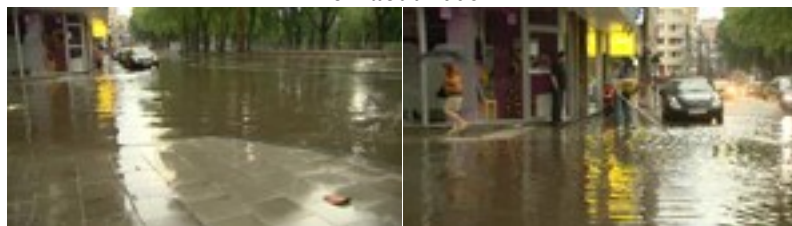
Le 7 août 2006, un foyer orageux s'est développé durant la soirée sur la région liégeoise (voir figure 43). Les inondations qui en ont résulté ont touché une partie du boulevard d'Avroy. Il a dû être coupé à la circulation (voir figure 44). Les trémies de la rue Sainte-Marie ont également été en partie submergées.

Figure 43. Image radar du 7 août 2006 – 18:00 TU



D'autres secteurs du centre-ville ont subi la forte intensité des précipitations : le parc d'Avroy, les ponts Albert et Kennedy, l'avenue Rogier, le boulevard Frankignoul, l'îlot Saint-Michel et la place Saint-Lambert ont été fortement inondés. Cependant, seuls 60 appels ont été enregistrés par les services d'intervention, soit dix fois moins que lors de l'événement du 18 juin 2006. Ceux-ci concernaient essentiellement des pompages de caves inondées dans des habitations, des commerces ou même au lycée de Waha, le long du boulevard d'Avroy, où le réseau d'égouttage n'a pas été en mesure d'évacuer les volumes précipités.

Figure 44. Inondation de la partie ouest du boulevard d'Avroy, le 7 août 2006



Notons d'ailleurs que ce mois d'août 2006 fut le plus humide jamais enregistré au pluviomètre de Bierset, avec 284 mm de précipitations.

Source : <http://www.rtl.be/page/rtlinfo/articles/societearticle/227.aspx?articleid=62611>

Ces précipitations intenses, dont la fréquence semble s'accroître actuellement, ont tendance à provoquer régulièrement le débordement des réseaux d'égouttage¹². Ceux-ci ont été dimensionnés d'après des normes européennes. A partir de 160 litres par seconde et par hectare pendant plus de 20 minutes, ils entrent dans une phase de surcapacité. Cette valeur correspond à une précipitation de 57,6 mm/h durant 20 minutes, dont la période de retour est proche d'environ 10 ans à Bierset d'après la période de référence 1993-2004. Il reste à savoir si la tendance actuelle d'intensification des précipitations se confirmera dans le futur, ce qui engendrerait la réduction de la période de retour des averses susceptibles de dépasser les normes du réseau d'égouttage de l'agglomération liégeoise et favoriserait donc des inondations plus fréquentes.

¹² Le Soir, Le réseau d'égouts en question, 30/08/2006

6. Conclusion

Au terme de ce mémoire, nous avons pu enrichir l'analyse initiale qui s'était basée uniquement sur les relevés des services d'interventions de la région liégeoise. La base de données créée en 2004 a été interprétée sous un nouvel angle, notamment grâce à la disponibilité récente de données géographiques plus précises. Ceci nous a permis de constater que la précision de la localisation des interventions était maximale à Liège et à Seraing (précision de l'ordre de 20 m) alors qu'elle était moindre dans les communes avoisinantes (100 à 250 m).

En outre, l'étude des documents anciens relatifs à la crue de l'hiver 1925-1926 nous a permis de reconstituer l'étendue submergée par cette inondation dans l'ensemble de la plaine alluviale. Une approche originale a été mise en œuvre afin de comparer les zones ayant été les plus sujettes à cette catastrophe par rapport à la localisation et à la fréquence des inondations plus récentes et moins tragiques. En amont de Seraing, la répartition différentielle de la population entre les rives gauche et droite de la Meuse engendre une localisation préférentielle des interventions en rive gauche. A Jemeppe, on constate une bonne corrélation entre la localisation des interventions récentes par rapport aux hauteurs de submersion de la crue de 1926. A Seraing, par contre, l'efficacité du système de démergement semble prévenir l'intégralité des problèmes d'inondation, même à l'échelle locale. Au niveau de Renory, les interventions se localisent à nouveau dans les points bas, exclusivement en rive gauche, suite à la répartition différentielle de la population. Au centre-ville, il existe une très bonne correspondance entre le plan d'eau reconstitué et la limite des zones où des interventions sont recensées. Les points bas du boulevard d'Avroy sont à nouveau corrélés à de nombreuses interventions des pompiers. Il en va de même le long de la rue Saint-Léonard et dans son prolongement vers le quartier de Vivegnis.

