



Marché de services

Institut bruxellois pour la Gestion de l'Environnement

Cahier spécial des charges 2008-02-AL

« Validation des données du réseau pluviométrique géré par l'IBGE, répartition des précipitations, analyse qualitative des sites de mesure et projet de micro-climatologie en Région bruxelloise »

Rapport final

Didier Dehem, Christian Tricot, Patrick Wylleman et Rafiq Hamdi

Janvier 2010

**Institut royal météorologique de Belgique
3 avenue Circulaire
B – 1180 Bruxelles**

Tables des matières

1	INTRODUCTION	3
2	LES DONNEES DE PRECIPITATIONS.....	4
2.1	LE RESEAU DE L'IBGE	4
2.2	LA BASE DE DONNEES DE L'IBGE.....	5
2.3	INSPECTION SOMMAIRE DES DONNEES.....	6
3	CORRECTIONS SE RAPPORTANT A L'ETALONNAGE	9
3.1	INTRODUCTION	9
3.2	DESCRIPTION DE LA PROCEDURE UTILISEE.....	9
3.3	IMPACT SUR LES DONNEES	11
3.4	CONCLUSIONS	11
4	VALIDATION ET COMPLEMENT DES DONNEES MANQUANTES.....	12
4.1	INTRODUCTION	12
4.2	ADAPTATION DU LOGICIEL	12
4.3	DESCRIPTION THEORIQUE DE LA VALIDATION.....	12
4.3.1	Les appareils en panne	12
4.3.2	L'estimation	13
4.3.3	Tests de cohérence.....	17
4.4	DESCRIPTION PRATIQUE DE LA VALIDATION.....	17
4.4.1	Après le 1 août 2003	18
4.4.2	Avant le 1 août 2003	19
4.5	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	23
5	REPARTITION SPATIALE DES PRECIPITATIONS	25
5.1	COMPARAISON DES CUMULS AUX STATIONS.....	25
5.2	INFLUENCE DE L'OROGRAPHIE ET DES VALLEES	27
5.3	CARTOGRAPHIE DES PRECIPITATIONS	39
6	MESURE PLUVIOMETRIQUES.....	41
6.1	COMPARAISON DE PLUVIOMETRES A UCCLE	41
6.2	RESEAUX PLUVIOMETRIQUES DANS LA REGION DE BRUXELLES-CAPITALE.....	50
7	MICRO-CLIMATOLOGIE EN REGION BRUXELLOISE	54
7.1	INTRODUCTION	54
7.2	SURFEX.....	54
7.3	EVOLUTION DE L'URBANISATION A LA RBC.....	55
7.4	SIMULATIONS EFFECTUEES.....	56
7.5	CONCLUSIONS DE L'ETUDE	57
7.6	PERSPECTIVES	58
8	RAPPORT D'EXPERTISE EN 2009	59
8.1	INTRODUCTION	59
8.2	LES DONNEES DE PRECIPITATIONS A UCCLE : DONNEES RECENTES ET STATISTIQUES.....	59

8.3	EVOLUTION DES CUMULS SAISONNIERS DEPUIS LE DEBUT DU 20E SIECLE.....	62
8.4	CONCLUSION	65
9	CONCLUSIONS	67
10	BIBLIOGRAPHIE.....	72
11	ANNEXES.....	73
	ANNEXE 1 : INVENTAIRE DES DONNEES PRESENTES	74
	ANNEXE 2 : DONNEES D'ETALONNAGE	78
	ANNEXE 3 : CARTES DES PRECIPITATIONS EN REGION BRUXELLOISE	83
	ANNEXE 4 : CUMULS PLUVIOMETRIQUES JOURNALIERS UTILISES POUR L'ETUDE COMPARATIVE DES PLUVIOMETRES A UCCLE	102
	ANNEXE 5 : EFFECTS OF URBANIZATION AND CLIMATE CHANGE ON SURFACE RUNOFF OF THE BRUSSELS CAPITAL REGION : A CASE STUDY USING AN URBAN SOILVEGETATION- ATMOSPHERE TRANSFER MODEL.....	107

1 Introduction

Le marché de services 2008-02-AL intitulé « Validation des données du réseau pluviométrique géré par l'IBGE, répartition des précipitations, analyse qualitative des sites de mesure et projet de micro-climatologie en Région bruxelloise » prolonge le marché de services 2007-01-AL.

Pour rappel, le marché de services 2007-01-AL intitulé « Réseau de pluviomètres : validation des données et étude de répartition des précipitations en Région bruxelloise » abordait deux thèmes principaux. Le premier concernait la validation et l'amélioration de la base de données pluviométriques issues du réseau de mesures des précipitations géré par l'Institut bruxellois pour la Gestion de l'Environnement (noté IBGE par la suite). Le second thème consistait dans l'analyse des séries de données validées pour étudier la répartition spatiale des précipitations sur le territoire de la Région bruxelloise.

Les chapitres 2 à 5 se basent sur le rapport du marché de services précédent en le condensant, en l'améliorant et en l'adaptant, au besoin, à l'extension jusqu'en juillet 2009 de la période de validation des données de l'IBGE. Les annexes 1 et 2 se rapportent à ce chapitre. Au terme du chapitre 5, un nouveau jeu de cartes des précipitations moyennes sur le territoire de Bruxelles-Capitale a pu être réalisé et est repris en annexe 3. Dans le point 5.2, on a essayé de déceler dans le présent marché de services un effet éventuel des vallées de la Senne et de la Woluwe sur les précipitations.

Le chapitre 6 fait la synthèse de mesures comparatives de précipitations menées à Uccle pour différents pluviomètres entre juin 2009 et décembre 2009 (l'annexe 4 donne les valeurs des mesures utilisées pour cette étude). L'objectif est de déterminer si un pluviomètre automatique particulier, basé sur la mesure du poids des précipitations, pourrait être proposé comme alternative dans le futur aux appareils à augets basculants encore souvent utilisés actuellement. Ce même chapitre reprend ensuite le résultat d'une étude qui a été réalisée en juillet 2009 sur les différents réseaux pluviométriques existants à Bruxelles et d'une réflexion générale sur les questions à se poser pour déterminer la densité optimale d'un réseau pluviométrique.

Le chapitre 7 est un résumé en français d'un article scientifique soumis pour publication et présenté dans l'annexe 5. Cet article a été rédigé à la suite de la recherche effectuée dans le cadre du présent marché de services. On présente le type de modélisation hydrologique urbaine réalisée à l'aide d'un modèle de surface adapté pour des études d'impact. En particulier, les rôles relatifs de l'évolution climatique et du degré d'imperméabilité de la surface en Région bruxelloise sur les débits, les ruissellements et le bilan hydrologique ont été étudiés.

Le chapitre 8 reprend le texte du rapport d'expertise envoyé à l'IBGE en juillet 2009. Il s'agit principalement d'une analyse statistique des précipitations mensuelles et saisonnières à Uccle sur les dix dernières années. On donne aussi l'évolution des précipitations saisonnières à Uccle depuis le début du vingtième siècle.

Dans les conclusions, on résume les principaux résultats obtenus dans le cadre du présent marché de services. On propose également quelques pistes pour approfondir les questions traitées à cette occasion ou pour aborder des sujets connexes dans les domaines plus généraux de la climatologie et de l'hydrologie urbaines.

2 Les données de précipitations

2.1 Le réseau de l'IBGE

Le réseau des pluviomètres géré actuellement par l'IBGE a été mis en place dans les années 1990 par le Ministère de la Région bruxelloise au sein du service de l'Hydrogéologie afin de répondre à des besoins en matière d'hydrologie.

Suite au transfert des compétences de ce service vers IBGE d'une part et vers la Société Bruxelloise de Gestion de l'Eau d'autre part, ce réseau a été maintenu jusqu'à présent par IBGE notamment afin de permettre la finalisation de l'installation du réseau pluviométrique de la SBGE et d'éviter en certains sites toute interruption dans l'historique de mesures.

Le réseau de pluviomètres géré par l'IBGE (cf. Figure 1) a fourni ses premières données en juin 1992 et est toujours opérationnel aujourd'hui. Les données proviennent de 14 stations de mesures dont la moitié environ a fonctionné dès l'origine du réseau. Actuellement, il comporte 13 stations. Notons que les stations de Viangros et de Senne Viangros se trouvent au même endroit. Les pluviomètres sont de deux types : les « Précis Mécaniques » (PM) et les « Génie Rural » (Géru) tous deux à augets basculants.

Un entretien régulier et une calibration in situ des appareils ont été assurés sur toute la période, mais le contrôle de qualité des données archivées n'a pu être réalisé de manière relativement régulière que jusqu'en décembre 2003. Les campagnes de contrôle d'étalonnage sont réalisées tous les deux à trois mois. Chaque campagne est réalisée en deux vagues, l'une pour les « Précis Mécaniques », l'autre pour les « Géru ».

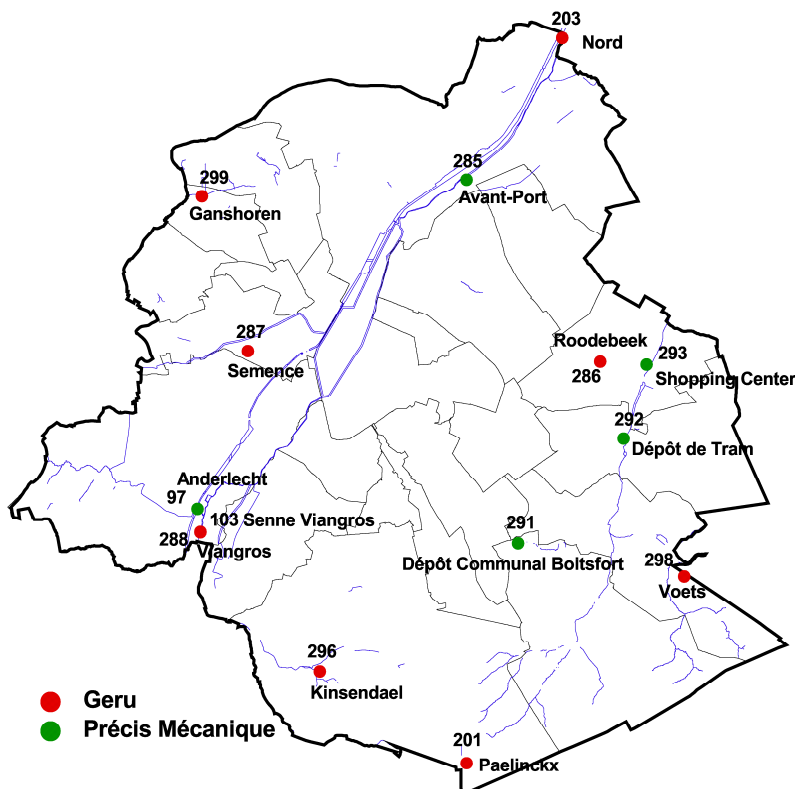


Figure 1 : Réseau de l'IBGE de juin 1992 à juillet 2009. Chaque station est labélisée par son nom et son code.

2.2 La base de données de l'IBGE

L'incorporation des données horaires s'est déroulée relativement facilement. La Table 1 fournit la liste des stations reprises dans notre gestionnaire de base de données. Les difficultés lors de l'incorporation proviennent du format irrégulier ou variable des fichiers d'entrées.

Citons quelques difficultés et les solutions que nous avons apportées. Certaines données se trouvaient en double avec une minute de décalage. Exemple pour la station d'Anderlecht (code 097) :

```
"1998-08-03 11:00:00",0.000  
"1998-08-03 11:01:00",0.000
```

Nous avons vérifié que les données étaient identiques dans tous les cas, nous avons alors supprimé la seconde ligne.

La station Senne Viangros (code 103) se différencie des autres stations par le fait que les fichiers contiennent des données toutes les 15 minutes. Nous les avons sommées pour obtenir des données horaires. Pour cette station, nous n'avons pas incorporé les données antérieures à l'année 1999 car le format était extrêmement variable. Par la suite, l'IBGE a envoyé à nouveau les données avant 1999, par manque de temps, elles n'ont toutefois pas été incorporées dans la base de l'IRM.

Table 1. Liste des quatorze stations du marché de services avec la mention du début et de la fin de la période sur laquelle les données sont disponibles.

Code	Type d'appareil	Nom	Début	Fin
97	Précis Mécanique	Anderlecht	20/03/1998:15	14/09/2009:12
103	Geru	Senne Viangros	29/12/1998:22	30/08/2009:07
201	Geru	Paelinckx	31/05/1992:23	15/09/2009:04
203	Geru	Nord	31/05/1992:23	06/08/2009:20
285	Précis Mécanique	Avant-Port	29/01/2001:10	06/09/2009:06
286	Geru	Roodebeek	30/10/1998:10	09/09/2009:19
287	Geru	Semence	03/11/1997:12	15/09/2009:03
288	Geru	Viangros	20/01/1995:11	10/09/2009:09
291	Précis Mécanique	Dépôt Communal Boitsfort	31/05/1992:23	13/09/2009:07
292	Précis Mécanique	Dépôt de Tram	12/02/1993:12	13/09/2009:09
293	Précis Mécanique	Shopping Center	31/12/1991:23	13/09/2009:08
296	Geru	Kinsendael	31/05/1992:23	13/08/2009:13
298	Geru	Voets	19/06/1992:12	25/10/2005:11
299	Précis Mécanique	Ganshoren	03/06/1992:08	15/09/2009:04

2.3 Inspection sommaire des données

L'inspection sommaire des données, les inventaires et les graphes des sommes cumulées, permet de se faire une première idée sur la qualité des données et de repérer les tendances générales ou les anomalies très frappantes.

La Table 1 reprise à l'annexe 1 reprend l'inventaire des données présentes sur la période retenue pour la confection des cartes : du 01 janvier 1999 au 31 juillet 2009. Il permet d'avoir une vue d'ensemble sur la complétude des données. Ce tableau ne donne aucune indication sur la vraisemblance des données, il mentionne juste le nombre de données horaires présentes. Certaines stations, comme Roodebeek, sont relativement complètes, d'autres sont relativement complètes mais présentent des mois entiers sans données (Nord, Semence). Les stations d'Anderlecht et de Paelinckx présentent régulièrement des données manquantes.

Les sommes cumulées permettent d'avoir une vue spatiotemporelle du réseau. Pour pouvoir mieux comparer les courbes de sommes cumulées, il est pertinent de soustraire aux courbes la moyenne de toutes les courbes (cf. Figure 2 et Figure 3). Ainsi, nous pouvons facilement détecter les écarts par rapport à la tendance moyenne du réseau. La Figure 2 permet de détecter des valeurs mensuelles anormalement élevées à la station d'Anderlecht de février à avril 2005 (par rapport aux autres stations). Après inspection des données, ce surplus de précipitations provient de valeurs aberrantes. La Figure 3 permet de détecter une surestimation pour Paelinckx et une sous-estimation pour Kinsendael. Pour Paelinckx, il était évident que la surestimation provenait d'un mauvais calibrage de l'appareil. Nous avons réalisé la correction d'étalonnage sur la période concernée : du 12/02/1998 au 15/03/1999. Pour Kinsendael, le diagnostic est différent, la sous-estimation s'explique par des valeurs manquantes ou des valeurs égales à zéro en période de pluie. Nous avons dans ce cas estimé ces valeurs.

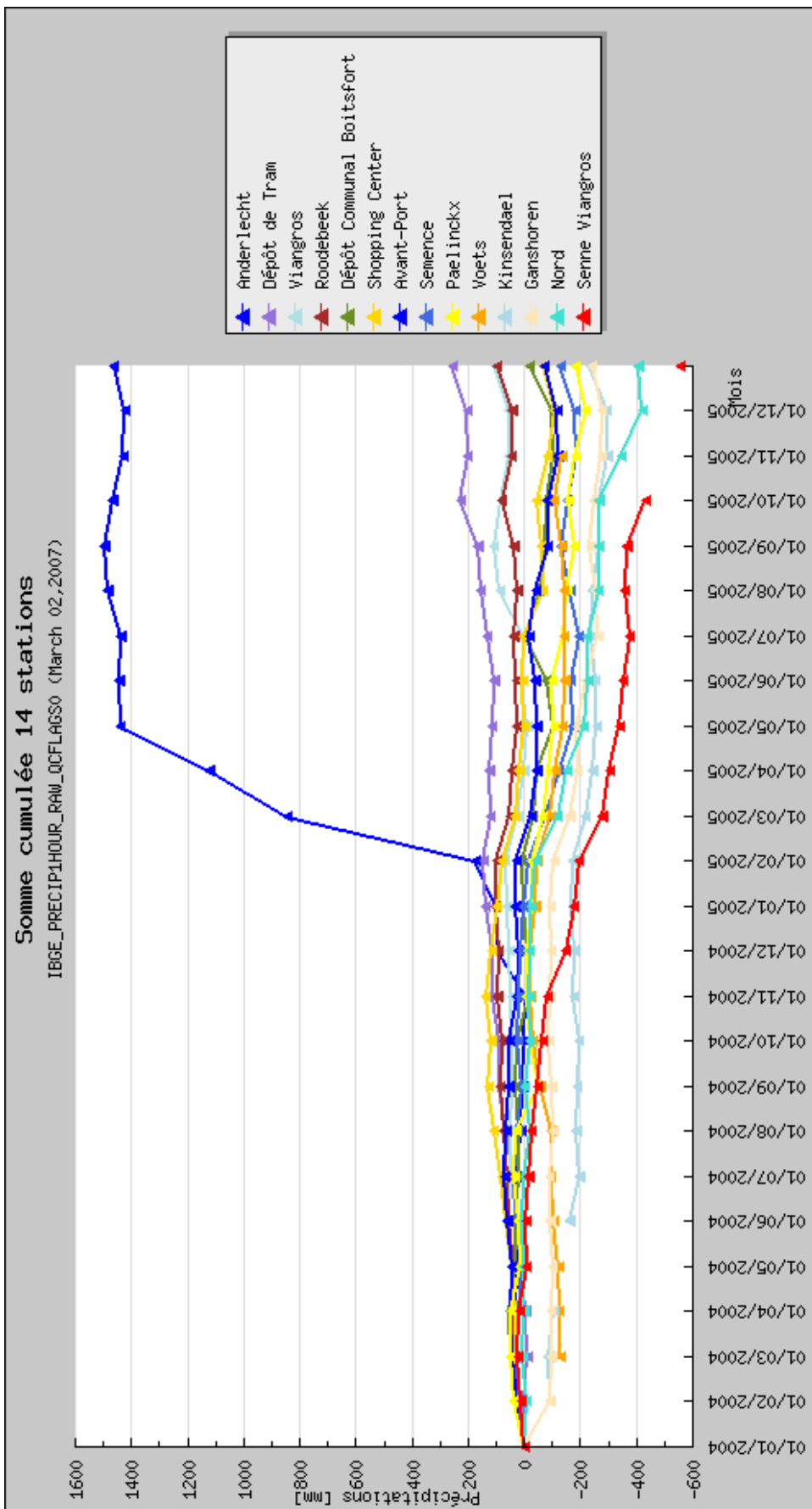


Figure 2: Sommes mensuelles cumulées des écarts par rapport à la moyenne de l'ensemble des stations, pour la période janvier 2004 à janvier 2006. Données brutes.

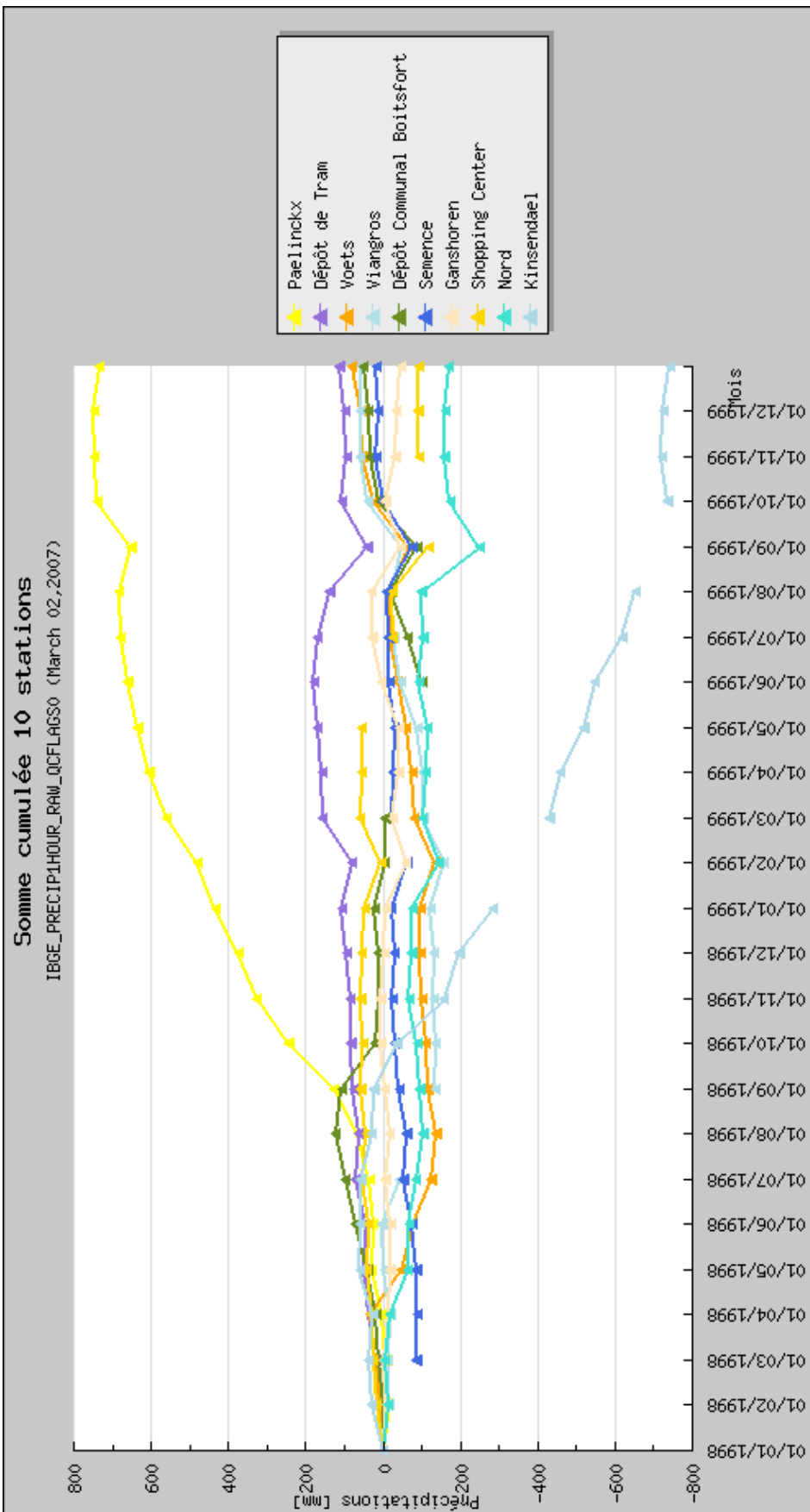


Figure 3 : Sommes mensuelles cumulées des écarts par rapport à la moyenne de l'ensemble des stations, pour la période janvier 1998 à janvier 2000. Données brutes.

3 Corrections se rapportant à l'étalonnage

3.1 Introduction

Les corrections d'étalonnage concernant la période avant 2004 ont été réalisées par l'IBGE. Cette partie du rapport traite de la correction des données se rapportant à l'étalonnage des appareils pour la période allant de janvier 2004 à juillet 2009. L'étalonnage déborde sur 2003 car les premières périodes d'étalonnage se terminant en 2004 débutent en 2003. L'annexe 2 reprend les dates d'étalonnage concernées par les corrections ainsi que les données y afférant. Chaque entrée dans la table concerne un nombre plus ou moins important de corrections de valeurs individuelles de précipitations suivant la longueur de l'intervalle. Une erreur sur la date de calibrage ou sur les valeurs utilisées pour calculer le facteur de correction a donc de grandes conséquences. Aussi, il est important que ces données soient vérifiées scrupuleusement. Un travail important y a été consacré. Pour le présent marché de service, l'IRM a demandé à l'IBGE de lui fournir les données d'étalonnage sous une forme plus proche de l'annexe 2. Cela a permis d'alléger le travail d'assimilation.

3.2 Description de la procédure utilisée

À intervalles réguliers, les pluviomètres se voient étalonnés pour compenser le phénomène de dérive. Lors de ces étalonnages, une quantité connue d'eau est versée dans le collecteur. Si l'appareil est calibré correctement, le nombre de basculements mesuré est égal au nombre de basculements escompté qui est égal à cinquante ou cent basculements suivant les pluviomètres.

La base de données relative à l'étalonnage est orientée « date d'étalonnage ». Pour chaque date ayant fait l'objet d'un étalonnage, la base mentionne trois valeurs de nombre de basculements :

- *N avant réglage* (N_{avant}) correspond au nombre de basculements mesuré avant calibrage ;
- *N après nettoyage* correspond au nombre de basculements mesuré avant calibrage et après nettoyage des augets ;
- *N après réglage* ($N_{\text{après}}$) correspond au nombre de basculements mesuré après calibrage.

Pour une station donnée, la succession des dates d'étalonnage (t) détermine des périodes d'étalonnage. L'algorithme de correction des valeurs pluviométriques est le suivant :

1. pas de correction pour la première moitié de chaque période d'étalonnage ;
2. pour la deuxième moitié de chaque période d'étalonnage, calculer le facteur de correction sur base de l'étalonnage de la date courante (t) et de l'étalonnage de la date précédente ($t-1$) :
$$1) : \frac{N_{\text{après}}(t-1)}{N_{\text{avant}}(t)}$$
. Ne pas tenir compte de la valeur N après nettoyage.

Avant d'appliquer l'algorithme pour le calcul du facteur de correction, il ne faut plus de valeurs manquantes pour N_{avant} et $N_{\text{après}}$. Le comblement des valeurs manquantes a été réalisé de manière suivante :

- si N_{avant} est manquant, prendre la valeur $N_{\text{après}}$ nettoyage ;
- si $N_{\text{après}}$ est manquant, prendre la valeur de 100 ou 50 suivant les pluviomètres ;
- si N_{avant} est manquant et que $N_{\text{après}}$ nettoyage est manquant aussi, prendre $N_{\text{après}}$ au temps $t-1$. Ce choix est cohérent avec la méthode de correction. Ceci revient à faire l'hypothèse que l'appareil n'a pas dérivé depuis le dernier étalonnage. Le facteur de correction est alors égal à un.

Les données se rapportant à l'étalonnage ont été vérifiées scrupuleusement vu qu'une erreur d'encodage peut avoir des conséquences sur plusieurs mois de données pluviométriques. Aussi,

en plus d'une inspection visuelle, nous avons vérifié que les deux invariants suivants étaient toujours valables. Invariant 1 : le facteur de correction est compris entre 0.5 et 2. Invariant 2 : la longueur de la période d'étalonnage est supérieure à 3 jours ; une valeur négative signifiant une erreur au niveau du caractère croissant des dates d'encodages. Nous avons ainsi détecté des erreurs de dates d'étalonnage : répétition de dates (11/05/2004 pour le pluviomètre 203 Pluviomètre Nord) ou erreur dans l'année de la date (26/06/2003 au lieu de 26/06/2004 pour le pluviomètre 97 Pluviomètre Anderlecht).

Il a été convenu de réserver le code '8' comme indice de qualité pour désigner les valeurs ayant subi une correction d'étalonnage. L'indice '0' désigne les valeurs brutes. Les autres valeurs de l'indice de qualité sont reprises à la Table 7.

Exemple de correction pour la station Ganshoren (code 299) pour la période entre les deux dates d'étalonnage : 03/06/2003 et 10/02/2004. Le facteur de correction se calcule à partir des données relatives aux étalonnages (cf. la Table 2 de l'annexe 2), il s'élève à 1.282 et s'applique sur la seconde moitié de la période (à partir du 07/10/2003). La Table 2 détaille le résultat des calculs. On vérifie bien qu'après correction, chaque valeur horaire ainsi que le cumul pluviométrique sur la seconde partie de la période d'échantillonnage est multiplié par le facteur de correction.

Table 2: Extraits des données pluviométriques avant et après correction pour le pluviomètre Ganshoren (code 299). L'extrait commence au début de la seconde moitié de la période d'échantillonnage concernée (cf. texte). Un cumul horaire est identifié par le moment de fin de l'intervalle horaire. Le cumul pluviométrique sur les 3024 valeurs horaires de cette seconde moitié est égal à 174.1 mm pour les données brutes et 223.2 mm pour les données corrigées.

Code	Timestamp	AVANT		APRÈS	
		Cumul pluviométrique	Code de qualité	Cumul pluviométrique	Code de qualité
299	07/10/2003:01	0	0	0	8
299	07/10/2003:02	0	0	0	8
299	07/10/2003:03	0	0	0	8
299	07/10/2003:04	0	0	0	8
299	07/10/2003:05	0	0	0	8
299	07/10/2003:06	0.1	0	0.1282	8
299	07/10/2003:07	2	0	2.564	8
299	07/10/2003:08	1.8	0	2.3076	8
299	07/10/2003:09	2	0	2.564	8
299	07/10/2003:10	0.1	0	0.1282	8
299	07/10/2003:11	0	0	0	8
299	07/10/2003:12	0.6	0	0.7692	8
299	07/10/2003:13	0	0	0	8
299	07/10/2003:14	0	0	0	8
299	07/10/2003:15	0.1	0	0.1282	8
299	07/10/2003:16	0	0	0	8
299	07/10/2003:17	0	0	0	8
299	07/10/2003:18	0.4	0	0.5128	8
299	07/10/2003:19	0	0	0	8
299	07/10/2003:20	0.1	0	0.1282	8
299	07/10/2003:21	0	0	0	8
299	07/10/2003:22	0	0	0	8
299	07/10/2003:23	0.1	0	0.1282	8
...					
299	09/02/2004:23	0	0	0	8
299	10/02/2004:00	0	0	0	8

3.3 Impact sur les données

La Table 3 reprend les écarts globaux par station avant et après correction. On constate que les écarts varient entre +2% et -2% sauf pour Paelinckx où l'écart est de -3.6 %.

Table 3: Cumul et écart relatif par station sur la période janvier 2004 à juillet 2009 inclus. L'écart relatif est calculé par la formule suivante : $(DATA_{cal} - DATA_{raw}) / DATA_{raw}$. « Data_raw » est mis pour données brutes et « Data_cal » pour les données après correction d'étalonnage.

CODE	PARAMETER	NAME	Data_raw	Data_cal	Écart (%)
97	PM	Anderlecht	5914.5	5947.3	+0.55
103	Geru	Senne Viangros	3019.6	2963.8	-0.85
201	Geru	Paelinckx	4132.5	3983.8	-3.60
203	Geru	Nord	3481.8	3436.9	-1.29
285	PM	Avant-Port	4290.7	4295.1	+0.10
286	Geru	Roodebeek	4176.5	4159.8	-0.40
287	Geru	Semence	4386.8	4345.1	-0.95
288	Geru	Viangros	4506	4425	-1.80
291	PM	Dépôt Communal Boitsfort	4520.2	4594.3	+1.64
292	PM	Dépôt de Tram	4746.7	4768	+0.45
293	PM	Shopping Center	4006.4	4001.9	-0.11
296	Geru	Kinsendael	3312	3293.8	-0.55
298	Geru	Voets	1362.4	1389.1	+1.96
299	Geru	Ganshoren	2859.8	2818.2	-1.45

3.4 Conclusions

Le contrôle de qualité est un processus qui s'effectue en fin de course d'une chaîne de traitement. L'objectif optimal à atteindre est que cette étape soit la plus légère possible et que les « corrections » soient faites le plus en amont possible au niveau de l'appareil lui-même et de son entretien.

Certaines stations dérivent fortement, repérer cette dérive le plus vite possible permettrait d'améliorer la qualité des données. Pour éviter d'augmenter la fréquence des visites, la solution consisterait à effectuer la télémessure des appareils et à inspecter régulièrement les données. La représentation des données sous forme de somme cumulée comme à la Figure 2 est une manière adaptée pour repérer les dérivées : une courbe se démarque par rapport aux autres.

Dans le cas de Paelinckx, nous avons jugé qu'il était évident que la surestimation en 1999 provenait d'un mauvais calibrage de l'appareil (cf. le point 2.3). Nous avons réalisé la correction d'étalonnage sur la période concernée : du 12/02/1998 au 15/03/1999, estimant qu'elle n'avait pas été réalisée par l'IBGE.

4 Validation et comblement des données manquantes

4.1 Introduction

La validation, encore appelée le contrôle de qualité, comprend le comblement des données manquantes ou la correction de données aberrantes par estimation. La validation a été réalisée en utilisant un logiciel créé à l'IRM pour la validation des données de précipitations horaires du Ministère wallon de l'Équipement et des Transports (MET). Le logiciel a été adapté au réseau de l'IBGE. Il se présente sous forme d'interfaces graphiques dirigées par un utilisateur (Dehem et Tricot, 2004). Le présent point décrit le travail d'adaptation du logiciel ainsi que la méthode d'estimation de manières théorique et pratique sur base d'exemples concrets.

Lors du second marché de service, nous avons poursuivi le contrôle de qualité d'octobre 2007 à juillet 2009 inclus ainsi que pour la période de 1999 à 2003. Le choix de commencer en 1999 fut motivé par le souhait d'avoir les meilleures données possible sur la période de confection des cartes climatologiques : 1999 à 2008/2009.

4.2 Adaptation du logiciel

L'adaptation du logiciel PLUVIOVALID comprend deux phases, la première phase vise à passer du réseau du MET à celui de l'IBGE, la seconde à automatiser entièrement le processus de validation dès le moment où l'ensemble des stations en panne ont été déterminée.

Phase après le 1 août 2003. Le travail d'adaptation est plus important qu'il n'y paraît au premier abord. Il consiste d'abord à spécifier au logiciel qu'il doit accéder aux données de l'IBGE et non plus aux données du MET. Il faut ensuite déterminer quel est le réseau de mesure de contrôle. Il a été pris égal au réseau de l'IBGE augmenté de la station automatique chauffée de l'IRM. Lors du présent marché de service, les interfaces ont été amendées pour permettre une utilisation plus aisée : mise à disposition des données d'orage d'étalonnages et de précipitations. Avoir ces informations facilement sous la main permet de prendre les meilleures décisions lors du processus de validation qui reste une procédure semi-automatique : le logiciel propose et l'utilisateur dispose. Pour le présent marché de service, les données radar avant 2004 ont été intégrées dans le logiciel

Phase avant le 1 août 2003. En vue d'automatiser le processus de validation, il a fallu transformer les actions réalisées manuellement par l'utilisateur dans l'interface du logiciel par des appels de procédures. Il a fallu aussi modifier le logiciel pour qu'il puisse prendre en compte la spécification journalière des appareils en panne. En vue de détecter de spécifier les appareils en panne (données manquantes ou données aberrantes) une interface supplémentaire a été réalisée permettant de générer, à la demande, des graphes horaires, journaliers ou mensuels. Le réseau de mesure de contrôle a été pris égal au réseau de l'IBGE.

4.3 Description théorique de la validation

Le logiciel contribue au contrôle de qualité des données horaires de l'IBGE. Le mode de fonctionnement consiste à réaliser jour par jour le contrôle de qualité.

4.3.1 Les appareils en panne

La première étape consiste à déterminer, parmi le réseau de contrôle, les appareils dits en pannes. Ces appareils sont des appareils qui sont effectivement en panne et ne délivrent pas de données ou des appareils délivrant des données aberrantes (bouchés, semi-bouchés, enneigés). La détection de ces appareils est réalisée sur base d'inspections de graphes ou d'indices journaliers

de cohérence spatiale associés à chaque station (cf. 0). Les valeurs de ces appareils n'interviennent pas, pour le jour traité, dans le calcul des valeurs estimées.

4.3.2 L'estimation

Pour estimer une valeur horaire en une station, on détermine le voisinage de la station. Le voisinage d'une station appartient au réseau de contrôle (cf. 4.2), c'est l'ensemble des neuf stations les plus proches qui ne sont pas en panne.

Nous décrivons d'abord une **formule simplifiée** qui donne des estimations horaires légèrement différentes de ce que donne le logiciel. Les estimations journalières sont quant à elles identiques suivant les deux méthodes. L'estimation à l'appareil A et pour l'heure h se calcule par une moyenne pondérée par l'inverse du carré de la distance (cf. la Table 4 pour un exemple numérique) :

$$P(A, h) = \frac{P(A_1, h) \cdot \frac{1}{d_1^2} + \dots + P(A_n, h) \cdot \frac{1}{d_n^2}}{\frac{1}{d_1^2} + \dots + \frac{1}{d_n^2}}$$

où A_i ($1 \leq i \leq n$) constitue les stations appartenant au voisinage V de A ,

$P(A, h)$ est le cumul de précipitations associé à l'heure h et à la station A et

d_i ($1 \leq i \leq n$) est la distance entre A et A_i .

La **formule complète**, utilisée dans le logiciel, pour l'estimation d'une valeur horaire s'inspire d'un article anglais déjà assez ancien mais dont les principes nous ont semblé toujours d'actualité (Kelway and Herbert, 1969). Il se place dans un cadre où l'on dispose à la fois de données automatiques horaires et de données manuelles journalières. L'idée consiste à tirer le meilleur profit des données disponibles (journalières et horaires) en estimant séparément les cumuls journaliers et les répartitions horaires des pluies. L'estimation des valeurs horaires s'effectue en trois phases :

1. Estimation des cumuls quotidiens par une moyenne pondérée par l'inverse de la distance au carré. Les données journalières utilisées dans l'estimation sont les données manuelles, par essence journalières, et les données journalières calculées à partir des données horaires.

2. Estimation des répartitions horaires (en %/100) par une moyenne pondérée en $1/d^2$; cette estimation se base uniquement sur les stations délivrant des données horaires ;

3. L'estimation horaire est le produit des estimations réalisées en 1 et 2.

L'expression du cumul de précipitation $P(A, h)$ associé à la station A et à l'heure h s'écrit donc (cf. la Table 5 pour un exemple numérique) :

$$P(A, h) = \frac{\frac{P(A_1, h)}{P(A_1, j)} \cdot \frac{1}{d_1^2} + \dots + \frac{P(A_n, h)}{P(A_n, j)} \cdot \frac{1}{d_n^2}}{\frac{1}{d_1^2} + \dots + \frac{1}{d_n^2}} * \frac{P(A_1, j) \cdot \frac{1}{d_1^2} + \dots + P(A_n, j) \cdot \frac{1}{d_n^2}}{\frac{1}{d_1^2} + \dots + \frac{1}{d_n^2}}$$

où A_i ($1 \leq i \leq n$) constituent les stations appartenant au voisinage V de A

d_i ($1 \leq i \leq n$) est la distance entre A et A_i

j est le jour comprenant l'heure h

$P(A, h)$ est le cumul de précipitations associé à l'heure h et à la station A

$P(A, j)$ est le cumul de précipitations associé au jour j et à la station A

Différence entre les deux formules. Par construction, la formule simplifiée et complète donnent les mêmes résultats au niveau journalier. Pour des considérations climatologiques, les deux formules sont donc équivalentes. Par contre, au niveau horaire, il y a de légères différences, ceci est illustré dans la Figure 4, elle reprend les exemples numériques des Table 4 et Table 5.

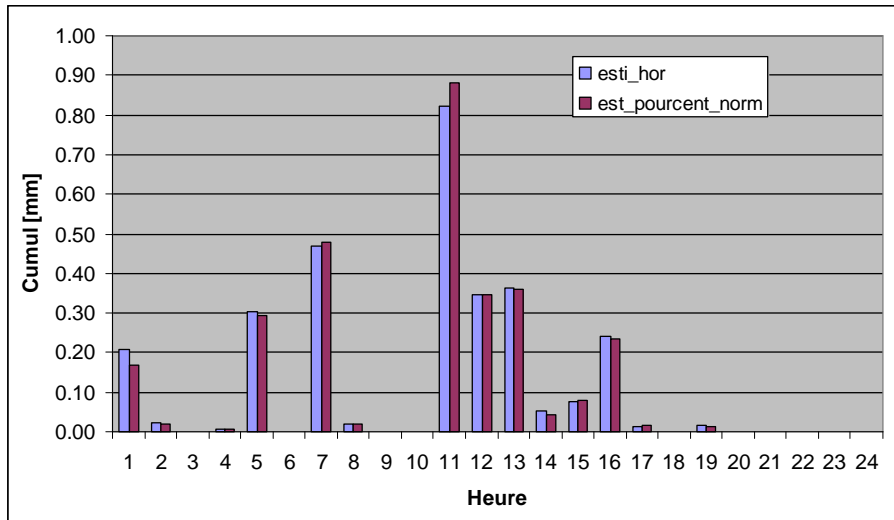


Figure 4 : Différences entre les estimations horaires issues de la méthode simplifiée (esti_hor) et complète (est_pourcent_norm) dans le cas de Paelinckx, le 23 janvier 2003.

Commentaires sur l'exemple numérique de la Table 4. Les valeurs du tableau sont des cumuls horaires exprimés en millimètre. Le champ « Paelinckx – les valeurs » reprend les valeurs mesurées à la station. Le détail du calcul pour l'estimation du cumul horaire de l'heure 13 est : $(0.3\text{mm} \cdot 0.042 + 0.4\text{mm} \cdot 0.026 + \dots + 0.2\text{mm} \cdot 0.005) / 0.1539 = 0.078 \text{ mm}$. Le détail pour le cumul de l'estimation du cumul journalier est : $(0.2\text{mm} \cdot 0.042 + 3.4\text{mm} \cdot 0.026 + \dots + 2.9\text{mm} \cdot 0.005) / 0.1539 = 2.965 \text{ mm}$.

Table 4: Estimation des valeurs à Paelinckx le 23 janvier 2003 via une somme pondérée par l'inverse du carré de la distance des valeurs. La somme des estimations horaires redonne l'estimation journalière : 2.965 mm. Les stations sont identifiées par leur code. La colonne valeurs reprend les valeurs à la station de Paelinckx, la colonne estimation reprend les estimations calculées.

Timestamp	Valeurs	291	298	103	288	292	286	293	285	299	Estimation
23 janv 1h	0	0	0	0	0	0,6	0,8	0,9	0,1	0,3	0,208
23 janv 2h	0	0	0,1	0	0	0	0	0,1	0	0	0,024
23 janv 3h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000
23 janv :4h	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2	0	0,008
23 janv 5h	0,3	0,2	0,3	0,2	0,2	0,4	0,6	0,6	0,3	0,2	0,303
23 janv 6h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000
23 janv 7h	0,2	0,2	0,3	0,9	0,9	0,5	0,4	0,4	0,7	0,5	0,468
23 janv 8h	0	0	0	0,1	0	0	0,1	0	0	0	0,019
23 janv 9h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000
23 janv 10h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000
23 janv 11h	0,1	1,1	0,6	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	1,5	1,2	0,823
23 janv 12h	1	0,1	0,7	0,6	0,6	0,3	0,2	0,1	0,1	0,2	0,347
23 janv 13h	0,3	0,3	0,4	0,3	0,2	0,4	0,7	0,5	0,4	0,2	0,363
23 janv 14h	0	0	0,2	0	0	0,1	0	0,1	0	0	0,052
23 janv 15h	0,2	0,1	0,1	0	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,078
23 janv 16h	0,2	0,2	0,6	0	0,1	0,2	0,2	0,4	0,1	0,1	0,241
23 janv 17h	0,1	0	0	0	0,1	0	0	0	0	0,1	0,015
23 janv 18h	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000
23 janv 19h	0	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0,017
23 janv 20h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000
23 janv 21h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000
23 janv 22h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000
23 janv 23h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000
24 janv 0h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000
Σ	2,5	2,2	3,4	2,6	2,7	3,3	3,9	4	3,5	2,9	2,965
Un sur d2		0,042	0,026	0,017	0,017	0,016	0,012	0,011	0,006	0,005	0,1539
D		4,9	6,2	7,6	7,6	7,8	9,1	9,4	12,6	13,5	

Commentaires sur l'exemple numérique de la Table 5. Les valeurs du tableau, sauf la dernière colonne, sont sans dimension. Ces valeurs sont des répartitions horaires comprises entre 0 et 1. La dernière colonne reprend des valeurs de cumuls de précipitations exprimées en millimètre. Le détail du calcul pour l'estimation du cumul horaire de l'heure 13 est : $\{(0.136*0.042 + 0.118*0.026 + \dots + 0.069*0.005) / 0.1539\} * 2.965 \text{ mm} = 0.36 \text{ mm}$.

Table 5 : Estimation des valeurs à Paelinckx le 23 janvier 2003 via une somme pondérée par l'inverse du carré de la distance des répartitions horaires multipliée par l'estimation journalière 2.965 mm. Les stations sont identifiées par leur code. La colonne « Répartition valeur » reprend la répartition des valeurs à la station de Paelinckx, La colonne « Répartition estimée » reprend la répartition des valeurs estimées à la station de Paelinckx, la colonne « Estimation » reprend les estimations calculées.

Timestamp	Répartition valeur	291	298	103	288	292	286	293	285	299	Repartition estimée	Estimation
23 janv 1h	0.	0.	0.	0.	0.	0.182	0.205	0.225	0.029	0.103	0.057	0.169
23 janv 2h	0.	0.	0.029	0.	0.	0.	0.	0.025	0.	0.	0.007	0.020
23 janv 3h	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.000	0.000
23 janv :4h	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.057	0.	0.002	0.007
23 janv 5h	0.12	0.091	0.088	0.077	0.074	0.121	0.154	0.15	0.086	0.069	0.099	0.292
23 janv 6h	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.000	0.000
23 janv 7h	0.08	0.091	0.088	0.346	0.333	0.152	0.103	0.1	0.2	0.172	0.162	0.480
23 janv 8h	0.	0.	0.	0.038	0.	0.	0.026	0.	0.	0.	0.006	0.019
23 janv 9h	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.000	0.000
23 janv 10h	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.000	0.000
23 janv 11h	0.04	0.5	0.176	0.192	0.222	0.212	0.205	0.2	0.429	0.414	0.298	0.882
23 janv 12h	0.4	0.045	0.206	0.231	0.222	0.091	0.051	0.025	0.029	0.069	0.117	0.348
23 janv 13h	0.12	0.136	0.118	0.115	0.074	0.121	0.179	0.125	0.114	0.069	0.121	0.360
23 janv 14h	0.	0.	0.059	0.	0.	0.03	0.	0.025	0.	0.	0.015	0.045
23 janv 15h	0.08	0.045	0.029	0.	0.	0.03	0.026	0.025	0.029	0.034	0.027	0.079
23 janv 16h	0.08	0.091	0.176	0.	0.037	0.061	0.051	0.1	0.029	0.034	0.079	0.234
23 janv 17h	0.04	0.	0.	0.	0.037	0.	0.	0.	0.	0.034	0.005	0.016
23 janv 18h	0.04	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.000	0.000
23 janv 19h	0.	0.	0.029	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.005	0.015
23 janv 20h	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.000	0.000
23 janv 21h	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.000	0.000
23 janv 22h	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.000	0.000
23 janv 23h	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.000	0.000
24 janv 0h	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.000	0.000
Σ Un sur d2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.000	2.965
		0,042	0,026	0,017	0,017	0,016	0,012	0,011	0,006	0,005		

4.3.3 Tests de cohérence

Les tests de cohérences sont effectués de manière globale au niveau journalier. Ils permettent de repérer les stations pour lesquelles le cumul journalier est suspect. Le test de cohérence est un test spatial, il consiste à déterminer, pour chaque mesure, un intervalle de validité et une estimation. Une mesure tombant en dehors de son intervalle sera déclarée suspecte.