Afin d'analyser les archives enregistrées par le service du démergement, une méthode de numérisation des graphiques sous forme papier a été mise en place. Elle a permis d'établir des corrélations multiples entre le passage des fronts pluvio-orageux et les moments de déclenchement des pompes dans les stations primaires et secondaires. Par ailleurs, la distribution des appels et la localisation des appelants au fil du temps ont été interprétées afin de mettre en évidence la progression d'une « ligne de crue », pour certains épisodes pluvieux intenses et discontinus. Cette progression ne se marque pas aussi clairement lors des averses continues et moins intenses. Par ailleurs, l'évolution des séquences de déclenchement de pompes a également été abordée afin d'appréhender une éventuelle logique amont-aval et de définir les causes de saturation du réseau d'égouttage. On constate,

selon les épisodes pluvieux, un comportement différent du réseau de drainage. La séquence de déclenchement des stations est complexe et liée à la variabilité intrinsèque des précipitations extrêmes à l'échelle d'une agglomération urbaine. En outre, il a été possible d'analyser les lames d'eau écoulées lors des épisodes bien documentés et de constater l'importance capitale du système de démergement dans la lutte contre les inondations. Enfin, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des précipitations extrêmes semble présager de débordements de plus en plus fréquents du réseau d'égouttage, dont le gabarit devient insuffisant. Une étude pluviographique à haute résolution temporelle et spatiale permettrait de caractériser les précipitations extrêmes au sein de l'agglomération liégeoise. En effet, une analyse du réseau existant, et la simulation d'événements de plus en plus intenses et récurrents auraient pour objet la définition des modifications à apporter aux infrastructures d'égouttage urbain afin de limiter les inondations locales dues au ruissellement et au refoulement d'égout, actuellement irrésolues dans certaines portions démergées et nettement plus problématiques au centre-ville de Liège, en territoire non démergé. En outre, les archives d'exploitation du réseau de démergement promettent également de plus amples recherches, essentiellement au niveau des hauteurs d'eau dans les différents puisards et l'évolution du remplissage et de la vidange de ceux-ci au cours des périodes pluvieuses. Cependant, ce dépouillement nécessiterait le repérage de toutes les caractéristiques de chaque station du réseau, de chaque pompe et des différents puisards et canalisations qui en font partie. Une meilleure connaissance du comportement du drainage urbain lors des précipitations exceptionnelles aurait pour objectif de mieux appréhender les problèmes d'inondations récurrentes afin d'envisager des solutions concrètes.

7. Bibliographie

- AIDE, s.d. Lutter contre les inondations par le démergement, 21 p.
- AIDE, 2001. Association Intercommunale pour le Démergement et l'Épuration des communes de la province de Liège, *brochure de présentation*
- AIDE, 2004. Le démergement de la région liégeoise, *inédit*, 43 p.
- BERNE A., DELRIEU G., CREUTIN J.-D. & OBLED C. 2004. Temporal and spatial resolution of rainfall measurements required for urban hydrology, *Journal of Hydrology*, **299**, pp. 166-179
- BERGAOUI M. & DESBORDES M. 1986. Etude de la structure spatio-temporelle des pluies à des échelles fines de temps et d'espace, Programme finalise de recherché et d'expérimentation. L'eau dans la ville. *LHM – USTL Montpellier France*, 12-86
- BERTHIER E., ANDRIEU H. & CREUTIN J.-D. 2004. The role of soil in the generation of urban runoff : development and evaluation of a 2D model, *Journal of Hydrology*, **299**, pp. 252-266
- BOUGHTON W. 2005. Calibrations of a daily rainfall-runoff model with poor quality data, *Environmental Modelling & Software*, *in press*
- CHEBBO G., DEUTSCH J.-C. & TASSIN B. 1997. *Notes de Cours d'Hydrologie Urbaine*, Ecole

- Nationale des Ponts et Chaussées, Marne-la-Vallée, inédit, 77 p.
- CHEBBO G. & GROMAIRE M.C. 2004. The experimental urban catchment 'Le Marais' in Paris : what lessons can be learned from it ?, *Journal of Hydrology*, **299**, pp. 312-323
- DURRANS S.R., BURIAN S.J. & PITT R. 2004. Enhancement of precipitation data for small storm hydrologic prediction, *Journal of Hydrology*, **299**, pp. 180-185
- EINFALT T., ARNBJERG-NIELSEN K., GOLZ C., JENSEN N.-E., QUIRMBACH M., VAES G. & VIEUX B. 2004. Towards a roadmap for use of radar rainfall data in urban drainage, *Journal of Hydrology*, **299**, pp. 186-202
- ERPICUM M. 1977. Variabilité de la répartition spatiale des précipitations sur l'agglomération de Liège : analyse de quelques cas, *Bull. Soc. Géog. de Liège*, vol. **11-13**, pp. 133-145
- JENA S.K. & TIWARI K.N. 2006. Modeling synthetic unit hydrograph parameters with geomorphologic parameters of watersheds, *Journal of Hydrology*, **319**, pp. 1-14
- KIM L.H., KAYHANIAN M., ZOH K.-D. & STENSTROM M.K. 2005. Modeling of highway stormwater runoff, *Science of the Total Environment*, **348**, pp. 1-18
- LAURANT A. & ALEXANDRE J. 1977. Accroissement récent de l'intensité des fortes averses dans la banlieue bruxelloise, *Bull. Soc. Géog. de Liège*, vol. **11-13**, pp. 127-132
- LECOUTURIER P. 1930. Liège : étude de géographie urbaine, *Vaillant-Carmanne*, **239**, pp. 34-53
- LEJAXHE J.-L., 2006. 1925-1926 : Inondations au Pays de Liège, *Noir Dessin Production*, 192 p.
- LHOMME J., BOUVIER C. & PERRIN J.-L. 2004. Applying a GIS-based geomorphological routing model in urban catchments, *Journal of Hydrology*, **299**, pp. 203-216
- MAHEEPALA U.K., TAKYI A.K. & PERERA B.J.C. 2001. Hydrological data monitoring for urban stormwater drainage systems, *Journal of Hydrology*, **245**, pp. 32-47
- MARK O., WEESAKUL S., APIRUMANEKUL C., BOONYA AROONNET S. & DJORDJEVIC S. 2004. Potential and limitations of 1D modelling of urban flooding, *Journal of Hydrology*, **299**, pp. 284-299
- MIKKELSEN P.S., MADSEN H., ARNBJERG-NIELSEN K., ROSBJERG D. & HARREMOËS P. 2005. Selection of regional historical rainfall time series as input to urban drainage simulations at ungauged locations, *Atmospheric Research*, **77**, pp. 4-17
- PIROTON M., ERPICUM S., ARCHAMBEAU P., MOUZELARD Th. & DEWALS B. 2002. *Constructions du Génie civil sanitaire*, Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, inédit, 235 p.
- PLEAU M., COLAS H., LAVALLEE P., PELLETIER G. & BONIN R. 2005. Global optimal real-time control of the Quebec urban drainage system, *Environmental Modelling & Software*, **20**, pp. 401-413
- SCHMITT T.G., THOMAS M. & ETTRICH N. 2004. Analysis and modelling of flooding in urban drainage systems, *Journal of Hydrology*, **299**, pp. 300-311
- SMITH M. 2006. Comment on 'Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems', *Journal of Hydrology*, **317**, pp.355-363
- VAN CAMPENHOUT J. 2004. Analyse des inondations en région liégeoise sur base des relevés des services d'intervention, mémoire de licence, *Université de Liège*, 117 p.
- WILLEMS P. 2001. A spatial rainfall generator for small spatial scales, *Journal of Hydrology*, **252**, pp. 126-144
- XIAOYONG Z. & HUANG M.-L. 2004. ArcCN-Runoff : an ArcGIS tool for generating curve number and runoff maps, *Environmental Modelling & Software*, **19**, pp. 875-879

<http://www.lydec.ma/html/down/lotisseurs.pdf>, consulté le 06/04/2006

http://fr.wikipedia.org/wiki/Hydraulique_urbaine, consulté le 12/04/2006

<http://www3.bae.ncsu.edu/Regional-Bulletins/Modeling-Bulletin/paper98-draft1.html>,
consulté le 12/04/2006

http://www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=/docrep/W7320B/w7320b34.htm,
consulté le 12/04/2006

<http://www.callisto.si.usherb.ca/~fbonn/PageFB/SiteGEO-457/Chapitre4.pdf>, consulté le 12/04/2006

http://www.kmi.be/francais/index.php?menu=Menu1_3_1_2, consulté le 07/08/2006

<http://www.weersite.net/?archieff&radarbeelden>, consulté le 10/08/2006

<http://www.terrils.be/fr/Terrils/Histoire/liege/index.php>, consulté le 17/08/2006

http://www.lalibre.be/article.phtml?id=10&subid=90&art_id=228696, consulté le 02/09/ 2006

http://www.lalibre.be/article.phtml?id=10&subid=90&art_id=232694, consulté le 02/09/ 2006

http://www.lalibre.be/article.phtml?id=10&subid=87&art_id=292710, consulté le 02/09/2006

<http://www.rtl.be/page/rtlinfo/articles/societearticle/227.aspx?articleid=63336>, consulté le 02/09/2006

<http://www.rtl.be/page/rtlinfo/articles/societearticle/227.aspx?articleid=62611>, consulté le 02/09/2006

Atlas