Le problème à résoudre est donc le suivant : connaissant les cumuls quotidiens P dans un voisinage V donné d'un appareil A, quelle est la plage des cumuls acceptable pour l'appareil. De nombreuses possibilités peuvent être envisagées pour déterminer cet intervalle I. Nous avons considéré les possibilités suivantes :

1. $I = [\text{Min}(P), \text{Max}(P)]$;
2. $I = [\mu(P) - 3 \cdot \sigma(P), \mu(P) + 3 \cdot \sigma(P)]$ avec $\mu(P)$ = moyenne sur P et $\sigma(P)$ = écart type de P ;
3. utiliser la méthode n° 2 avec $P^* = P$ sans les deux valeurs extrêmes ;
4. utiliser la méthode n°3 avec un changement de variable $f(RR)$ qui aurait pour effet de rendre la distribution de P plus normale. $I = f^{-1}[\mu(f(P^*)) - 3 \cdot \sigma(f(P^*)), \mu(f(P^*)) + 3 \cdot \sigma(f(P^*))]$ où $f(RR) = 100 \cdot \ln(1 + 10 \cdot RR)$ avec RR exprimé en mm par jour. C'est la méthode utilisée à Météo-France (Givone, 1997) ;
5. utiliser la méthode n°2 avec le changement de variable du point 4.

On appelle « indice de variation spatiale » la somme des indicateurs correspondant aux cinq calculs de l'intervalle de validité exposés plus haut. Pour un calcul donné, l'indicateur prend la valeur 0 si la mesure tombe dans l'intervalle d'acceptation et la valeur 1 dans le cas contraire. Ainsi, l'indice de variation spatiale peut prendre une valeur de 0 à 5, suivant le résultat de chaque calcul d'intervalle.

4.4 Description pratique de la validation

De manière pratique la validation a été réalisée suivant plusieurs modes opératoires différents (cf. Table 6) mais en utilisant la même méthode d'interpolation.

Table 6 : Vue d'ensemble de la méthode utilisée pour la validation des données de l'IBGE.
 «Méthode journalière» correspond à la description reprise au point 0, «Méthode mensuelle» correspond à la description reprise au point 4.4.2, «second passage» est décrit au point 4.4.2.

	Juin 1992- décembre 1998	Janvier 1999 – juillet 2003	Août 2003 – décembre 2003	Janvier 2004 – septembre 2007	Octobre 2007 – juillet 2009
Méthode	Méthode mensuelle.	Méthode mensuelle + second passage.	Méthode journalière	Méthode journalière	Méthode journalière
Utilisation du radar	Non	Non	Oui	Oui	Oui
Marchés de service concernés	Précédent	Précédent et présent	présent	précédent	présent

Chaque cumul horaire est estampillé d'un indice de qualité décrivant le traitement réalisé sur les données brutes (cf. Table 7). Le code 0 de l'indice de qualité désigne les données pluviométriques brutes, une autre valeur de l'indice de qualité signifie que le cumul a fait l'objet d'un processus de validation. La valeur 1 signifie que le cumul a été validé bon, une autre valeur de l'indice de qualité signifie que le cumul a été modifié.

Table 7 : Indices de qualité associés aux données de précipitations.

Code	Signification
0	Donnée brute.
1	La donnée brute a été validée bonne.
2	La donnée brute a été corrigée suite à la connaissance d'une information extérieure : temps sec, entretien de l'appareil...
3	La donnée brute a été estimée.
8	Donnée ayant subi une correction d'étalonnage.
9	Modification de la donnée brute (correction ou estimation) suite à la « fonte » de la neige dans le cas d'un appareil non chauffé.

4.4.1 Après le 1 août 2003

Le mode opératoire après le 1 août 2003 Les données ont été regardées en détail jour par jour. Pour cette période, les données radar étaient disponibles et ont été utilisées de manière qualitative. Les données radar constituent un outil très précieux pour cerner la répartition spatiale des précipitations, il est de plus une source alternative pour juger de la pertinence des valeurs des pluviomètres. Le réseau de contrôle (cf. 4.2) a été pris égal au réseau de l'IBGE augmenté de la station automatique chauffée de l'IRM. Dans le cas d'épisodes neigeux, l'utilisateur « a fait fondre la neige » : il a utilisé les valeurs de l'appareil chauffé de l'IRM ou des appareils non enneigés pour estimer des valeurs horaires pour les pluviomètres enneigés. Le contrôle a été réalisé à l'aide d'une interface graphique dirigée par un utilisateur.

Le processus de validation est réalisé par un utilisateur dirigeant une interface. La première phase de la validation consiste à repérer les appareils ayant des valeurs suspectes. Ces appareils sont alors mis en panne, ces valeurs ne participeront pas dans le calcul des estimations et seront remplacées par des estimations. Le repérage des valeurs suspectes est réalisé de manière manuelle ou par inspection d'outputs du logiciel qui repère ces valeurs à l'aide de tests de cohérence (cf. 0). La détection manuelle se base sur l'inspection visuelle de graphes (cf. la Figure 5) donnant pour chaque station le profil horaire temporel de trois valeurs : la valeur du pluviomètre (rouge), l'estimation à partir des autres pluviomètres (vert) et l'estimation radar aussi appelée prg¹ (bleu). Le logiciel propose des estimations mais c'est l'utilisateur qui dispose en acceptant les estimations proposées ou en proposant d'autres suivant sa connaissance de la situation acquise par l'inspection de produits annexes :

cumul radar. C'est une image représentant le cumul des images radar instantanées sur le jour étudié. Cette image permet de se faire une idée sur la répartition spatiale du cumul ; elle doit être toutefois correctement interprétée vu que les images de cumuls amplifient les défauts habituels des images radar instantanées.

carte. C'est une carte représentant sous forme de labels les cumuls quotidiens des appareils de mesure au sol. Elle permet de repérer facilement des appareils à cumul suspect.

¹ Pseudo rain gauge

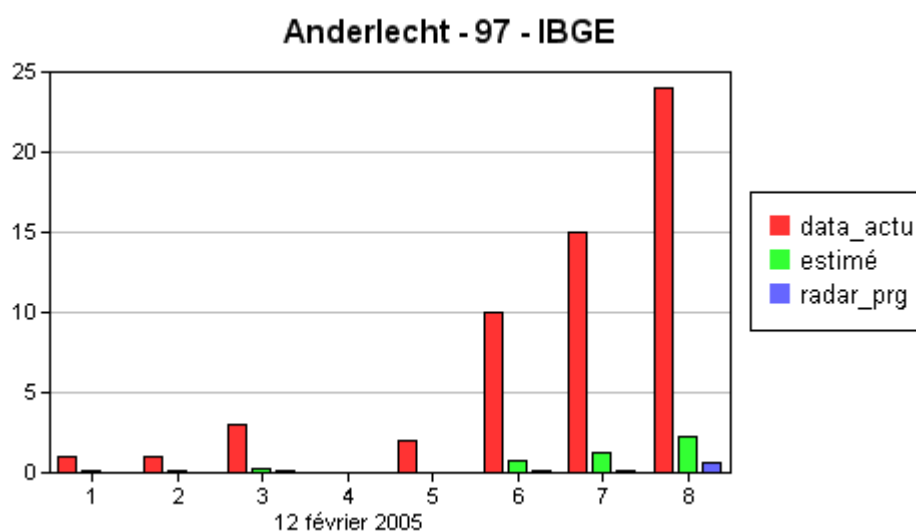


Figure 5 : Exemple de graphe pour le pluviomètre Anderlecht. L'inspection de graphe permet facilement de détecter les valeurs aberrantes, ici trop élevées, de l'appareil.

4.4.2 Avant le 1 août 2003

Le mode opératoire avant le 1 août 2003 (précédent marché de service). Les données ont été regardées de manière plus sommaire, les données radar n'ont pas été utilisées. Le réseau de contrôle (cf. 4.2) a été pris égal au réseau de l'IBGE uniquement. Les épisodes neigeux n'ont pas été traités : si tous les appareils sont bouchés lors d'un épisode neigeux, ils le resteront après validation. Les jours pour lesquels les appareils étaient en panne ont été déterminés de manière manuelle. Le reste de la validation a été ensuite réalisée de manière entièrement automatique.

Avant 2004, le processus de validation est réalisé différemment mais la méthode d'interpolation (moyenne pondérée par l'inverse du carré de la distance) reste la même. La validation s'opère en deux étapes.

Première étape À l'aide d'inspection visuelle de graphe, l'utilisateur repère les jours et les stations pour lesquels les données sont manquantes ou aberrantes. Pour ces jours les stations (encore appelées appareils) sont dites « en panne ». L'inventaire des données reçues de l'IBGE (cf. annexe 1) permet de déterminer les données aberrantes, mais nous avons repéré de nombreux cas où les données étaient présentes mais aberrantes (cf. Figure 6). Les causes principales de données manquantes sont les appareils bouchés ou semi-bouchés. Un décalage temporel a été détecté pour la station de Voets : les données sont correctes mais sont décalées de vingt-quatre heures. La période concernée est l'intervalle temporel entre le 01 décembre 1996 et le 12 février 1997.

Seconde étape La validation est réalisée ensuite de manière entièrement automatique, le logiciel utilisant les renseignements sur les appareils en pannes comme guide de ce qu'il y a à faire : pour chaque jour, le logiciel effectue les opérations suivantes :

- En utilisant les renseignements de l'étape précédente, il détermine quels sont les appareils en panne pour le jour concerné. Les valeurs de ces appareils ne seront pas utilisées dans le calcul des estimations.
- Il estime ensuite les vingt-quatre valeurs horaires des stations en panne.

Dans le présent marché de service, nous sommes partis de la validation effectuée lors du marché de service précédent qui nous a semblait de bonne qualité. Nous avons ensuite effectué un « second passage » en réexaminant les données sur la période allant du 1 janvier 1999 au 31 juillet 2003. Nous avons inspectée de manière détaillée (avec la méthode du point 4.4.1.) que les jours suspects sur base de l'inspection de graphes de valeur journalière ou de graphes de somme cumulée.

La méthode d'inspection est illustrée à l'aide des quatre exemples didactiques suivants.

Dans l'exemple 1 (cf. Figure 6), la station de Paelinckx n'a pas enregistré l'événement pluvieux autour du 15 mars 2001. Ces données ont été estimées.

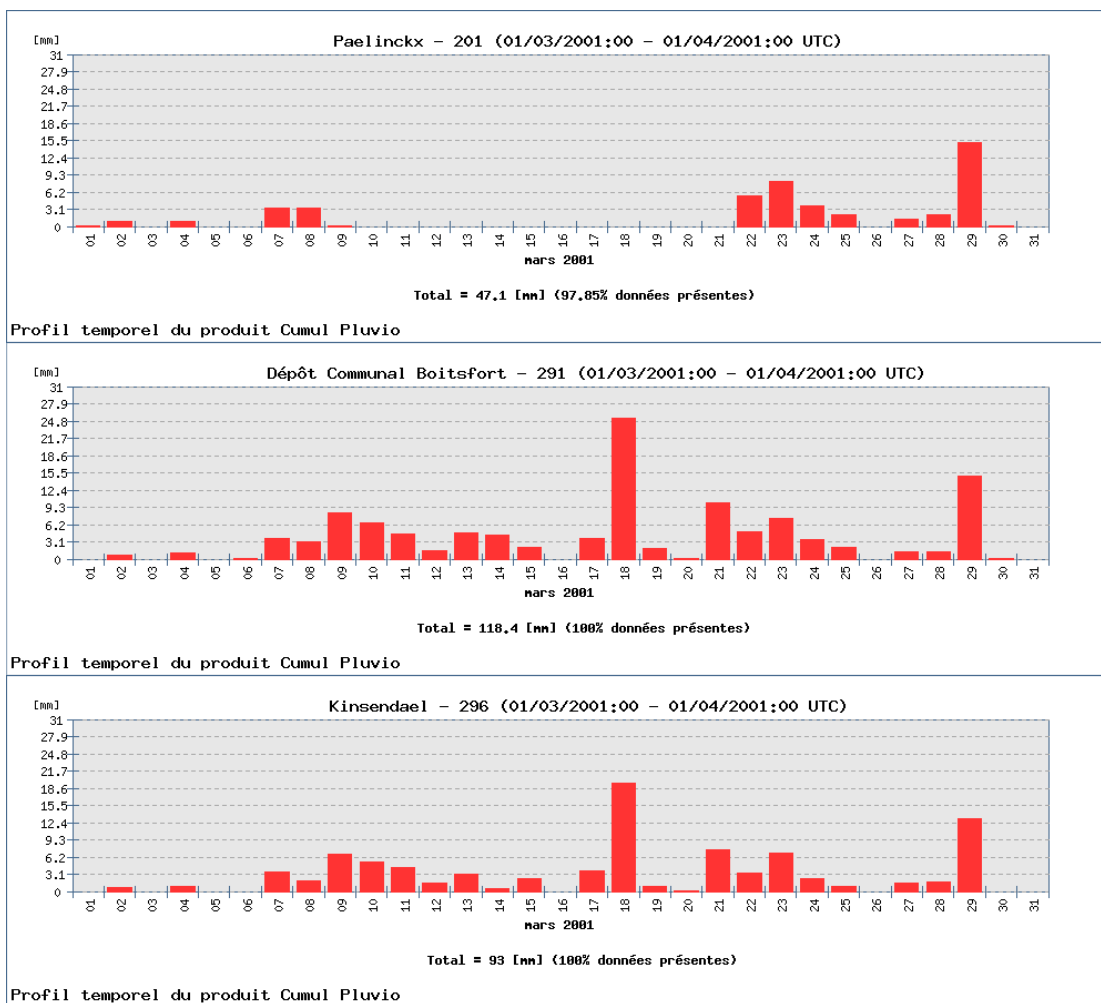


Figure 6 : Profil temporel journalier mettant en évidence des données aberrantes à Paelinckx en mars 2001. L'appareil était probablement bouché.

Dans l'exemple 2 (cf. Figure 7), la station Nord n'a pas enregistré l'événement pluvieux de fin octobre, début novembre. Ces données devront être estimées.

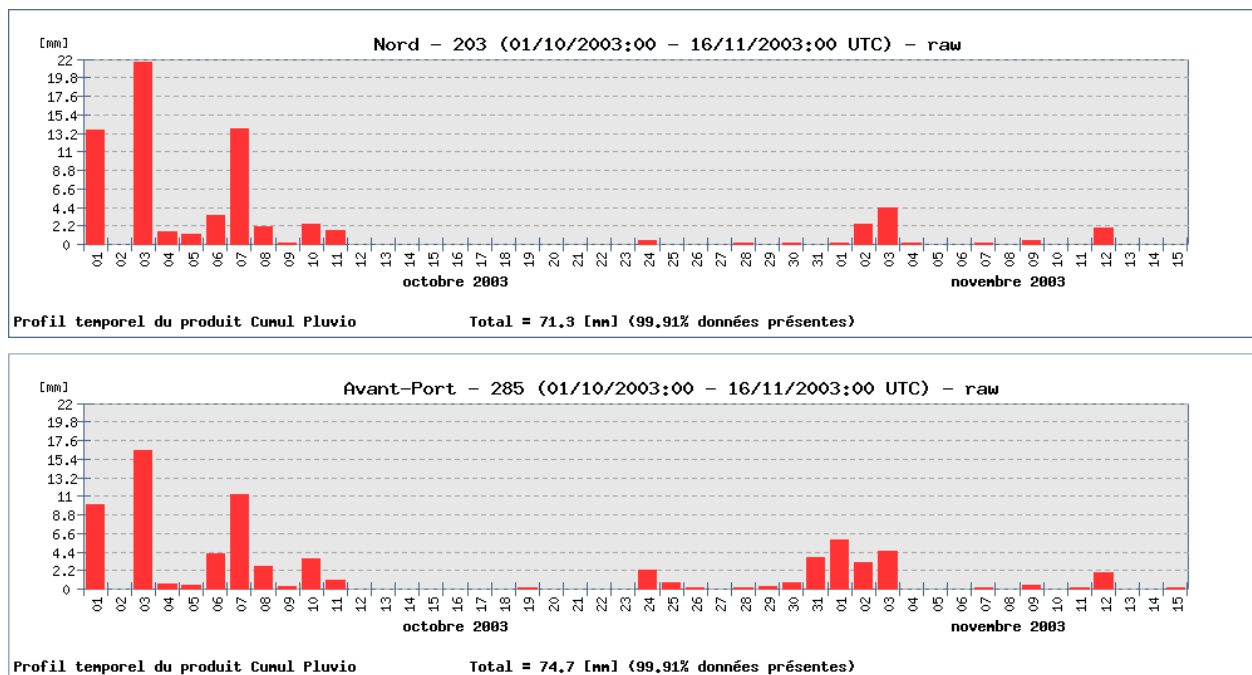


Figure 7 : Illustration de l'inspection des graphes de valeurs journalière. Le diagnostique est que la station Nord n'a pas enregistré l'événement pluvieux de fin octobre, début novembre.

Dans l'exemple 3 (cf. Figure 8), les surestimations de Roodebeek et de Shopping center sont expliquées par l'orage du 28 juillet 2006. Il n'y a donc plus aucune correction supplémentaire à réaliser. Par contre, nous n'avons pas pu expliquer la décroissance simultanée, autour du mois de mai et juin 2007, des stations proches : Roodebeek, Shopping Center et Dépôt de Tram. Est-ce un déficit climatique ou les stations qui n'ont pas bien fonctionné ?

Dans l'exemple 4 (cf. Figure 3), il s'est avéré que les corrections d'étalonnage de Paelinckx n'avaient pas été faites, nous les avons donc réalisées.

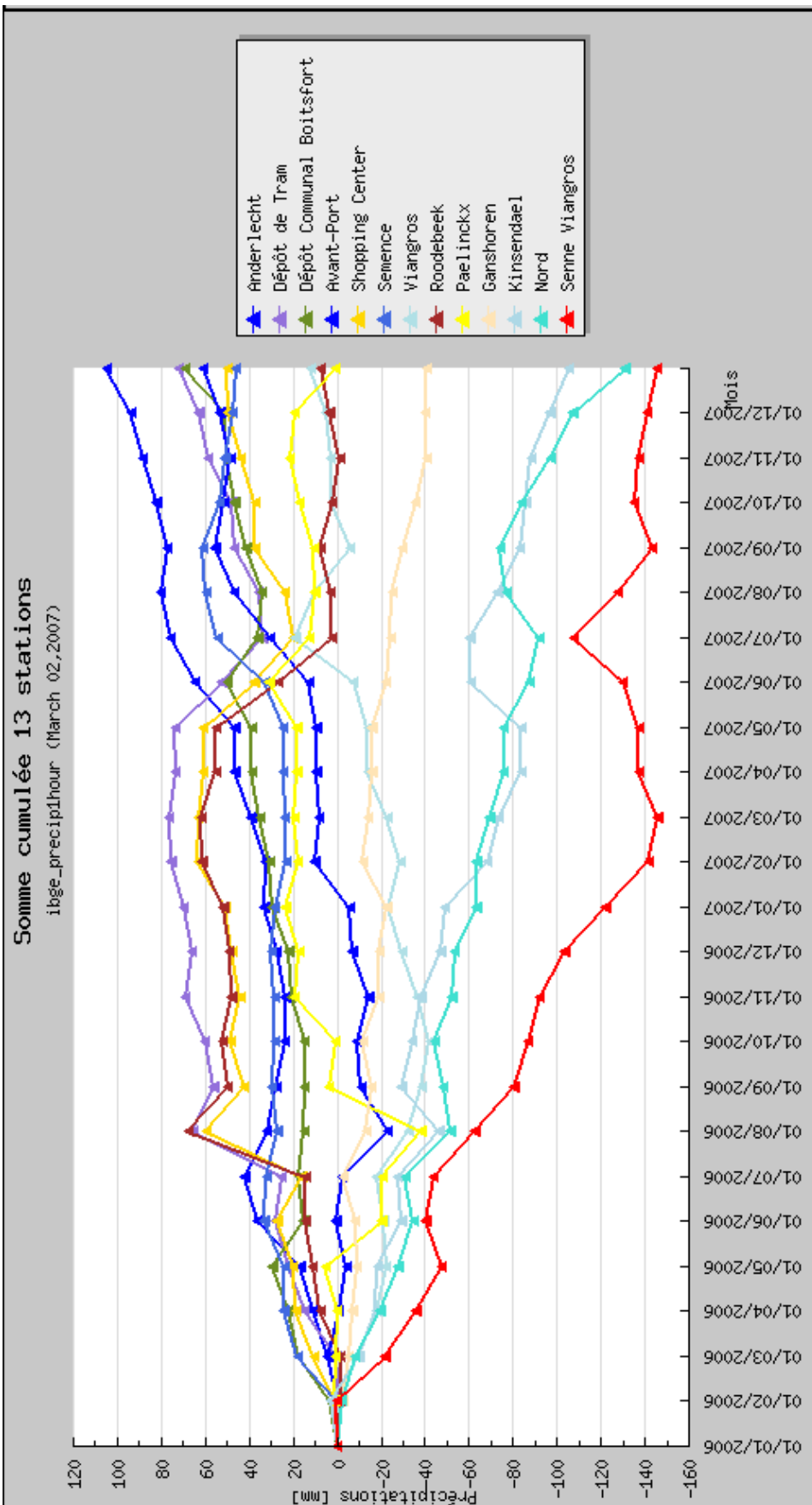


Figure 8 : Somme des valeurs cumulées de précipitations validées sur la période 1 janvier 2006 au 31 décembre 2007.

4.5 Conclusions et recommandations

Au terme de cette validation, l'IRM pourra fournir en retour une base de données de précipitations validées sous la forme d'un fichier texte, une ligne par valeur. Les champs sont séparés par des points-virgules et sont les suivants : code, timestamp, precip_quantity, qc_flags. Le champ *qc_flags* reprend le code de qualité associé à la quantité de précipitation. Le champ *timestamp* identifie un cumul horaire se terminant à l'heure indiquée, il est exprimé dans le format dd/mm/yyyy:hh en heure UTC. Le champ *precip_quantity* est exprimé en millimètre. Un extrait de la base est repris dans la Table 8.

Table 8: Extrait de la base de données validées.

```
CODE;TIMESTAMP;PRECIP_QUANTITY;QC_FLAGS;
97;28/11/2006:14;0;1;
97;28/11/2006:15;0;1;
97;28/11/2006:16;.1;1;
97;28/11/2006:17;1.4;1;
97;28/11/2006:18;.3;1;
97;28/11/2006:19;0;1;
97;28/11/2006:20;0;1;
97;28/11/2006:21;0;1;
97;28/11/2006:22;0;1;
97;28/11/2006:23;0;1;
97;29/11/2006:00;0;1;
```

La Table 9 reprend l'inventaire des stations qui ont été validées. Pour chaque station, le début coïncide avec le début d'un mois. Si les données reçues de l'IBGE commençaient quelques jours avant, elles n'ont pas été reprises, si par contre elles commençaient quelques jours après le début du mois, les premiers jours ont été estimés. Lorsque les premiers mois d'une station comportaient trop de données estimées, ils n'ont pas été repris dans les données validées.

Table 9: Liste des quatorze stations du marché de services avec la mention du début et de la fin de la période sur laquelle les données sont validées. Le champ début réel est repris de la Table 1.

Code	Nom	Début réel	Début de la validation	Fin de la validation
97	Anderlecht	20/03/1998:15	01/06/1998:00	31/07/2009:24
103	Senne Viangros	29/12/1998:22	01/01/1999:00	31/07/2009:24
201	Paelinckx	31/05/1992:23	01/07/1992:00	31/07/2009:24
203	Nord	31/05/1992:23	01/08/1992:00	31/07/2009:24
285	Avant-Port	29/01/2001:10	01/02/2001:00	31/07/2009:24
286	Roodebeek	30/10/1998:10	01/11/1998:00	31/07/2009:24
287	Semence	03/11/1997:12	01/11/1997:00	31/07/2009:24
288	Viangros	20/01/1995:11	01/02/1995:00	31/07/2009:24
291	Dépôt Communal Boitsfort	31/05/1992:23	01/06/1992:00	31/07/2009:24
292	Dépôt de Tram	12/02/1993:12	01/03/1993:00	31/07/2009:24
293	Shopping Center	31/12/1991:23	01/06/1992:00	31/07/2009:24
296	Kinsendaël	31/05/1992:23	01/06/1992:00	31/07/2009:24
298	Voets	19/06/1992:12	01/07/1992:00	27/10/2005:06
299	Ganshoren	03/06/1992:08	01/06/1992:08	31/07/2009:24

Le contrôle de qualité est un processus qui s'effectue en fin de course d'une chaîne de traitement. L'objectif optimal à atteindre est que cette étape soit la plus légère possible et que les « corrections » soient faites le plus en amont possible au niveau de l'appareil lui-même et de son entretien.

En analysant plus en détail la période octobre 2007 – juillet 2009, nous avons constaté que certains appareils n’avaient pas fonctionné sur une longue période, par exemple Ganshoren en juin et juillet 2008. Les données étaient bien présentes (cf. annexe 1), mais les valeurs étaient toutes égales à zéro.

Plusieurs appareils peuvent parfois être hors service en même temps. C’est par exemple le cas pour la première quinzaine du mois de juin 2008 pour les stations de Ganshoren, Anderlecht et Dépôt Communal. Cette situation complique le contrôle de qualité vu que nous devons, pour ces jours-là, les retirer du processus d’estimation (les mettre en panne, cf. le point 4.3.1).

Les deux situations décrites entraînent une perte de la qualité de la base de données que le contrôle de qualité ne peut pas récupérer par estimation, au mieux, il la camoufle. La solution consisterait à réaliser la télémessure des données et d’inspecter quotidiennement les données. Ainsi, il est possible de repérer au plutôt les appareils hors service et agir en conséquence in situ.

5 Répartition spatiale des précipitations

5.1 Comparaison des cumuls aux stations

La période de comparaison correspond à celle utilisée pour la réalisation des cartes, elle va du 01/01/1999 au 31/07/2009.

Cette période de 10 ans et 7 mois a été obtenue comme compromis entre la durée la plus longue possible à prendre en considération (nécessaire d'un point de vue climatologique) et le nombre de stations ouvertes le plus élevé possible pour mettre en évidence d'éventuelles variations spatiales. Pour cette période, 12 stations ont été en activité du début à la fin. Ces stations sont reprises à la Table 10. Si nous avons choisi une période plus longue, débutant au 01/01/1993, l'ensemble des stations disponibles aurait été réduit à 7 (cf. Table 1), ce qui ne nous a pas semblé suffisant pour caractériser spatialement les précipitations sur Bruxelles.

Nous avons travaillé à partir des séries complètes, obtenues après l'étape de contrôle de qualité. Ce contrôle de qualité a été effectué de manière automatique, sans l'aide d'un opérateur, sur la période janvier 1999 - juillet 2003. Pour travailler sur les mêmes valeurs que celles utilisées pour les cartes, nous avons multiplié les valeurs par le facteur de calibration 0.9305 (cf. le point 5.3).

<i>Numero attribué</i>	<i>Nom de la station</i>
1	Paelinckx
2	Kinsendael
3	Dépot Communal Boitsfort
4	Senne Viangros
5	Viangros
6	Anderlecht
7	Dépôt de Tram
8	Shopping Center
9	Roodebeek
10	Semence
11	Ganshoren
12	Nord

Table 10. Liste des stations utilisées. Période : 01/01/1999-31/07/2009.

La Figure 9 reprend les résultats obtenus pour les cumuls annuels calibrée (moyenne des cumuls annuels multiplié par un facteur correctif tenant compte de la climatologie 1971-2000 à Uccle) tandis que la Figure 10 donne les résultats pour les moyennes saisonnières calibrées. Le déficit de la station Nord peut être expliqué par la relation entre cumul et altitude. Ce point sera développé au paragraphe suivant. On remarque également que la station n°1 (Paelinckx) présente de plus le cumul total le plus élevé sur toute la période. Ce fait peut également être expliqué par la relation entre cumul et altitude.

La station de Senne Viangros présente un cumul faible. Nous proposons de ne pas inclure cette station pour le calcul des cartes des normales pluviométriques car ce cumul est anormalement faible en comparaison des valeurs obtenues pour les stations proches (Viangros et Anderlecht). Le déficit observé à la station de Senne Viangros est vraisemblablement lié à l'instrument (la station de Viangros, située sur le même site ne présente pas ce déficit). Les Figure 11 et Figure 12 illustrent le déficit quasi systématique de la station de Senne Viangros. Il s'agit des données des deux stations Viangros et Senne Viangros (situées sur le même site) pour le mois de février 2004, ainsi que le détail des données horaires pour le 08/02/2004.

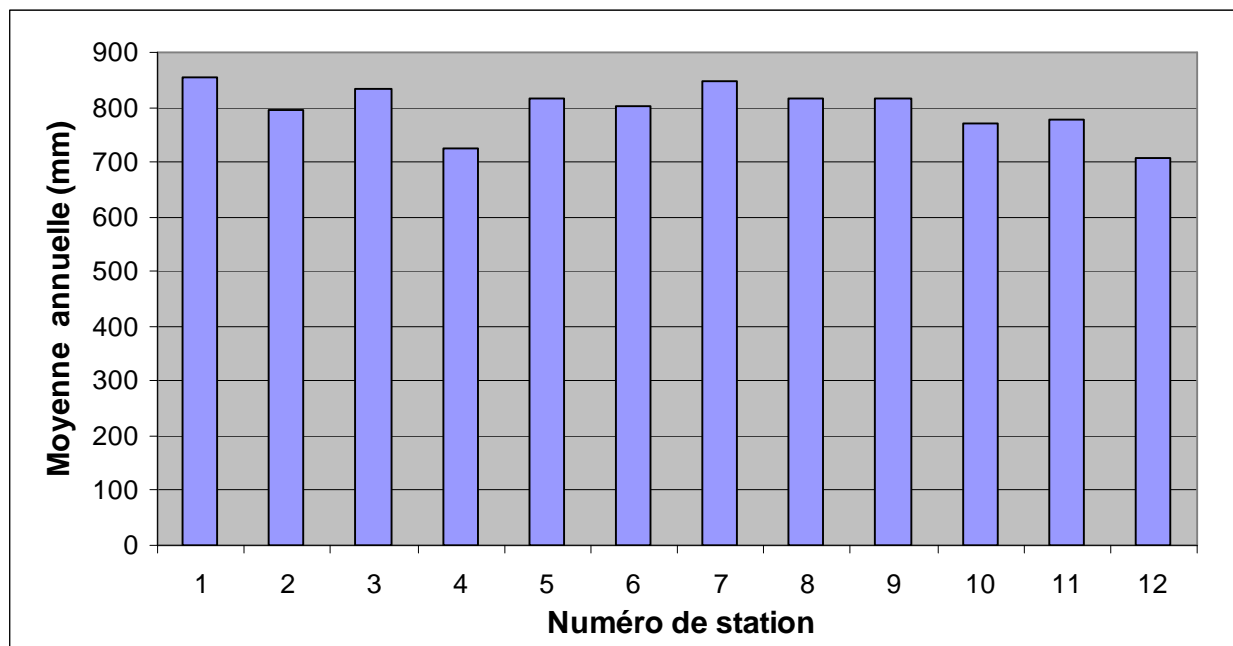


Figure 9. Comparaison sur la période 01/01/1999 au 31/07/2009 des moyennes annuelles calibrées pour les stations de l'IBGE reprises à la Table 10.

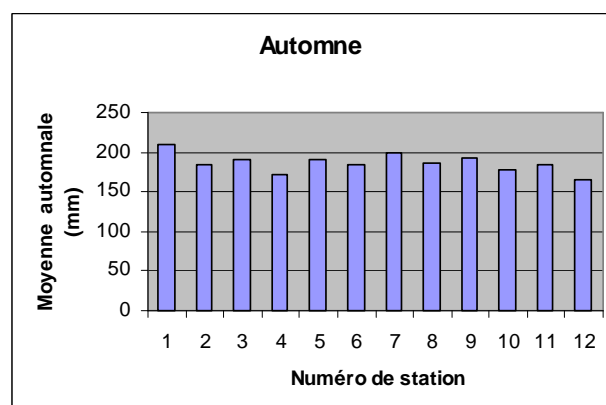
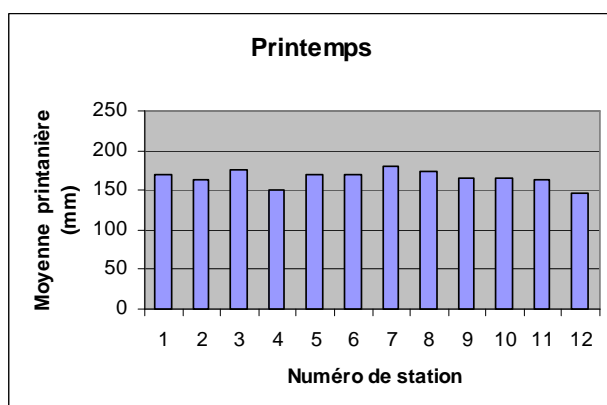
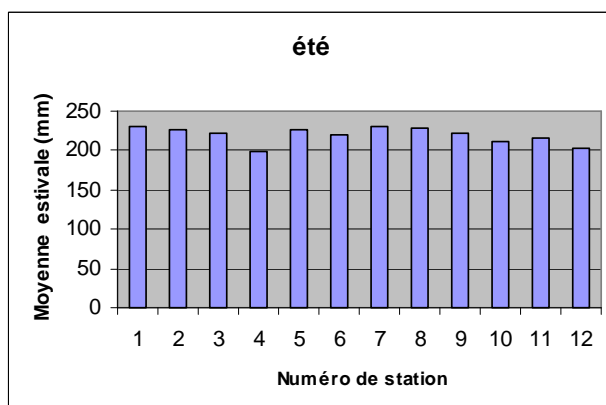
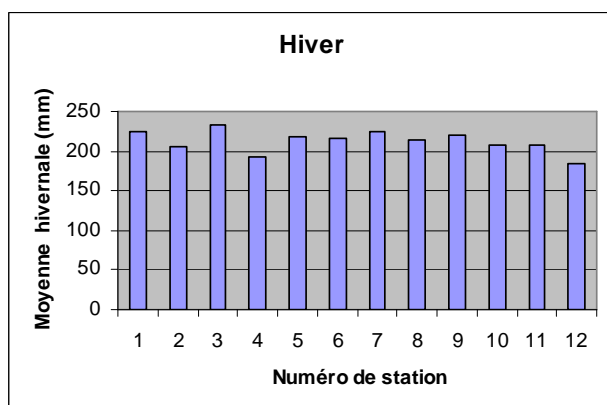


Figure 10. Comparaison sur la période 01/01/1999 au 31/07/2009 des moyennes saisonnières pour les stations de l'IBGE reprises à la Table 10.

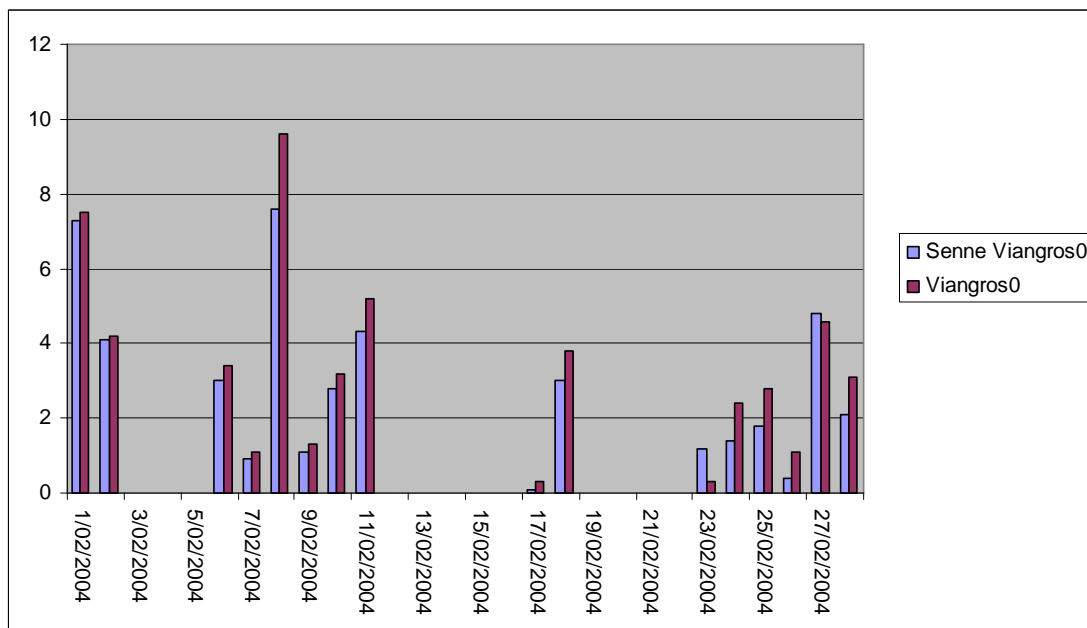


Figure 11: Comparaison des données validées pour les stations Viangros et Senne Viangros pour le mois de février 2004.

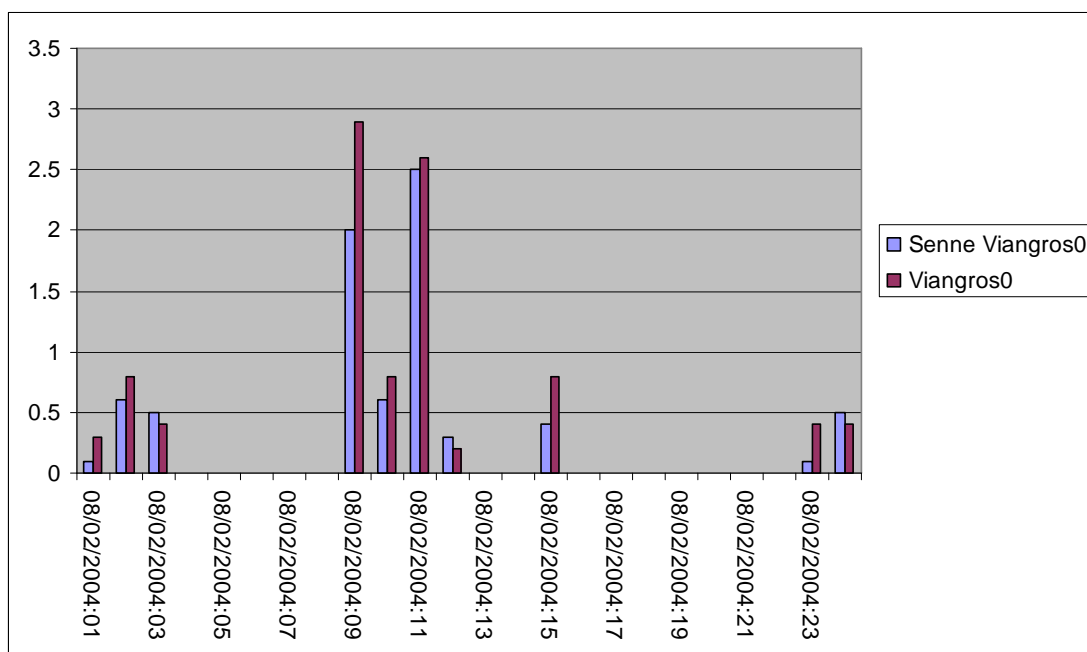


Figure 12: Comparaison des données validées pour les stations de Viangros et Senne Viangros le 8 février 2004.

5.2 Influence de l'orographie et des vallées

On souhaite examiner dans ce point si des caractéristiques de surface jouent un rôle significatif sur la répartition des cumuls pluviométriques en Région bruxelloise. Deux questions concrètes étaient posées au départ : la Forêt de Soignes et la topographie des vallées de la Senne et de la Woluwe influencent-elles la répartition spatiale des précipitations ? La question de la forêt de Soignes a été examinée dans le marché précédent. Pour être complet, nous commençons par rappeler ici les principaux résultats obtenus dans le précédent marché.

Effet de l'orographie

Pour étudier l'éventuelle influence de la Forêt de Soignes, un ensemble de stations situées dans un rayon de 30 km autour de Bruxelles a été sélectionné. La Figure 13 reprend l'ensemble des stations disponibles, tous réseaux confondus. Un sous-ensemble de ces stations a été sélectionné pour l'étude (voir Table 11). Seules les stations ayant fonctionné durant la période de référence 01/01/2004-31/09/2007 ont été retenues. Cette période est celle sur laquelle le contrôle de qualité du réseau de l'IBGE a été effectué avec l'aide d'un opérateur.

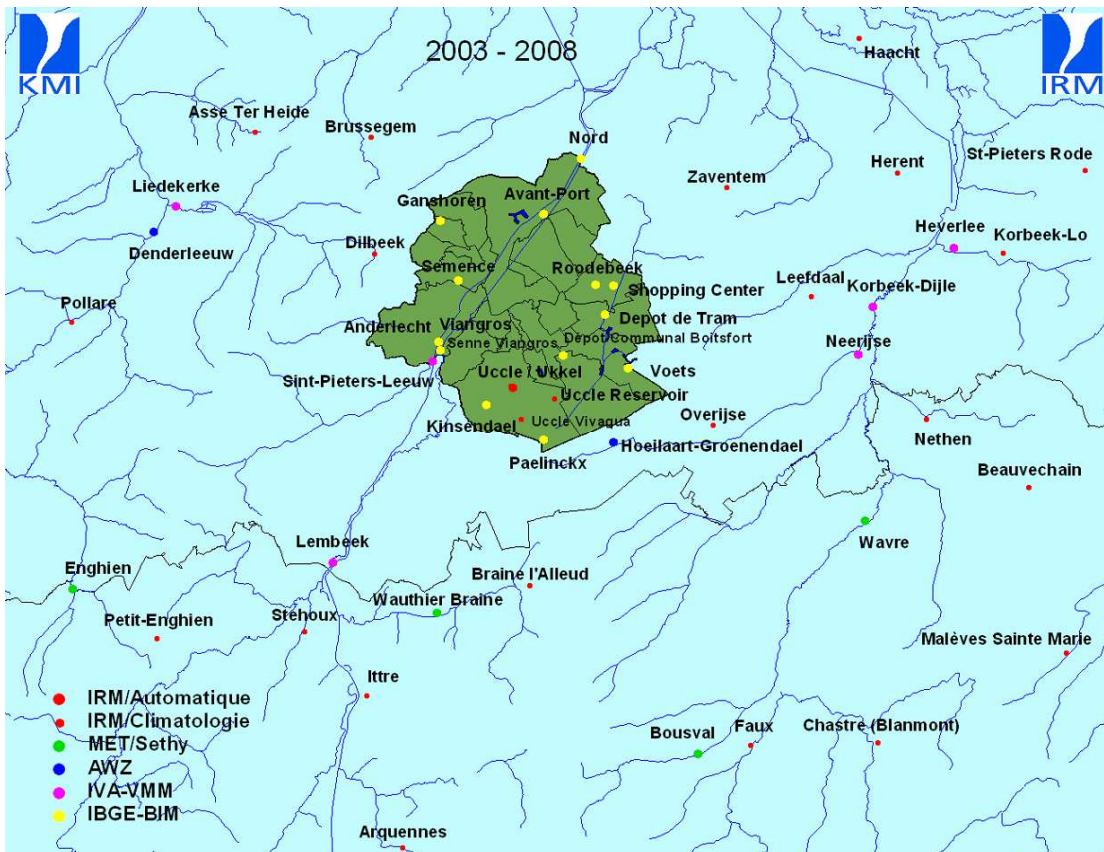


Figure 13 : Stations disponibles aux alentours de Bruxelles.

Numéro	Code	Altitude (m)	Nom	Cumul (mm)
1	2109	10	Haacht	3049,2
2	203	16	Nord	2808,6
3	285	16	Avant-Port	3108,7
4	103	21	Senne Viangros	2622,2
5	288	21	Viangros	3075,4
6	97	22	Anderlecht	3040,8
7	299	29	Ganshoren	2985,3
8	3309	32	Herent	2981,8
9	293	42	Shopping Center	3119,6
10	1205	42	Brussegem	3378,5
11	3005	43	Korbeek-Lo	2860,0
12	287	43	Semence	3024,4
13	3317	47	Nethen	2857,4
14	292	48	Depôt de Tram	3342,5
15	296	48	Kinsendaal	2996,8

16	2708	48	Stehoux	2952,8
17	286	50	Roodebeek	3133,8
18	1210	50	Asse Ter Heide	3390,8
19	2905	58	Zaventem	2818,6
20	3313	60	St-Pieters Rode	3009,5
21	2710	75	Dilbeek	3022,6
22	2804	75	Petit-Engbien	2993,9
23	291	76	Dépot Communal Boitsfort	3157,5
24	3310	80	Faux	3421,2
25	3315	80	Leefdaal	3052,2
26	2907	92	Braine l'Alleud	3369,1
27	4003	95	Arquennes	3131,3
28	2900	100	UCCLe IRM P50	3165,4
29	3311	100	Uccle Vivaqua	3601,7
30	3007	119	Uccle Reservoir	3313,0
31	3401	120	Beauvechain	2421,8
32	201	122	Paelinckx	3127,5
33	3303	125	Chastre (Blanmont)	3335,2
34	2903	128	Malèves Sainte Marie	3141,3

Table 11: Stations sélectionnées pour l'étude de l'influence de l'altitude sur le cumul de précipitations. (Bruxelles et alentours)

En premier lieu, nous avons comparé les cumuls totaux sur la période pour détecter la présence de stations dont le cumul s'éloigne significativement de l'ensemble des cumuls (Figure 14).

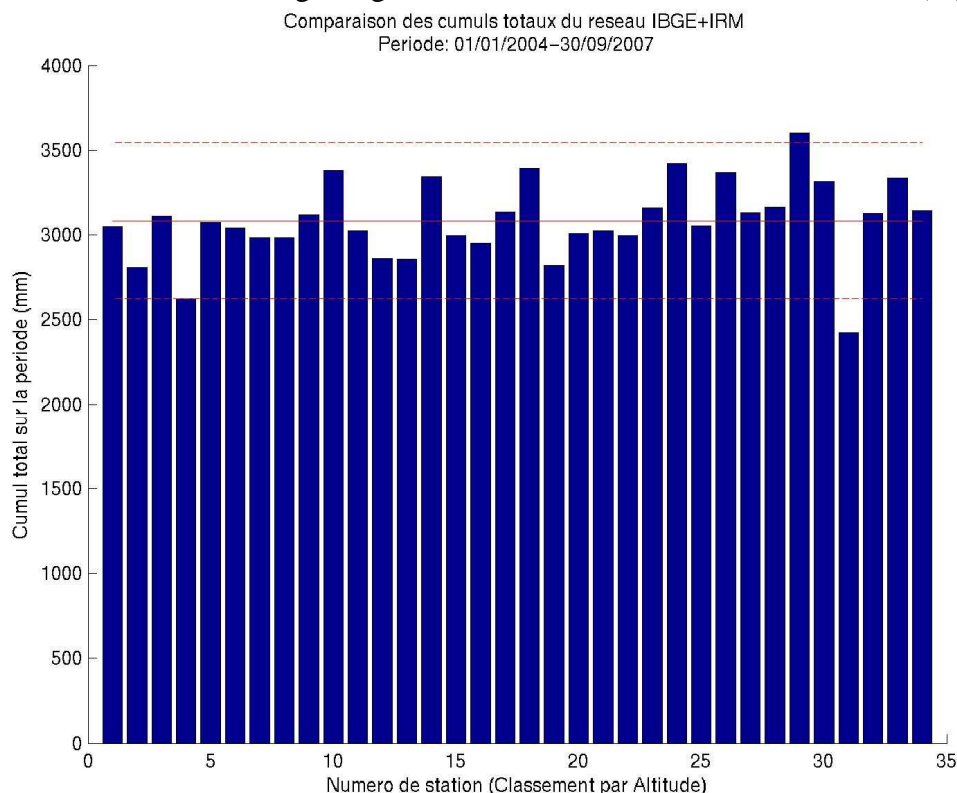


Figure 14: Comparaison des cumuls totaux sur la période 01/01/2004-31/09/2007, des stations reprises à la Table 11. Le nombre de stations est égal à 34. Ces stations sont classées par ordre croissant d'altitude.

On observe que deux stations ont des cumuls significativement inférieurs à l'ensemble des autres cumuls. Il s'agit des stations de Senne Viangros (IBGE) et de Beauvechain (IRM). Le déficit de la station de Senne Viangros a déjà été mentionné. Le déficit de Beauvechain est un problème lié à l'instrument. Remarquons que cette station est devenue une station automatique. Les cumuls de ces deux stations ne seront pas pris en compte pour l'étude de l'influence de l'altitude sur le cumul pluvieux.

Il est apparu que l'altitude est le facteur principal permettant d'expliquer la variabilité des cumuls. L'effet de la forêt de Soignes est un facteur secondaire, masqué par ce facteur principal. Nous avons donc décidé de nous concentrer sur l'effet d'altitude. Avec les emplacements des stations existantes, nous ne sommes pas parvenu à isoler l'effet de la forêt de Soignes proprement dit (indépendamment de l'effet d'altitude).

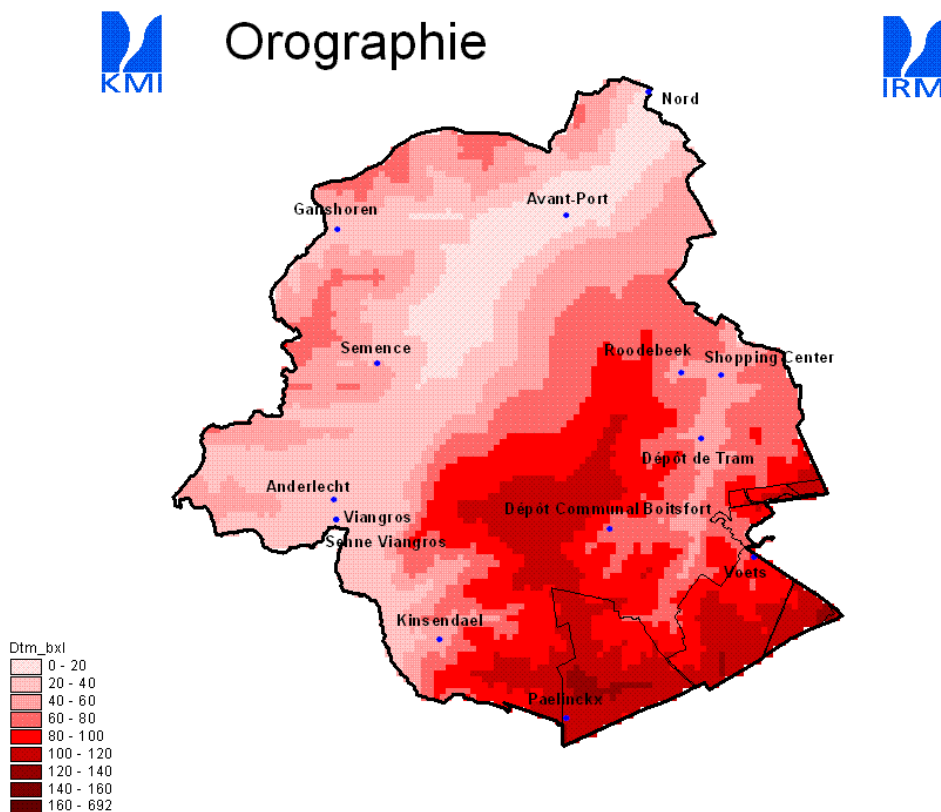


Figure 15. Orographie de la Région de Bruxelles-Capitale.

La Figure 15 présente l'orographie de la Région de Bruxelles-Capitale. On observe un gradient d'altitude allant globalement du Nord-Ouest (faibles altitudes) au sud-est (altitudes élevées).

Nous avons étudié la relation entre les cumuls totaux et l'altitude pour l'ensemble des stations reprises à la Table 11. Une corrélation positive et égale à 0.46 est obtenue. Ce chiffre est significativement supérieur à zéro, au niveau de confiance 95 %. Une analyse par saison a également été effectuée. Pour chaque saison, des corrélations positives entre l'altitude et le cumul sont obtenues. Les tests statistiques montrent que les corrélations obtenues pour le printemps, l'été et l'hiver sont significatives (la corrélation pour l'automne n'est pas significative) et ce au niveau de confiance 95 %.

Nous avons ensuite refait la même analyse, mais centrée sur Bruxelles. Les stations utilisées sont reprise à la Table 12. La Figure 16 illustre la corrélation trouvée entre le cumul total et l'altitude. Cette corrélation (0.57) est positive et significativement supérieure à zéro au niveau de confiance 95 %. Les corrélations saisonnières obtenues sont toutes positives, mais seul l'automne présente une corrélation significativement supérieure à zéro au seuil 95 % (cf. Figure 17).

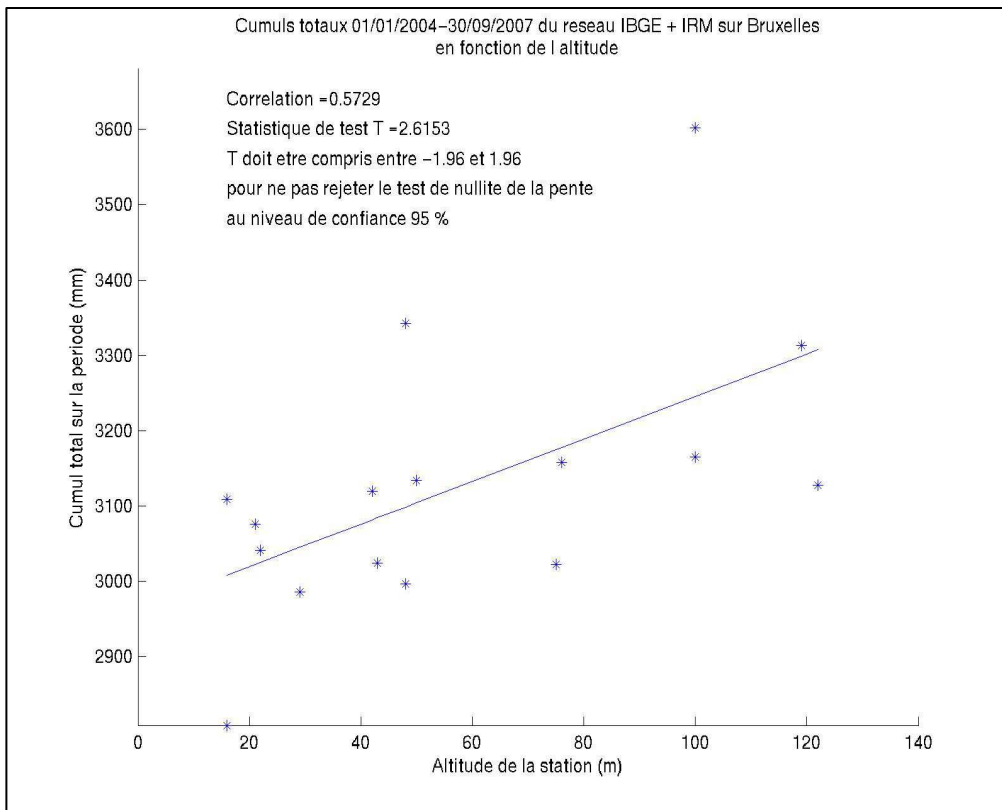


Figure 16: Corrélation entre altitude et cumul total pour l'ensemble des stations reprises à la Table 12.

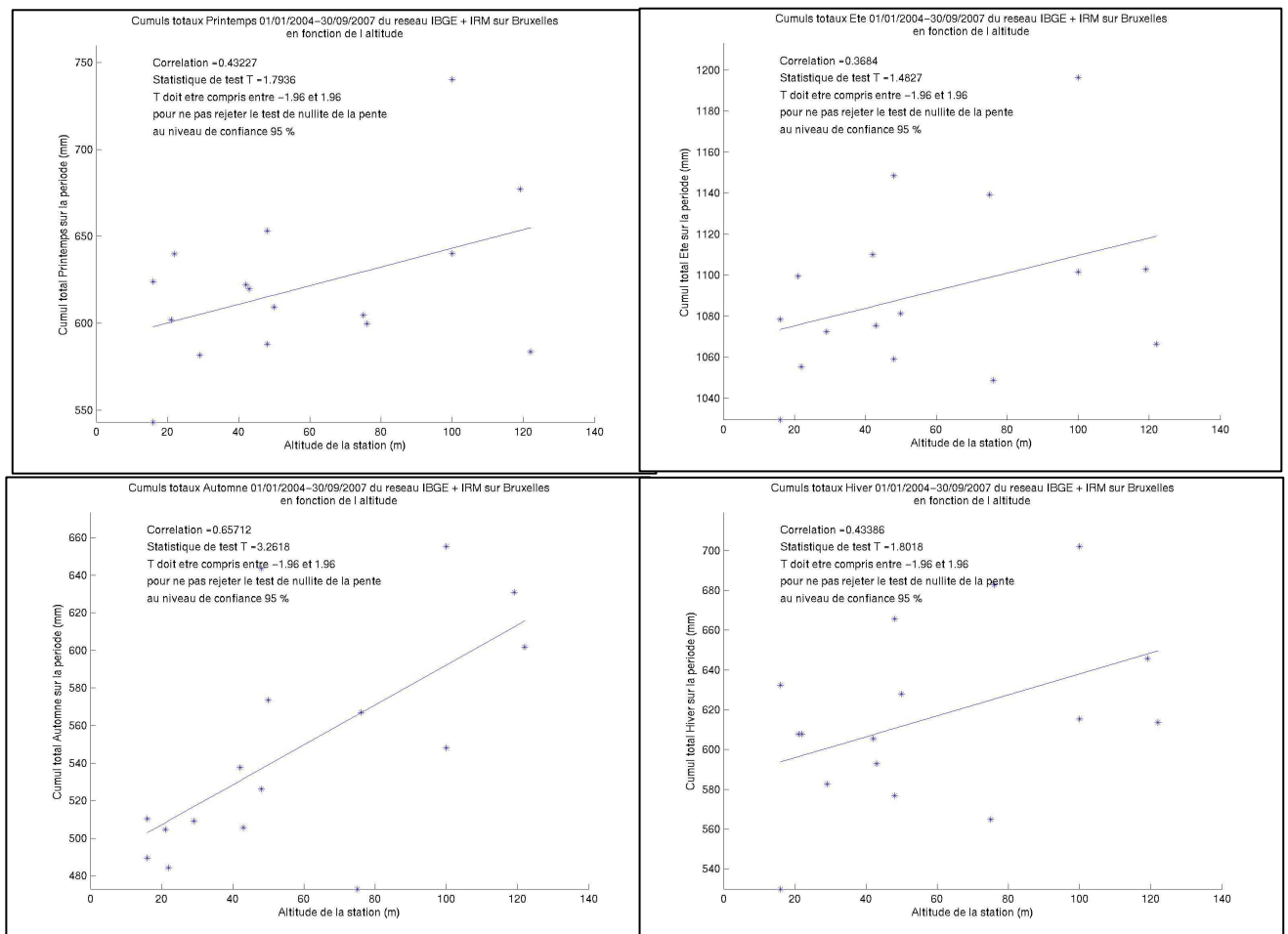


Figure 17: Corrélation entre altitude et cumul saisonnier pour l'ensemble des stations reprises à la Table 12.

En conclusion de ce point, on observe un lien positif entre l'altitude des stations et le cumul mesuré à cette station. Ce lien est significatif au sens statistique lorsque l'on considère le cumul total. Au niveau saisonnier, nous devons rester prudents au niveau des conclusions car même si les corrélations obtenues sont positives, elles ne sont pas significatives pour toutes les saisons. Au niveau quantitatif, le gradient de cumul en fonction de l'altitude est de l'ordre de 300 mm par 100 mètres pour 45 mois de données. Ce qui fait environ, 80 mm par 100 mètres pour un cumul annuel. Notons que dans cette étude la connaissance précise de l'altitude est importante car l'écart entre la station la plus basse et la plus élevée n'est que d'environ cent mètres. Nous avons donc contrôlé et parfois corrigé l'altitude de ces stations. La Forêt de Soignes étant située à une altitude relativement élevée (100 m), il est normal de constater des cumuls plus élevés pour les stations situées aux alentours.

Code	Altitude (m)	Nom	Cumul (mm)
203	16	Nord	2808,6
285	16	Avant-Port	3108,7
288	21	Viangros	3075,4
97	22	Anderlecht	3040,8
299	29	Ganshoren	2985,3
293	42	Shopping Center	3119,6
287	43	Semence	3024,4
292	48	Depot de Tram	3342,5
296	48	Kinsendael	2996,8
286	50	Roodebeek	3133,8
2710	75	Dilbeek	3022,6
291	76	Dépot Communal Boitsfort	3157,5
2900	100	UCCle IRM P50	3165,4
3311	100	Uccle Vivaqua	3601,7
3007	119	Uccle Reservoir	3313,0
201	122	Paelinckx	3127,5

Table 12: Stations sélectionnées pour l'étude de l'influence de l'altitude sur le cumul de précipitations (sur le territoire de Bruxelles).

Effet des vallées

Une seconde question, abordée dans le présent marché de services, concerne l'influence éventuelle des vallées de la Senne et de la Woluwe sur la répartition relative des précipitations sur le territoire de la Région bruxelloise. Pour essayer de répondre à cette question, un ensemble de situations pluvieuses et neigeuses ont été sélectionnées sur la période entre le 01/01/2004 et le 30/09/2007, soit sur 3 ans et 9 mois (en utilisant les données horaires du réseau de l'IBGE validées dans le marché de service précédent). Ces épisodes de précipitations ont été sélectionnés à l'aide des quatre critères suivants qui devaient être vérifiés simultanément pour retenir un épisode :

- (1) Précipitations relativement homogènes sur l'ensemble du territoire bruxellois (on élimine ainsi les cas avec des valeurs trop 'particulières' en l'une ou l'autre station).
- (2) Cumuls d'au moins 1 mm dans toutes les stations.
- (3) La direction du vent est relativement stable durant tout l'épisode (la durée d'un épisode est comprise entre 1 heure et 24 heures).
- (4) La direction du vent est proche de directions prédéterminées durant tout l'épisode (on élimine les épisodes durant lesquelles le vent change de direction de manière prononcée).

L'examen des situations de précipitations sur la période considérée a conduit à ne pouvoir retenir qu'un petit nombre de périodes de précipitations répondant aux critères définis ci-dessus (voir plus loin). Les résultats présentés ci-dessous doivent donc être considérés comme largement préliminaires à ce stade.

Signalons que le critère (1) a conduit à rejeter dans la présente étude le cas des situations orageuses qui conduisent à des répartitions de précipitations très souvent fortement hétérogènes, même à l'échelle d'une région comme celle de Bruxelles. Pour étudier l'éventuelle influence spatiale de ce genre de précipitations, il faudrait pouvoir considérer un nombre beaucoup plus élevé de situations orageuses. A ce sujet, l'utilisation des données Safir de l'IRM (détection de l'activité électrique par interférométrie à une résolution spatiale d'environ 2-3 km) sur une période de plusieurs années pourrait peut-être fournir des résultats intéressants au sujet de la répartition spatiale des précipitations orageuses à l'échelle de la Région bruxelloise.

On a sélectionné ensuite les stations représentatives des vallées de la Senne et de la Woluwe, ainsi que les stations proches non situées dans (ou non représentatives de) ces vallées. Dans la présente étude, on cherche à voir si les cumuls relatifs de ces ensembles de stations dépendent des situations météorologiques caractérisées par le type de précipitations et par la direction du vent durant chaque épisode pluviométrique sélectionné. L'idée sous-jacente est que la topographie peut influencer la répartition des précipitations non seulement en fonction directe de l'altitude (comme on l'a vu précédemment), mais également de manière plus subtile en fonction de la direction du vent interagissant avec la topographie locale (examinée ici du point de vue vallées/plateaux), et cela en fonction du type de précipitations.

Le choix des stations n'est pas simple. La répartition actuelle des stations du réseau de l'IBGE n'est pas optimale du point de vue qui nous intéresse, en particulier parce qu'aucune station n'occupe le 'plateau' central, entre les deux vallées (cf. figure 15). Pour la vallée de la Senne, on a retenu les stations Avant-Port et Nord comme stations les plus représentatives de la vallée et les stations proches de Ganshoren et de Semence comme stations de référence. Pour la Vallée de la Woluwe, les stations retenues pour la vallée sont celles du Shopping Center et du Dépôt de Tram et les stations de référence proches sont celles du Dépôt communal de Boitsfort et de Roodebeek. Le choix de stations de référence plus éloignées risquait de fausser les comparaisons du fait de l'inévitable hétérogénéité spatiale des précipitations lors des épisodes pluvieux.

Les quantités de précipitations ont été classifiées selon le type de précipitations (pluies ou averses de pluies) et la direction du vent. On a distingué la pluie des averses de pluie en partant de l'hypothèse que les pluies sont réparties spatialement de manière plus homogène, ce qui permettrait peut-être de mettre en évidence plus facilement un effet de vallée. On s'est basé sur le type de temps donné chaque heure à la station de Zaventem dans le message synoptique. On n'a conservé ici que les situations clairement 'pluies' pendant toute la durée de l'épisode pluvieux ou avec des observations d'averses' au moins pendant une partie de l'épisode pluvieux considéré. Pour les directions, on est parti de la direction de l'axe de la vallée (SO -> NE pour la Senne et SSO -> NNE pour la Woluwe), de la direction perpendiculaire (NO -> SE pour la Senne et ONO -> ESE pour la Woluwe) et des deux directions intermédiaires. En pratique, on ne garde que les épisodes pour lesquels la direction moyenne du vent sur la durée de l'épisode est à l'intérieur d'un intervalle de 22,5°C autour de la direction retenue. Chaque direction est en fait dédoublée en termes d'origine des vents puisque le sens de la direction du vent suivant un axe est double.

Les Tables 13 et 14 présentent schématiquement les résultats obtenus pour la vallée de la Senne, respectivement pour les épisodes sans averses ('PLUIES') et pour les épisodes avec mention d'averses au moins à un moment donné dans les messages synoptiques de Zaventem pendant la

durée de l'épisode de précipitations ('AVERSES'). Pour 4 combinaisons de stations, les Tables donnent (i) le rapport entre les cumuls aux stations concernées indépendamment de la direction du vent (en %), ainsi que (ii) la tendance par rapport à la situation non directionnelle des 8 directions de vent considérées. L'objectif est de détecter si le sous-ensemble des épisodes correspondant à une direction donnée présente un rapport significativement différent du rapport pour l'ensemble des épisodes (indépendamment de la direction du vent). Les Tables 15 et 16 donnent les mêmes résultats pour la vallée de la Woluwe.

Comme mentionné plus haut, les résultats sont préliminaires vu le faible nombre de situations de précipitations analysées (entre 21 et 60, selon la vallée et le type de précipitations).

Table 13. Analyse qualitative des quantités de précipitations (sous forme de pluies ou neiges startiformes) selon la direction du vent, pour la vallée de la Senne. La colonne 'toutes directions' donne le rapport des quantités de précipitations mesurées pour les combinaisons de stations données par un chiffre de 1 à 4 (cf. sous le tableau pour le détail des combinaisons des stations) en considérant toutes les directions de vent (rapport 'non directionnel'). Les colonnes suivantes indiquent si le rapport, pour une fourchette de directions de vent centrée sur la direction indiquée, est inférieur, supérieur ou égal au rapport non directionnel. Les conventions sont les suivantes :

'=' signifie que le rapport directionnel est égal au rapport non directionnel (à $\pm 1,5\%$ près)

'-', '--' ou '---' signifie que le rapport directionnel est inférieur au rapport non directionnel (jusqu'à $\pm 5,5\%$ près pour '-', $\pm 10,5\%$ près pour '--', plus de $\pm 10,5\%$ près pour '---')

+', '++' ou '+++' signifie que le rapport directionnel est supérieur au rapport non directionnel (jusqu'à $\pm 5,5\%$ près pour '+', $\pm 10,5\%$ près pour '++', plus de $\pm 10,5\%$ près pour '+++')

Sous le symbole de chaque direction de vent est indiqué le nombre d'épisodes pluvieux correspondant à la direction concernée.

SENNE/PLUIES	toutes directions	SO	O	NO	N	NE	E	SE	S
Stations	47	21	3	3	1	2	1	1	15
1	106,0	=	---	++	+	=	+++	=	=
2	100,2	=	--	+++	+++	--	++	-	-
3	95,0	-	--	++	++	+++	+++	++	=
4	89,9	-	=	+++	+++	+++	+++	+	=

1 = Avant-Port / Ganshoren

2 = Avant-Port / Semence

3 = Nord / Ganshoren

4 = Nord / Semence

Table 14. Analyse qualitative des quantités de précipitations (sous forme d'averses, au moins partiellement) selon la direction du vent, pour la vallée de la Senne. On renvoie aux commentaires de la Table 13 pour l'explication des informations données dans la Table.

SENNE/AVERSES	toutes directions	SO	O	NO	N	NE	E	SE	S
Stations	21	9	8	1	2	0	0	0	1
1	82,6	++	---	+++	+++				+++
2	82,7	+++	---	+++	+				+++
3	75,3	++	--	--	++				+++
4	75,3	+++	--	+++	--				++

Les combinaisons de stations utilisées dans chacun des 4 cas définis sont les mêmes que celles données sous la Table 13.

Table 15. Analyse qualitative des quantités de précipitations (sous forme de pluies ou neiges stratiformes) selon la direction du vent, pour la vallée de la Woluwe. On renvoie aux commentaires de la Table 13 pour l'explication des informations données dans la Table.

WOLUWE/ PLUIES	toutes directions	SSO	OSO	ONO	NNO	NNE	ENE	ESE	SSE
Stations	60	32	11	3	2	1	2	2	7
1	94,6	-	-	---	+++	-	+++	++	=
2	99,6	-	--	+++	+++	+++	+++	+++	+
3	99,3	-	++	---	+	---	+++	++	-
4	104,6	-	++	++	-	-	++	+++	=

- 1 = Shopping Center / Boitsfort
- 2 = Shopping Center / Roodebeek
- 3 = Dépôt Tram / Boitsfort
- 4 = Dépôt Tram / Roodebeek

Table 16. Analyse qualitative des quantités de précipitations (sous forme d'averses, au moins partiellement) selon la direction du vent, pour la vallée de la Woluwe. On renvoie aux commentaires de la Table 13 pour l'explication des informations données dans la Table.

WOLUWE/ AVERSES	toutes directions	SSO	OSO	ONO	NNO	NNE	ENE	ESE	SSE
Stations	27	5	8	10	0	2	0	0	2
1	88,9	+++	+	--		+++			---
2	93,3	++	+	+		+++			---
3	99,9	-	++	=		++			---
4	104,9	-	+	+++		--			---

Les combinaisons de stations utilisées dans chacun des 4 cas définis sont les mêmes que celles données sous la Table 15.

Vallée de la Senne

Précipitations stratiformes

Commençons par examiner la Table 13 pour la vallée de la Senne dans le cas de précipitations sous forme de pluies ou de neiges de type stratiforme, c'est-à-dire relativement homogènes spatialement. La deuxième colonne ('toutes directions') montre tout d'abord que les quantités de précipitations, indépendamment de la direction du vent, sont plus importantes à la station Avant-Port qu'à la station Nord, et ce quelle que soit la station de référence que l'on choisisse (comparez les données des lignes '1' et '2' (pour Avant-Port), avec les données des lignes '3' et '4' (pour Nord)). Les différences sont de l'ordre de 10% sur l'ensemble des 47 épisodes pluvieux considérés (voir la répartition de ces épisodes en fonction de la direction du vent en dessous de chaque direction). Il faudra comprendre dans le futur l'origine de telles différences entre ces deux stations de vallée, difficiles explicables vu leur proximité. Si l'on examine maintenant les résultats indiqués dans chacune des colonnes liées à une direction du vent (c'est-à-dire la différence du rapport entre une station de vallée et une station de référence pour une direction de vent donnée par rapport à l'ensemble des situations indépendamment de la direction du vent), on obtient les principaux résultats indiqués ci-dessous.

Relativement significatifs :

- Il y a une légère diminution des précipitations à la station de vallée 'Avant-Port' lorsque le vent vient du SO, c'est-à-dire lorsqu'il souffle suivant l'axe de la vallée, mais pas de modification apparente pour l'autre station de vallée, la station 'Nord' (21 cas).
- Il n'y a pas de modification apparente lorsque les vents viennent du sud (15 cas).

Peu significatifs :

- Toujours suivant l'axe de la vallée, mais pour des vents venant de la direction opposée (NE), les résultats sont différents selon la station de vallée considérée : un renforcement des précipitations pour la station 'Nord' et un ex aequo ou une diminution pour la station 'Avant-Port' (2 cas).
- Pour des vents soufflant perpendiculairement à l'axe de la vallée et venant de la direction NO, il y a un renforcement des précipitations aux deux stations de vallée (3 cas). Pour la direction opposée (SE), les résultats sont différents selon la station de vallée considérée (1 cas).

En conclusion, de manière générale pour les précipitations stratiformes, il semble y avoir un renforcement des précipitations aux stations de vallée pour des vents provenant globalement du secteur NO à E et un affaiblissement pour des vents du secteur SE à O. Mais ces résultats devraient être confirmés en considérant un plus grand nombre de situations de précipitations.

Averses

Examinons maintenant le cas des précipitations sous forme d'averses pour la vallée de la Senne. La Table 14 donne pour ce type de précipitations le même genre d'informations que la Table 13. Il n'y a que 21 situations de précipitations qui ont pu être sélectionnées dans ce cas et aucune situation de vent dans le secteur NE à SE n'a été retenue. Une différence relativement similaire entre les quantités de précipitations mesurées aux deux stations de vallée s'observe encore dans le cas d'averses (cf. discussion de la Table 13). En examinant l'ensemble des colonnes de la Table, on obtient les principaux résultats indiqués ci-dessous.

Relativement significatifs :

- Il y a un renforcement des précipitations aux deux stations de vallée lorsque le vent vient du SO, c'est-à-dire lorsqu'il souffle suivant l'axe de la vallée (9 cas).
- Par contre, il y a une diminution pour les stations de vallée lorsque les vents viennent de la direction voisine O (8 cas).

Peu significatifs :

- Renforcement des précipitations aux stations de vallée lorsque les vents viennent du sud (1 cas).
- Pour des vents soufflant perpendiculairement à l'axe de la vallée et venant de la direction NO, il y a un renforcement des précipitations aux deux stations de vallée, sauf pour la station 'Nord' comparée à la station de référence Ganshoren (1 cas).

En conclusion, de manière générale, il semble y avoir un renforcement des précipitations aux stations de vallée pour des vents provenant globalement du secteur S à SO et des résultats variables suivant la station lorsque les vents viennent du secteur NO à N. Mais, à nouveau, ces résultats devraient être confirmés en considérant un plus grand nombre de situations de précipitations.

Vallée de la Woluwe

Précipitations stratiformes

Les Tables 15 et 16 donnent, pour la vallée de la Woluwe, les mêmes résultats que les Tables 13 et 14 pour la vallée de la Senne. Commençons par examiner la Table 15 dans le cas de précipitations sous forme de pluies ou de neiges de type stratiforme. Ici aussi, la deuxième colonne ('toutes directions') montre que les quantités de précipitations, indépendamment de la direction du vent, sont différentes entre les deux stations de vallée : plus importantes à la station du Dépôt de Tram qu'à la station du Shopping Center. Mais cette différence est moins marquée que dans le cas des stations de vallée pour la Senne (5% dans le cas présent, pour les 60 situations de précipitations considérées, contre 10% pour la Senne).

Si l'on examine maintenant les résultats indiqués dans chacune des colonnes liées à une direction du vent, on obtient les principaux résultats indiqués ci-dessous.

Relativement significatifs :

- Il y a une légère diminution des précipitations aux deux stations de vallée lorsque le vent vient du SSO, c'est-à-dire lorsqu'il souffle suivant l'axe de la vallée (32 cas).
- Lorsque le vent souffle de la direction OSO, il y a une diminution à la station du Shopping Center, mais un renforcement à l'autre station de vallée, celle du Dépôt de Tram (11 cas).
- Les résultats sont variables pour les vents de direction SSE (7 cas).

Peu significatifs :

- Pour des vents soufflant perpendiculairement à l'axe de la vallée et venant de la direction ESE, il y a un renforcement des précipitations aux deux stations de vallée (2 cas). Ce résultat se retrouve également pour les vents du secteur voisin ENE (2 cas). Pour la direction opposée perpendiculaire à la vallée (ONO), les résultats sont différents selon la station de référence considérée (3 cas).

En conclusion, pour la vallée de la Woluwe dans le cas de précipitations de type stratiforme, les tendances sont à une faible diminution des précipitations aux stations de vallée lorsque le vent souffle suivant l'axe de la vallée (du SSO vers le NNE) et un renforcement des précipitations en ces stations pour les vents de secteur ENE à ESE. Mais, comme dans le cas de la vallée de la Senne, ces résultats devraient être confirmés en considérant un plus grand nombre de situations de précipitations.

Averses

Examinons maintenant le cas des précipitations sous forme d'averses pour la vallée de la Woluwe. Il n'y a que 27 situations de précipitations qui ont pu être sélectionnées dans ce cas et aucune situation de vent dans les secteurs NNO et ENE à ESE n'a été retenue. Une différence plus importante que dans le cas des précipitations stratiformes entre les quantités de précipitations mesurées aux deux stations de vallée est observée dans le cas d'averses (de l'ordre de 10%). En examinant l'ensemble des colonnes de la Table, on obtient les principaux résultats indiqués ci-dessous.

Relativement significatifs :

- Renforcement des précipitations aux deux stations de vallée pour des vents de direction OSO (8 cas).
- Résultats variables suivant la station de référence pour la direction ONO, perpendiculaire à l'axe de la vallée (10 cas).

Peu significatifs :

- Lorsque le vent vient du SSE, diminution des précipitations aux stations de vallée (2 cas).
- Lorsque le vent vient du SSO, c'est-à-dire lorsqu'il souffle suivant l'axe de la vallée, la tendance est différente en fonction de la station de vallée considérée : renforcement pour la station du Shopping Center et faible diminution pour la station du Dépôt du Tram (5 cas). Toujours perpendiculairement à l'axe de la vallée, lorsque les vents soufflent de la direction opposée NNE, il y a généralement une tendance à un renforcement aux stations de vallée, mais pas pour la station du Dépôt de Tram par rapport à la station de référence Roodebeek (2 cas).

En conclusion, pour la vallée de la Woluwe, dans le cas de précipitations sous forme d'averses (hors orage), il n'y a pas de tendance qui dégage clairement. Mais, une fois de plus, ce résultat devrait être confirmé en considérant un plus grand nombre de situations de précipitations.

En conclusion de ce point, il faut insister sur le fait que les résultats préliminaires obtenus dans le présent travail sont à considérer avec précaution. Le trop faible nombre d'épisodes analysés ne permet pas de tirer de conclusions définitives sur le sujet de l'influence des vallées sur la répartition des précipitations. Les quelques résultats présentés qui semblent significatifs doivent être confirmés. De plus, comme cela a déjà été indiqué, la distribution des stations n'est pas très adaptée au traitement de cette problématique.

Des pistes possibles pour examiner la question plus en détail consisteraient à utiliser une période de données plus étendue que dans le présent marché (la période utilisée ici était de 45 mois). Les données horaires des pluviomètres de l'IBGE ont donc été examinées sur une période relativement courte et une sélection 'visuelle' des épisodes pluviométriques à retenir pour l'analyse a été effectuée en fonction des critères cités plus haut. Il serait intéressant d'essayer de mettre au point une classification automatique des épisodes de précipitations à considérer pour l'analyse en utilisant plus d'informations synoptiques (Zaventem et Uccle).

D'autre part, l'exploitation des estimations de précipitations fournies par les radars de Wideumont (Libramont) et de Zaventem, calibrées grâce aux données du réseau de surface de l'IBGE, et une autre piste pour poursuivre et affiner l'analyse de la répartition des précipitations en Région bruxelloise à l'échelle spatiale de 2-3 km environ.

Enfin, une approche de modélisation des précipitations en Région bruxelloise est, à terme, une autre piste intéressante pour essayer de comprendre les processus atmosphériques et les propriétés de surface qui pourraient être à l'origine de variations spatiales des quantités de précipitations (par exemple, les effets orographiques à relativement petite échelle au niveau de la Région bruxelloise).

5.3 Cartographie des précipitations

La période 01/01/1999-31/07/2009 a été sélectionnée pour l'obtention des cartes des précipitations sur le territoire de la Région bruxelloise aux échelles saisonnière et mensuelle. Il y a près de deux ans supplémentaires par rapport au marché de service précédent. Pour l'échelle annuelle, cette période se réduit à la période 1999-2008. Pour les autres périodes (saisonnières ou mensuelles), la période est variable : par exemple, pour le printemps (mars à mai), il s'agit de 1999-2009 et pour le mois de décembre, 1999-2008. Par abus de langage, et pour simplifier la présentation, nous parlerons toujours de la période 1999-2008.

La période a été choisie comme compromis entre la période la plus longue possible (pour avoir des moyennes les plus représentatives du point de vue climatique) et le nombre de stations en fonctionnement le plus important possible (pour permettre l'étude spatiale la plus pertinente). Douze stations du réseau de l'IBGE ont fonctionné du début à la fin de la période 1999-2008. De ces douze stations, nous avons exclu la station de Senne Viangros en raison du déficit anormalement élevé qu'elle présente (cf. le point 5.1). Ces onze stations sont représentées à la Figure 1 de l'annexe 3.

Pour l'obtention des cartes de précipitations, les valeurs moyennes aux stations (mensuelles, saisonnières et annuelles) ont d'abord été calculées sur la période retenue. La moyenne consiste à diviser le cumul total par le nombre d'éléments ayant servi à calculer ce cumul. Par exemple, le cumul estival moyen s'obtient en divisant le cumul total estival par le nombre d'étés disponibles sur la période.

Il faut signaler que la période retenue pour le calcul des moyennes inclut les deux années les plus pluvieuses depuis le début des relevés réguliers à Bruxelles en 1833 : en 2001, il est tombé 1088,5 mm sur l'année à Uccle (station IRM) et en 2002, 1077,8 mm. À Uccle, la moyenne annuelle sur la période 1999-2008 est de 881,6 mm, soit près de 8% de plus que sur la période standard de 30 ans retenue actuellement pour définir les normales climatologiques : sur la période 1971-2000, la moyenne des précipitations annuelle à Uccle n'a atteint que 820,3 mm. Après 2002, à Uccle, les précipitations annuelles sont redevenues plus « normales » : en moyenne, sur la période 2003-2008, il est tombé 815 mm.

En conséquence, pour que la cartographie présentée donne non seulement la variation spatiale du champ de précipitations, mais également des valeurs quantitatives représentatives du climat pluviométrique de Bruxelles, les cumuls relevés aux stations IBGE sur la période 1999-2008 ont été modifiés par le rapport des précipitations totales mesurées à Uccle sur la période 1971-2000 et celles mesurées sur la période 1999-2008 (soit un facteur $0,9305 = 820,3 \text{ mm} / 881,6 \text{ mm}$). Cette calibration a été appliquée aux cumuls mensuels, saisonniers et annuels. Les valeurs moyennes calibrées aux différentes stations sont données à la Table 3 de l'annexe 3.

Nous avons fait le choix de ne pas lisser les valeurs comme cela avait été fait lors du Marché de services précédent. Ce lissage avait été motivé pour éviter des cercles concentriques autour des stations. Cet effet avait été jugé indésirable car la cartographie décrit un phénomène qui doit être indépendant de l'échantillonnage spatial au niveau des stations. La méthode d'interpolation choisie (spline) fournit un résultat satisfaisant sans effet « stations », rendant inutile l'étape de lissage.

Finalement, les cartes elles-mêmes sont obtenues en interpolant spatialement les valeurs calibrées aux stations. L'interpolation a été calculée à l'aide du logiciel Arcview. Nous avons opté pour une interpolation de type spline. Celle-ci nous semblait plus adaptée que l'autre type d'interpolation proposé par le logiciel (consistant à calculer, pour chaque point d'une grille régulière, une moyenne pondérée par l'inverse du carré de la distance des valeurs ponctuelles aux

stations) et ce, pour deux raisons. D'une part, une comparaison entre les deux types de méthodes a révélé que le gradient de précipitation apparaissait plus clairement avec la méthode spline, et d'autre part, d'un point de vue théorique, cette méthode est particulièrement adaptée pour estimer des fonctions qui varient spatialement de manière continue et progressive, ce qui est le cas pour les cumuls mensuels, saisonniers ou annuels de précipitations.

La méthode d'interpolation de type spline consiste à estimer une surface lisse qui passe exactement par les points de mesure et dont la courbure est minimale. Le lecteur intéressé trouvera plus d'informations par exemple dans les références suivantes : David et al.(1999), Kincaid and Cheney (2002) et Shatzman (2002).

L'ensemble des cartes obtenues aux échelles mensuelles, saisonnières et annuelle est repris à l'annexe 3. Elles sont données dans la projection Lambert 72 (Grid Lambert 72) avec le datum correspondant (Belgian Datum 1972).

L'examen des cartes conduit à une série de constatations, notons qu'elles sont similaires à celle du précédent marché de service. On observe tout d'abord que l'été et l'hiver présentent les cumuls saisonniers les plus élevés (184 à 233 mm/saison), le printemps étant la saison où il pleut le moins (146 à 181 mm/saison). Au niveau mensuel, les cumuls les plus importants sont observés durant les mois de juillet et août (69 à 93 mm/mois) alors que le mois le plus sec est le mois d'avril (40 à 52 mm/mois). Il est intéressant de noter que tous ces résultats sont similaires à ceux observés à la station centrale de l'IRM à Uccle.

Mais le résultat principal qui ressort de l'examen des cartes est le gradient de précipitations dirigé du nord-ouest au sud-est sur le territoire de la Région bruxelloise. On le retrouve sur la plupart des cartes. La figure annuelle de l'annexe 3 illustre ce résultat à l'échelle annuelle et il est également bien visible pour les quatre saisons. Nous avons vu au point précédent que ce gradient est relié à l'orographie de la Région bruxelloise. Ce gradient est également visible pour la plupart des mois.

Une étude détaillée des pluies par temps d'orage dans la Région bruxelloise pourrait apporter des indications utiles sur le type de répartition de ces pluies. En particulier, il semble que le bassin de la Woluwe subisse des précipitations de ce type relativement plus importantes que la plupart des autres régions.

Il faut noter que l'analyse effectuée ici ne concerne que les cumuls de précipitations, indépendamment de la fréquence de celles-ci et de leur intensité. À partir du nombre de jours de précipitations, on peut par exemple calculer les intensités journalières moyennes. Cela montrait, notamment, que si les cumuls hivernaux et estivaux sont en moyenne relativement similaires, il n'en est pas de même des intensités journalières moyennes durant ces saisons. Ainsi à la station de l'IRM à Uccle, sur la période 1999-2006, les intensités journalières estivales sont en moyenne plus importantes de 30% par rapport aux intensités journalières hivernales.

6 Mesure pluviométriques

Dans ce chapitre consacré aux mesures pluviométriques, nous ferons une synthèse à propos de deux sujets. Nous présenterons d'une part les résultats de mesures pluviométriques comparatives menées à Uccle et, d'autre part, nous introduirons les réseaux pluviométriques opérationnels existants sur le territoire de Bruxelles-Capitale et dans la région environnante. Nous discuterons également brièvement de la question de la densité optimale d'un réseau pluviométrique.

6.1 Comparaison de pluviomètres à Uccle

Nous présentons ici une synthèse des mesures comparatives entre pluviomètres effectuées à l'IRM depuis juin 2009. La station principale de l'IRM à Uccle a été choisie comme référence. Les mesures de précipitations y sont effectuées à l'aide du pluviomètre manuel standard de l'Institut, développé au début des années 1950 et utilisé dans le réseau climatologique depuis cette période. Ce pluviomètre, appelé le P50 (cf. plus loin), est relevé tous les matins à 8h et donne le cumul des précipitations tombées sur les dernières 24 heures (de 8h du matin la veille du relevé à 8h le jour du relevé).

De leur côté, les appareils de mesure automatique des précipitations ont connu ces dernières années une évolution importante. De plus en plus, le choix se porte aujourd'hui sur des instruments qui mesurent directement le poids des précipitations pour en déterminer la quantité. Ces appareils sont non seulement plus précis de manière générale que les anciens pluviomètres à augets basculants, mais également beaucoup plus simples à entretenir.

En 2004-2005, une étude comparative de pluviomètres automatiques en laboratoire a été effectuée à l'initiative de l'OMM, l'Organisation Météorologique Mondiale (Lanza *et al.*, 2005 ; Lanza and Stagi, 2008). Il ressortait de cette étude que le pluviomètre automatique OT1 de la firme allemande Ott était l'un des meilleurs de sa catégorie. En particulier, il répondait au critère de précision de 2% souhaité par l'OMM pour les cumuls journaliers. C'est pourquoi, en décembre 2004, l'IRM a installé un OT1 dans le parc climatologique à Uccle et a commencé des mesures comparatives entre cet appareil et d'autres instruments. Au bout de quelques mois, on a pu conclure que le pluviomètre OT1 était effectivement un appareil précis et robuste, même si son temps de réponse aux hautes intensités de pluie est de l'ordre de 10 minutes, ce qui est exagéré selon les normes de l'OMM. L'IRM a ensuite installé ce type d'instrument dans ses 14 stations météorologiques automatiques en remplacement des anciens pluviomètres à augets. La qualité du OT1 a encore été reconnue à l'occasion d'une campagne comparative de pluviomètres automatiques in situ (en 2007-2009, en Italie) organisée sous l'égide de l'OMM, à la suite de l'étude comparative en laboratoire mentionnée ci-dessus (WMO, 2009).

Cependant, fin 2008, la firme Ott a abandonné la fabrication du OT1 et lancé sur le marché un nouvel instrument, le OT2, basé sur le même principe de mesure que son prédécesseur, mais développé pour réduire le prix d'achat de l'instrument et pallier au problème du temps de réponse exagéré du OT1. Début 2009, l'IRM a acheté deux pluviomètres OT2 et les a installés dans les parcs de mesures en mai à des fins de comparaisons. Très rapidement, il est apparu manifeste que si le temps de réponse de l'appareil était meilleur que précédemment (cf. Table 1), par contre les quantités de précipitations étaient généralement sous-estimées, avec des déficits importants sur les cumuls journaliers, régulièrement au-delà de 10% par rapport au P50. La firme Ott a été informée de ce problème et examine la question. Elle promet la livraison d'un nouveau software devant résoudre le biais systématique (qui semble plus particulièrement lié au traitement de la mesure en cas de précipitations faibles). Si une solution satisfaisante n'est pas trouvée, il faudra

en conclure que le Ott de type 2 (comme le OT2) ne convient pas pour des mesures suffisamment précises dans un réseau pluviométrique opérationnel.

Table 1. Exemple typique de la réponse temporelle des OT1 et des OT2. On donne ici les quantités de précipitations mesurées par pas de 10 minutes le 10 juin 2009 entre 15h20 et 21h00 (TU). Les deux premiers appareils sont dans le parc climatologique et les trois suivants dans le parc synoptique. On a relevé en bleu les débuts et les fins de trois périodes pluvieuses qui illustrent les temps de réponse différents entre les OT1 (plus lents) et les OT2 (plus rapides). On remarque aussi que le cumul sur la période est très similaire entre les trois appareils de type OT1 (OT1, SYN et OT1sol) et plus élevé que celui des appareils de type OT2 (OT2 et OT2sol), très similaires entre eux également.

Date	OT1	OT2	SYN	OT1sol	OT2sol
10/06/2009 15:30	0	0	0	0	0
10/06/2009 15:40	0	0.02	0	0	0.01
10/06/2009 15:50	0.08	0.2	0.03	0	0.16
10/06/2009 16:00	0.34	0.27	0.23	0.24	0.32
10/06/2009 16:10	0.3	0.38	0.27	0.29	0.36
10/06/2009 16:20	0.47	0.39	0.41	0.43	0.41
10/06/2009 16:30	0.32	0.33	0.41	0.45	0.32
10/06/2009 16:40	0.36	0.22	0.34	0.33	0.25
10/06/2009 16:50	0.13	0.14	0.24	0.23	0.13
10/06/2009 17:00	0.19	0.2	0.13	0.15	0.19
10/06/2009 17:10	0.15	0.12	0.2	0.21	0.13
10/06/2009 17:20	0.1	0.04	0.16	0.1	0.03
10/06/2009 17:30	0.03	0.02	0.03	0.06	0.01
10/06/2009 17:40	0	0	0	0	0
10/06/2009 17:50	0	0.08	0.03	0	0.06
10/06/2009 18:00	0.14	0.21	0.07	0.07	0.18
10/06/2009 18:10	0.39	0.5	0.22	0.23	0.5
10/06/2009 18:20	0.41	0.31	0.52	0.5	0.33
10/06/2009 18:30	0.27	0.16	0.33	0.33	0.19
10/06/2009 18:40	0.09	0.02	0.15	0.18	0.04
10/06/2009 18:50	0.04	0.15	0.03	0.03	0.13
10/06/2009 19:00	0.41	0.54	0.19	0.17	0.52
10/06/2009 19:10	0.47	0.38	0.52	0.52	0.4
10/06/2009 19:20	0.32	0.17	0.4	0.38	0.19
10/06/2009 19:30	0.04	0.02	0.15	0.17	0
10/06/2009 19:40	0	0	0	0	0
10/06/2009 19:50	0	0.1	0	0	0.08
10/06/2009 20:00	0.16	0.1	0.11	0.08	0.12
10/06/2009 20:10	0.09	0.13	0.1	0.15	0.11
10/06/2009 20:20	0.1	0.06	0.14	0.1	0.07
10/06/2009 20:30	0.03	0.01	0.06	0.06	0
10/06/2009 20:40	0.03	0.01	0	0	0.01
10/06/2009 20:50	0	0	0	0.03	0
10/06/2009 21:00	0	0	0	0	0
cumul	5.46	5.28	5.47	5.49	5.25
	OT1	OT2	SYN	OT1sol	OT2sol

Pour la présente étude, la période des mesures comparatives couvre sept mois, elle s'étend du 01/06/2009 au 31/12/2009. La comparaison repose essentiellement sur des cumuls mensuels puisque l'objectif principal de la présente étude consistait à détecter d'éventuels biais systématiques sur les cumuls mesurés par les différents appareils. Plusieurs pluviomètres ont été utilisés pour la comparaison, ils sont situés sur deux sites de mesures espacés d'une centaine de mètres : le parc climatologique et le parc synoptique, le premier est plus 'fermé' que le second :

Dans le parc climatologique (cf. Figure 18) :

- Le **P50, appareil manuel** de référence de l'IRM, dont le contenu est relevé tous les jours à huit heures du matin, heure officielle. Le pluviomètre proprement dit (entonnoir + bouteille) est entouré d'un cône de Nipher pour atténuer l'influence du vent sur le captage des précipitations. Cet appareil délivre donc uniquement des cumuls sur vingt-quatre heures. La quantité d'eau dans la bouteille est mesurée à l'aide d'une éprouvette finement graduée. En cas de précipitations neigeuses, le pluviomètre (entonnoir et bouteille) est remplacé par un nivomètre de hauteur équivalente dont on laisse fondre lentement le contenu avant la mesure à l'éprouvette pour obtenir l'équivalent en eau liquide.
- Le **PM, appareil automatique** de marque Précis Mécanique, délivrant des données horaires et géré par le SPW/Sethy. Le principe de mesure repose sur des **augets basculants**. L'appareil n'est pas entouré d'une protection au vent. Il est calibré pour une intensité de 18 mm/h. L'entretien consiste en un suivi de l'appareil in situ lors de tournées régulières sur le terrain, en principe tous les trois mois. Un remplacement du système de mesure proprement dit (augets) est aussi effectué en principe tous les ans ; un nouveau système calibré en laboratoire est installé. Cet appareil est en fonctionnement à l'IRM depuis décembre 1999, sans problème particulier de mesure, sinon lorsqu'il neige puisqu'il n'est pas chauffé.
- Le **OT1, appareil automatique** du SPW/Sethy de marque Ott de type 1 (appareil en métal). Le principe de mesure repose sur la **pesée des précipitations**. Ce pluviomètre est entouré d'un cône de Nipher semblable à celui du P50. Cet appareil est en fonctionnement à l'IRM depuis le 20/12/2004 sans problème ni entretien particulier ; il faut juste le vider une ou deux fois par an au maximum et mettre un antigel en hiver.
- Le **OT2, appareil automatique** de l'IRM de marque Ott de type 2 (appareil en plastique). **Appareil à pesée**. Ce pluviomètre, trop large, n'est pas entouré d'un cône de Nipher. Il est en fonctionnement à l'IRM depuis juin 2009 sans problème ni entretien particulier ; il faut juste le vider une ou deux fois par an au maximum et mettre un antigel en hiver.

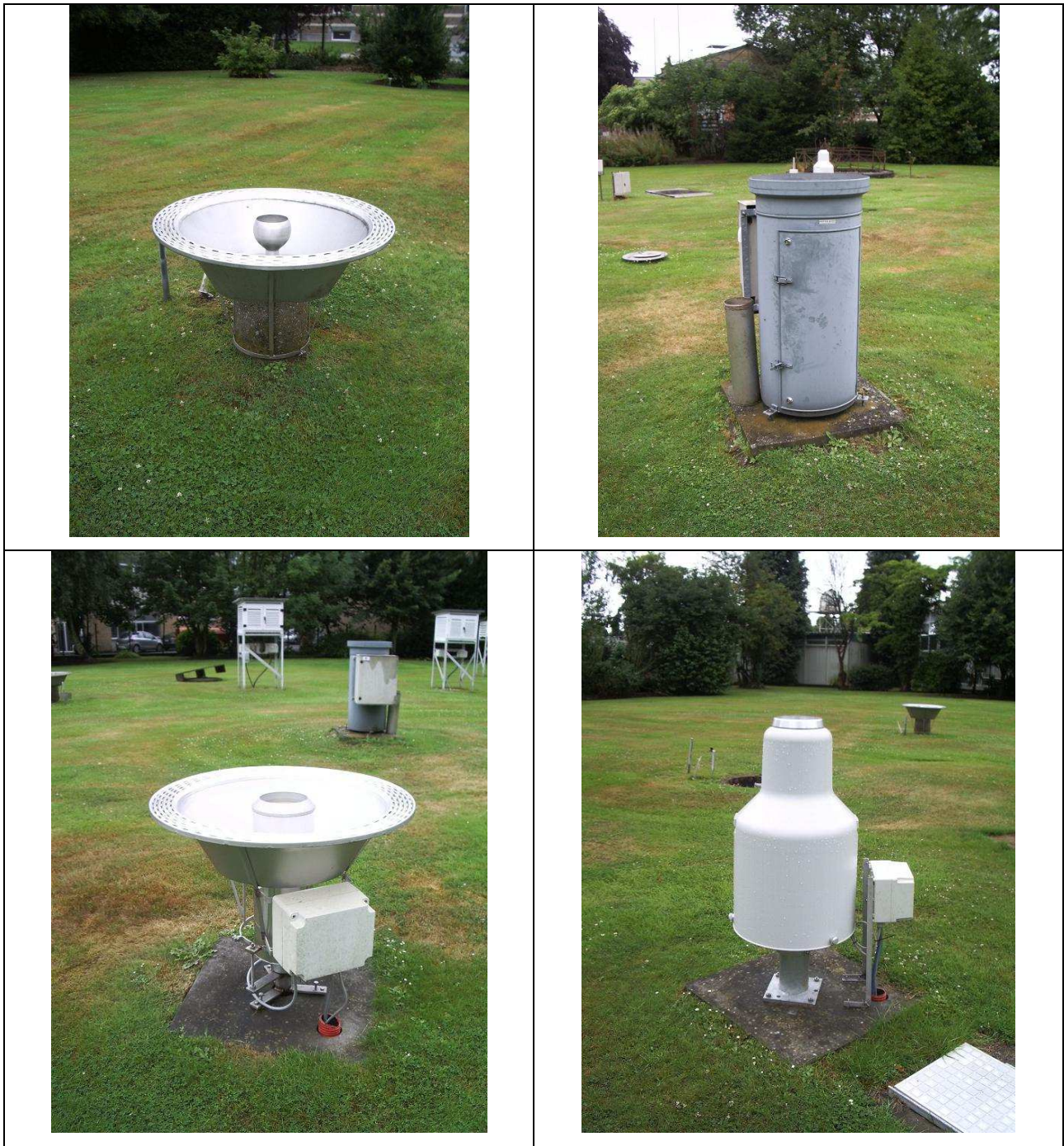


Figure 18. Pluviomètres dans le parc climatologique : de gauche à droite et de bas en haut : le P50 manuel (avec cône de Nipher), le PM (à augets, sans cône de Nipher), le OT1 (à pesée, avec cône de Nipher) et le OT2 (à pesée, sans cône de Nipher).



Figure 19 : Pluviomètres dans le parc synoptique : de gauche à droite et de bas en haut : le OT1sol (à pesée, similaire au OT1 mais sans cône de Nipher), le SYN (à pesée, avec cône de Nipher, similaire au OT1) et le OT2sol (à pesée, sans cône de Nipher, similaire au OT2).

Dans le parc synoptique (cf. Figure 19) :

- Le **SYN, appareil automatique** de l'IRM de marque Ott de type 1 (appareil en métal). **Appareil à pesée.** Ce pluviomètre est entouré d'un cône de Nipher semblable à celui du P50. Cet appareil est en fonctionnement à l'IRM depuis février 2009 sans problème ni entretien particulier ; il faut juste le vider une ou deux fois par an au maximum et mettre un antigel en hiver. Il est tout à fait similaire au pluviomètre OT1 installé dans le parc climatologique.
- Le **OT1sol, appareil automatique** de l'IRM de marque Ott de type 1 (appareil en métal). **Appareil à pesée** similaire au OT1 et SYN. L'alimentation électrique provient de panneaux solaires. Le cône de Nipher a été retiré le 09 juillet 2009 pour essayer de mesurer l'impact de celui-ci sur les mesures. Cet appareil est en fonctionnement à l'IRM depuis début 2009, mais avec beaucoup de problèmes d'alimentation. Dès lors, ses résultats ne seront pas utilisés explicitement dans le présent rapport.
- Le **OT2sol, appareil automatique** de l'IRM de marque Ott de type 2 (appareil en plastique). **Appareil à pesée** similaire au OT2 installé dans le parc climatologique. Appareil sans cône de Nipher. Ce pluviomètre est en fonctionnement à l'IRM depuis février 2009, mais avec beaucoup de problèmes d'alimentation, comme le OT1sol. Dès lors, ses résultats ne seront pas utilisés explicitement dans le présent rapport.

En résumé, quatre types d'appareils interviennent donc dans la comparaison : un appareil manuel (P50), un appareil à augets basculants (PM) et cinq appareils Ott à pesée, de type 1 (OT1, SYN, OT1sol) ou de type 2 (OT2, OT2sol). L'appareil manuel est choisi comme référence puisqu'on en connaît particulièrement bien les particularités. Les appareils à augets basculants sont moins onéreux que les appareils à pesée mais demandent un entretien et un réglage réguliers d'où des frais de maintenance plus importants. Les appareils à pesée sont plus onéreux à l'achat mais demandent beaucoup moins de suivi. Lorsque ce type d'appareil montre des signes de faiblesse, le système de pesée doit être simplement remplacé. Le Ott de type 2 est moins cher que le Ott de type 1 ; d'après le constructeur, cette diminution des coûts provient principalement d'une conception moins onéreuse du système de pesée. Le cône de Nipher utilisé traditionnellement par l'IRM ne peut pas être adopté pour le OT2, vu la largeur trop importante de cet appareil. Le OT2 délivre aussi plusieurs sorties de précipitations à sémantique proche.

L'annexe 4 fournit les quantités journalières relevées aux différents pluviomètres entre le 01/06/2009 et le 31/12/2009, période sur laquelle les comparaisons ont été faites. Dans cette annexe, on a indiqué en jaune les dates où le cumul journalier d'au moins un appareil semble 'curieux' (trop faible), ainsi que la période de neige en décembre durant laquelle les mesures sont toujours plus délicates (à l'appareil manuel comme aux autres). Ensuite, on a comparé les données journalières des différents appareils en considérant deux ensembles de données : (1) on prend en compte toutes les données (cumuls journaliers), (2) on élimine les dates pour lesquelles le cumul d'au moins un appareil semble vraiment trop faible. Dans le sous-ensemble (2), on a aussi éliminé les dates correspondant à la période de neige en décembre pour laquelle le PM (à augets et non chauffé) a manifestement mesuré globalement trop peu de précipitations (sans qu'une 'compensation' normale ne se produise dans les jours qui suivent les précipitations neigeuses).

Nous examinerons ici les résultats des mesures présentés à la Table 2. Pour chacun des deux ensembles de données signalés plus haut (selon que l'on a ou non filtré certaines données), la Table 2 donne les cumuls mensuels et les cumuls sur deux 'périodes' particulières : sur la période

totale de juin à décembre 2009 et sur la période de juin à novembre 2009, c'est-à-dire les cumuls pour les mois sans neige sur la période totale. La partie droite de la table donne aussi les rapports entre les cumuls de différents pluviomètres

Table 2. Cumuls mensuels entre juin 2009 et décembre 2009 et sur différentes périodes des différents pluviomètres comparés. On donne aussi dans la partie droite du tableau les rapports entre certains appareils.

Les deux parties du tableau correspondent aux données journalières conservées pour l'analyse (cf. l'annexe 4 pour les détails des données) :

(1) : tous les cumuls journaliers bruts ont été conservés.

(2) : données journalières filtrées : élimination de dates avec valeurs journalières aberrantes (0 à un appareil) + dates avec un problème pour au moins un pluviomètre (valeur(s) manifestement trop faible(s) par rapport aux autres) + dates avec neige (si trop peu de compensation les jours suivants).

Outre les valeurs mensuelles, les cumuls sont également indiqués sur deux 'périodes' :

- sur les mois de juin à novembre 2009, c'est-à-dire les mois pendant lesquels les précipitations n'ont pas du tout été neigeuses (au moins en partie) (ligne 'total hors neige'),
- sur toute la période de juin à décembre 2009 (ligne 'TOTAL').

(1)	P50	PM	OT1	OT2	SYN	PM/P50	OT1/P50	OT2/P50	SYN/P50	OT1/OT2	OT1/SYN
juin-09	64.5	65.1	61.8	25.3	61.0	1.009	0.959	0.393	0.945	2.441	1.014
juil-09	73.1	75.6	70.7	62.3	69.2	1.034	0.967	0.852	0.947	1.135	1.021
août-09	34.7	36.5	29.9	23.6	33.1	1.052	0.861	0.679	0.955	1.268	0.901
sept-09	29.1	30.9	26.1	23.8	28.8	1.062	0.896	0.819	0.991	1.094	0.904
oct-09	105.0	106.0	102.7	95.7	102.7	1.010	0.978	0.911	0.978	1.073	1.000
nov-09	98.0	106.2	93.6	88.2	90.4	1.084	0.955	0.900	0.922	1.061	1.035
déc-09	80.8	69.9	80.7	71.7	79.4	0.865	0.998	0.888	0.983	1.125	1.016
total hors neige	404	420	385	319	385	1.039	0.951	0.788	0.953	1.207	0.999
TOTAL	485	490	465	391	465	1.010	0.959	0.805	0.958	1.191	1.002

(2)	P50	PM	OT1	OT2	SYN	PM/P50	OT1/P50	OT2/P50	SYN/P50	OT1/OT2	OT1/SYN
juin-09	27.8	28.8	26.6	24.7	26.9	1.036	0.956	0.889	0.969	1.076	0.987
juil-09	73.1	75.6	70.7	62.3	69.2	1.034	0.967	0.852	0.947	1.135	1.021
août-09	22.4	24.2	21.6	20.0	21.5	1.080	0.965	0.894	0.958	1.079	1.008
sept-09	21.9	23.1	20.6	18.5	20.7	1.055	0.939	0.843	0.947	1.114	0.992
oct-09	105.0	106.0	102.7	95.7	102.7	1.010	0.978	0.911	0.978	1.073	1.000
nov-09	94.1	102.4	93.1	87.9	90.0	1.088	0.989	0.934	0.956	1.059	1.034
déc-09	51.5	51.8	49.9	45.4	49.2	1.006	0.969	0.882	0.955	1.098	1.015
total hors neige	344	360	335	309	331	1.046	0.974	0.898	0.961	1.085	1.013
TOTAL	396	412	385	354	380	1.041	0.973	0.896	0.961	1.087	1.013

Examinons tout d'abord la partie (1) de la Table. Les cumuls donnés sont calculés à partir de tous les cumuls journaliers bruts (pas de filtrage). On observe tout d'abord que le PM (à augets, non chauffé) donne les cumuls mensuels les plus élevés, devant le P50 (manuel), sauf en décembre lorsqu'il a neigé. Sur l'ensemble de la période, le PM a mesuré 1% de plus que le P50. On remarque aussi que le OT2 (à pesée) donne toujours les cumuls les plus faibles. Le déficit de cet appareil est de 21,2% par rapport au P50 sur la période totale (ligne 'TOTAL') et de 20,4% si on ne considère pas le mois de décembre (ligne 'total hors neige'). Par rapport au OT1 (à pesée également), les déficits du OT2 sont respectivement de 16,0% et de 17,1%.

La dernière ligne de la partie (1) de la Table montre aussi que le OT1 et le SYN (des appareils à pesée strictement identiques, mais dans des parcs de mesures différents, distants d'une centaine de mètres) ont mesuré sur la période totale quasiment le même cumul (à 1 mm près), à moins de 5% du cumul du P50 (respectivement -4,1% et -4,2%).

Si l'on considère seulement les cumuls entre juin et novembre (ligne 'total hors neige'), on ne constate pas beaucoup de différences dans les résultats relatifs des différents pluviomètres par rapport aux résultats obtenus en considérant la période totale. L'écart entre le PM et le P50 est plus important (un excès de 3,9% du PM, pour un excès seulement de 1% si l'on rajoute le mois de décembre). Cela signifie, comme les cumuls mensuels le montrent, que le PM a tendance à mesurer moins par temps neigeux (lorsqu'il neige, le PM accumule la neige sans mesure et la récupération postérieure, lorsque le temps se radoucit, est insuffisante).

Comparons maintenant ces résultats avec ceux présentés dans la partie (2) de la Table. Ici, on a éliminé les jours, 22 au total, où au moins un appareil présentait un 'problème' jugé inhabituel (par rapport aux autres instruments). En laissant décembre de côté (10 jours supprimés), ce sont principalement des journées où les relevés du OT2 étaient 'curieux' (12 jours), mais aussi parfois du OT1 (4 jours) et du SYN (1 jour).

Sur la période totale (ligne 'TOTAL'), c'est toujours le PM qui mesure le cumul le plus important et l'écart avec le P50 a augmenté (+4,1%). Cela s'explique surtout par la suppression de l'épisode neigeux en décembre 2009 (10 jours supprimés) qui a conduit à un cumul partiel manifestement trop faible pour le PM. Pour les autres appareils, comme on pouvait s'y attendre vu les causes du filtrage, les écarts se réduisent par rapport au P50. Le OT2 ne montre plus qu'un déficit de 11,4%, alors que ceux du OT1 et de SYN n'atteignent plus, respectivement, que 2,7% et 3,9%. Contrairement aux cumuls obtenus avec les données brutes, cette fois le OT1 mesure significativement plus que le SYN sur l'ensemble de la période, même si l'écart reste faible, du fait de la suppression de 4 jours pour lesquels le cumul mesuré par le OT1 était manifestement (et curieusement) trop faible. L'écart entre le OT1 et le OT2 se réduit également spectaculairement et n'atteint plus que 7,8%, ce qui reste malgré tout très important et illustre le déficit systématique des mesures du OT2 (même en ayant supprimé les cas les plus flagrants).

Enfin, si l'on considère seulement les cumuls entre juin et novembre (ligne 'total hors neige'), on ne constate pratiquement pas de différences dans les résultats relatifs des différents pluviomètres par rapport aux résultats obtenus en considérant la période totale. Cela s'explique par le fait que 10 jours en décembre ont déjà été supprimés lors du filtrage des jours « à problème » et que, les autres jours de décembre, les appareils se comportent les uns par rapport aux autres de manière habituelle.

En conclusion, nous pouvons dire que les Ott de type 1 (OT1 et SYN) montrent des résultats très comparables entre eux. Leur déficit à l'échelle mensuel est compris entre 1% et 6% par rapport au P50 (si on ne tient pas compte de dates où le OT1 présente quelques valeurs 'curieuses' et le SYN une valeur suspecte). Le Précis Mécanique du SPW/Sethy donne les cumuls les plus élevés, au-dessus des valeurs du P50, sauf en période neigeuse (en décembre) où la compensation lors du redoux et de la fonte de la neige dans l'appareil ne suffit manifestement pas à récupérer le déficit accumulé par rapport au P50 et aux appareils à pesée lors des précipitations hivernales. Enfin, le OT2, présenté comme une alternative au OT1 que la firme Ott ne commercialise plus, ne donne pas les résultats escomptés. Il présente des déficits systématiques par rapport aux autres appareils. Mise au courant, la firme Ott cherche à solutionner le problème qui semble surtout lié à la prise en compte insuffisante des faibles précipitations par le software de l'instrument.

Pour terminer, signalons encore que les quelques résultats parcellaires de comparaison dans le parc synoptique entre le OT1sol (sans cône de Nipher) et le SYN (appareil identique avec cône de Nipher) permettent de dire que cet écran de protection n'influence que de manière secondaire les mesures (cela joue en général sur 2 ou 3 %); cette influence pourrait cependant être plus importante par temps de neige mais cela n'a pas pu être analysé suffisamment jusqu'ici. Ces résultats laissent penser que le déficit du OT2 (par rapport au OT1) n'est pas à attribuer principalement à l'absence de cône de Nipher autour du OT2. Cette affirmation est d'autant plus vraisemblable que le site de mesures où se trouvent les OT1 et OT2 est un site relativement fermé et donc relativement bien abrité du vent et de son influence négative (déficit) sur les mesures de précipitations.

6.2 Réseaux pluviométriques dans la région de Bruxelles-Capitale

Le but de ce point est de fournir des pistes de réflexion sur la densité optimale de pluviomètres en Région bruxelloise.

La liste des réseaux en Région bruxelloise dont nous disposons des coordonnées des stations est la suivante (ces réseaux sont repris à la Table 13 et à la Figure 20) :

- IRM/Climatologie : stations climatologiques de l'IRM. Appareil : P50. Appareil manuel mesurant les précipitations sur 24 heures.
- IRM/Automatique : station automatique de l'IRM. Appareil automatique, à auget basculants jusqu'au 11 février 2009, de type OTT (version 1 en métal) ensuite.
- AWZ : Administratie Waterwegen Zeewezen. Maintenant AWL : Afdeling Waterbouwkundig Laboratorium. Aussi appelé HIC. Appareils de type OTT ou DIDCOT (à auget basculant).
- IVA-VMM : Vlaamse Milieu Maatschappij (anciennement Aminal). Appareil de type OTT ou à augets basculants (kantelbak en néerlandais).
- MET/Sethy : Ministère de l'Équipement et des Transport wallon. Appareils automatiques Précis Mécanique à auget basculant (PMSethy).
- IBGE-BIM, organisme d'intérêt public, est l'opérateur chargé du contrôle des captages bruxellois d'eau destinée à la consommation humaine.
- IBDE, intercommunale, chargée de l'acheminement de l'eau potable.
- SBGE, société anonyme de droit public, chargée de l'assainissement public des eaux résiduaires et la gestion et l'exploitation d'un réseau de mesures de débit et de pluviométrie.

Citons encore les réseaux suivants dont nous ne disposons pas les coordonnées des stations :

- CELINE – IRCEL, Cellule Interrégionale de l'Environnement.
- Vivaqua, intercommunale, chargée de la gestion des infrastructures relatives à l'eau potable.

La description de l'IBGE-BIM, de l'IBDE, de la SBGE et de Vivaqua s'inspire du moniteur belge du 17 février 2009.

Table 13 : Liste des stations à Bruxelles et dans ses alentours (rayon de 20 km). Remarque : à partir d'un inventaire sur le 10 juin 2009, les données d'Ukkel d'AWZ sont présentes, mais aberrantes, la station Neerijse d'IVA-VMM n'a pas de données.

NETWORK	CODE	NAME	ALTITUDE	COMMUNE
AWZ	G2380005	Hoeilaart-Groenendaal		
AWZ	T2650005	Denderleeuw		
AWZ	UKKL0005	Ukkel		
IBDE	30	Roodebeek		
IBDE	31	Watermaelbeek		
IBDE	32	Belliard		
IBGE-BIM	97	Anderlecht	22	
IBGE-BIM	103	Senne Viangros	21	
IBGE-BIM	201	Paelinckx	122	
IBGE-BIM	203	Nord	16	
IBGE-BIM	285	Avant-Port	16	
IBGE-BIM	286	Roodebeek	50	
IBGE-BIM	287	Semence	43	
IBGE-BIM	288	Viangros	21	
IBGE-BIM	291	Dépôt Communal Boitsfort	76	

IBGE-BIM	292	Dépôt de Tram	48	
IBGE-BIM	293	Shopping Center	42	
IBGE-BIM	296	Kinsendael	48	
IBGE-BIM	299	Ganshoren	29.1	
IRM/Automatique	6447	UCCLE	101	UCCLE-UKKEL
IRM/Climatologie	CL13	BRUSSEGEM	53	BRUSSEGEM
IRM/Climatologie	CL15	ASSE-TER-HEIDE	50	ASSE
IRM/Climatologie	FL23	KAPELLE-OP-DEN-BOS	9	KAPELLE-OP-DEN-BOS
IRM/Climatologie	FL40	DILBEEK	50	DILBEEK
IRM/Climatologie	FL53	LOT	32	BEERSEL
IRM/Climatologie	FS 1	UCCLE-UKKEL (OUVERT)	100	UCCLE-UKKEL
IRM/Climatologie	FS 3	UCCLE-UKKEL (FERME)	100	UCCLE-UKKEL
IRM/Climatologie	FS 6	ZAVENTEM	58	ZAVENTEM
IRM/Climatologie	FS 8	BRAINE-L'ALLEUD	96	BRAINE-L'ALLEUD
IRM/Climatologie	FS03	UCCLE-UKKEL (ANCIEN FERME)	100	UCCLE-UKKEL
IRM/Climatologie	FS17	UCCLE RESERVOIR	96	UCCLE-UKKEL
IRM/Climatologie	FS37	UCCLE VIVAQUA	100	UCCLE-UKKEL
IRM/Climatologie	FS43	LEEFDAAL	80	BERTEM
IRM/Climatologie	FS49	BUIZINGEN	85	HALLE
IRM/Climatologie	FS90	UCCLE-UKKEL AWS	101	UCCLE-UKKEL
IRM/Climatologie	FS99	UCCLE-UKKEL AWS2	100	UCCLE-UKKEL
IVA-VMM	P06	Liedekerke		LIEDEKERKE
IVA-VMM	P09	Sint-Pieters-Leeuw		SINT-PIETERS-LEEUEW
IVA-VMM	P13	Korbeek-Dijle		KORBEEK-DIJLE
IVA-VMM	P23	Lembeek		Lembeek
IVA-VMM	Pk243	Neerijse		NEERIJSE
MET/Sethy	18980015	Uccle	94	Uccle
SBGE	C04	Roodebeek		Woluwe-St-Lambert
SBGE	N02	Nord		Bruxelles
SBGE	N06	Broekbeek		Anderlecht
SBGE	N08	Hippocrate		Woluwe-St-Lambert
SBGE	P02	Ganshoren		Ganshoren
SBGE	P05	Dépôt Trams		Woluwe-St-Pierre
SBGE	P06	Centre Bruxelles		Bruxelles
SBGE	P07	Ecluse d'Anderlecht		Anderlecht
SBGE	P08	Maison forestière Paelinckx		Uccle
SBGE	P09	Kinsendael		Uccle
SBGE	P10	Semence		Molenbeek-St-Jean
SBGE	P11	Dépôt Communal		Watermael-Boitsfort
SBGE	P12	Maison forestière Voets		Auderghem
SBGE	P13	IRM		Uccle
SBGE	U24	Avant-Port		Bruxelles

Il n'est pas aisé de donner une réponse à la question de la densité optimale de pluviomètres. Les réseaux en Région bruxelloise sont d'origines diverses et à finalités diverses. Le type d'appareils utilisés et le protocole d'entretien et de contrôle de qualités varient aussi d'un réseau à l'autre.

Le réseau de l'IBGE a l'avantage d'être dense (1 station pour 12 km²) sur la Région bruxelloise. Il a aussi l'avantage d'avoir un historique débutant en 1992, sur lequel un contrôle de qualité (en cours) a été réalisé à partir de l'année 1999.

Quels sont les besoins de la Région de Bruxelles-Capitale en mesure de précipitations auxquels l'IBGE pourrait satisfaire ? En se basant sur les buts de mission de l'IBGE, on peut citer les éléments suivants : contrôle des nappes (un appareil serait suffisant), surveillance et étude des espaces verts, climatologie des précipitations en Région bruxelloise. Quels sont les objectifs que l'IBGE souhaiterait assigner à son réseau.

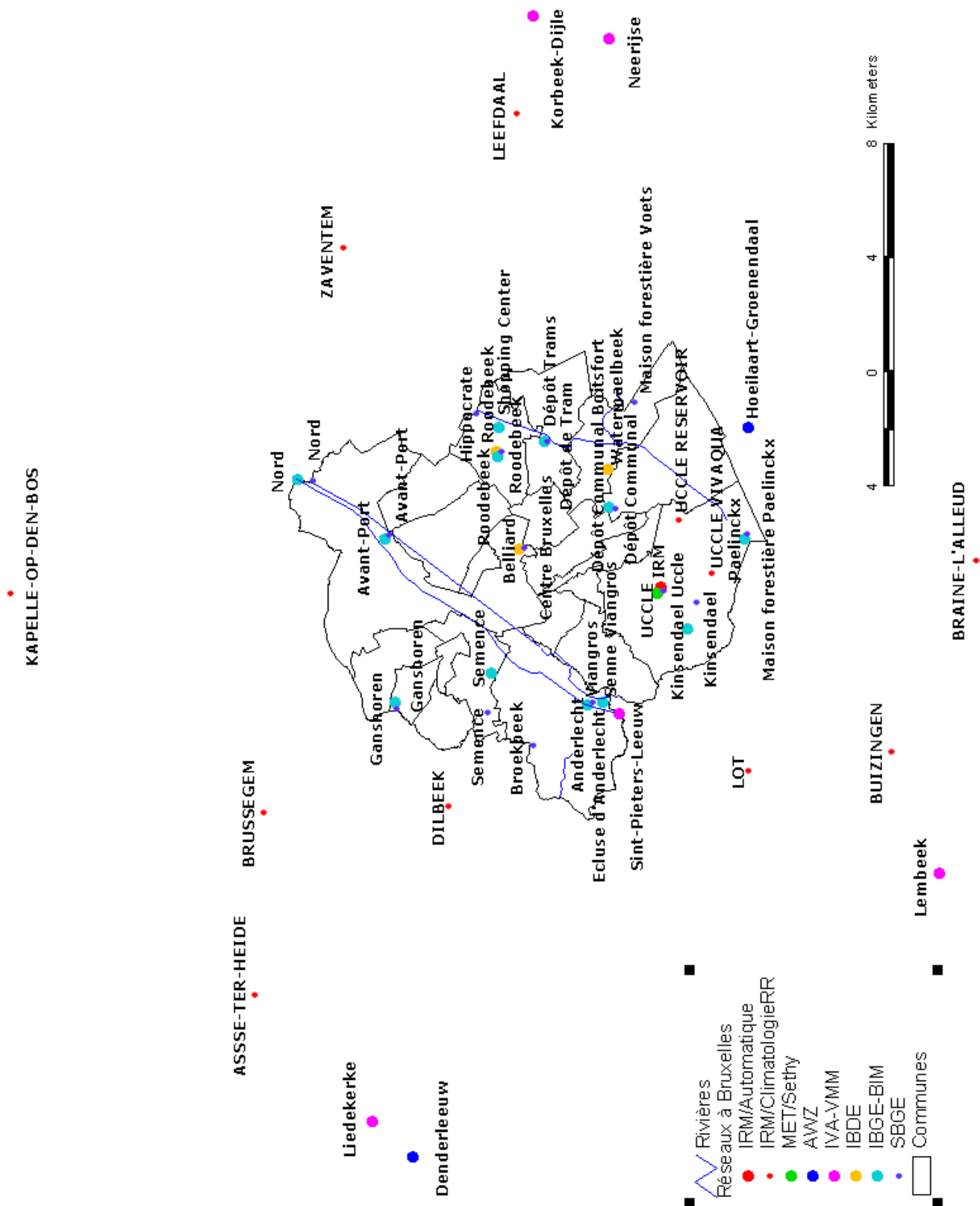


Figure 20 : Réseaux pluviométriques aux alentours de la Région bruxelloise.

En considérant l'ensemble des réseaux, et en particulier celui de l'IBGE, on constate un déficit de stations dans le nord de Bruxelles et dans le sud, dans la région de la Forêt de Soignes. Mais le sud est plus vallonné, ce qui pourrait aussi justifier une densité plus importante de pluviomètres, un relief plus accentué créant une plus grande hétérogénéité dans la répartition des pluies.

La présence de plusieurs appareils de réseaux différents et situés en un même endroit (Roodebeek) constitue en outre une opportunité de comparaison d'appareils et de réseaux de mesure.

Vu les faibles variations pluviométriques, les études climatologiques en Région bruxelloise imposent un réseau pluviométrique le plus homogène possible en termes d'appareils et de contrôle de qualité.

Les alternatives : maintenir le réseau comme il est avec changement ou non du type d'appareil, déplacer les appareils situés à côté d'autres appareils, investir dans des protocoles d'échanges de données pluviométriques avec d'autres institutions. L'avantage d'avoir ses propres données est que l'on maîtrise mieux la manière dont elles sont mesurées ainsi que le contrôle de qualité dont elles ont fait l'objet.

7 Micro-climatologie en Région bruxelloise

L'effet de l'urbanisation et du changement climatique sur le ruissellement en surface dans la Région de Bruxelles Capitale (RBC)

Une étude de cas en utilisant le nouveau schéma de surface SURFEX

(Voir aussi l'annexe 5 pour le document en anglais soumis pour publication dans *International Journal of Climatology* suite à la recherche accomplie)

7.1 Introduction

La micro-climatologie urbaine résulte des échanges entre les surfaces urbanisées et l'atmosphère. La présence des bâtiments peut modifier la structure de la couche limite atmosphérique (à 1 km près du sol) en altérant les champs de vent, température, humidité et de turbulence. Les processus physiques qui sont au cœur de cette micro-climatologie sont les bilans énergétiques et hydriques entre les surfaces urbaines et l'atmosphère.

Depuis une vingtaine d'années, les scientifiques se sont penchés sur ce problème, pour tenter de mieux comprendre les comportements énergétique et hydrique observés dans les villes. Ces études ont un intérêt majeur, d'une part dans l'analyse et la prévision des phénomènes (par exemple, le comportement des routes lors de forts épisodes de pluie) et d'autre part dans l'amélioration des aménagements en milieu urbain. Même si des processus similaires à ceux observés en milieu naturel interviennent en ville, ils n'agissent pas de la même manière ni avec la même intensité. En milieu urbain, le stockage de l'eau en surface et l'évaporation sont plus faibles qu'en milieu naturelle, par contre, le ruissellement de surface est beaucoup plus fort que celui produit par des couverts naturels.

L'objectif de cette étude est d'apporter une meilleure compréhension de l'impact de l'urbanisation sur le régime hydrologique des eaux pluviales en Région de Bruxelles Capitale (RBC).

7.2 SURFEX

Le modèle de surface SURFEX développé par le Centre National de Recherches Météorologiques (Météo-France) dans lequel le module TEB (Town Energy Balance) est spécifique aux applications en matière d'hydrologie urbaine sera utilisé en intégrant les données météorologiques représentatives de la RBC pour simuler les bilans d'eau et d'énergie en surface.

Ce module urbain représente la ville par une combinaison de trois types de surface à savoir les routes, les toits et les murs. Les apports d'eau sont les précipitations et la rosée tandis que les pertes sont l'évaporation et le ruissellement. Dans TEB, la gestion des réserves en eau pour les surfaces bâties est relativement simple. Il est admis que seuls la route et le toit peuvent intercepter de l'eau. Ces deux surfaces possèdent chacune un réservoir d'interception, caractérisé par un contenu en eau qui évolue en fonction des apports et des pertes, et par une capacité maximale

d'interception qui reste fixe (elle est habituellement fixé à 1 kg m^{-2} pour la route comme pour le toit). Les surfaces bâties sont supposées totalement imperméables, compte tenu des matériaux qui les constituent. Par conséquent, les mécanismes d'échange en eau se limitent à des échanges en surface. Les réservoirs se remplissent sous l'effet des précipitations et de la condensation éventuelle. Quand aux processus de puits, seuls interviennent les mécanismes d'évaporation et de ruissellement de surface. L'évaporation a lieu dès que le réservoir n'est plus vide, alors que le ruissellement ne se déclenche que lorsque la capacité maximale d'interception est dépassée.

Les résultats obtenus par TEB ont déjà été validés et confrontés à des mesures de terrain sur un site péri-urbain à Nantes (France). Cette étude de validation à permis d'améliorer la paramétrisation des mécanismes hydrologique qui n'étaient pas pris en compte dans la version originale de TEB : tout d'abord, par l'inclusion du processus d'infiltration d'eau dans la chaussée, et deuxièmement par la calibration des capacités maximales d'interception d'eau du toit et de la route (4 kg m^{-2} pour les routes et 0.5 kg m^{-2} pour les toits).

7.3 Evolution de l'urbanisation à la RBC

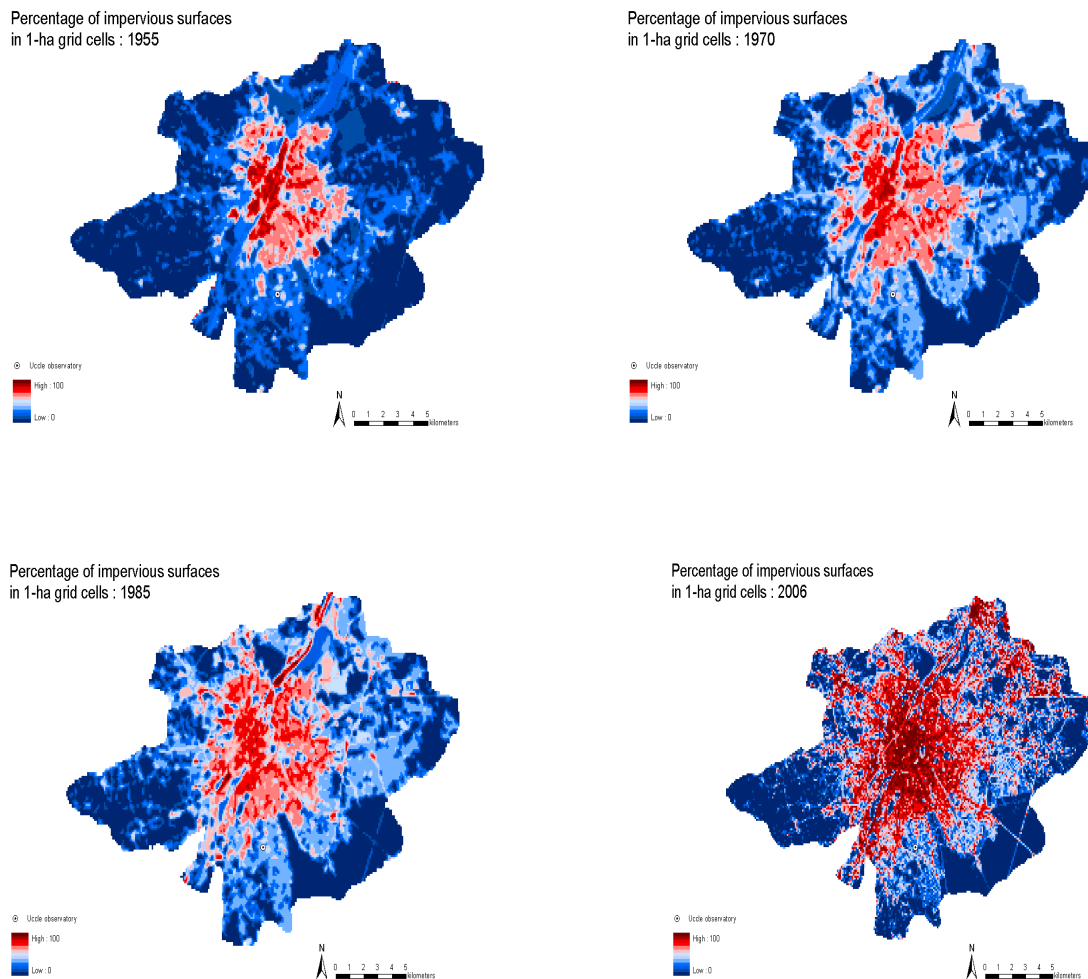


Fig.1. Evolution de l'évolution de la superficie imperméable entre 1955 et 2006 sur la Région de Bruxelles Capitale.

L'évolution historique des surfaces imperméables est obtenue à partir de l'étude de Vanhuysse et al. (2006). L'augmentation des surfaces imperméables est très importante depuis les années 1950 puisqu'elles passent de 26% en 1955 à 47% en 2006, presque le double.

	Surface imperméable (%)	Vegetation (%)
1955	26	74
1970	34	66
1985	39	61
2006	47	53

7.4 Simulations effectuées

Période historique

SURFEX est tournée sur une seule colonne "offline mode" du 1 Janvier 1960 au 31 Décembre 1999 (40 années). Les paramètres de forçage nécessaires au fonctionnement du modèle sont tirés des ré-analyses ERA-40 du centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (ECMWF en anglais) et des précipitations journalières observées à Uccle. Cette simulation prend en compte l'urbanisation historique de la RBC en utilisant l'évolution des surfaces imperméables présentée dans la figure 1.

Scénarios climatiques futurs

Les données sur les changements climatiques utilisées dans cette étude proviennent de la base de données du projet PRUDENCE. La base de données fournit des séries chronologiques par jour et pour plusieurs modèles climatiques régionaux pour des simulations de contrôle (1961-1990) et pour des scénarios climatiques futurs (2071-2100). Pour les besoins du présent travail, nous avons utilisé les données de deux membres du projet PRUDENCE : l'Institut Max Planck (MPI) et Météo-France (CNRM). Les travaux antérieurs sur la validation des modèles utilisés dans le projet PRUDENCE par rapport à la température et les précipitations historiques observées à Uccle, ont montré que les deux membres choisis couvrent presque tout l'éventail de la variabilité des différents modèles utilisés dans le projet. Dans ce travail on prend en compte le signal du changement climatique comme suit : pour chaque variable d'entrée nous calculons l'écart entre le scénario futur et les données de contrôle. Cela est exprimé comme une différence pour la température et comme un taux de variation pour les autres variables. Nous utilisons ensuite les anomalies climatiques mensuelles, afin de perturber les séries correspondantes au climat historique. Les modifications climatiques mensuelles pour la période 2071-2100 sont données à la Fig. 2 pour la température et la quantité de précipitations.

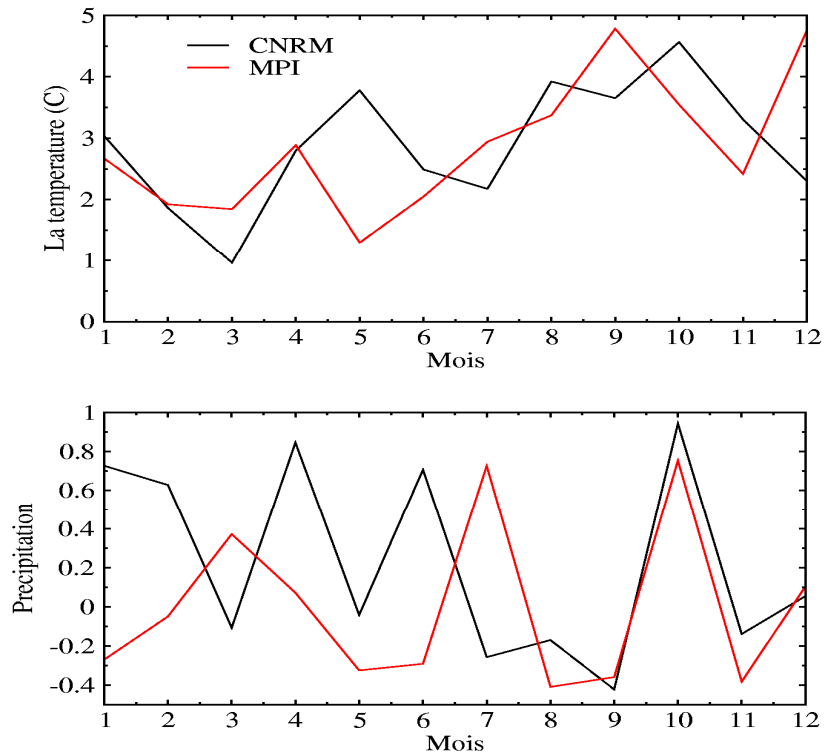


Fig.2. Les perturbations climatiques mensuelles entre les scénarios futurs et les données de contrôles. Cela est exprimé comme une différence pour la température et comme un taux de variation pour les précipitations.

7.5 Conclusions de l'étude

L'effet de l'urbanisation historique de la RBC

1. Un changement a été détecté dans la série annuelle : (1) du ruissellement superficiel cumulé, (2) du débit de point, (3) de la fréquence d'événements d'inondations, quand le pourcentage d'imperméabilité excède 35 %.
2. Le débit de point augmente de 32%, le ruissellement superficiel cumulé augmente de 40%, et la fréquence d'événements d'inondation augmente de 2,25 événements pour chaque augmentation de 10% des surfaces imperméables.
3. L'augmentation la plus importante du rapport : ruissellement de surface/précipitation est de 40%, elle est simulée durant l'été.

L'effet du changement climatique

1. Un écart très important existe entre les projections futures des modèles climatiques en terme de précipitations (cf. Fig. 2).

2. En terme du débit de point ainsi que du ruissellement annuel cumulé, l'urbanisation historique et le scénario futur avec une augmentation des précipitations produisent approximativement la même tendance à la hausse, (32%, 40%) et (44%, 39%) respectivement. Toutefois, pendant l'été quand les inondations se produisent fréquemment dans la Région de Bruxelles Capitale en raison de l'augmentation de l'écoulement total, la contribution moyenne de l'urbanisation est de 4 fois supérieure à celle de l'augmentation des précipitations.

L'effet combiné d'un changement climatique et d'une urbanisation future

1. Les changements futurs des précipitations sont plus influents que les changements de température dans la conduite des tendances futures en terme de : débit de point, ruissellement annuel cumulé et rapport : ruissellement de surface/précipitations.
2. L'hypothèse d'une hausse de 10% en surfaces imperméables dans la RBC est en mesure de contrer l'augmentation de l'évapotranspiration résultant des températures futures plus chaudes.
3. Quand on combine l'effet de l'urbanisation future (+20% de surfaces imperméables) et le scénario d'augmentation des précipitations, l'augmentation du débit de point est exacerbée.

7.6 Perspectives

Les types de simulations de micro-climatologie urbaine menées ici pourraient être poursuivies et étendues, mais cela demande un effort de recherche et développement important. A titre d'exemples, il devrait être possible :

- de coupler le modèle de surface SURFEX à un module de routage du ruissellement en surface (couplage des sorties du modèle à un modèle local plus fin). Ce couplage pourrait être validé par l'étude de cas d'inondations historiques dans certains quartiers ou grâce à une campagne de mesures spécifiques à cette fin. Il serait aussi envisageable d'introduire comme input les prévisions de précipitations pour les 36 prochaines heures données par le modèle régional ALARO utilisé à l'IRM pour les prévisions opérationnelles (résolution spatiale actuelle de 4 km et plus fine dans le futur) ou par des simulations d'ensemble (plusieurs modèles de prévisions, de résolution spatiale de l'ordre de 10 km). Un projet GLAMEPS est mené actuellement à l'IRM pour la production opérationnelle de ce type de simulations d'ensemble qui permettra de mieux quantifier les incertitudes dans les prévisions (résultats présentés sous forme de probabilité).
- d'établir une carte des zones à risque pour les inondations pluviales à partir de simulations historiques de débits et de ruissellement.

8 Rapport d'expertise en 2009

« Précipitations mensuelles et saisonnières à Bruxelles au cours des 12 dernières années. Données et analyse »

8.1 Introduction

Dans le cadre des missions d'expertises prévues dans le cahier des charges « IBGE 2008-02_AL » et dans le cadre d'une réflexion sur la recharge des eaux souterraines en région bruxelloise, il a été demandé à l'IRM un avis d'expertise sur les données de précipitations en Région bruxelloise sur la période récente couvrant environ les 10 dernières années.

En particulier, il a été demandé de transmettre à l'IBGE les précipitations mensuelles sur cette période (ainsi que leurs valeurs normales) et d'analyser si certaines saisons récentes ont présenté des déficits pluviométriques importants. Il a aussi été demandé si un éventuel déficit pluviométrique observé au cours du temps pourrait être lié au changement climatique en cours.

8.2 Les données de précipitations à Uccle : données récentes et statistiques

La station principale de l'IRM à Uccle a été choisie comme station de référence pour répondre aux questions posées. Les mesures de précipitations y sont effectuées à l'aide du pluviomètre manuel standard de l'IRM, utilisé dans le réseau climatologique depuis les années 1950. Ce pluviomètre est relevé tous les matins à 8h et donne le cumul des précipitations tombées sur les dernières 24 heures (de 8h du matin la veille du relevé à 8h le jour du relevé).

Analyse des données récentes par rapport à la période de référence 1971-2000

La partie supérieure de la Table 1 donne les cumuls mensuels, saisonniers et annuels entre juin 1998 et mai 2009 (cette période a été choisie pour avoir 11 saisons de chaque type sur la période). Pour chaque type de cumul, la moyenne sur la période retenue est également indiquée à la suite des valeurs pour chaque année.

La partie inférieure de la Table 1 donne quelques statistiques pour les mêmes types de cumuls que dans la partie supérieure du tableau. La période retenue ici est la période standard de référence actuelle de l'Organisation météorologique mondiale (OMM), à savoir 1971-2000. On pense généralement qu'une période de 30 ans permet de caractériser relativement correctement le climat général d'une région pour un paramètre comme les précipitations, à la fois en ce qui concerne les valeurs moyennes, mais également la variabilité interannuelle des différents cumuls, ainsi que leurs valeurs extrêmes possibles. Bien sûr, l'hypothèse retenue n'est valable que si le climat est relativement 'stable' sur la période considérée.

Pour cette période de 30 ans, les statistiques données ici pour les différents types de cumuls pluviométriques comportent :

- la moyenne sur la période,
- la médiane (ligne 'n'),
- les valeurs des percentiles par défaut (-) et excès (+) correspondant à des périodes de retour moyennes de 6, 10, 30 et 100 ans,

- les valeurs maximales (MAX) et minimales (MIN) observées sur la période de 30 ans, avec les années correspondantes (an_max et an_min).

A titre d'exemple, pour l'hiver (colonne 'HIV'), on a un cumul moyen de 202,1 mm entre 1971 et 2000, une médiane de 198,6 mm pour la série de valeurs, avec une valeur maximale de 365,9 mm en 1995 et une valeur minimale de 106,4 mm en 1972.

Pour définir le caractère plus ou moins anormal d'une valeur particulière, on utilise ici l'approche empirique (statistique non paramétrique) qui consiste à calculer les percentiles d'une série de données pour obtenir les seuils (par défaut ou excès) qui correspondent à certaines périodes de retour moyennes fixées. Ainsi, une valeur hivernale (déficitaire, dite « très anormale ») de 119,9 mm correspond à une période de retour moyenne de 10 ans et une valeur (excédentaire, dite « très anormale ») de 283,7 mm correspond également à une période de retour moyenne de 10 ans.

De manière traditionnelle, à l'IRM, on définit comme suit le degré d'anormalité d'un phénomène, en fonction de sa période moyenne de retour :

Code	Degré d'anormalité :	Phénomène égalé ou dépassé en moyenne une fois tous les
n	Normal	-
a	Anormal	6 ans
ta	très anormal	10 ans
e	Exceptionnel	30 ans
te	très exceptionnel	100 ans

Dans la partie supérieure droite de la Table 1, pour les cumuls saisonniers et annuels entre 1998 et 2009, on a surligné en couleur les valeurs au moins « très anormales », correspondant donc à des périodes de retour moyennes au moins égales à 10 ans (rappelons que les niveaux d'anormalité sont établis ici par comparaison avec les données de la période 1971-2000). Visuellement, par comparaison avec les couleurs attribuées aux valeurs-seuils dans la partie inférieure de la Table, on détermine rapidement le niveau d'anormalité d'une valeur particulière. Ainsi, on observe :

- 2 cumuls hivernaux excédentaires « très anormaux » (en 2000 et 2002). A titre d'exemple, rappelons que l'hiver 2000 comprend les mois de décembre 1999, janvier 2000 et février 2000.
- 1 cumul printanier excédentaire « très exceptionnel » (en 2001) et 1 cumul déficitaire « exceptionnel » (en 2004).
- 2 cumuls estivaux excédentaires « très anormaux » (en 2002 et 2004).
- 2 cumuls automnaux excédentaires « très anormaux » (en 1998 et 2001).
- 1 cumul annuel déficitaire « très anormal » (en 2003) et 2 cumuls excédentaires « très exceptionnels » (en 2001 et 2002). Remarquons que ces 2 cumuls excédentaires sont les 2 valeurs record du cumul annuel depuis le début des relevés à Bruxelles-Uccle en 1833.

Table 1. Partie supérieure : précipitations mensuelles, saisonnières et annuelles mesurée à Uccle entre juin 1998 et mai 2009.

Partie inférieure : valeurs moyennes (normales) sur la période 1971-2000 et valeurs des percentiles définissant les niveaux d'anormalité (en déficit et excès) correspondant à des périodes de retour moyennes de 6 ans (a-,a+), 10 ans (ta-,ta+), 30 ans (e-,e+) et 100 ans (te-,te+). La ligne **n** correspond au percentile 0,5 (valeurs médianes). MAX et MIN donnent respectivement les valeurs les plus élevées observées sur la période et an_max et an_min donnent les années correspondantes. Les couleurs dans la partie supérieure indiquent les valeurs saisonnières et annuelles qui dépassent les seuils d'anormalité de 10, 30 et 100 ans (cf. partie inférieure pour les seuils).

Année	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	HIV	PRIN	ETE	A
1998						87.7	43.8	64.7	139.1	128.7	87.8	81.7			196.2	3
1999	123.9	76.3	71.9	71.0	40.0	83.1	34.5	91.2	42.5	47.0	32.7	171.9	281.9	182.9	208.8	1
2000	45.7	81.9	56.8	65.1	86.2	35.1	133.8	34.5	69.9	98.3	86.7	58.2	299.5	208.1	203.4	2
2001	83.6	83.5	112.3	134.3	30.0	44.5	120.1	43.4	199.4	68.1	99.8	69.5	225.3	276.6	208.0	3
2002	71.3	167.8	66.3	41.9	57.2	72.3	96.5	172.1	25.8	105.1	92.2	109.3	308.6	165.4	340.9	2
2003	101.7	29.1	34.6	46.7	82.0	34.4	72.7	44.4	31.0	64.0	65.4	64.5	240.1	163.3	151.5	1
2004	153.8	48.8	25.0	37.2	40.8	78.4	112.4	122.7	82.9	67.6	78.4	65.7	267.1	103.0	313.5	2
2005	44.9	80.9	38.8	46.1	60.0	53.9	123.5	69.5	74.2	47.0	60.9	51.4	191.5	144.9	246.9	1
2006	18.7	83.1	65.3	46.0	115.6	25.8	48.1	202.3	9.2	56.3	71.6	93.0	153.2	226.9	276.2	1
2007	82.3	95.4	61.9	0.0	103.4	99.2	96.7	56.9	57.6	65.2	71.7	89.2	270.7	165.3	252.8	1
2008	70.7	35.4	140.5	45.8	53.9	69.9	101.9	89.3	70.8	72.4	67.6	43.3	195.3	240.2	261.1	2
2009	62.9	57.1	68.2	47.1	43.1								163.3	158.4		
Moyenne 1998-2009	78.1	76.3	67.4	52.8	64.7	59.7	94.0	92.6	66.3	69.1	72.7	81.6	236.0	185.0	241.8	2
<hr/>																
Période 1971-2000																
Moyenne 1971-2000	71.2	53.0	72.9	53.8	69.5	77.6	69.1	63.7	63.0	68.1	79.4	79.0	202.1	196.2	210.4	2
te- (≥ 100 ans)	6.2	10.6	7.9	7.2	19.1	14.2	19.2	11.8	9.2	5.4	24.4	19.2	107.8	79.6	108.0	1
e- (≥ 30 ans)	14.6	13.6	16.7	10.0	19.4	19.3	19.8	14.9	15.3	6.0	29.9	26.7	111.1	104.3	109.3	1
ta- (≥ 10 ans)	30.5	14.5	24.6	22.5	26.2	33.9	32.6	21.0	17.8	22.4	33.5	33.2	119.9	110.6	121.4	1
a- (≥ 6 ans)	36.9	25.5	28.1	25.7	34.7	44.4	34.3	29.8	29.0	24.3	47.2	43.2	140.4	136.4	145.2	1
n (médiane)	67.7	47.3	77.8	55.8	68.3	83.6	63.3	60.8	53.5	67.0	77.1	76.9	198.6	205.1	211.3	2
a+ (≥ 6 ans)	115.4	81.7	105.3	79.2	99.6	109.3	108.1	81.4	90.3	105.7	108.2	106.5	251.6	245.1	239.1	2
ta+ (≥ 10 ans)	121.0	93.1	120.4	87.3	116.6	117.1	124.5	92.7	120.7	124.2	118.6	117.5	283.7	260.2	312.6	2
e+ (≥ 30 ans)	134.4	101.2	130.9	105.8	133.0	123.3	140.5	182.2	144.4	135.4	135.9	170.2	310.4	269.2	348.9	3
te+ (≥ 100 ans)	140.8	108.4	136.0	106.8	133.1	127.0	166.3	216.5	182.5	154.8	163.0	171.4	349.3	274.4	360.0	4
MAX	143.6	111.5	138.1	107.2	133.1	128.6	177.3	231.2	198.8	163.1	174.6	171.9	365.9	276.6	364.8	4
an_max	1995	1990	1988	1998	1971	1987	1980	1996	1984	1974	1991	1999	1995	1988	1992	1
MIN	2.6	9.3	4.2	6.0	19.0	12.1	19.0	10.4	6.6	5.2	22.1	16.0	106.4	69.0	107.4	1
an_min	1997	1986	1993	1996	1990	1976	1979	1983	1979	1975	1989	1971	1972	1976	1983	1

8.3 Evolution des cumuls saisonniers depuis le début du 20^e siècle

Pour mettre davantage en perspective les cumuls saisonniers récents, on peut aussi examiner l'évolution des cumuls saisonniers depuis le début du 20^e siècle. Les figures 1 à 4 donnent sous forme de bâtonnets, pour chacune des saisons, les cumuls relevés entre 1901 et 2008 (ou 2009). Visuellement, on détecte rapidement une saison déficitaire ou excédentaire d'après la position du bâtonnet, selon qu'il est en dessous ou au-dessus de la moyenne saisonnière sur la période 1901-2008 (ou 2009).

On a également tracé la droite de tendance linéaire sur toute la période. Comme on le remarque, à l'échelle du siècle, à l'exception de l'automne où la tendance est quasi nulle, les tendances des précipitations saisonnières sont légèrement à la hausse, surtout en hiver (augmentation de l'ordre de 15 %, contre 5% au printemps et 7 % en été). Notons cependant que, d'un point de vue statistique, vu la variabilité marquée des cumuls saisonniers, les pentes de ces droites de régression ne sont pas significativement différentes de zéro (pour un risque d'erreur de 5%, retenu habituellement).

Pour les 10-12 dernières années, en examinant les figures pour chacune des saisons, on peut mettre en évidence les éléments suivants (qui recoupent souvent ceux qui ont déjà été signalés à l'occasion de l'analyse de la Table 1 du point (2)) :

Pour l'hiver (figure 1) :

Entre 1999 et 2004, on remarque que les cumuls hivernaux ont tous été supérieurs à la moyenne à long terme (en particulier, 2000 et 2002, avec des cumuls de l'ordre de 300 mm).

Par la suite, les années furent variables : 2005 et 2008 ont connu des valeurs quasi normales, 2007 un cumul excédentaire, 2006 et 2009, des cumuls déficitaires. Toutes ces valeurs restent cependant relativement « normales » en comparaison avec la valeur moyenne sur le 20^e siècle.

Pour le printemps (figure 2) :

Entre 1998 et 2009, on observe trois périodes dans les cumuls printaniers. Tout d'abord, entre 1998 et 2001, les valeurs sont supérieures à la moyenne à long terme (en particulier 2001, qui présente un excès très important). Ensuite, entre 2002 et 2005, les cumuls sont inférieurs à la moyenne (principalement 2004). Et enfin, depuis 2006, les valeurs oscillent autour de la moyenne, mais ce sont surtout les excès en 2006 et 2008 qui sont relativement marqués.

Pour l'été (figure 3) :

Entre 1997 et 2008, on observe deux périodes dans les cumuls estivaux, séparées par deux années intermédiaires. Tout d'abord, entre 1997 et 2001, les valeurs sont chaque fois légèrement déficitaires, proches de la moyenne à long terme. Ensuite, 2002 a connu un été très pluvieux, suivi en 2003 d'un été relativement sec. Par la suite, de 2004 à 2008, les cumuls estivaux furent tous supérieurs à la moyenne (en particulier 2004).

Pour l'automne (figure 4) :

Entre 1997 et 2001, les cumuls automnaux furent très variables d'une année à l'autre : excès très importants en 1998 et 2001, encadrant un déficit relativement marqué en 1999 (1997 et 2000 furent des années relativement normales). Ensuite, entre 2002 et 2008, les cumuls furent généralement déficitaires, mais les valeurs sont restées relativement proches de la moyenne (le déficit le plus important fut observé en 2006).

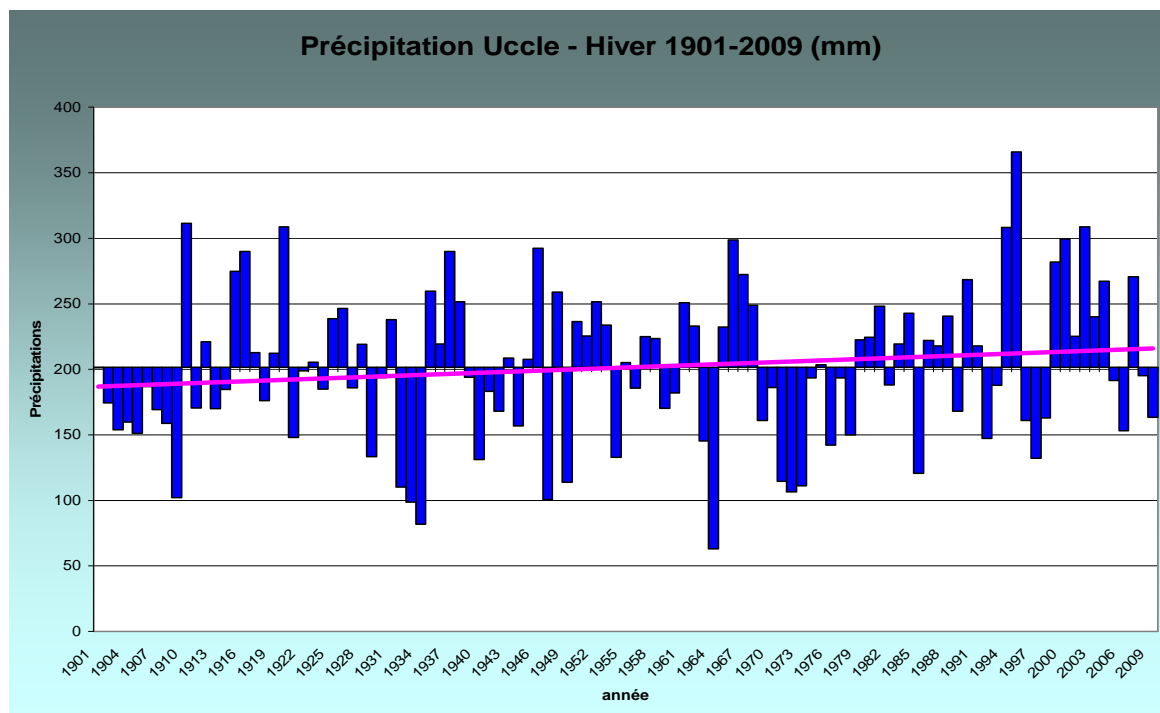


Figure 1. Précipitations hivernales (décembre-février) à Uccle sur la période 1901-2009 (en mm). Les bâtonnets donnent les valeurs annuelles par rapport à la moyenne sur la période totale (201,4 mm). La droite traversant le graphique est la droite de régression linéaire sur la période.

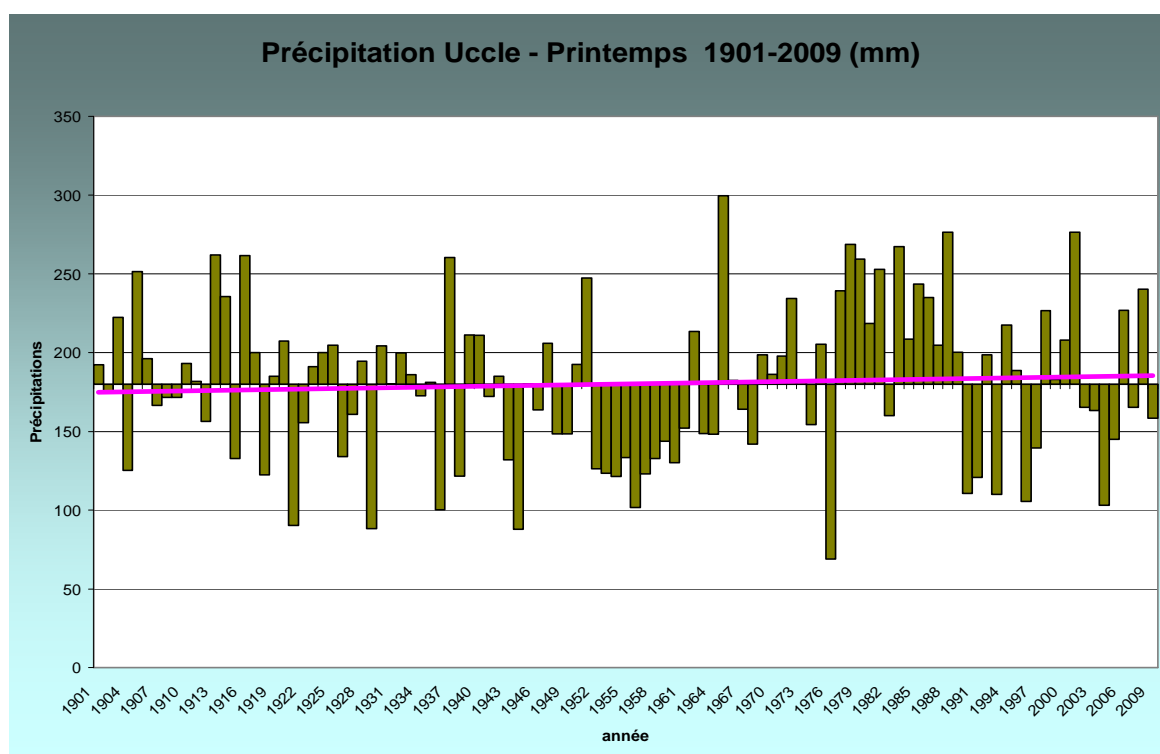


Figure 2. Précipitations printanières (mars-mai) à Uccle sur la période 1901-2009 (en mm). Les bâtonnets donnent les valeurs annuelles par rapport à la moyenne sur la période totale (180,0 mm). La droite traversant le graphique est la droite de régression linéaire sur la période.

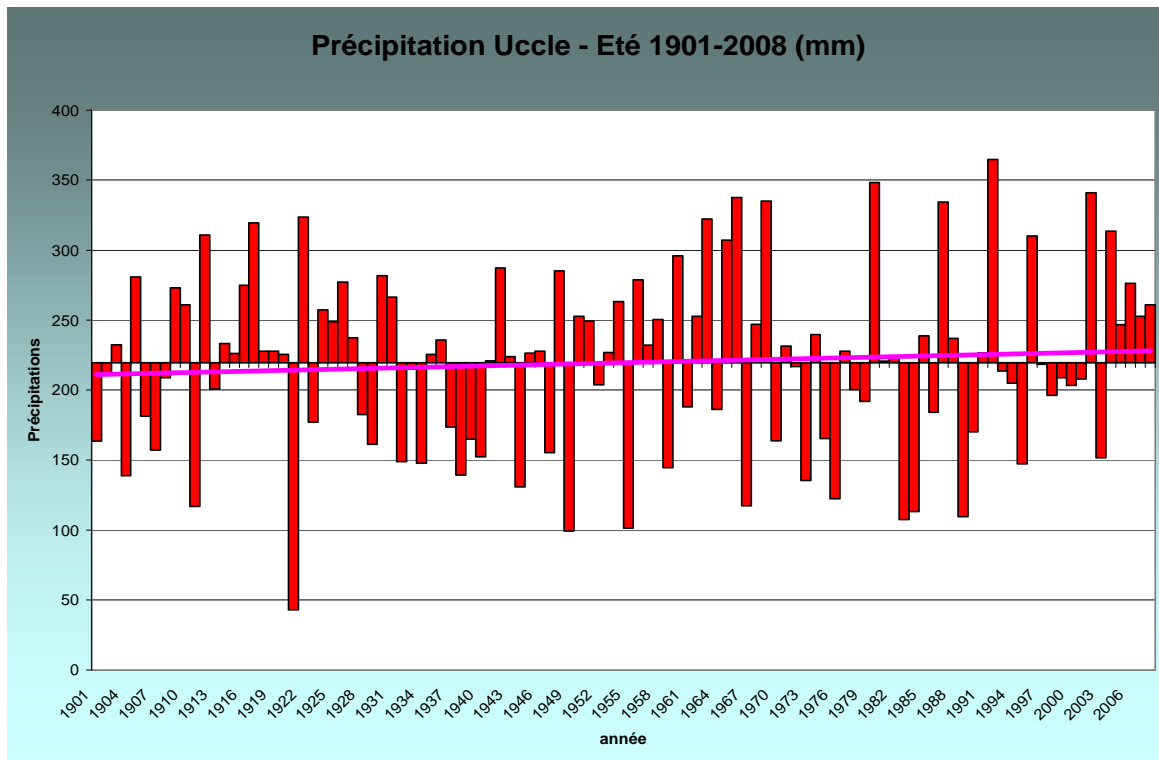


Figure 3. Précipitations estivales (juin-août) à Uccle sur la période 1901-2008 (en mm). Les bâtonnets donnent les valeurs annuelles par rapport à la moyenne sur la période totale (219,5 mm). La droite traversant le graphique est la droite de régression linéaire sur la période.

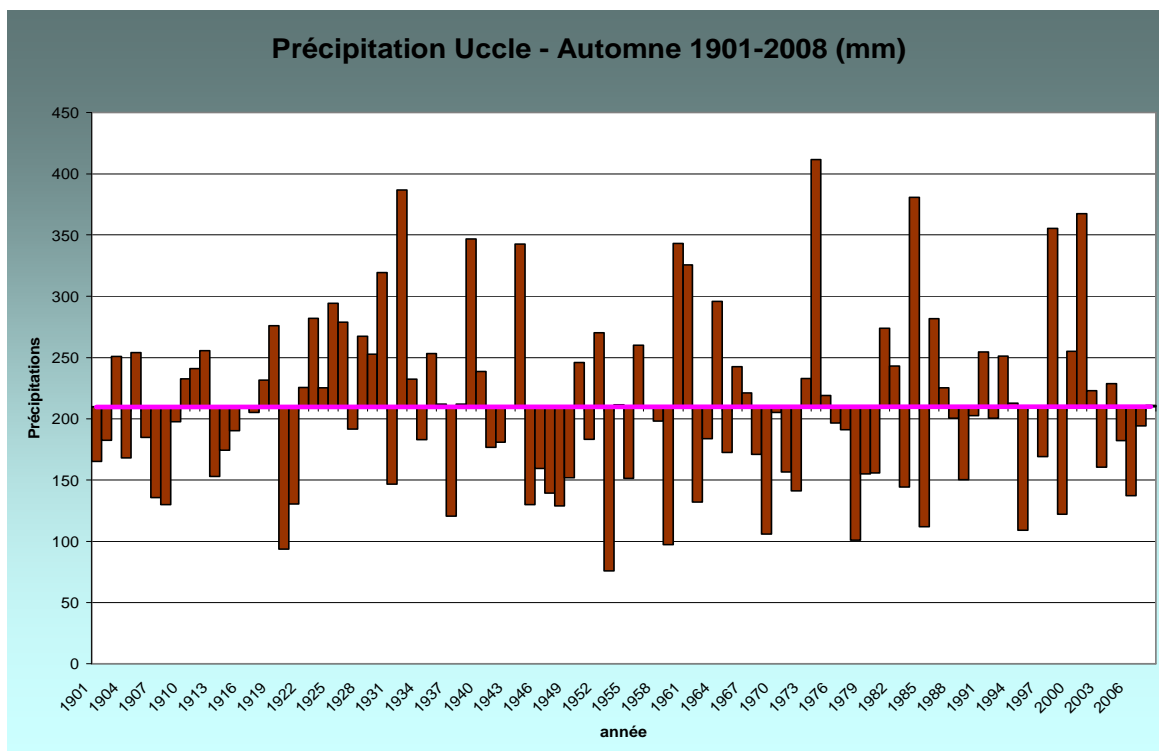


Figure 4. Précipitations automnales (septembre-novembre) à Uccle sur la période 1901-2008 (en mm). Les bâtonnets donnent les valeurs annuelles par rapport à la moyenne sur la période totale (209,9 mm). La droite traversant le graphique est la droite de régression linéaire sur la période (droite quasi horizontale, dans ce cas).

8.4 Conclusion

A l'échelle séculaire, entre le début du 20^e siècle et 2008/09, les cumuls saisonniers des précipitations à Uccle présentent une légère tendance à la hausse, à l'exception de l'automne qui ne présente pas de tendance à long-terme. Ce sont les précipitations hivernales qui ont connu l'augmentation la plus sensible (+ 15 % environ). Ces résultats globaux doivent être cependant relativisés dans la mesure où la variabilité interannuelle des cumuls saisonniers est importante (cf. figures 1 à 4). De ce fait, les significations statistiques de ces tendances sont relativement faibles.

En conclusion, contrairement aux températures, on observe donc relativement peu d'évolution globale pour les cumuls de précipitations à l'échelle de la saison ou de l'année sur les 110 dernières années. A plus petites échelles temporelles, on note cependant des variations parfois importantes des cumuls d'une année à l'autre, au cours d'une décennie ou d'une décennie à l'autre.

D'autre part, l'examen plus détaillé des 12 dernières années (1998 à 2009) conduit, aux échelles annuelle et saisonnière, à une série de résultats sur le caractère au moins « très anormal » des précipitations (correspondant à des périodes de retour moyennes d'au moins 10 ans).

Rappelons ici comment sont définis pour l'IRM les degrés d'anormalité d'un cumul pluviométrique, en fonction de sa période moyenne de retour :

Code	Degré d'anormalité (en excès ou déficit) :	cumul égalé ou dépassé en moyenne une fois tous les
n	Normal	-
a	Anormal	6 ans
ta	Très anormal	10 ans
e	Exceptionnel	30 ans
te	très exceptionnel	100 ans

On a utilisé ici comme période de référence pour définir le caractère d'anormalité d'un cumul la période de 30 ans actuellement recommandée par l'OMM, à savoir : 1971-2000. Pour définir le caractère éventuellement anormal des précipitations observées au cours des années récentes, on compare donc les cumuls relevés au cours de ces années aux cumuls observés au cours de la période de référence.

A l'échelle annuelle, on observe que les années 1998 à 2002 furent plus arrosées qu'en moyenne (avec les années record de 2001 et 2002, qualifiées de « très exceptionnellement » pluvieuses) et que les 3 dernières années complètes (2006 à 2008) furent des années relativement normales. Entre ces deux périodes, 2003 et 2005 furent relativement sèches (« très anormalement » pour 2003), et 2004 relativement pluvieuse.

Toujours pour les 12 dernières années, on observe que les cumuls saisonniers qualifiés d'au moins « très anormaux » furent généralement caractérisés par des excès de précipitations (plutôt que par des déficits).

Saison par saison, on peut constater que les dernières années se caractérisent comme suit (par rapport à la période 1971-2000) :

- **Pour l'hiver** : de 1999 à 2004, les cumuls furent supérieurs à la moyenne (mais seuls 2000 et 2002 présentèrent des excès « très anormaux »). Ensuite, de 2005 à 2009, les cumuls furent inférieurs à la moyenne (à l'exception de 2007, en excès), mais aucune valeur ne fut « très anormale ».
- **Pour le printemps** : après un excès « très exceptionnel » en 2001, les cumuls furent déficitaires entre 2002 et 2005, mais aucun ne fut « très anormal », à l'exception notoire de 2004 qui présenta un déficit « exceptionnel ». Ensuite, de 2006 à 2009, les cumuls printaniers furent variables autour de la moyenne, sans qu'aucune valeur ne fût « très anormale » (en déficit ou en excès).
- **Pour l'été** : de 1998 à 2001, les cumuls furent inférieurs à la moyenne, mais aucun déficit ne fut « très anormal ». Ensuite, à l'exception de 2003 qui présenta un déficit « normal », les cumuls estivaux furent tous en excès, mais seules les valeurs de 2002 et 2004 furent « très anormalement » élevées.
- **Pour l'automne** : de 1998 à 2004, les cumuls furent variables autour de la moyenne, mais seuls 1998 et 2001 présentèrent des valeurs « très anormales » (par excès). De 2005 à 2007, les cumuls furent inférieurs à la moyenne, mais sans être « très anormaux ». Le cumul 2008 fut pratiquement égal à la valeur moyenne.

Remarque finale : si l'on examine le cumul « hiver + printemps », on peut noter que la valeur observée à Uccle en 2009 (321,7 mm) fut la plus basse depuis les années 1996 et 1997 (à l'époque, on avait relevé respectivement 266,4 mm et 271,6 mm). Sur la période 1971-2009, la moyenne du cumul sur les deux saisons est de 400,2 mm. Sur cette période, un cumul égal ou inférieur à celui relevé en 2009 s'est produit en moyenne à Uccle tous les 5 à 6 ans. Les décennies 1970 et 1990 ont connu chacune trois années avec un cumul inférieur à celui de 2009. Par contre, durant les années 1980 et entre 2000 et 2008, les cumuls sur les deux saisons ne furent jamais très déficitaires, lorsqu'ils le furent. Avant 2009, en 2007 et 2008, les cumuls furent légèrement supérieurs à la moyenne sur la période (respectivement, 436,0 mm et 435,5 mm).

9 Conclusions

Le réseau de l'IBGE est unique en Belgique vu sa densité et l'historique de plus de près de vingt ans dont le réseau dispose C'est un outil incomparable pour mener des études climatologiques en Région bruxelloise.

Une exploitation rationnelle des données de précipitations de l'IBGE est l'aboutissement d'une chaîne de traitements : mesure, acheminement des données et contrôle de qualité. Vu la densité du réseau de l'IBGE, une estimation restera « fiable », mais l'augmentation du nombre d'estimations ira de pair avec une uniformisation des données, ce qui gommara les effets locaux. Par contre, la dérive des appareils menant à des surestimations ou sous-estimations systématiques ne pourra que très partiellement être récupérée par les corrections relatives à l'étalonnage.

Recommandations pour l'entretien et la gestion des appareils.

Le contrôle de qualité est réalisé en fin de course d'une chaîne de traitements. L'expérience acquise à l'IRM montre que la manière la plus efficace de procéder en vue d'obtenir des données de qualité optimale est d'agir le plus en amont possible, au niveau de la mesure elle-même, et de rendre l'étape du contrôle de qualité la plus légère possible. Une donnée mesurée correctement sera toujours meilleure qu'une donnée estimée, aussi bonne soit l'estimation.

Nous avons constaté à plusieurs reprises, lors du contrôle de qualité, de longues périodes où plusieurs appareils étaient en panne, ne délivrant aucune donnée ou présentant des données erronément égales à zéro. C'est par exemple le cas pour la première quinzaine du mois de juin 2008 pour les stations de Ganshoren, Anderlecht et Dépôt Communal. Cette situation complique en outre le contrôle de qualité vu que nous devons, pour ces jours-là, retirer ces stations du processus d'estimation (les mettre en panne, cf. le point 4.3.1).

Nous avons aussi constaté que des appareils restaient, durant de longues périodes, mal calibrés, (cf. les valeurs en rouge dans l'annexe 2). Ces valeurs en rouge identifient les périodes où un appareil a fortement dérivé : le facteur de correction est inférieur à 0,8 ou supérieur à 1,2. Ces erreurs ne peuvent être que partiellement récupérées par les corrections d'étalonnage. Dans le cas de Paelinckx, nous avons réalisé une correction d'étalonnage surrogatoire sur une période avant 2004 (cf. Figure 3) car il était patent que la surestimation de l'appareil provenait d'une non-réalisation des corrections d'étalonnage.

Les deux situations décrites ci-dessus entraînent une perte de la qualité de la base de données que le contrôle de qualité ne peut pas récupérer ; au mieux, il la camoufle. Cela montre qu'il serait très utile, dans l'optique d'augmenter la qualité des données, et de tirer pleinement profit d'un réseau historique aussi dense que celui de l'IBGE sur la Région de Bruxelles Capital, de modifier le modus operandi de la partie « mesure » de la chaîne de traitement. Nous proposons :

1. la télémessure des données, par exemple avec le réseau GPRS,
2. la surveillance journalière des mesures à l'aide de graphes de valeurs cumulées, ou d'autres types de rapports,
3. d'effectuer, en plus des visites de routine, suite à l'inspection de ces rapports, des visites ciblées en vue d'agir le plus rapidement possible in situ en cas de panne ou de dérive d'un appareil.

Enfin, signalons que les données de Senne Viangros ne sont toujours pas exploitables, l'appareil sous-estimant systématiquement les précipitations par rapport à ses proches voisins : Viangros et Anderlecht (cf. le point 5.1).

Le contrôle de qualité, description du travail effectué

Les nouvelles données après octobre 2007 ont été incorporées dans le système. Il en est de même pour les dates d'étalonnage sur lesquelles un contrôle très minutieux a été réalisé. Nos recommandations sur le format d'échanges des données relatives aux étalonnages ont été suivies par l'IBGE et nous ont fait gagner un temps précieux. Nous insistons une nouvelle fois sur le fait que ces données doivent être collectées avec la plus grande minutie puisque chaque valeur du nombre de basculements a des répercussions sur un grand nombre de données via le facteur de correction.

Un nouveau collaborateur a été formé pour le contrôle de qualité des données. Le mode opératoire a été, par ailleurs, mieux documenté pour les besoins internes. Le contrôle de qualité manuel, par un opérateur, a été réalisé pour la période allant d'août à décembre 2003 et pour la période plus récente allant d'octobre 2007 à juillet 2009 (pour la période entre janvier 1999 et juillet 2003, nous sommes partis de la validation effectuée lors du marché de services précédent qui nous semblait de bonne qualité). Nous avons ensuite effectué un « second passage » en réexaminant les données. Nous avons inspecté de manière détaillée (avec la méthode décrite au point 4.4.1.) les jours suspects sur base de l'inspection de graphes de valeurs journalières ou de graphes de sommes cumulées. La Table 6 résume la répartition du travail relatif au contrôle de qualité réalisé sur les deux marchés de services.

Nous disposons maintenant d'une base de données validées de l'IBGE de plus de dix ans de 1999 à juillet 2009.

Exploitations des données : cartes et analyse

Un des apports importants de ce marché de services est la confection de nouvelles cartes pluviométriques sur la Région bruxelloise sur une période étendue par rapport au marché précédent : de janvier 1999 à juillet 2009. La méthode de confection est similaire à celle utilisée pour le marché de services précédent hormis le fait que l'étape de lissage des cartes climatologiques a été court-circuitée, car la méthode d'interpolation choisie (spline) fournit un résultat satisfaisant sans effet « stations », rendant inutile l'étape de lissage supplémentaire utilisée précédemment.

L'examen des cartes obtenues conduit à la conclusion principale déjà relevée dans le précédent marché de services. Le résultat essentiel qui ressort de l'exploitation du réseau historique des données de l'IBGE est la mise en évidence d'un effet orographique (effet d'altitude) sur les précipitations et les cartes de répartitions annuelle et saisonnières.

L'effet orographique montre que les cumuls annuels augmentent avec l'altitude : annuellement, il pleut plus au sud qu'au nord de Bruxelles. De manière plus précise, le gradient est orienté nord-ouest/sud-est. Ce lien est significatif au sens statistique lorsque l'on considère le cumul annuel, il est d'environ 80 mm par 100 mètres. Cet effet orographique était déjà bien connu au niveau de la Belgique et nous avons été relativement surpris de constater qu'il était aussi d'application sur une surface aussi réduite que la Région de Bruxelles Capitale, avec des écarts en altitude ne dépassant pas 100 mètres. Au niveau saisonnier, nous devons rester prudents au niveau des conclusions, car même si les corrélations obtenues sont positives, elles ne sont pas significatives pour toutes les saisons.

Les cartes saisonnières nous apprennent que les saisons les plus sèches sont le printemps et l'automne et que les saisons les plus pluvieuses sont l'hiver et l'été. Ces deux dernières saisons, similaires en termes de cumuls, sont toutefois très différentes en termes d'intensité : les précipitations hivernales sont d'intensités faibles alors que l'été est connu par ses précipitations plus intenses dont les manifestations les plus énergétiques sont les orages.

L'examen des données pluviométriques du réseau de l'IBGE pour essayer de mettre en évidence un effet de vallée (Senne et Woluwe) sur les quantités mesurées en fonction de la direction du vent et du type de précipitations a conduit à quelques résultats préliminaires (cf. point 5.2), mais qu'il faudrait confirmer par des analyses plus systématiques, incluant un beaucoup plus grand nombre de situations de précipitations. S'il y a une influence topographique réelle des vallées dans certaines situations, elle est sans doute relativement faible et, en moyenne, secondaire en tout cas à l'effet plus général de l'altitude sur les précipitations en Région bruxelloise.

Étude sur la densité des réseaux

Nous reprenons les conclusions du point 6.2. Il n'est pas aisé de donner une réponse à la question générale de la densité optimale d'un réseau de pluviomètre, tant cela dépend des régimes pluviométriques et des problématiques que l'on souhaite traiter avec les données du réseau. Les réseaux en Région bruxelloise sont d'origines diverses et à finalités diverses. Le type d'appareils utilisés et le protocole d'entretien et de contrôle de qualités varient aussi d'un réseau à l'autre.

Le réseau de l'IBGE a l'avantage d'être dense (1 station pour 12 km²) sur la Région bruxelloise. Il a aussi l'avantage d'avoir un historique débutant en 1992, sur lequel un contrôle de qualité a été réalisé à partir de l'année 1999.

Quels sont les besoins de la Région de Bruxelles-Capitale en mesure de précipitations auxquels l'IBGE pourrait satisfaire ? En se basant sur les missions de l'IBGE, on peut citer les éléments suivants : contrôle des nappes aquifères, surveillance et étude des espaces verts, climatologie des précipitations en Région bruxelloise. Sans doute, y a-t-il encore d'autres objectifs pour lesquels l'IBGE souhaiterait utiliser son réseau. Il est important que ces objectifs soient définis clairement pour répondre de manière plus pertinente à la question posée.

Que peut-on néanmoins dire de manière générale ? En considérant l'ensemble des réseaux, et en particulier celui de l'IBGE, on constate un déficit de stations dans le nord de Bruxelles et dans le sud, dans la région de la Forêt de Soignes. Le sud est plus vallonné, ce qui pourrait aussi justifier une densité plus importante de pluviomètres, un relief plus accentué créant a priori une plus grande hétérogénéité dans la répartition des pluies. Une étude plus micro-climatique des précipitations à Bruxelles pour mettre en évidence une influence à plus petite échelle que celle de la Région dans son ensemble (qui a mis en évidence l'effet d'altitude à l'échelle de la Région) demanderait un réseau plus dense, au moins dans certaines zones critiques (définies en fonction de la problématique étudiée). Ainsi, par exemple, l'étude de la répartition spatiale moyenne des pluies les plus intenses demanderait la mise en place d'un réseau spécifique (tenant mieux compte du relief à plus petite échelle dans la Région).

Concernant cette dernière question, citons les conclusions sur ce point du marché précédent. De manière schématique, on peut affirmer que le réseau actuel de l'IBGE fournit une image relativement représentative du champ de précipitations sur l'ensemble du territoire bruxellois dans le cas de pluies frontales. Ces pluies, typiques en saison hivernale, sont généralement assez homogènes spatialement. Par contre, durant la période chaude de l'année, le réseau peut « rater » des précipitations très intenses et abondantes tombant très localement lors d'averses orageuses. C'est surtout dans ces conditions que la combinaison entre les mesures locales au sol et les estimations radar peut fournir un champ de précipitations beaucoup plus correct pour l'ensemble du territoire régional. De ce point de vue, une meilleure connaissance de la climatologie des trajectoires orageuses sur la ville de Bruxelles pourrait peut-être fournir des indications utiles pour le renforcement ou le redéploiement du réseau de mesures en l'un ou l'autre endroit de la ville.

Terminons en signalant que, vu les faibles variations pluviométriques, les études climatologiques en Région bruxelloise imposent un réseau pluviométrique le plus homogène possible en termes d'appareils et de contrôle de qualité. Le réseau actuel de l'IBGE utilise deux types d'appareils (Précis Mécanique et Géru), ce qui ne simplifie pas les comparaisons entre les mesures. A ce sujet, la présence de plusieurs appareils de réseaux différents et situés en un même endroit (par ex., Roodebeek) constitue en outre une opportunité de comparaison d'appareils et de réseaux de mesures.

Les alternatives, non exclusives, qui nous paraissent possibles pour améliorer la qualité et la quantité des données disponibles : maintenir le réseau en l'état, mais avec choix d'un appareil unique ; déplacer les appareils de l'IBGE situés à côté d'appareils d'autres institutions ; investir dans des protocoles d'échanges de données pluviométriques avec d'autres institutions ; exploiter davantage les données radar (mais ceci demande un investissement en recherche et développement).

L'avantage d'avoir ses propres données est que l'on maîtrise mieux la manière dont elles sont mesurées ainsi que le contrôle de qualité dont elles ont fait l'objet. Enfin, une télémesure des données permet un contrôle de qualité plus efficace (car plus proche des événements) et la mise en place d'une intervention sur les appareils plus rapide en cas de besoin, ce qui ne peut qu'améliorer la qualité des données.

Mesures pluviométriques

L'étude comparative de plusieurs pluviomètres menée à Uccle depuis juin 2009 a permis de commencer à connaître le comportement de différents instruments dans différentes conditions météorologiques. Deux grandes conclusions ressortent jusqu'à présent de ces comparaisons. Tout d'abord, en cas de pluie, les appareils automatiques à pesée de type similaire (soit de type Ott1, soit de type Ott2) donnent souvent des cumuls journaliers très similaires, ce qui est rassurant sur la 'robustesse' de ces types d'appareil basés sur le principe de la mesure du poids des précipitations. Par contre, un biais important a été détecté entre les appareils de type Ott1 et ceux de type Ott2. Il faudra examiner encore plus quantitativement comment les appareils se comportent en cas de chutes de neige et en fonction de l'intensité des précipitations.

Par comparaison avec l'appareil manuel de référence de l'IRM, le P50, il ressort clairement que le OT2 sous-estime les cumuls des précipitations de manière assez systématique et de manière parfois très importante (de l'ordre de 10 à 20% en moyenne mensuelle, hormis les cas de juin, lié au démarrage 'aléatoire' de l'appareil, avant manipulation tout à fait correcte des sorties de l'appareil, et du cas d'août au cours duquel les OT1 et OT2 semblent n'avoir curieusement rien enregistré à deux dates successives). La firme Ott a été avertie des problèmes rencontrés avec le OT2 et va examiner la question.

Si une solution n'est pas trouvée par la firme Ott au problème du OT2, il faudra en conclure que cet appareil n'est pas un candidat acceptable comme pluviomètre à pesée à utiliser dans les réseaux pluviométriques opérationnels. En effet, dans ce type de réseaux, on considère généralement qu'il faut utiliser des pluviomètres sans biais importants, jusqu'à 5% environ, au moins à l'échelle mensuelle et, si possible, également à l'échelle journalière. On est loin du compte pour le OT2 (la situation est bien meilleure pour les pluviomètres de type Ott 1 ou pour le PM [s'il est bien entretenu]).

Il faudra alors se tourner vers un autre appareil, sachant que le pluviomètre Ott de type 1 (comme le OT1 et le SYN) n'est plus fabriqué (le Ott de type 2 est présenté par la firme Ott comme son remplaçant). Un des grands avantages des appareils à pesée (contrairement aux appareils à augets

comme le PM), c'est le peu d'entretien qu'ils demandent (tout au plus, le vidanger une ou deux fois par an, à Bruxelles, et mettre de l'antigel en hiver pour éviter les déformations).

Micro-climatologie urbaine

Quelques expériences d'impact sur les débits, le ruissellement et le bilan hydrologique en surface ont été menées globalement à l'échelle de Bruxelles. Nous renvoyons aux conclusions du chapitre 7 qui donnent de manière synthétique les principaux résultats obtenus. Ces résultats illustrent l'importance à la fois de la variation temporelle du taux d'imperméabilité des surfaces et de celle des précipitations (et accessoirement des températures) pour expliquer les changements au cours du temps des paramètres étudiés. Deux pistes sont également données à titre d'exemples pour poursuivre ce type d'études.

10 Bibliographie

David K., Dorey M. and Smith D., 1999. What's the point? Interpolation and extrapolation with a regular grid DEM. IV International Conference on GeoComputation, Fredericksburg, VA, USA.

Dehem D. et Tricot C, 2004. Étude d'une méthodologie de contrôle de qualité de données pluviométriques (MS/212/2001/04). Rapport final. Institut royal météorologique de Belgique, 46 p.

Dehem D., Mohymont B. et Tricot C, 2008. Réseau de pluviomètres : validation des données et étude de répartition des précipitations en Région bruxelloise (cahier spécial des charges 2007-01-AL). Rapport final. Institut royal météorologique de Belgique, 106 p.

Givone C., 1997. Circulation et contrôle des données climatologiques à Météo-France. La Météorologie 8° série - n°20 - décembre 1997. 10 p.

Kelway P. S. and Herbert S. I., 1969. Short-term rainfall analysis. *Weather*, 24(9), 342-354.

Kincaid, D. and Cheney W., 2002. *Numerical Analysis* (3rd edition), Brooks/Cole. ISBN 0-534-38905-8, chapter 6.

Lanza L. G. and Stagi L., 2008. Certified accuracy of rainfall data as a standard requirement in scientific investigations. *Advances in Geosciences*, 16, 43-48.

Lanza L. G., Leroy M., Van Der Melen, J. and M. Ondras, 2005. The WMO Laboratory Intercomparison of Rainfall Intensity (RI) Gauges. WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2005), Bucharest, Romania, 4-7 May 2005 (published on CD-ROM).

OMM, 1994. Guide des pratiques hydrologiques. OMM-N° 168 (5^e édition), Genève, 793 pp.

OMM, 2008. Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques. OMM-N° 8 (7^e édition), Genève.

Schatzman M., 2002. *Numerical Analysis : A Mathematical Introduction*, Clarendon Press, Oxford. ISBN 0-19-850279-6. Chapters 4 and 6.

Sevruk B., 1982. *Methods of Correction for Systematic Errors in Point Precipitation Measurements for Operational Use*. WMO-N° 589, Genève, 91 pp.

WMO, 2009. WMO Field Intercomparison of Rainfall Intensity Gauges (Vigna die Valle, Italy, October 2007-April 2009), Vuerich E., Monesti C., Lanza L.G., Stagi L. and Lanzinger E. (eds), *Instruments and Observing Methods*, Report N° 99, WMO/TD-No. 1504, 96 pp. (+ annexes).

Annexes

Annexe 1

Inventaire des données présentes

(cf. chapitre 2, point 2.3 : *Inspection sommaire des données*).

Table 14: Inventaire mensuel des données de l'IBGE avant traitement par l'IRM du 01 janvier 1999 au 31 juillet 2009. Les valeurs reprises dans le tableau donnent le nombre de données horaires sur le mois. Une valeur sur fond vert signifie que le mois est complet, une valeur sur fond orange signifie que plus de 80 % des données sont présentes sur le mois et une valeur sur fond rouge signifie que moins de 80 % des données sont présentes sur le mois.

CODE	NAME	YEAR	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
97	Anderlecht	1999	744	671	744	718	744	720	743	744	719	744	719	743
103	Senne Viangros	1999	744	648	718	720	744	720	744	744	720	744	720	744
201	Paelinckx	1999	744	672	744	703	744	720	731	744	720	598	680	744
203	Nord	1999	744	672	744	719	744	720	744	219	720	744	720	744
286	Roodebeek	1999	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
287	Semence	1999	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
288	Viangros	1999	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
291	Dépôt Communal Boits.	1999	744	202			688	720	744	744	720	744	720	744
292	Dépôt de Tram	1999	744	672	744	720	744	720	34	446	718	744	720	744
293	Shopping Center	1999	744	672	744	609		134	744	297		230	649	744
296	Kinsendaël	1999		394	743	720	744	720	300		563	744	720	744
298	Voets	1999	744	672	743	720	744	720	744	744	720	744	720	744
299	Ganshoren	1999	744	672	744	720	744	720	744	744	322	135	720	744
97	Anderlecht	2000	742	696	743	719	743	720	742	744	719	744	720	743
103	Senne Viangros	2000	744	696	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
201	Paelinckx	2000	744	696	744	720	710	707	654	744	650	573	720	703
203	Nord	2000	744	682	744	686	744	132	744	744	720	744	720	744
286	Roodebeek	2000	744	696	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
287	Semence	2000	744	696	341		566	720	744	744	720	744	720	744
288	Viangros	2000	744	696	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
291	Dépôt Communal Boits.	2000	744	234	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
292	Dépôt de Tram	2000	744	696	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
293	Shopping Center	2000	744	696	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
296	Kinsendaël	2000	744	696	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
298	Voets	2000	744	696	744	720	743	719	744	744	720	744	719	744
299	Ganshoren	2000	744	696	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
97	Anderlecht	2001	744	671	743	720	743	719	744	742	720	743	717	744

CODE	NAME	YEAR	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
103	Senne Viangros	2001	744	672	744	720	744	673	744	744	720	669	720	744
201	Paelinckx	2001	727	651	727	635	692	720	679	662	654	522	552	744
203	Nord	2001	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
285	Avant-Port	2001	62	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
286	Roodebeek	2001	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
287	Semence	2001	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
288	Viangros	2001	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
291	Dépôt Communal Boits.	2001	371	326	744	720	178				639	744	720	418
292	Dépôt de Tram	2001	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
293	Shopping Center	2001	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
296	Kinsendaël	2001	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	743
298	Voets	2001	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
299	Ganshoren	2001	744	672	154	279	720	720	744	743	720	744	720	744
97	Anderlecht	2002	741	671	742	720	743	718	742	743	720	743	719	744
103	Senne Viangros	2002	742	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
201	Paelinckx	2002	744	672	744	720	727	720	744	726	720	686	720	727
203	Nord	2002	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
285	Avant-Port	2002	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
286	Roodebeek	2002	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
287	Semence	2002	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
288	Viangros	2002	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
291	Dépôt Communal Boits.	2002	335	62	744	719	744	720	346			181	714	744
292	Dépôt de Tram	2002	744	672	106		710	720	744	744	720	744	720	744
293	Shopping Center	2002	744	672	744	720	454	720	744	744	719	744	720	744
296	Kinsendaël	2002	744	672	744	720	744	130	709	744	719	744	720	744
298	Voets	2002	744	672	744	719	742	720	744	744	720	561		
299	Ganshoren	2002	744	672	624	720	744	720	744	744	720	526	612	744
97	Anderlecht	2003	743	668	728	720	743	720	742	742	718	742	720	743
103	Senne Viangros	2003	744	672	744	528	744	720	744	744	720	744	720	744
201	Paelinckx	2003	744	672	744	720	744	720	744	727	678	710	658	744
203	Nord	2003	744	672	744	720	744	720	744	744	720	743	720	744
285	Avant-Port	2003	744	672	744	720	744	720	744	744	720	743	720	744
286	Roodebeek	2003	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
287	Semence	2003	738	672	744	720	744	720	744	744	720	743	720	744
288	Viangros	2003	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
291	Dépôt Communal Boits.	2003	744	672	744	720	744	720	744	744	720	743	720	744
292	Dépôt de Tram	2003	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
293	Shopping Center	2003	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
296	Kinsendaël	2003	736	672	744	720	743	720	744	744	720	744	720	744
298	Voets	2003	253	672	744	720	743	720	744	744	720	744	83	
299	Ganshoren	2003	744	672	744	720	744	720	744	744	720	743	720	744
97	Anderlecht	2004	742	695	744	719	744	719	742	744	718	743	561	588
103	Senne Viangros	2004	744	696	744	720	744	720	708	744	720	361	91	530
201	Paelinckx	2004	744	679	679	720	744	720	744	744	720	744	720	744
203	Nord	2004	744	696	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
285	Avant-Port	2004	744	696	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
286	Roodebeek	2004	744	696	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
287	Semence	2004	744	696	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
288	Viangros	2004	744	696	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
291	Dépôt Communal Boits.	2004	744	696	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744

CODE	NAME	YEAR	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
292	Dépôt de Tram	2004	744	696	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
293	Shopping Center	2004	744	696	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
296	Kinsendaël	2004	744	696	618		157	720	744	744	720	744	720	744
298	Voets	2004		591	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
299	Ganshoren	2004	744	696	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
97	Anderlecht	2005	588	136	89	179	744	718	742	744	718	744	720	743
103	Senne Viangros	2005	488	672	744	720	744	719	722	744	254			627
201	Paelinckx	2005	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
203	Nord	2005	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
285	Avant-Port	2005	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
286	Roodebeek	2005	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
287	Semence	2005	744	672	744	720	744	720	704	744	720	744	720	744
288	Viangros	2005	744	672	744	720	744	516	744	744	720	744	720	744
291	Dépôt Communal Boits.	2005	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
292	Dépôt de Tram	2005	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
293	Shopping Center	2005	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
296	Kinsendaël	2005	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
298	Voets	2005	744	672	744	720	744	719	744	744	720	587		
299	Ganshoren	2005	744	672	744	720	744	720	744	744	709	744	720	744
97	Anderlecht	2006	743	672	743	720	742	719	743	743	719	743	718	744
103	Senne Viangros	2006	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
201	Paelinckx	2006	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
203	Nord	2006	744	656	743	720	744	720	744	744	720	744	720	744
285	Avant-Port	2006	744	672	743	720	744	720	744	744	720	744	720	744
286	Roodebeek	2006	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
287	Semence	2006	744	672	743	720	744	720	744	744	720	744	720	744
288	Viangros	2006	744	672	743	720	744	720	744	744	720	744	720	744
291	Dépôt Communal Boits.	2006	744	672	743	720	744	720	744	744	720	744	720	744
292	Dépôt de Tram	2006	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
293	Shopping Center	2006	744	672	743	720	744	720	744	744	720	744	720	744
296	Kinsendaël	2006	744	672	743	720	744	720	744	744	720	744	720	744
299	Ganshoren	2006	744	672	743	720	744	720	744	744	720	744	720	744
97	Anderlecht	2007	743	671	744	718	743	717	743	743	720	742	719	744
103	Senne Viangros	2007	744	526				74	407			686	720	744
201	Paelinckx	2007	744	672	743	720	744	720	744	744	720	744	720	744
203	Nord	2007	744	672	743	720	744	720	744	744	720	744	720	744
285	Avant-Port	2007	744	672	743	720	744	720	744	744	720	744	720	744
286	Roodebeek	2007	744	672	743	720	744	720	744	744	720	744	720	744
287	Semence	2007	744	672	743	720	744	720	744	744	720	744	720	744
288	Viangros	2007	744	672	743	720	744	720	744	744	720	744	720	744
291	Dépôt Communal Boits.	2007	744	672	743	720	744	720	744	744	720	744	720	744
292	Dépôt de Tram	2007	744	672	743	720	744	720	744	744	720	744	720	744
293	Shopping Center	2007	744	672	743	720	744	720	744	744	720	744	720	744
296	Kinsendaël	2007	744	672	743	720	744	720	744	744	720	744	720	744
299	Ganshoren	2007	744	672	743	720	744	720	744	744	720	744	720	744
97	Anderlecht	2008	743	695	744	718	743	719	743	743	716	744	718	743
103	Senne Viangros	2008	744	696	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
201	Paelinckx	2008	744	696	743	720	744	720	744	744	720	744	720	744
203	Nord	2008	744	696	743	720	744	720	744	744	720	744	720	744
285	Avant-Port	2008	744	696	743	720	744	720	744	744	720	744	720	744

CODE	NAME	YEAR	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
286	Roodebeek	2008	744	696	743	720	744	720	744	744	720	744	720	744
287	Semence	2008	744	696	743	720	744	720	744	744	720	744	720	744
288	Viangros	2008	744	696	743	720	744	720	744	744	720	744	720	744
291	Dépôt Communal Boits.	2008	744	696	743	720	744	720	744	744	720	744	720	744
292	Dépôt de Tram	2008	744	696	743	720	744	720	744	744	720	744	720	744
293	Shopping Center	2008	744	696	743	720	744	720	744	744	720	744	720	744
296	Kinsendael	2008	744	696	743	720	744	720	744	744	720	744	720	744
299	Ganshoren	2008	744	696	743	720	744	720	744	744	720	744	321	2
97	Anderlecht	2009	744	671	647	720	743	719	744					
103	Senne Viangros	2009	744	672	649	720	744	720	744					
201	Paelinckx	2009	744	672	743	720	744	720	744					
203	Nord	2009	744	672	744	720	744	720	744					
285	Avant-Port	2009	744	672	744	720	744	720	744					
286	Roodebeek	2009	744	672	743	720	744	720	744					
287	Semence	2009	744	672	743	720	744	720	744					
288	Viangros	2009	744	672	744	720	744	720	744					
291	Dépôt Communal Boits.	2009	744	672	743	720	744	720	744					
292	Dépôt de Tram	2009	744	672	743	720	744	720	744					
293	Shopping Center	2009	744	672	743	720	744	720	744					
296	Kinsendael	2009	744	672	743	720	744	720	744					
299	Ganshoren	2009	744	672	743	720	744	720	744					

Annexe 2

Données d'étalonnage

(cf. chapitre 3 : *Corrections se rapportant à l'étalonnage*).

Le tableau suivant reprend les dates d'étalonnage, et les données y afférentes, reprises dans la base de données de l'IRM. Les colonnes relatives au nombre de basculements sont décrites dans le texte au point 3.2 du chapitre 3. La colonne 'Fact' désigne le facteur de correction relatif à la période considérée. La couleur rouge désigne des facteurs inférieurs à 0.8 ou supérieurs à 1.2, les lignes concernées identifient les périodes pour lesquelles un appareil a fortement dérivé. Les stations 97, 285, 294, 292, 293 ont connu une transition de 100 à 50 du nombre de basculements escompté. Les valeurs relatives au nombre de basculements ont été ramenées à une valeur commune de 50 par une division par 2 des valeurs se rapportant initialement à 100 basculements.

Table 15. Dates d'étalonnage, et les données y afférentes, reprises dans la base de données de l'IRM.

Code	Date_étalonnage	Date_étalonnage_next	N_avant	N_apres_nettoyage	N_apres	Fact
97	07/12/2003	13/01/2004	49		50	1.016
97	13/01/2004	28/06/2004	49.2	49.1	50.6	1.041
97	28/06/2004	07/12/2004	48.6	48	50.75	1.036
97	07/12/2004	26/04/2005	49	49	50	1
97	26/04/2005	29/07/2005	50	49	50	1
97	29/07/2005	05/12/2005	50		49	1.021
97	05/12/2005	11/05/2006	48	48	50	1
97	11/05/2006	15/09/2006	50		50.1	1.022
97	15/09/2006	23/11/2006	49	47	50	1
97	23/11/2006	11/10/2007	50		50	1.02
97	11/10/2007	04/04/2008	49	49	49	1
97	04/04/2008	26/09/2008	49	49	50	1
97	26/09/2008	20/03/2009	50	50	50	1
97	20/03/2009	14/09/2009	50	50	50	1.02
97	14/09/2009		49	49	50	
103	10/06/2003	23/02/2004	97		101	0.971
103	23/02/2004	28/07/2004	104	98	99	1
103	28/07/2004	03/08/2004	99		98	1
103	03/08/2004	22/10/2004	98		99.5	1.026
103	22/10/2004	24/03/2005	97	99	99	0.971
103	24/03/2005	26/04/2005	102	98	101	1.02
103	26/04/2005	27/07/2005	99	100	100	1
103	27/07/2005	04/08/2006	100		99	0.925
103	04/08/2006	30/01/2007	107	102	100	0.98
103	30/01/2007	22/02/2007	102	95	100	0.763
103	22/02/2007	29/11/2007	131	144	99	0.952
103	29/11/2007	14/05/2008	104	100	100	0.962
103	14/05/2008	14/11/2008	104	101	100	0.971

103	14/11/2008	07/05/2009	103	100	100	1.02
103	07/05/2009	14/09/2009	98	96	100	0.962
103	14/09/2009		104	102	100	
201	12/02/1998	15/03/1999	90		99	0.678
201	15/03/1999	25/10/1999	146		99	
201	25/10/1999		127		101	
201	30/10/2003	20/04/2004	102.5		99.5	1.015
201	20/04/2004	16/09/2004	98	99	99	0.971
201	16/09/2004	18/03/2005	102	96	101	0.981
201	18/03/2005	29/07/2005	103	98	100	1
201	29/07/2005	21/09/2005	100		102	1
201	21/09/2005	21/03/2006	102	99	100	1.053
201	21/03/2006	04/08/2006	95	90	99	1.1
201	04/08/2006	16/01/2007	90	87	99	0.846
201	16/01/2007	21/08/2007	117	109	99	0.952
201	21/08/2007	12/10/2007	104	101	101	1.02
201	12/10/2007	04/04/2008	99	97	100	1.02
201	04/04/2008	14/11/2008	98	92	100	0.714
201	14/11/2008	07/05/2009	140	103	100	0.98
201	07/05/2009	15/09/2009	102	102	100	1.389
201	15/09/2009		72	108	100	
203	23/10/2003	11/05/2004	110		99	0.98
203	11/05/2004	07/12/2004	101	100	100	0.971
203	07/12/2004	26/04/2005	103	101	100	1
203	26/04/2005	28/07/2005	100	99	100	1
203	28/07/2005	14/02/2006	100		100	1
203	14/02/2006	16/03/2006	100		100.5	1.142
203	16/03/2006	04/08/2006	88	94	101	0.935
203	04/08/2006	08/01/2007	108	103	99	0.98
203	08/01/2007	06/09/2007	101	99	99	0.925
203	06/09/2007	17/09/2007	107	107	107	1
203	17/09/2007	29/11/2007	107		99	0.971
203	29/11/2007	04/04/2008	102	97	100	1
203	04/04/2008	14/05/2008	100	100	100	0.962
203	14/05/2008	14/11/2008	104	100	100	1
203	14/11/2008	07/05/2009	100	96	99	0.99
203	07/05/2009	14/09/2009	100	96	100	1.042
203	14/09/2009		96	94	100	
285	29/07/2003	16/03/2004	50.5		50.5	1.052
285	16/03/2004	28/09/2004	48	48.5	50.5	1.031
285	28/09/2004	09/03/2005	49	47.4	50.5	1.031
285	09/03/2005	28/07/2005	49	50	50	1
285	28/07/2005	09/09/2005	50		49	1
285	09/09/2005	05/12/2005	49	48	50	0.943
285	05/12/2005	27/04/2006	53	52	50	0.98
285	27/04/2006	15/09/2006	51	50.1	50.1	0.982
285	15/09/2006	14/11/2006	51	49	50	1
285	14/11/2006	11/10/2007	50	49	49	1
285	11/10/2007	26/09/2008	49	46	50	0.962
285	26/09/2008	20/03/2009	52	50	50	1.042
285	20/03/2009	14/09/2009	48	48	50	1.02
285	14/09/2009		49	49	50	
286	21/10/2003	27/04/2004	87		99	1.076
286	27/04/2004	02/11/2004	92	94	101	1.031
286	02/11/2004	02/05/2005	98	99	100	1.064

286	02/05/2005	16/03/2006	94	94	100	0.971
286	16/03/2006	04/08/2006	103	95	100	1.02
286	04/08/2006	23/01/2007	98	96	100	0.971
286	23/01/2007	11/10/2007	103	99	99	0.934
286	11/10/2007	02/04/2008	106	98	100	0.971
286	02/04/2008	14/11/2008	103	100	100	0.98
286	14/11/2008	07/05/2009	102	100	100	0.98
286	07/05/2009	14/09/2009	102	100	100	0.99
286	14/09/2009		101	99	100	
287	16/10/2003	13/05/2004	93		99	0.892
287	13/05/2004	02/11/2004	111	103	100	0.98
287	02/11/2004	26/04/2005	102	99	101	1.174
287	26/04/2005	29/07/2005	86	80	100	1
287	29/07/2005	21/03/2006	100		101	1.122
287	21/03/2006	04/08/2006	90	87	100	0.98
287	04/08/2006	01/02/2007	102	99	99	0.934
287	01/02/2007	11/10/2007	106	99	99	0.934
287	11/10/2007	04/04/2008	106	100	100	0.971
287	04/04/2008	14/11/2008	103	102	100	0.98
287	14/11/2008	07/05/2009	102	100	100	0.943
287	07/05/2009	15/09/2009	106	98	100	0.98
287	15/09/2009		102	100	100	
288	30/09/2003	25/05/2004	95		101	0.962
288	25/05/2004	22/10/2004	105	99	99	0.98
288	22/10/2004	26/04/2005	101	104	101	1.01
288	26/04/2005	29/07/2005	100	100	100	1
288	29/07/2005	21/03/2006	100	96	100	1.031
288	21/03/2006	04/08/2006	97	93	100	1
288	04/08/2006	22/01/2007	100	96	100	1
288	22/01/2007	23/08/2007	100	95.5	101	0.815
288	23/08/2007	29/11/2007	124	112	101	0.918
288	29/11/2007	14/05/2008	110	106	100	0.98
288	14/05/2008	14/11/2008	102	100	100	1
288	14/11/2008	07/05/2009	100	96	100	1
288	07/05/2009	14/09/2009	100	98	100	0.98
288	14/09/2009		102	100	100	
291	07/10/2003	05/02/2004	48		50	1
291	05/02/2004	08/03/2004	50		50.6	1.002
291	08/03/2004	09/09/2004	50.5	50.5	49.8	1.073
291	09/09/2004	18/03/2005	46.4	46	50.6	1.077
291	18/03/2005	11/07/2005	47	47	50	1.07
291	11/07/2005	28/07/2005	46.75	46.75	50	1.22
291	28/07/2005	18/08/2005	41	38	50	1
291	18/08/2005	21/09/2005	50		50.2	1.091
291	21/09/2005	07/12/2005	46	46	50	0.909
291	07/12/2005	02/05/2006	55	56	50	0.962
291	02/05/2006	15/09/2006	52	52	50	1.163
291	15/09/2006	08/01/2007	43	48	50	0.96
291	08/01/2007	02/04/2007	52.1	52.25	49	1
291	02/04/2007	12/10/2007	49		50	0.962
291	12/10/2007	14/05/2008	52	49	50	0.909
291	14/05/2008	30/09/2008	55	53	50	1.351
291	30/09/2008	20/03/2009	37	37	50.5	0.971
291	20/03/2009	14/09/2009	52	51	50	0.98
291	14/09/2009		51	50	50	

292	21/10/2003	12/02/2004	57		50.5	1
292	12/02/2004	10/06/2004	50.5		50.6	1.01
292	10/06/2004	13/12/2004	50.1	50.75	50.3	1.07
292	13/12/2004	02/05/2005	47	47	50	0.98
292	02/05/2005	28/07/2005	51	49	50	1
292	28/07/2005	05/12/2005	50		50	0.943
292	05/12/2005	15/09/2006	53	54	50	1
292	15/09/2006	11/10/2007	50	52	50	1.042
292	11/10/2007	04/04/2008	48	46	50	1.064
292	04/04/2008	26/09/2008	47	47	50	0.98
292	26/09/2008	19/03/2009	51	50	50	0.962
292	19/03/2009	14/09/2009	52	51	50	0.98
292	14/09/2009		51	50	50	
293	07/10/2003	18/03/2004	48		50	1.01
293	18/03/2004	20/09/2004	49.5	48.9	49.2	1
293	20/09/2004	27/01/2005	49.2		49.5	1
293	27/01/2005	28/07/2005	49.5		50	1.02
293	28/07/2005	21/09/2005	49	50	50	1.087
293	21/09/2005	11/10/2005	46	46	50	1
293	11/10/2005	05/12/2005	50		49.5	1.01
293	05/12/2005	09/05/2006	49	50	50	0.985
293	09/05/2006	28/08/2006	50.75	50.1	49	1.089
293	28/08/2006	30/11/2006	45	45	50.1	1
293	30/11/2006	11/10/2007	50.1		51.1	0.983
293	11/10/2007	04/04/2008	52	49	50	0.909
293	04/04/2008	26/09/2008	55	55	51	0.981
293	26/09/2008	19/03/2009	52	51	50	0.909
293	19/03/2009	14/09/2009	55	54	50	1
293	14/09/2009		50	50	50	
296	05/05/2003	20/01/2004	99		100	1.064
296	20/01/2004	24/02/2004	94	98	98	1
296	24/02/2004	21/09/2004	98		99.5	1.026
296	21/09/2004	18/03/2005	97	100	100	1.01
296	18/03/2005	21/09/2005	99	98	100	1.053
296	21/09/2005	21/03/2006	95	97	100	1.01
296	21/03/2006	04/08/2006	99	97	100	0.893
296	04/08/2006	01/02/2007	112	106	100	0.98
296	01/02/2007	12/10/2007	102	97	99	0.952
296	12/10/2007	04/04/2008	104	100	100	1.02
296	04/04/2008	14/11/2008	98	94	97	0.96
296	14/11/2008	07/05/2009	101	98	100	0.98
296	07/05/2009	15/09/2009	102	98	100	1
296	15/09/2009		100	99	100	
298	27/05/2003	05/02/2004	105		100	0.952
298	05/02/2004	13/07/2004	105	101	101	0.971
298	13/07/2004	13/12/2004	104	101	101	1.074
298	13/12/2004	27/01/2005	94	94	101	1
298	27/01/2005	28/07/2005	101		100	1.136
298	28/07/2005	27/10/2005	88	85	99	
298	27/10/2005		99			
299	03/06/2003	10/02/2004	96.5		100	1.282
299	10/02/2004	17/06/2004	78		101	0.962
299	17/06/2004	07/12/2004	105	103	100.5	0.995
299	07/12/2004	26/04/2005	101	102	99	0.934
299	26/04/2005	28/07/2005	106	104	100	1.316

299	28/07/2005	21/03/2006	76	78	100	1.01
299	21/03/2006	04/08/2006	99	96	100	0.909
299	04/08/2006	12/03/2007	110	104	100	0.943
299	12/03/2007	15/03/2007	106	104	100	0.943
299	15/03/2007	16/08/2007	106	104	99	1.207
299	16/08/2007	29/11/2007	82	82	101	0.962
299	29/11/2007	04/04/2008	105	98	100	0.99
299	04/04/2008	14/11/2008	101	100	100	0.962
299	14/11/2008	07/05/2009	104	99	100	0.943
299	07/05/2009	15/09/2009	106	100	100	1.031
299	15/09/2009		97	95	100	

Annexe 3

Cartes des précipitations en Région bruxelloise

(cf. chapitre 5, point 5.3 : *Cartographie des précipitations*).

Cette annexe reprend les cartes de précipitations pour la Région de Bruxelles-Capitale obtenues à partir des données du réseau de l'IBGE sur la période 01/01/1999-31/07/2009. Dix-sept cartes sont présentées, dans l'ordre suivant :

- 1) Carte annuelle des précipitations.
- 2) Cartes saisonnières des précipitations : hiver, printemps, été, et automne.
- 3) Cartes mensuelles des précipitations : de janvier à décembre.

Les saisons sont définies comme suit:

- printemps: agrégation des mois de mars, avril et mai,
- été: agrégation des mois de juin, juillet et août,
- automne: agrégation des mois de septembre, octobre et novembre,
- hiver: agrégation des mois de décembre, janvier et février.

Onze stations ont été utilisées pour l'obtention des cartes (cf. Figure 21).

Une échelle de couleurs uniforme a été utilisée pour les saisons d'une part et pour les mois d'autre part. Cela permet une comparaison visuelle simple des cartes entre elles.

Les cartes sont dans la projection Lambert 72 (Grid Lambert 72) avec le datum correspondant (Belgian Datum 1972).

Les cartes sont obtenues à partir d'une climatologie sur la Région bruxelloise (cf. Table 16). Cette climatologie est construite en moyennant d'abord les données aux stations sur la période retenue. La climatologie est obtenue ensuite par calibration (multiplication par un facteur égal à 0.9305) des valeurs en utilisant la normale pluviométrique annuelle à Uccle sur la période 1971-2000.

Les valeurs mentionnées sont donc des cumuls pour des années ou des saisons « moyennes » et sont indicatives. L'information dans ces cartes réside plus dans les valeurs relatives que dans les valeurs absolues : il pleut plus au sud qu'au nord ou il pleut plus en été qu'au printemps.

Code	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	printemps	été	automne	hiver	année
97	77.1	70	67.8	47	56.2	49.6	86	83.2	56	63.1	67.2	76.1	171	219.3	186.3	215.7	806.4
201	76	73.8	65.2	47.3	55.3	56	83.6	92.8	67.8	71.7	69.6	77.5	167.8	230.7	209.1	222.5	841.5
203	63.6	58.9	56.1	39.8	50.1	46.8	69.3	83.3	51.8	54.1	59.9	66.9	145.9	202.5	165.9	183.9	708.6
286	74.7	71.9	62.8	47.7	54.6	50.5	85.5	82.5	60.6	62.3	70.6	81	165	221.2	193.5	220.4	814.4
287	69	67.2	64.3	41.1	58.8	47.7	81.5	79.6	54.6	58.5	64.5	75.1	164.2	211.4	177.5	207.8	769.2
288	74.5	70.2	65.5	47.7	55.5	53.6	88.6	84.7	57.7	65.5	66.8	78.2	168.7	227.2	190	218.7	815.5
291	78.3	75.1	69.3	48.3	58.7	54	81.9	84.3	56.3	64.3	70.1	84	176.3	222.2	190.7	232.5	834.1
292	74.6	73.9	69.8	52.2	58.9	53.2	89	83.6	64.5	65.4	69.6	81.2	180.9	230.3	199.5	224.4	847.8
293	71.1	69.9	64.4	50.7	57.8	51.9	86.5	82.7	59.2	62	67.1	76.9	172.8	228.6	188.2	213.4	816.8
296	71.2	66.6	59.5	45.8	57.9	54.8	81.4	88.4	57.1	64.1	63.7	74.5	163.2	226.9	184.8	205.9	794
299	70.6	64.9	61.4	43.6	57.8	49.3	84.3	80.2	57.1	59.2	67.4	74.8	162.8	216.9	183.6	207.9	779.6

Table 16 : Climatologie des précipitations en Région bruxelloise : données moyennes aux stations, calibrées en fonction du rapport des moyennes annuelles relevées à la station de l'IRM à Uccle sur les périodes 1971-2000 et 1999-2008.

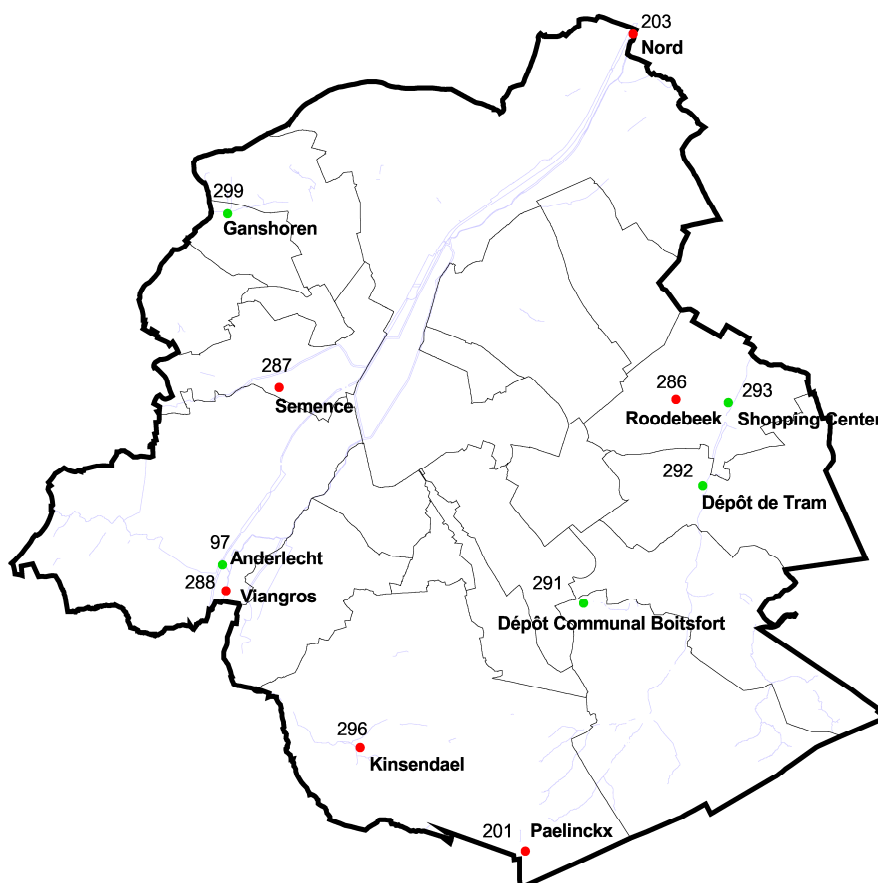


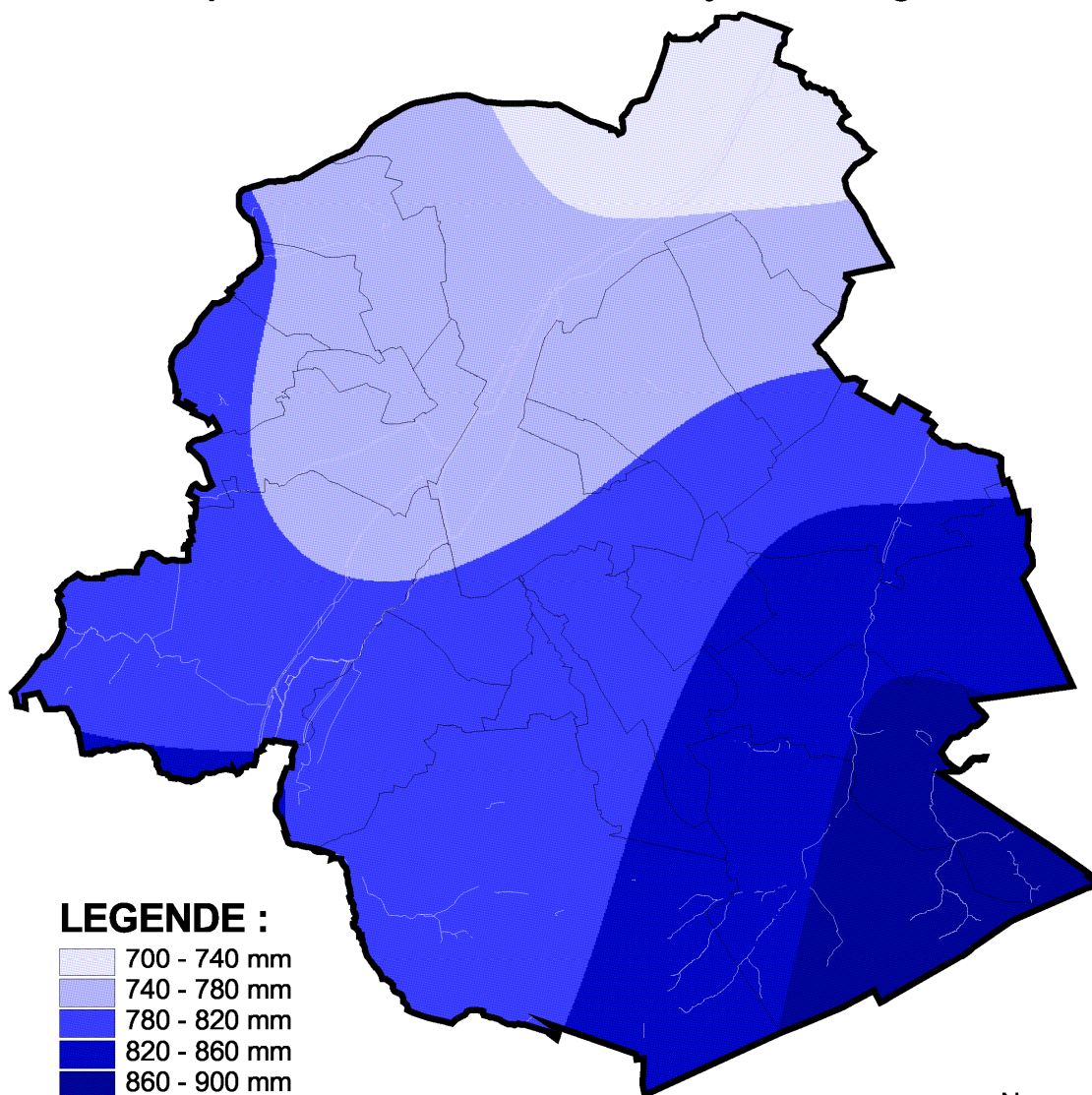
Figure 21 : Les onze stations retenues pour la confection des cartes. Les stations représentées en rouge sont de type GERU, celles en vert sont de type Précis Mécanique. Chaque station est labélisée par son nom et son code.

Région de Bruxelles-Capitale

Brussels Hoofdstedelijk Gewest

Précipitations annuelles

Jaarlijkse Neerslag



LEGENDE :

	700 - 740 mm
	740 - 780 mm
	780 - 820 mm
	820 - 860 mm
	860 - 900 mm

— Limites communales / Gemeentegrenzen

— Cours d'eau / Waterlopen

1 0 1 2 Km



Source : données pluviométriques issues du réseau de mesures de Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2008

Bron : neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2008

Bruxelles Environnement IBGE - Division Nature, Eau et Forêt
Cartographie : IRM - décembre 2010
Réalisé avec Brussels URbIS ©© - Distribution & Copyright CIRB

Leefmilieu Brussel BIM - Afdeling Natuur, Water en Bos
Cartografie : KMI - december 2010
Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS ©© - Verdelling & Copyright CIBG

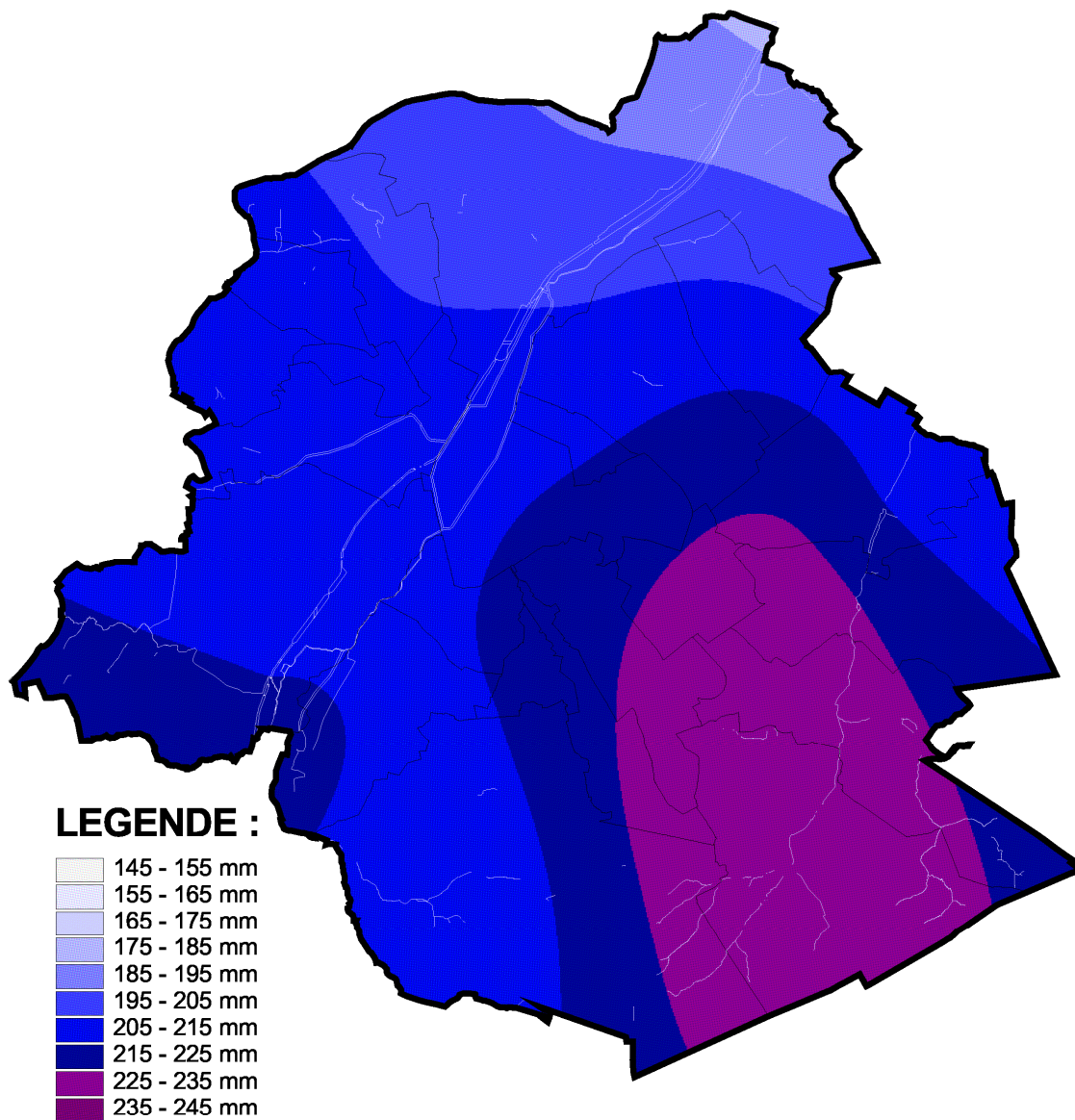


BRUXELLES ENVIRONNEMENT LEEFMILIEU BRUSSEL
IBGE - INSTITUT BRUXELLOIS POUR LA GESTION DE L'ENVIRONNEMENT BIM - BRUSSELS INSTITUUT VOOR MILIEUBEHEER



Région de Bruxelles-Capitale Brussels Hoofdstedelijk Gewest

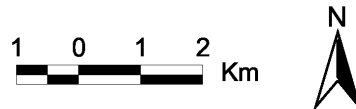
Précipitations hivernales **Winterneerslag**



LEGENDE :

145 - 155 mm
155 - 165 mm
165 - 175 mm
175 - 185 mm
185 - 195 mm
195 - 205 mm
205 - 215 mm
215 - 225 mm
225 - 235 mm
235 - 245 mm

— Limites communales / Gemeentegrenzen
 — Cours d'eau / Waterlopen



Source : données pluviométriques issues du réseau de mesures de Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2008

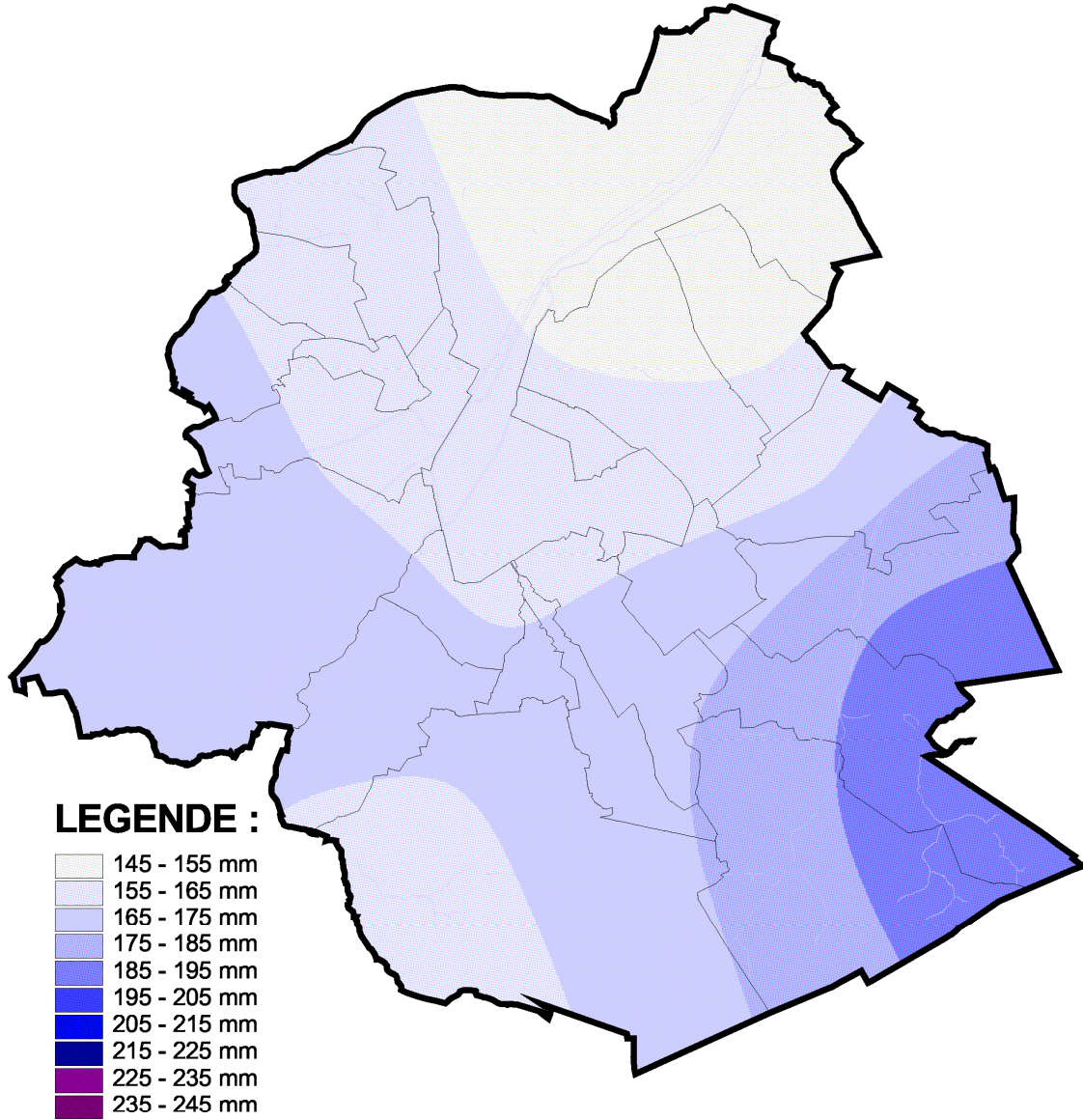
Bron : neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2008

Bruxelles Environnement IBGE - Division Nature, Eau et Forêt
 Cartographie : IRM - décembre 2010
 Réalisé avec Brussels URbIS ©© - Distribution & Copyright CIRB

Leefmilieu Brussel BIM - Afdeling Natuur, Water en Bos
 Cartografie : KMI - december 2010
 Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS ©© - Verdelling & Copyright CIBG



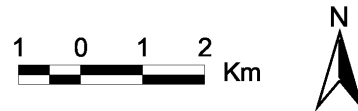
Précipitations printanières Lenteneerslag



LEGENDE :

145 - 155 mm
155 - 165 mm
165 - 175 mm
175 - 185 mm
185 - 195 mm
195 - 205 mm
205 - 215 mm
215 - 225 mm
225 - 235 mm
235 - 245 mm

— Limites communales / Gemeentegrenzen
— Cours d'eau / Waterlopen



Source : données pluviométriques issues du réseau de mesures de Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2008

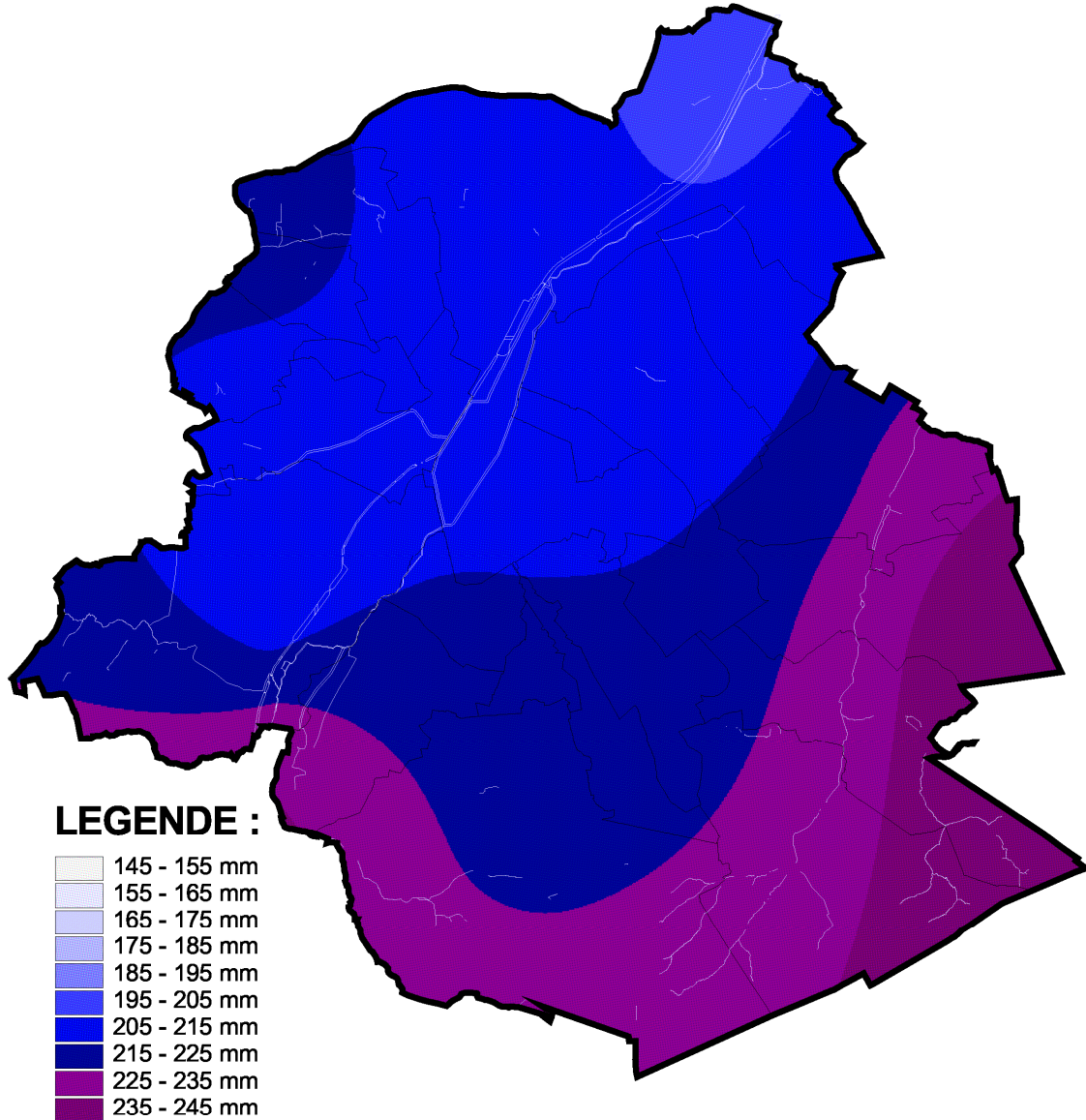
Bron : neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2008

Bruxelles Environnement IBGE - Division Nature, Eau et Forêt
Cartographie : IRM - décembre 2010
Réalisé avec Brussels URbIS ©© - Distribution & Copyright CIRB

Leefmilieu Brussel BIM - Afdeling Natuur, Water en Bos
Cartografie : KMI - december 2010
Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS ©© - Verdelling & Copyright CIBG



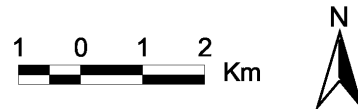
Précipitations estivales Zomerneerslag



LEGENDE :

- 145 - 155 mm
- 155 - 165 mm
- 165 - 175 mm
- 175 - 185 mm
- 185 - 195 mm
- 195 - 205 mm
- 205 - 215 mm
- 215 - 225 mm
- 225 - 235 mm
- 235 - 245 mm

- Limites communales / Gemeentegrenzen
- Cours d'eau / Waterlopen



Source : données pluviométriques issues du réseau de mesures de Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2008

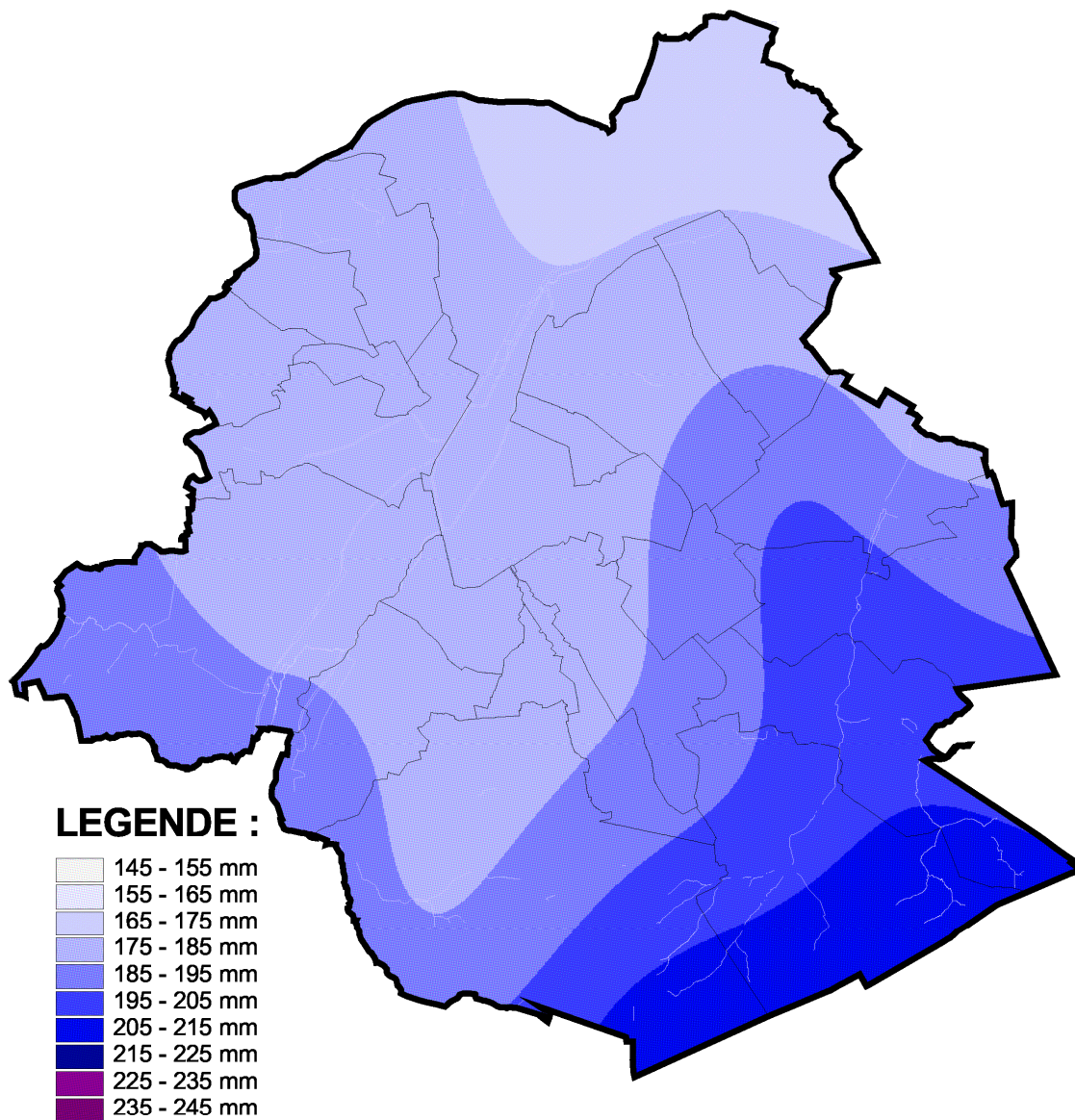
Bron : neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2008

Bruxelles Environnement IBGE - Division Nature, Eau et Forêt
Cartographie : IRM - décembre 2010
Réalisé avec Brussels URbIS ©© - Distribution & Copyright CIRB

Leefmilieu Brussel BIM - Afdeling Natuur, Water en Bos
Cartografie : KMI - december 2010
Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS ©© - Verdeling & Copyright CIBG



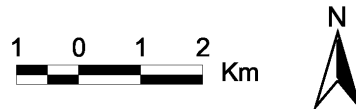
Précipitations automnales Herfsneerslag



LEGENDE :

145 - 155 mm
155 - 165 mm
165 - 175 mm
175 - 185 mm
185 - 195 mm
195 - 205 mm
205 - 215 mm
215 - 225 mm
225 - 235 mm
235 - 245 mm

— Limites communales / Gemeentegrenzen
— Cours d'eau / Waterlopen



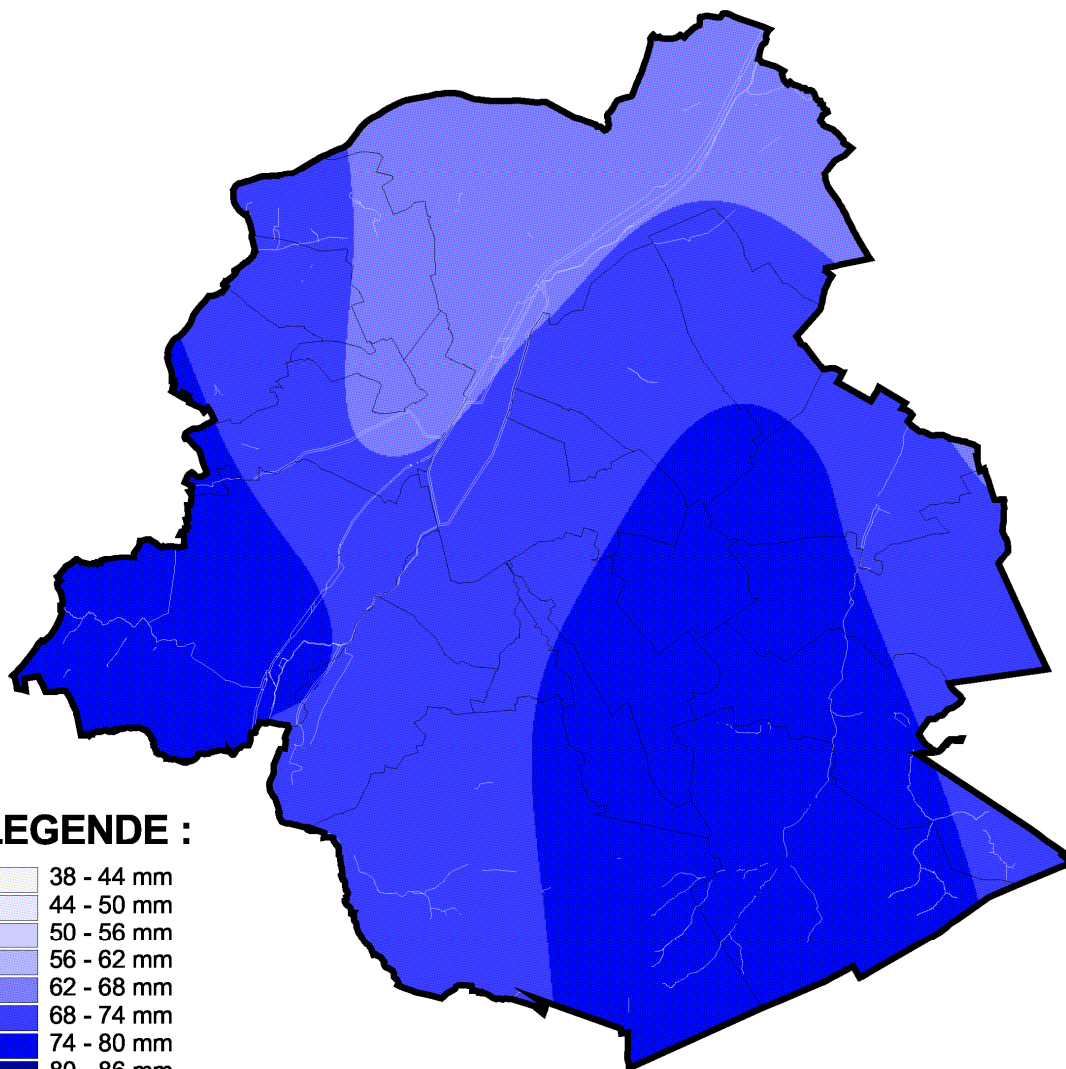
Source : données pluviométriques issues du réseau de mesures de Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2008

Bron : neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2008

Bruxelles Environnement IBGE - Division Nature, Eau et Forêt
Cartographie : IRM - décembre 2010
Réalisé avec Brussels URbIS ©© - Distribution & Copyright CIRB

Leefmilieu Brussel BIM - Afdeling Natuur, Water en Bos
Cartografie : KMI - december 2010
Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS ©© - Verdelling & Copyright CIBG

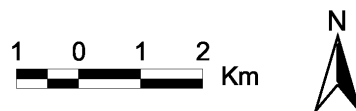




LEGENDE :

	38 - 44 mm
	44 - 50 mm
	50 - 56 mm
	56 - 62 mm
	62 - 68 mm
	68 - 74 mm
	74 - 80 mm
	80 - 86 mm
	86 - 92 mm
	92 - 96 mm

— Limites communales / Gemeentegrenzen
— Cours d'eau / Waterlopen



Source : données pluviométriques issues du réseau de mesures de Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2008

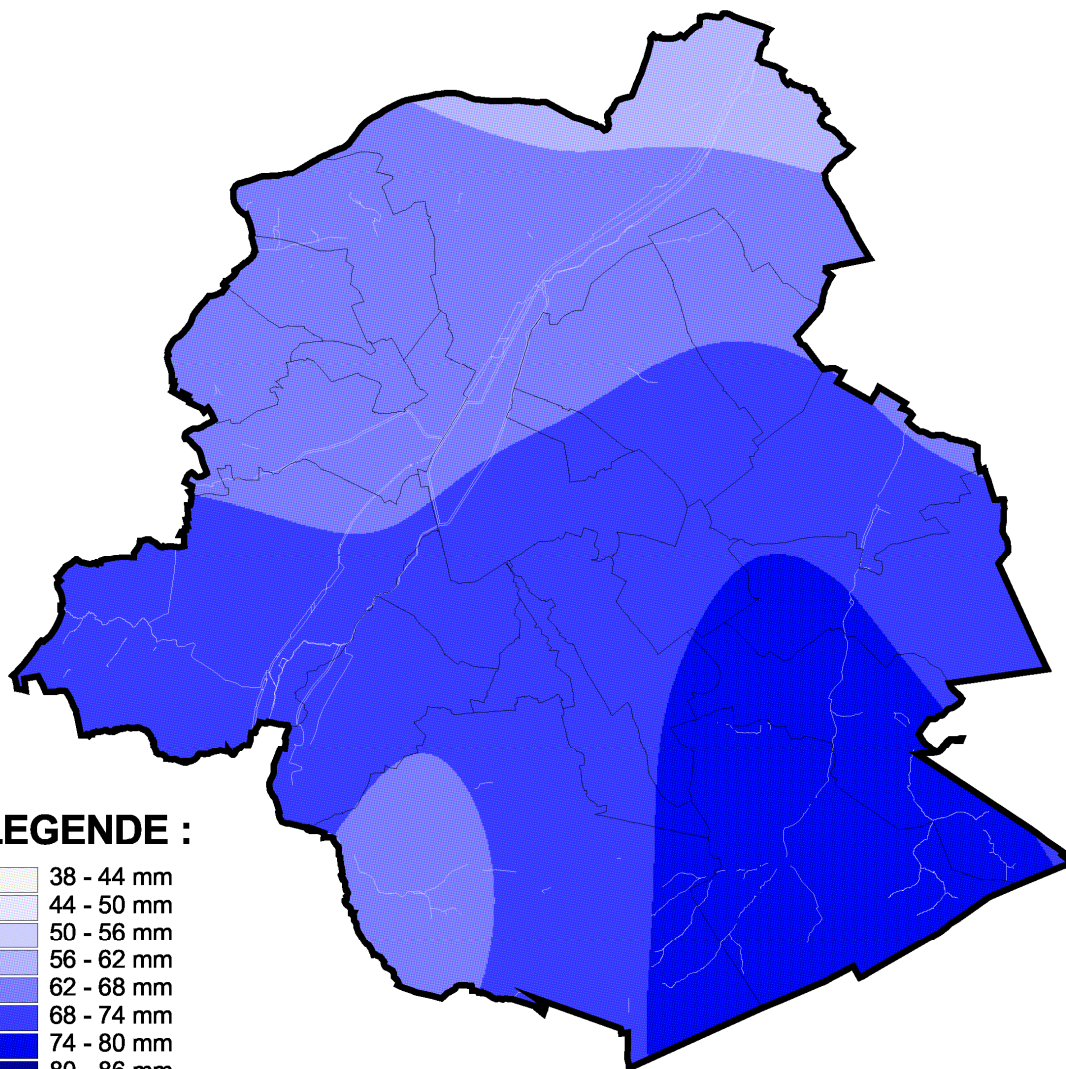
Bron : neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2008

Bruxelles Environnement IBGE - Division Nature, Eau et Forêt
Cartographie : IRM - décembre 2010
Réalisé avec Brussels URbIS ©© - Distribution & Copyright CIRB

Leefmilieu Brussel BIM - Afdeling Natuur, Water en Bos
Cartografie : KMI - december 2010
Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS ©© - Verdelling & Copyright CIBG



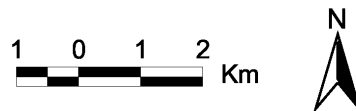
Région de Bruxelles-Capitale Brussels Hoofdstedelijk Gewest
Précipitations de février **Neerslag van februari**



LEGENDE :

38 - 44 mm
44 - 50 mm
50 - 56 mm
56 - 62 mm
62 - 68 mm
68 - 74 mm
74 - 80 mm
80 - 86 mm
86 - 92 mm
92 - 96 mm

— Limites communales / Gemeentegrenzen
 — Cours d'eau / Waterlopen



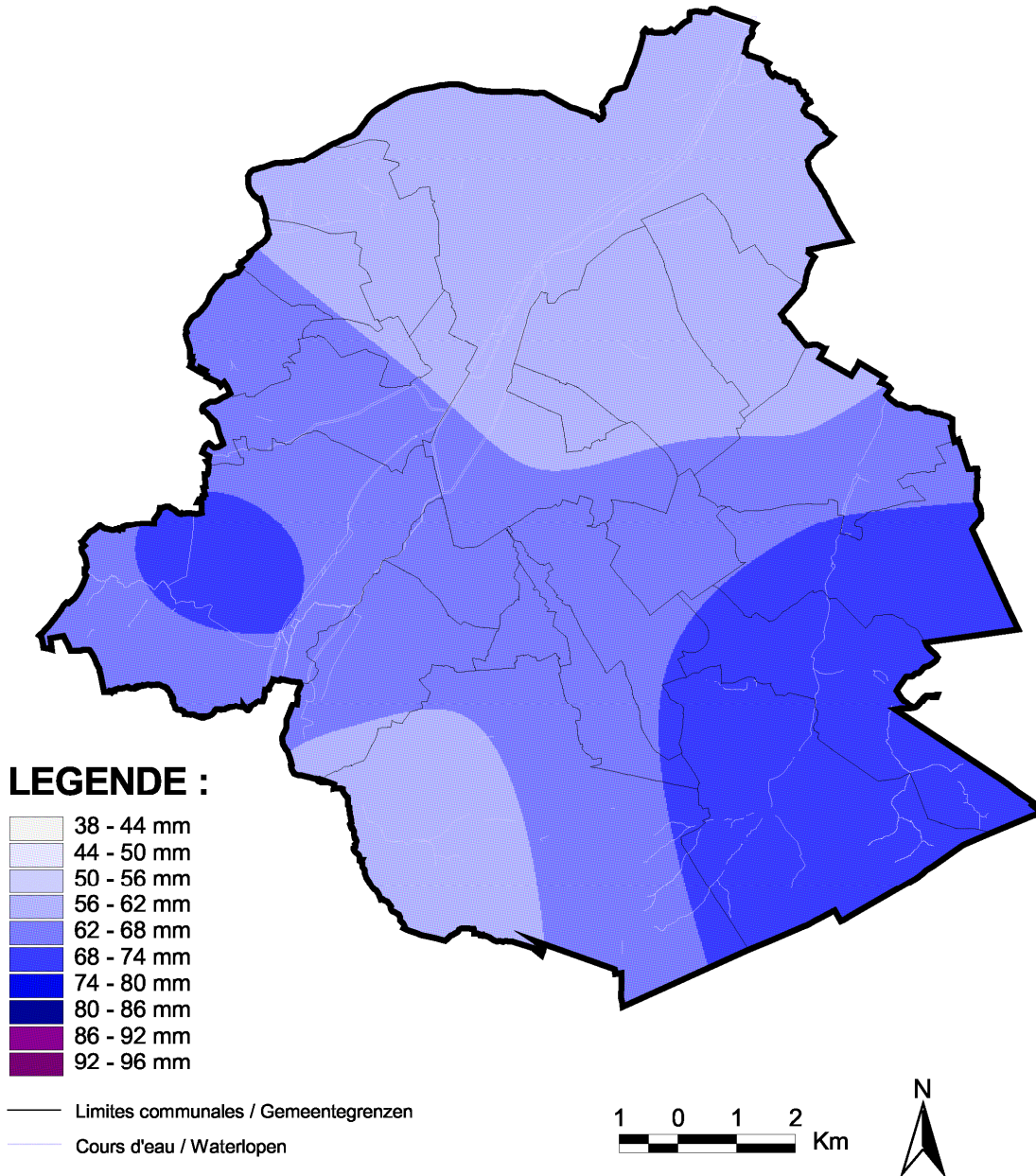
Source : données pluviométriques issues du réseau de mesures de Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2008

Bron : neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2008

Bruxelles Environnement IBGE - Division Nature, Eau et Forêt
 Cartographie : IRM - décembre 2010
 Réalisé avec Brussels URbIS ©© - Distribution & Copyright CIRB

Leefmilieu Brussel BIM - Afdeling Natuur, Water en Bos
 Cartografie : KMI - december 2010
 Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS ©© - Verdelling & Copyright CIBG





Source : données pluviométriques issues du réseau de mesures de Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2008

Bron : neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2008

Bruxelles Environnement IBGE - Division Nature, Eau et Forêt
Cartographie : IRM - décembre 2010
Réalisé avec Brussels URbIS ©© - Distribution & Copyright CIRB

Leefmilieu Brussel BIM - Afdeling Natuur, Water en Bos
Cartografie : KMI - december 2010
Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS ©© - Verdelling & Copyright CIBG

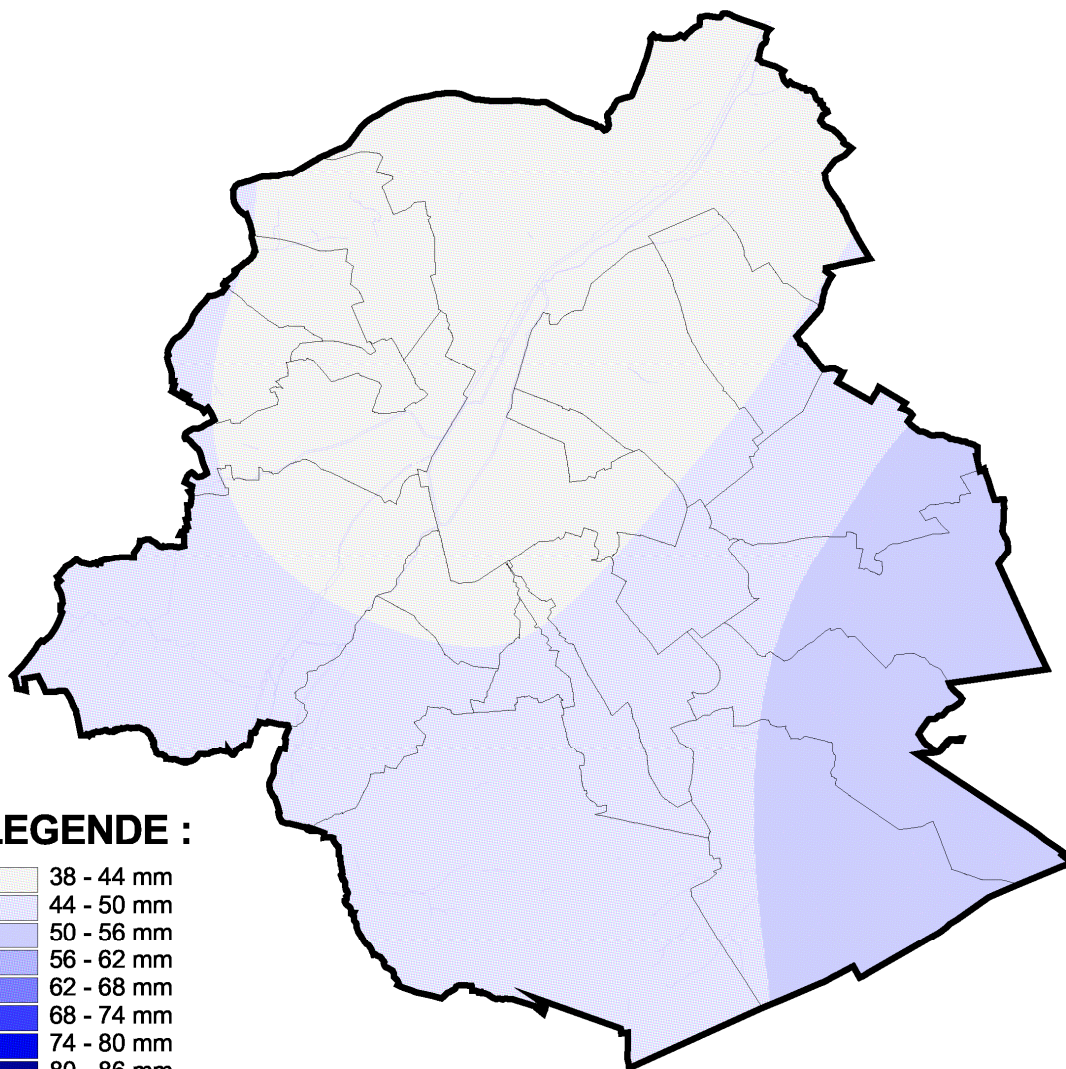


Région de Bruxelles-Capitale

Brussels Hoofdstedelijk Gewest

Précipitations d'avril

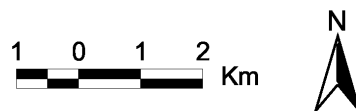
Neerslag van april



LEGENDE :

	38 - 44 mm
	44 - 50 mm
	50 - 56 mm
	56 - 62 mm
	62 - 68 mm
	68 - 74 mm
	74 - 80 mm
	80 - 86 mm
	86 - 92 mm
	92 - 96 mm

— Limites communales / Gemeentegrenzen
— Cours d'eau / Waterlopen



Source : données pluviométriques issues du réseau de mesures de Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2008

Bron : neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2008

Bruxelles Environnement IBGE - Division Nature, Eau et Forêt
Cartographie : IRM - décembre 2010
Réalisé avec Brussels URbIS ©© - Distribution & Copyright CIRB

Leefmilieu Brussel BIM - Afdeling Natuur, Water en Bos
Cartografie : KMI - december 2010
Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS ©© - Verdelling & Copyright CIBG

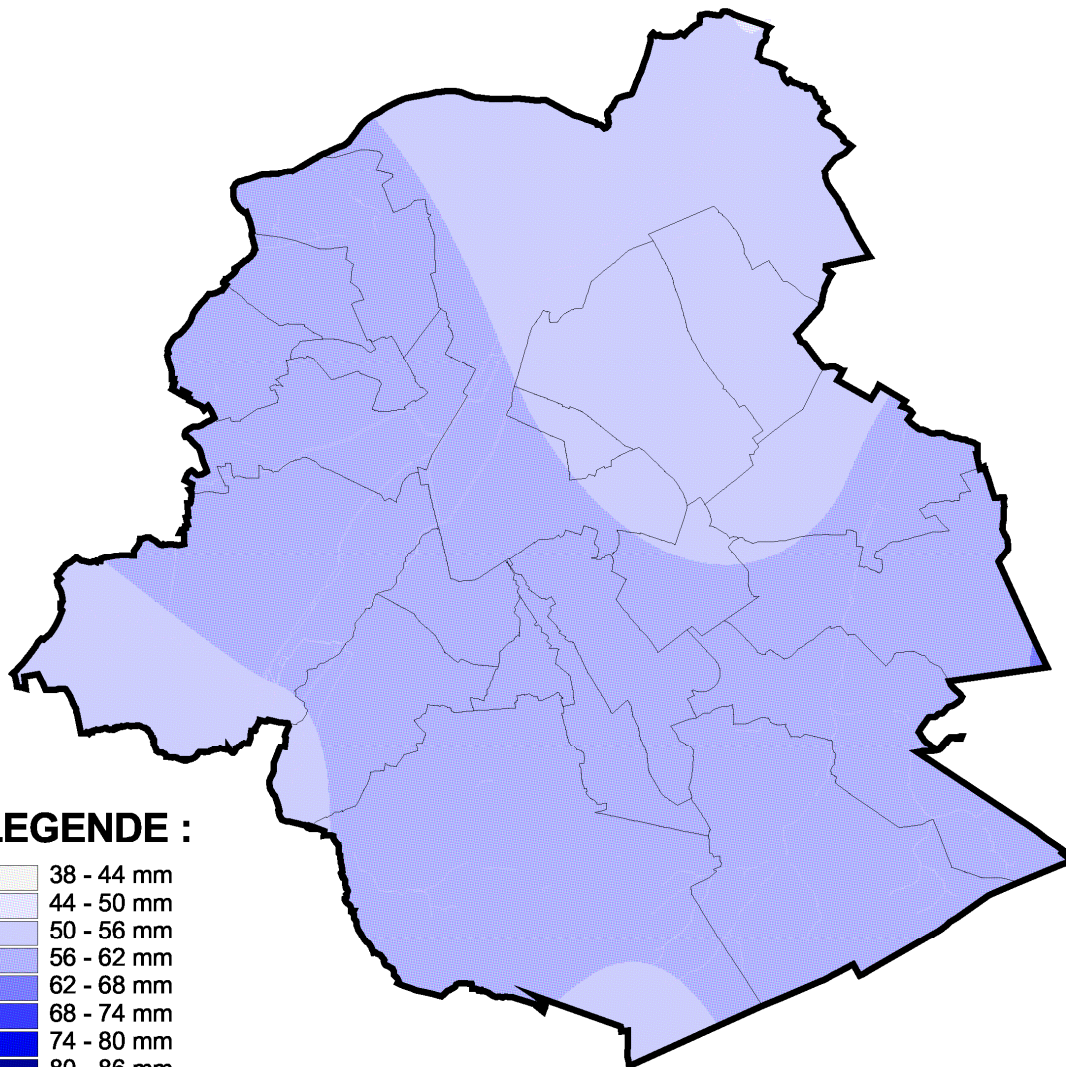


Région de Bruxelles-Capitale

Brussels Hoofdstedelijk Gewest

Précipitations de mai

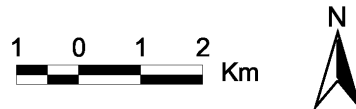
Neerslag van mei



LEGENDE :

	38 - 44 mm
	44 - 50 mm
	50 - 56 mm
	56 - 62 mm
	62 - 68 mm
	68 - 74 mm
	74 - 80 mm
	80 - 86 mm
	86 - 92 mm
	92 - 96 mm

- Limites communales / Gemeentegrenzen
- Cours d'eau / Waterlopen



Source : données pluviométriques issues du réseau de mesures de Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2008

Bron : neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2008

Bruxelles Environnement IBGE - Division Nature, Eau et Forêt
Cartographie : IRM - décembre 2010
Réalisé avec Brussels URbIS ©© - Distribution & Copyright CIRB

Leefmilieu Brussel BIM - Afdeling Natuur, Water en Bos
Cartografie : KMI - december 2010
Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS ©© - Verdelling & Copyright CIBG

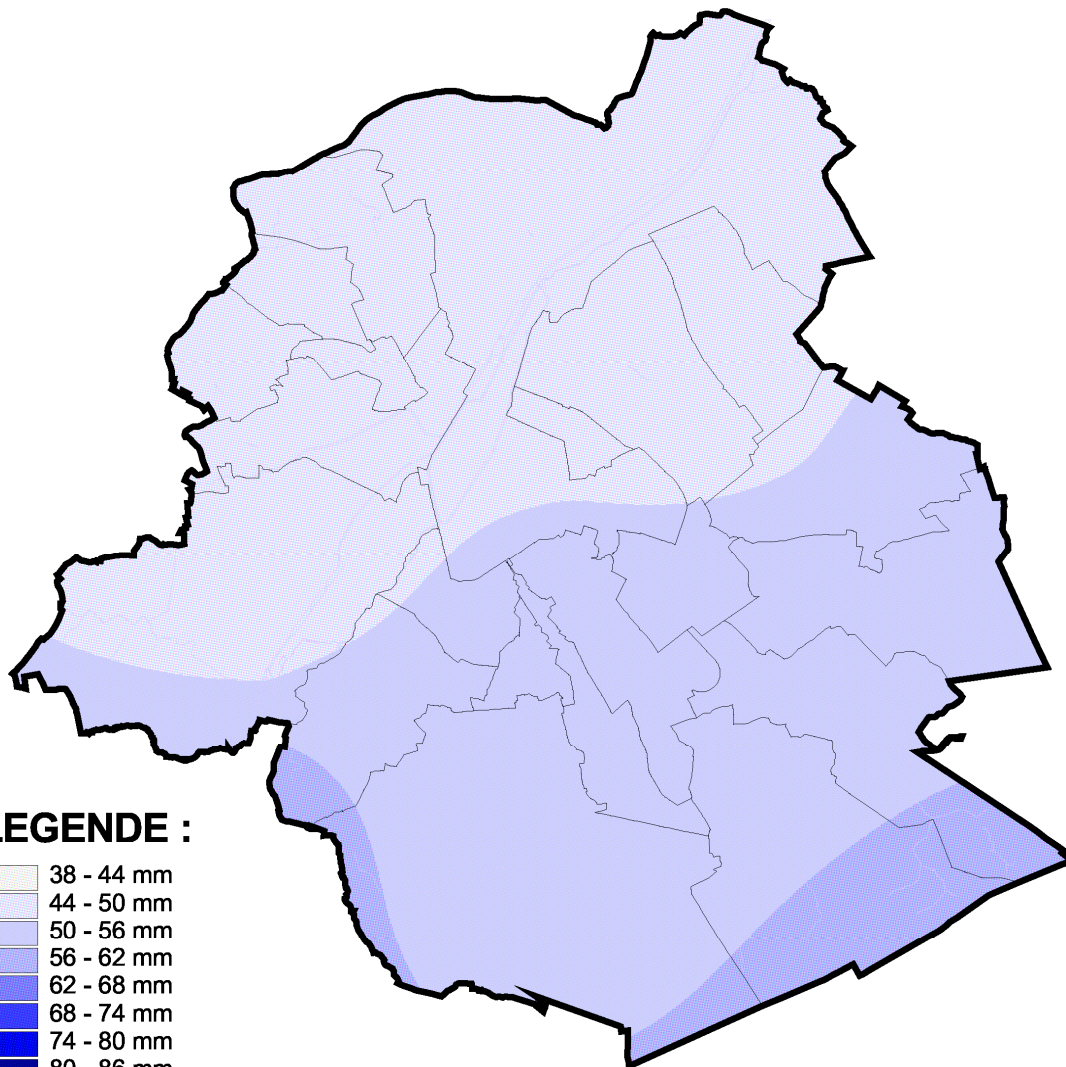


Région de Bruxelles-Capitale

Brussels Hoofdstedelijk Gewest

Précipitations de juin

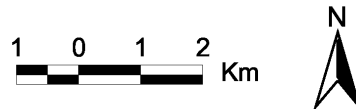
Neerslag van juni



LEGENDE :

	38 - 44 mm
	44 - 50 mm
	50 - 56 mm
	56 - 62 mm
	62 - 68 mm
	68 - 74 mm
	74 - 80 mm
	80 - 86 mm
	86 - 92 mm
	92 - 96 mm

- Limites communales / Gemeentegrenzen
- Cours d'eau / Waterlopen



Source : données pluviométriques issues du réseau de mesures de Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2008

Bron : neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2008

Bruxelles Environnement IBGE - Division Nature, Eau et Forêt
Cartographie : IRM - décembre 2010
Réalisé avec Brussels URbIS ©© - Distribution & Copyright CIRB

Leefmilieu Brussel BIM - Afdeling Natuur, Water en Bos
Cartografie : KMI - december 2010
Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS ©© - Verdeling & Copyright CIBG

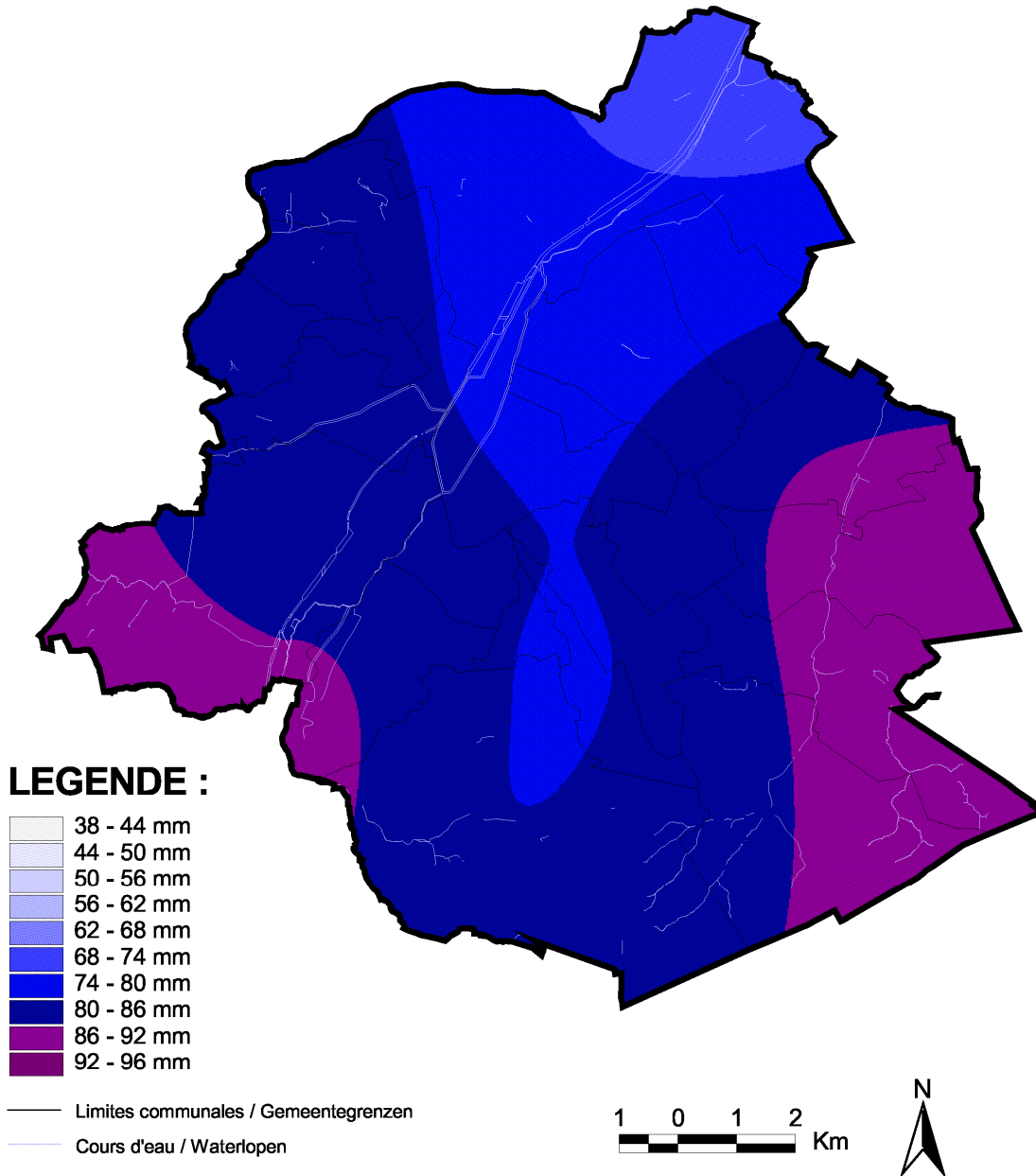


Région de Bruxelles-Capitale

Brussels Hoofdstedelijk Gewest

Précipitations de juillet

Neerslag van juli



Source : données pluviométriques issues du réseau de mesures de Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2008

Bron : neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2008

Bruxelles Environnement IBGE - Division Nature, Eau et Forêt
Cartographie : IRM - décembre 2010
Réalisé avec Brussels URbIS © - Distribution & Copyright CIRB

Leefmilieu Brussel BIM - Afdeling Natuur, Water en Bos
Cartografie : KMI - december 2010
Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS © - Verdelling & Copyright CIBG



BRUXELLES ENVIRONNEMENT LEEFMILIEU BRUSSEL
IBGE - INSTITUT BRUXELLOIS POUR LA GESTION DE L'ENVIRONNEMENT BIM - BRUSSELS INSTITUUT VOOR MILIEUBEHEER

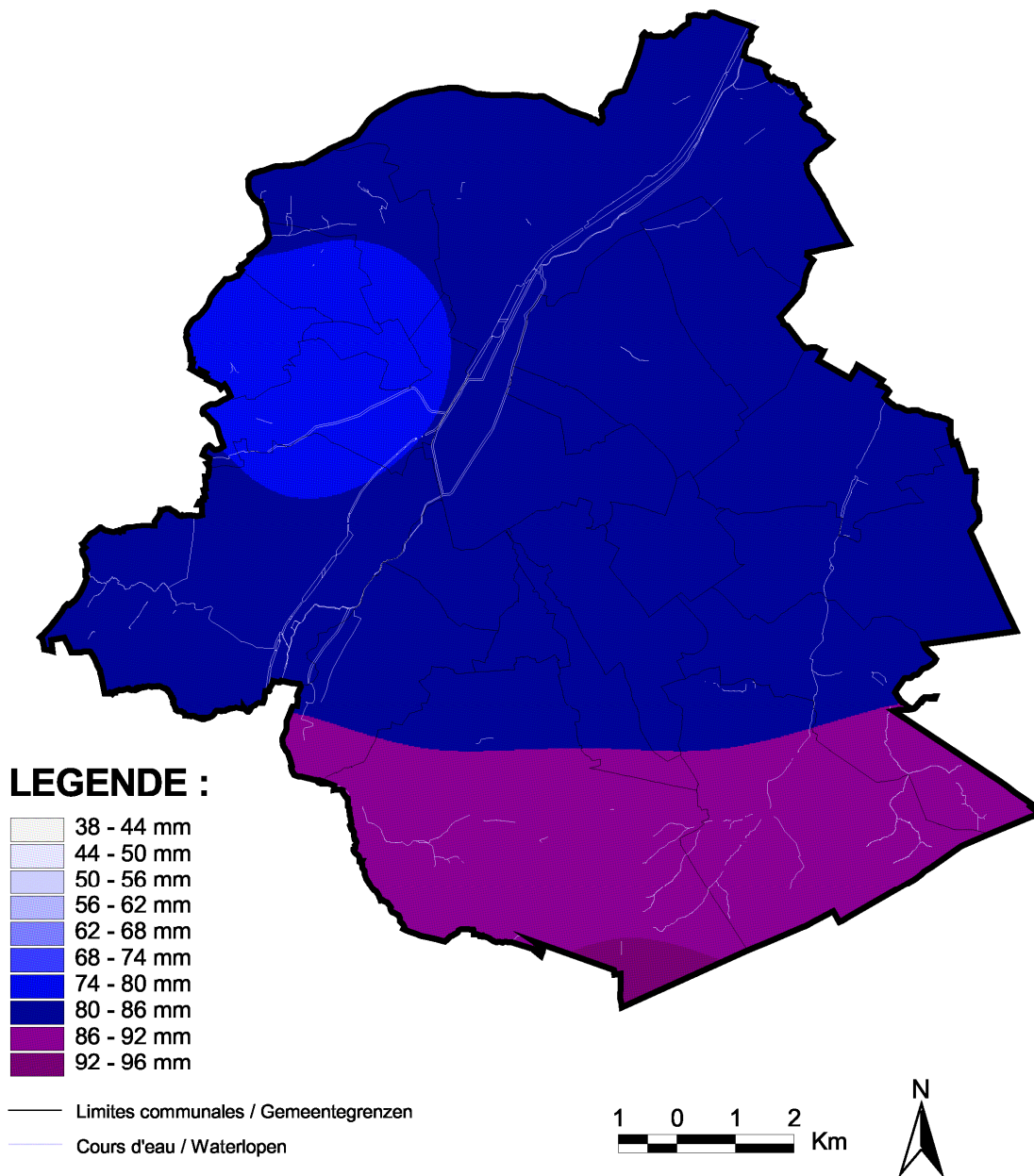


Région de Bruxelles-Capitale

Brussels Hoofdstedelijk Gewest

Précipitations d'août

Neerslag van augustus



Source : données pluviométriques issues du réseau de mesures de Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2008

Bron : neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2008

Bruxelles Environnement IBGE - Division Nature, Eau et Forêt
Cartographie : IRM - décembre 2010
Réalisé avec Brussels URbIS ©© - Distribution & Copyright CIRB

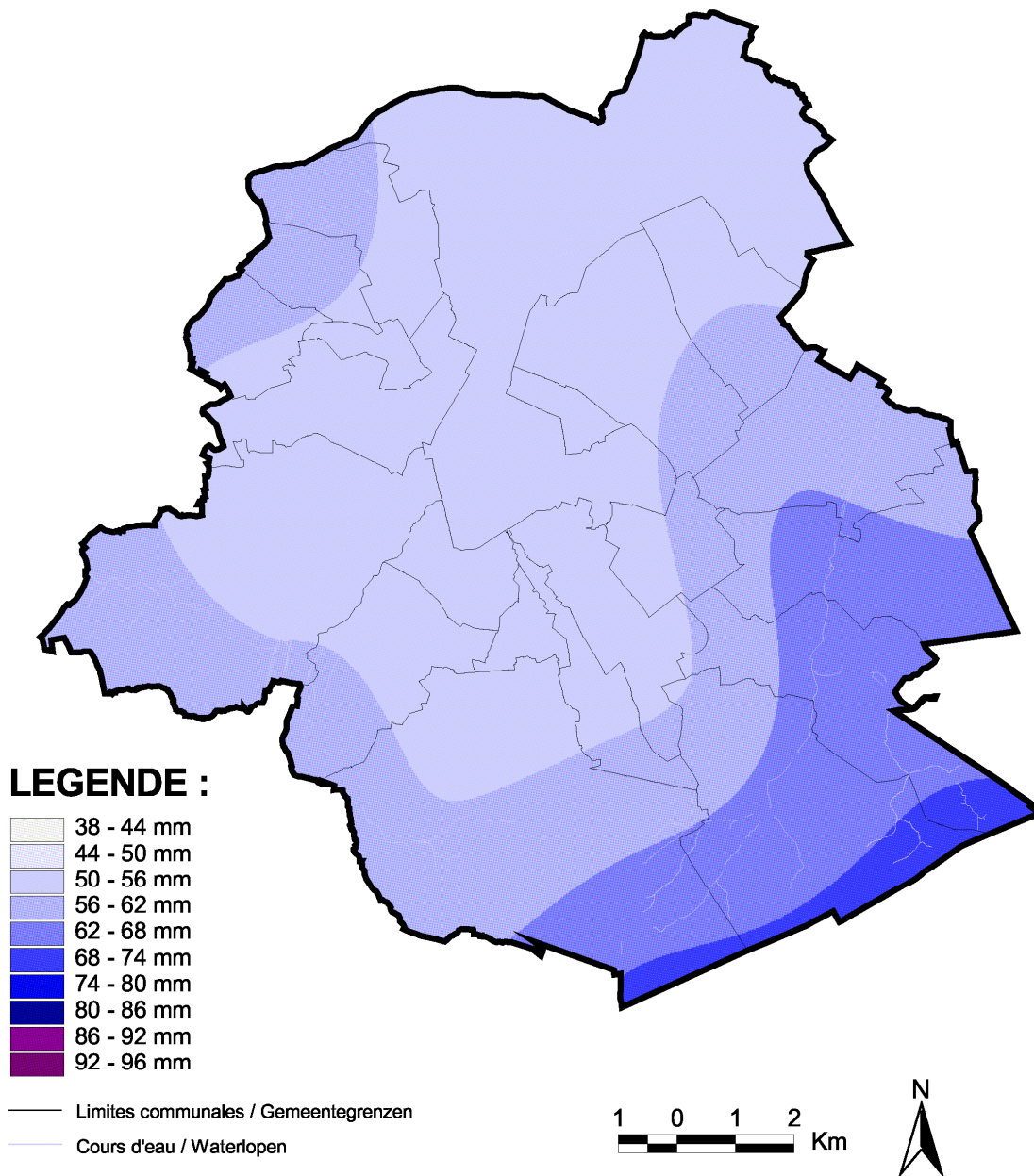
Leefmilieu Brussel BIM - Afdeling Natuur, Water en Bos
Cartografie : KMI - december 2010
Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS ©© - Verdeling & Copyright CIBG



BRUXELLES ENVIRONNEMENT LEEFMILIEU BRUSSEL
IBGE - INSTITUT BRUXELLOIS POUR LA GESTION DE L'ENVIRONNEMENT BIM - BRUSSELS INSTITUUT VOOR MILIEUBEHEER



Région de Bruxelles-Capitale Brussels Hoofdstedelijk Gewest
Précipitations de septembre **Neerslag van september**



Source : données pluviométriques issues du réseau de mesures de Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2008

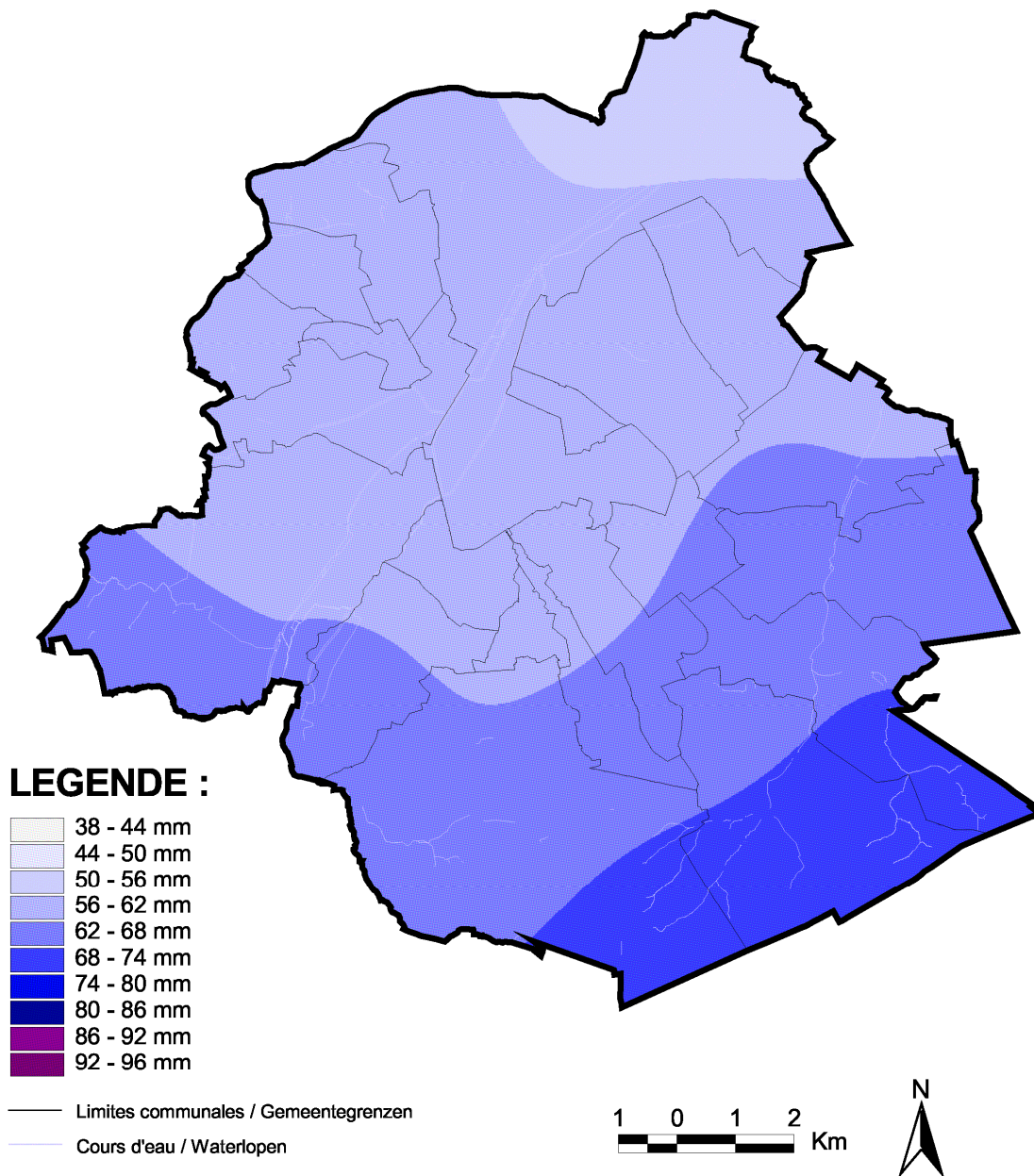
Bron : neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2008

Bruxelles Environnement IBGE - Division Nature, Eau et Forêt
 Cartographie : IRM - décembre 2010
 Réalisé avec Brussels URbIS ©© - Distribution & Copyright CIRB

Leefmilieu Brussel BIM - Afdeling Natuur, Water en Bos
 Cartografie : KMI - december 2010
 Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS ©© - Verdelling & Copyright CIBG



Région de Bruxelles-Capitale Brussels Hoofdstedelijk Gewest
Précipitations d'octobre Neerslag van oktober



Source : données pluviométriques issues du réseau de mesures de Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2008

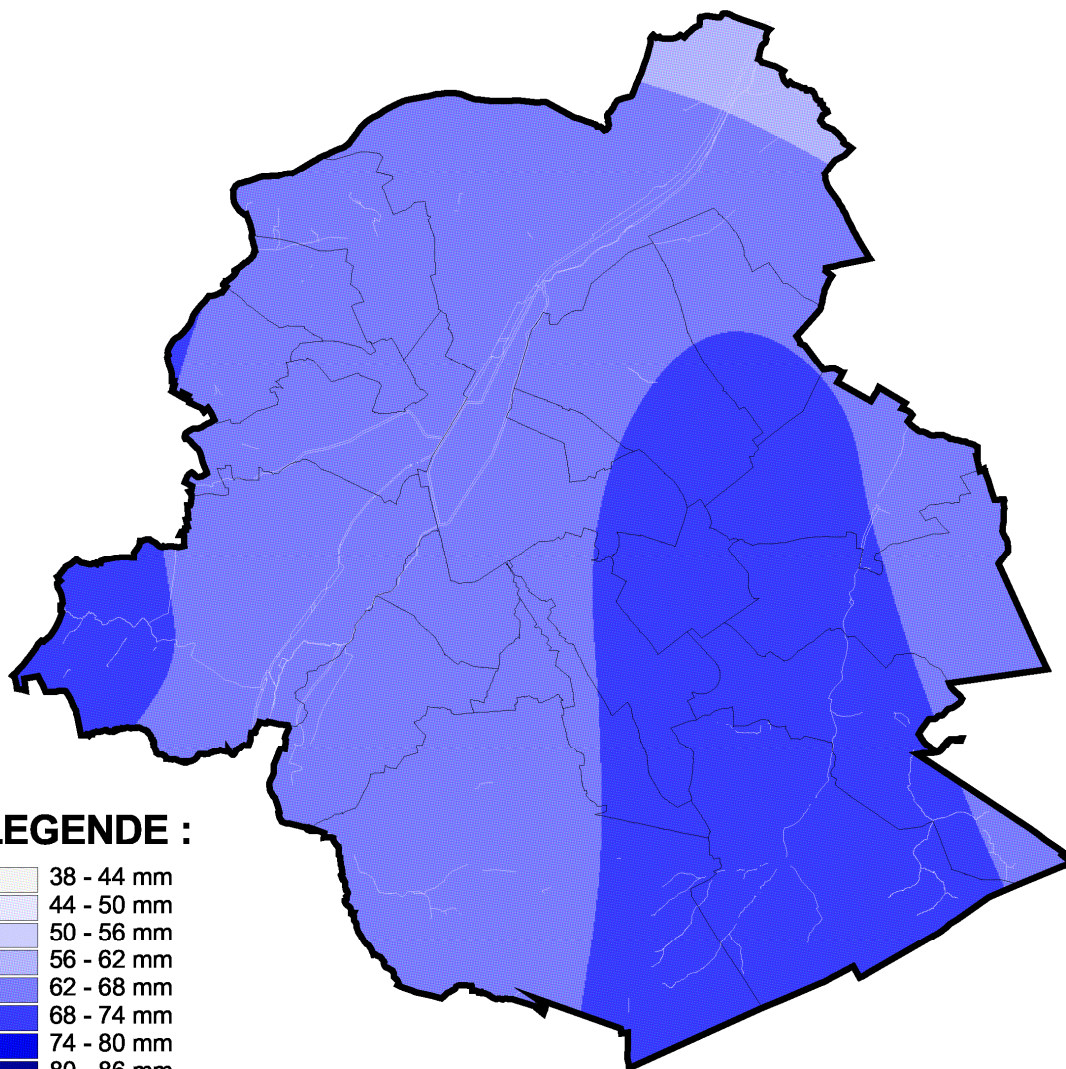
Bron : neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2008

Bruxelles Environnement IBGE - Division Nature, Eau et Forêt
 Cartographie : IRM - décembre 2010
 Réalisé avec Brussels URbIS ©© - Distribution & Copyright CIRB

Leefmilieu Brussel BIM - Afdeling Natuur, Water en Bos
 Cartografie : KMI - december 2010
 Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS ©© - Verdeling & Copyright CIBG



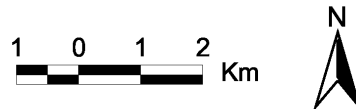
Région de Bruxelles-Capitale Brussels Hoofdstedelijk Gewest
Précipitations de novembre **Neerslag van november**



LEGENDE :

38 - 44 mm
44 - 50 mm
50 - 56 mm
56 - 62 mm
62 - 68 mm
68 - 74 mm
74 - 80 mm
80 - 86 mm
86 - 92 mm
92 - 96 mm

— Limites communales / Gemeentegrenzen
 — Cours d'eau / Waterlopen



Source : données pluviométriques issues du réseau de mesures de Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2008

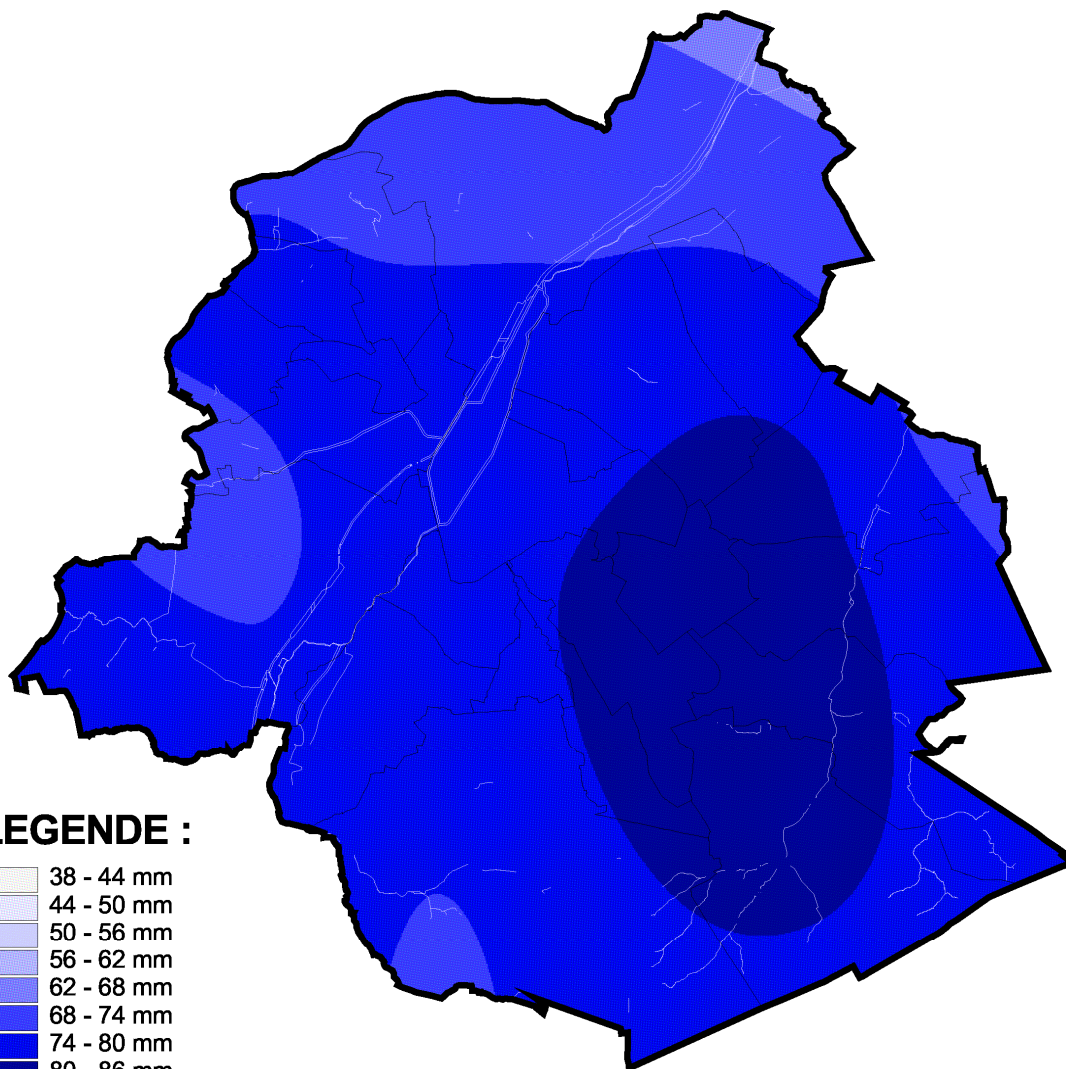
Bron : neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2008

Bruxelles Environnement IBGE - Division Nature, Eau et Forêt
 Cartographie : IRM - décembre 2010
 Réalisé avec Brussels URbIS ©© - Distribution & Copyright CIRB

Leefmilieu Brussel BIM - Afdeling Natuur, Water en Bos
 Cartografie : KMI - december 2010
 Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS ©© - Verdelling & Copyright CIBG



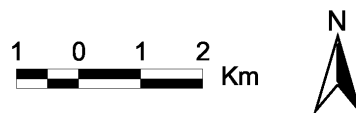
Région de Bruxelles-Capitale Brussels Hoofdstedelijk Gewest
Précipitations de décembre **Neerslag van december**



LEGENDE :

38 - 44 mm
44 - 50 mm
50 - 56 mm
56 - 62 mm
62 - 68 mm
68 - 74 mm
74 - 80 mm
80 - 86 mm
86 - 92 mm
92 - 96 mm

— Limites communales / Gemeentegrenzen
 — Cours d'eau / Waterlopen



Source : données pluviométriques issues du réseau de mesures de Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2008

Bron : neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2008

Bruxelles Environnement IBGE - Division Nature, Eau et Forêt
 Cartographie : IRM - décembre 2010
 Réalisé avec Brussels URbIS © - Distribution & Copyright CIRB

Leefmilieu Brussel BIM - Afdeling Natuur, Water en Bos
 Cartografie : KMI - december 2010
 Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS © - Verdelling & Copyright CIBG



Annexe 4

Cumuls pluviométriques journaliers utilisés pour l'étude comparative des pluviomètres à Uccle

(cf. chapitre 6, point 6.1 : *Comparaison de pluviomètres à Uccle*).

Les critères suivants ont été suivis pour déterminer si une date devait être filtrée ou non :

- la date est gardée chaque fois que les valeurs des pluviomètres semblent cohérentes entre elles (après analyse globale de toutes les données).
- si OT2 = 0 mm et tous les autres pluviomètres $\leq 0,5$ mm, alors la date est gardée.
- si un pluviomètre = 0,1 ou 0,2 mm (souvent PM) et tous les autres pluviomètres = 0 mm, alors la date est conservée.
- **En jaune** : les dates filtrées pour la partie (2) de la Table 2 (cf. chapitre 6) :
 - hors périodes neigeuses : si un ou deux pluviomètres (OT2 ou OT1+OT2) mesurent 0 mm et les autres pluviomètres $> 0,5$ mm
 - hors périodes neigeuses : s'il y a trop de différences entre un (ou deux, ou trois maximum) pluviomètre(s) (surtout OT2) et le P50 (l'appareil de référence).
 - en périodes neigeuses : s'il y a des valeurs manifestement trop basses au PM (à augets et non chauffé) et sans compensation 'suffisante' par la suite.

date	neige	P50	PM	OT1	OT2	SYN
1/06/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2/06/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3/06/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4/06/2009		0.0	0.1	0.1	0.0	0.1
5/06/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6/06/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7/06/2009		0.7	0.9	0.8	0.0	0.7
8/06/2009		1.5	1.5	1.2	0.6	1.2
9/06/2009		23.8	22.8	23.0	0.0	22.1
10/06/2009		14.6	15.2	13.8	13.0	13.3
11/06/2009		5.6	5.4	5.0	4.6	6.5
12/06/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13/06/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14/06/2009		5.4	5.6	5.3	0.0	5.2
15/06/2009		1.9	1.9	1.7	0.0	1.6
16/06/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17/06/2009		0.0	0.1	0.1	0.0	0.0
18/06/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19/06/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20/06/2009		1.2	1.4	1.2	0.0	1.2
21/06/2009		2.2	2.2	2.0	0.0	2.0
22/06/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

date	neige	P50	PM	OT1	OT2	SYN
23/06/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24/06/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25/06/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
26/06/2009		7.3	7.7	7.2	7.2	6.6
27/06/2009		0.3	0.3	0.4	0.0	0.4
28/06/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
29/06/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30/06/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1/07/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2/07/2009		0.3	0.3	0.3	0.2	0.2
3/07/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4/07/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5/07/2009		2.1	2.2	2.3	1.8	2.2
6/07/2009		4.2	4.3	4.2	3.6	3.7
7/07/2009		6.6	6.8	6.4	5.4	6.4
8/07/2009		7.9	8.2	7.4	6.4	7.7
9/07/2009		6.2	6.1	6.0	5.1	5.5
10/07/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11/07/2009		3.8	3.8	3.6	2.7	3.5
12/07/2009		0.2	0.3	0.2	0.0	0.2
13/07/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14/07/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15/07/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16/07/2009		0.5	0.7	0.6	0.4	0.5
17/07/2009		4.8	5.0	4.7	4.4	4.5
18/07/2009		4.8	5.0	4.7	4.1	4.3
19/07/2009		3.1	3.2	2.8	2.6	2.8
20/07/2009		0.2	0.1	0.1	0.0	0.1
21/07/2009		0.5	0.6	0.5	0.2	0.4
22/07/2009		8.1	8.7	8.0	7.6	7.9
23/07/2009		12.5	12.9	12.1	11.6	12.2
24/07/2009		5.2	5.0	5.0	4.5	5.1
25/07/2009		0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
26/07/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27/07/2009		0.7	0.9	0.8	0.4	0.7
28/07/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
29/07/2009		1.3	1.4	1.3	1.2	1.4
30/07/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
31/07/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1/08/2009		6.7	7.3	6.5	6.2	6.5
2/08/2009		8.6	8.9	8.3	8.0	8.3
3/08/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4/08/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5/08/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6/08/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7/08/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8/08/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9/08/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10/08/2009		3.2	3.7	3.1	2.7	3.1
11/08/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12/08/2009		1.5	1.6	1.3	1.1	1.3
13/08/2009		2.3	2.3	2.1	2.1	2.1
14/08/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15/08/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16/08/2009		0.1	0.1	0.1	0.0	0.1
17/08/2009		0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
18/08/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19/08/2009		0.0	0.1	0.1	0.0	0.0
20/08/2009		8.5	8.3	8.3	3.5	8.2

date	neige	P50	PM	OT1	OT2	SYN
21/08/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22/08/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23/08/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24/08/2009		0.9	1.0	0.0	0.0	0.8
25/08/2009		2.9	3.0	0.0	0.0	2.8
26/08/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27/08/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
28/08/2009		0.0	0.1	0.1	0.0	0.0
29/08/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30/08/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
31/08/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1/09/2009		6.0	6.4	5.6	5.3	5.5
2/09/2009		4.4	4.7	4.3	4.0	4.3
3/09/2009		5.1	4.9	4.8	4.3	4.7
4/09/2009		4.4	4.5	4.1	3.8	4.1
5/09/2009		0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
6/09/2009		0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
7/09/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8/09/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9/09/2009		0.3	0.3	0.2	0.0	0.4
10/09/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11/09/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12/09/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13/09/2009		0.0	0.1	0.1	0.0	0.1
14/09/2009		7.2	7.8	5.5	5.4	8.1
15/09/2009		0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
16/09/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17/09/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18/09/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19/09/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20/09/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21/09/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22/09/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23/09/2009		0.4	0.5	0.4	0.0	0.5
24/09/2009		1.1	1.3	1.2	1.0	1.1
25/09/2009		0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
26/09/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27/09/2009		0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
28/09/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
29/09/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30/09/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1/10/2009		0.1	0.3	0.1	0.0	0.1
2/10/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3/10/2009		1.3	1.5	1.3	1.1	1.3
4/10/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5/10/2009		10.7	11.7	10.6	10.1	10.4
6/10/2009		8.3	9.0	8.4	8.3	8.2
7/10/2009		61.8	57.9	59.6	56.2	59.5
8/10/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9/10/2009		9.2	9.7	9.2	8.8	9.3
10/10/2009		4.3	4.5	4.4	4.1	4.2
11/10/2009		2.8	3.0	2.6	2.2	2.6
12/10/2009		0.1	0.3	0.2	0.0	0.2
13/10/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14/10/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15/10/2009		0.0	0.2	0.1	0.0	0.1
16/10/2009		1.9	2.1	1.9	1.3	1.8
17/10/2009		0.5	0.6	0.5	0.5	0.6
18/10/2009		0.0	0.1	0.0	0.0	0.0

date	neige	P50	PM	OT1	OT2	SYN
19/10/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20/10/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21/10/2009		1.6	1.7	1.4	0.6	1.5
22/10/2009		0.1	0.2	0.0	0.0	0.1
23/10/2009		0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
24/10/2009		1.7	2.2	1.8	2.0	2.1
25/10/2009		0.4	0.7	0.5	0.5	0.6
26/10/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27/10/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
28/10/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
29/10/2009		0.1	0.2	0.0	0.0	0.0
30/10/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
31/10/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1/11/2009		11.8	12.5	11.5	11.2	11.4
2/11/2009		0.5	0.6	0.4	0.2	0.4
3/11/2009		17.4	17.4	17.0	16.2	16.2
4/11/2009		0.7	1.0	0.8	0.6	0.7
5/11/2009		4.0	4.5	4.0	3.8	3.9
6/11/2009		4.0	4.6	4.1	3.8	4.4
7/11/2009		0.2	0.4	0.3	0.0	0.2
8/11/2009		0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
9/11/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10/11/2009		1.2	1.5	1.2	0.7	1.2
11/11/2009		0.9	1.1	1.0	0.9	0.9
12/11/2009		3.4	3.9	3.6	3.5	3.5
13/11/2009		0.3	0.3	0.3	0.5	0.3
14/11/2009		2.7	3.1	2.6	2.6	2.7
15/11/2009		1.7	1.8	1.6	1.3	1.5
16/11/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17/11/2009		1.6	2.0	1.5	1.4	1.7
18/11/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19/11/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20/11/2009		1.5	1.7	1.4	1.3	1.3
21/11/2009		5.4	5.8	5.3	5.3	5.2
22/11/2009		5.5	5.4	5.4	4.8	4.9
23/11/2009		12.8	13.5	11.9	11.8	11.4
24/11/2009		3.9	3.8	0.5	0.3	0.4
25/11/2009		0.4	0.6	0.5	0.2	0.4
26/11/2009		3.9	4.4	4.0	3.7	3.9
27/11/2009		6.0	7.0	6.5	6.1	6.1
28/11/2009		6.9	7.4	6.8	6.7	6.4
29/11/2009		0.8	1.0	0.8	0.8	0.8
30/11/2009		0.5	0.8	0.7	0.6	0.7
1/12/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2/12/2009		2.8	3.3	3.0	2.4	2.8
3/12/2009		4.4	4.9	4.5	4.2	4.5
4/12/2009		6.3	6.2	5.8	5.5	5.5
5/12/2009		3.9	4.3	4.0	3.8	3.9
6/12/2009		1.4	1.8	1.4	1.0	1.3
7/12/2009		4.0	4.3	3.9	3.9	3.8
8/12/2009		0.1	0.2	0.1	0.0	0.1
9/12/2009		10.0	10.5	9.9	9.2	9.8
10/12/2009		0.6	0.5	0.4	0.0	0.4
11/12/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
12/12/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13/12/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14/12/2009		0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
15/12/2009		0.0	0.2	0.0	0.0	0.0
16/12/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

date	neige	P50	PM	OT1	OT2	SYN
17/12/2009	neige	6.9	0.1	6.9	4.9	6.7
18/12/2009		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19/12/2009	neige	0.3	0.0	0.3	0.0	0.2
20/12/2009	neige	7.4	0.0	8.1	6.6	7.8
21/12/2009	neige	4.4	0.0	4.9	4.7	5.0
22/12/2009		0.0	0.0	0.1	0.0	0.1
23/12/2009		0.0	1.8	0.0	0.0	0.0
24/12/2009		9.2	13.4	9.3	8.8	9.3
25/12/2009		1.1	2.7	1.2	1.4	1.2
26/12/2009		0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
27/12/2009		0.8	1.0	0.9	0.4	0.9
28/12/2009		0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
29/12/2009		13.4	10.5	12.6	12.0	12.7
30/12/2009		3.6	4.0	3.4	3.0	3.5
31/12/2009		0.2	0.0	0.0	0.0	0.0

Annexe 5

Effects of urbanization and climate change on surface runoff of the Brussels Capital Region basin : a case study using an urban soil–vegetation–atmosphere-transfer model

Article soumis pour publication dans *International Journal of Climatology* à la suite de l'étude sur la modélisation hydrologique urbaine

(cf. chapitre 7 : *Micro-climatologie en Région bruxelloise*).

Effects of urbanization and climate change on surface runoff of the Brussels Capital Region basin

A case study using an urban soil-vegetation-atmosphere-transfer model

Rafiq HAMDI

Corresponding author address: R. Hamdi, Royal Meteorological Institute, Avenue Circulaire, 3, B-1180 Brussels, Belgium.

E-mail: rafiq.[hamdi@oma.be](mailto:rafiq.hamdi@oma.be)

ABSTRACT

This study describe the use of a state-of-the-art urban parametrization (the Town Energy Balance scheme, TEB) to examine how the surface runoff of the Brussels Capital Region (BCR) responded to historical urbanization (1960-1999) and how it will respond in cases of climate changes and/or future urbanization. TEB is coupled to a soil-vegetation-atmosphere-transfer model in order to describe the energy exchanges between the urban surfaces and the atmosphere in a realistic way. Key for this study is that both energy and water balances are resolved and interact through the evaporative term. Historical urbanization of BCR is estimated from changes in impervious surface area using remote sensing imagery and future climate is modeled using data from two members of the European project PRUDENCE. Results show that: (1) a change could be detected in the annual series of cumulative surface runoff, high flow, and the frequency of flood events when imperviousness exceed 35%. (2) Climate change has a greater impact on low flows than urbanization. (3) In term of high flow and annual cumulative runoff, historical urbanization and the precipitation increase scenario have approximately the same increasing trend. However, during summertime where floods happen frequently in the BCR the average contribution of urbanization is 4 times greater than that of the increase in precipitation. (4) The assumed 10% increase in imperviousness in the BCR is able to counteract the increase in evapotranspiration due to the warmer climate predictions. (5) When combining the effect of future urbanization (+20% of imperviousness) and precipitation scenario together, the increase in high flow is exacerbated.

1. Introduction

The Brussels Capital Region (BCR) has experienced a rapid overturning of agricultural land and native vegetation to buildings and impermeable pavements over the last century resulting in a sharp increase in Impervious Surface Area (ISA) (Hamdi et al. 2009). When precipitations falls over natural land cover, it follows various routes. Some of it evaporates, returning to the atmosphere, some seeps into the ground, and the remainder becomes surface water, traveling to oceans and lakes by way of rivers and streams. Impervious areas associated with urbanization alter the natural amount of water that takes each route. The urbanization process involves an unsustainable use of natural systems and creates numerous problems both within and outside the city. One of the major environmental problems of urbanization is that the urban hydrological system has to cope with a highly fluctuating amount of surface runoff water which may become extremely high during periods of rainfall. Hydrological effects of increased ISA typically result in higher flow peaks and larger total streamflow volume, shifts in subsurface flow to surface flow, and increases in flood frequency (Brun and Band 2000 ; Weng 2001 ; Lange et al. 2001 ; Brandes et al. 2005 ; Olivera and DeFee 2007 ; Hejazi and Markus 2009 ; Yang et al. 2009 ; Franczyk and Chang 2009). Increased ISA due to urbanization also lead to greater temperatures in urban areas than in non-urban areas resulting in urban heat island (UHI, Oke 1982). The proportion of impervious surfaces has been reported to be a good indicator for the monitoring of the UHI. A positive correlation between the proportion of impervious surfaces and land surface temperatures was identified by Yuan and Bauer (2007). The expansion of the built-up area was found to be the main factor in long-term changes in air temperatures (Huang et al. 2008 ; Shouraseni and Yuan 2009). Recently, Hamdi et al. (2009) combined data from remote sensing imagery and a land surface model, including an urban parameterization, to examine the local impact of change in impervious surfaces in BCR on trend in maximum, minimum, and mean temperature between 1960 and 1999. They concluded that 45% of the overall warming trend observed at the BCR is attributed to intensifying urban heat island effects rather than to changes in local-regional climate.

The 2007 Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) fourth assessment report (AR4) forecast warming of 1.8 to 4.0°C by the year 2100, relative to 1990 temperatures (IPCC 2007). It is widely recognized that these predicted temperature changes has the potential to produce changes in the temporal and spatial distribution of precipitation, increasing the frequency of storm intensities and flooding, causing more frequent droughts, and decreasing annual snowfall (Kundewicz et al. 2007). Many studies have evaluated the effect of either urbanization (Smith et al. 2002 ; Chang 2007 ; Yang et al. 2009) or climate changes (Woldeamlak et al. 2007 ; Sanchez-Gomez et al. 2009) on watershed runoff, however, the combined effects of these two effects using simulation models has been coming under increased scrutiny in recent years (Hejazi and Moglen 2008 ; Franczyk and Chang 2009 ; Hejazi and Markus 2009 ; Wang et al. 2009 ; Cuo et al. 2009). Such models are driven by weather data time series such as precipitation, temperature, and soil moisture. These models are first calibrated to achieve an agreement between simulated and observed flows. Once calibrated, climate and/or urbanization change may be varied to study their effects on streamflows. However, these models are poor tools for exploring how urban evaporation can influence surface runoff because of their poor physical representation. Also, Bowling et al. (2000) found that modeled trends due to land use change and/or climate change are more statistically significant using simulated streamflow from a physically-based hydrological model.

In this study, a state-of-the-art urban parameterization, the Town Energy Balance (TEB) scheme (Masson 2000), is coupled to a soil-vegetation-atmosphere-transfer (SVAT) model in order to describe the energy exchanges between the urban surfaces and the atmosphere in a realistic way. Key for this study is that both energy and water balances are resolved and interact through the evaporative term as in Mitchell et al. (2008). The urban evaporation can therefore be derived from the surface energy balance. This approach brings two clear benefits to the task of modeling trends due to urbanization and/or climate change: firstly, the constraint of energy availability is imposed explicitly and secondly, the connection between the water balance and climate is quantified because the partitioning of available energy into sensible and latent heat fluxes modules the air and surface temperature in the urban canopy layer (Mitchell et al. 2007). The hydrological component of the TEB scheme has already been studied and evaluated for a suburban catchment in Nantes (France) in Lemonsu et al. (2007). In their study some weaknesses of the TEB were uncovered and led to improved parameterization of water exchanges: (i) calibration of the maximum capacity of the rainfall interception reservoir on roads and roofs and (ii) inclusion of water infiltration through the roads. The objectives of this study are to: (i) analyze the impact of historical urbanization (1960-1999) of the BCR on surface runoff combining data from remote sensing imagery and downscaled 40-yr European Center for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF) Re-Analysis (ERA-40), (ii) assess the impact of future urbanization and/or climate change on the surface runoff of the BCR.

2. Methods

a. *Study area*

The focus of our study is the BCR, centrally located in Belgium, with a registered population of 1 031 215 on January 1st 2007, estimated by the National Institute of Statistics (INS). The study area is the 162 km² BCR extended to the outlet of its watersheds (see Fig. 1). According to the Koppen climate classification scheme, this study catchment has a temperate oceanic climate without extremes (the temperature of the coldest month is superior to -3 °C and the warmest month has a temperature between 10 and 22 °C) with moderate annual rainfall about 820 mm year⁻¹ as observed by the national recording station of the Royal Meteorological Institute (RMI) of Belgium (1833-present), which is located some 6 km south of the center of the capital, in the Uccle suburban. Rainfall has a relatively uniform distribution throughout the year. Precipitation is generally generated by frontal systems in the winter in the form of rain (snowfall is generally not a contributing factor to winter precipitation), and by convective thunderstorms in the summer. However, there is a more seasonal cycle in precipitation intensity. In fact, in the BCR floods happen frequently due to the total runoff increase during summer thunderstorms which induce sewage overflows.

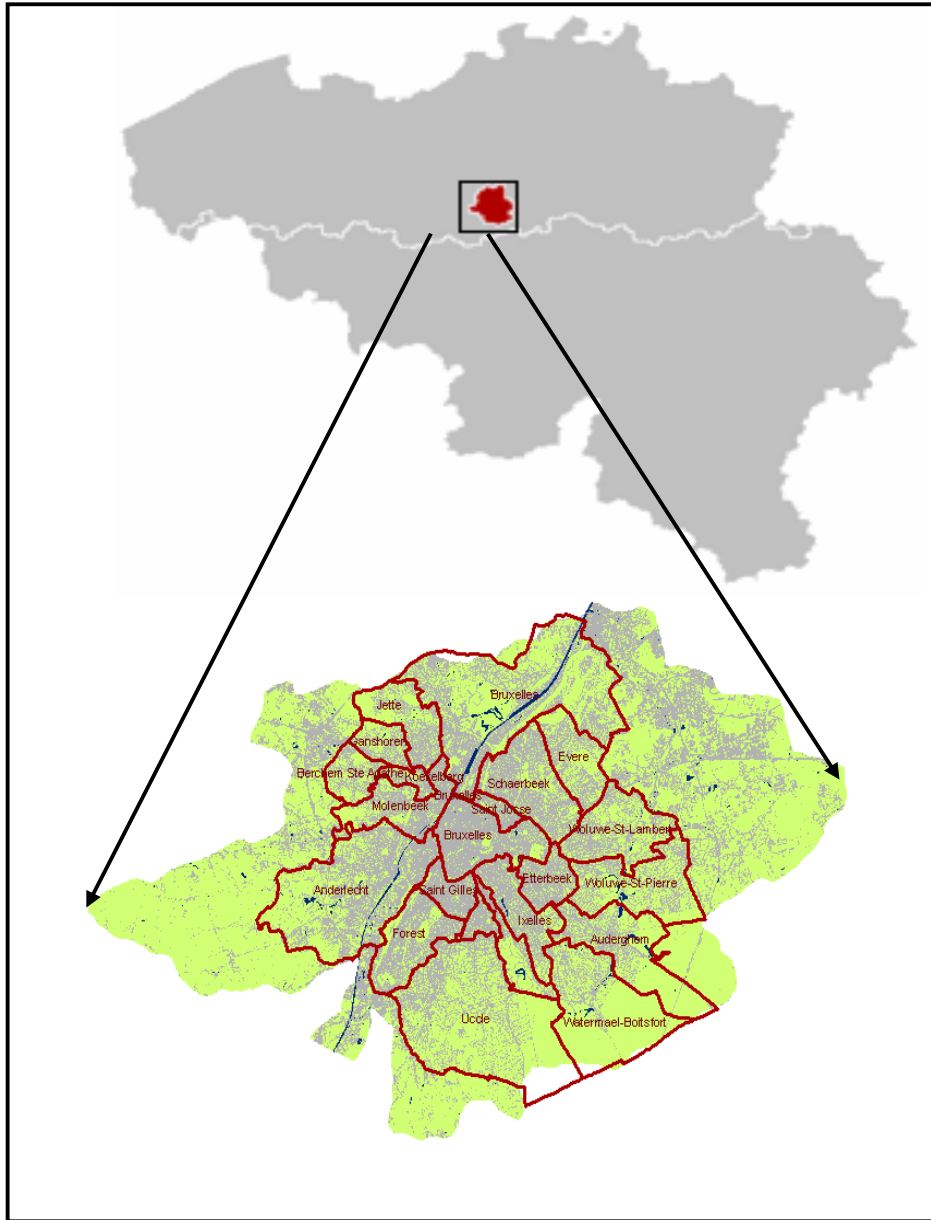


Fig 1. Belgium (top) and the Brussels Capital Region (bottom) with the contemporaneous imperviousness in gray (year 2006, from Vanhuyse et al. 2006).

b. Model

We use the newly developed surface scheme of Météo-France SURFEX (SURFace EXternalisée) (Le Moigne 2009). SURFEX is an externalized surface scheme that can be run either in a coupled mode in which case the atmospheric forcing is provided by the host atmospheric model, or in a stand-alone mode where the atmospheric drivers are derived from observations and fed to the surface scheme such that it is decoupled from the atmospheric part of a global circulation model. The latter case is possible by relying on the algorithmic structure proposed by Best et al. (2004). SURFEX contains various modules allowing to describe the exchanges of water, momentum, and energy on four surface area tiles: sea, lake, vegetation, and the city, a grid value is then simply an area averaged value of the different tiles present in the grid cell.

Over vegetated areas, SURFEX includes the Noilhan and Planton (1989) Interactions between Soil, Biosphere, and Atmosphere (ISBA) scheme. ISBA solves simultaneously the energy and water budget of the soil and vegetation. The subsurface water storage consists of three layers: surface layer, root layer, and deep layer (Fig. 2 in Lemonsu et al., 2007). The water sources for the system are rainfall and dewfall (it is assumed to be no external water use, e.g. irrigation of gardens). The hydrological processes considered in the scheme are ground evaporation, vegetation evapotranspiration, runoff from root and deep layers, diffusion between the layers, and gravitational drainage from the root and the deep layers. The runoff produced by the deep layer occurs when the water content exceeds the volumetric water content at saturation. In the root layer, it takes place when just one part of the layer is saturated following Dumenil and Todini (1992). Vegetation parameters for this scheme come from the ECOCLIMAP database (Masson et al. 2003).

Over urban surfaces, SURFEX includes the Town Energy Balance single-layer urban canopy module (TEB, Masson 2000). Urban canopy is assumed to be an isotropic array of street canyons. TEB simulates heat and water exchanges of three generic surfaces (roof, wall, and road), where heat transfers are computed through several layers of materials, generally four. Anthropogenic heat and vapor releases from buildings, vehicles and chimneys can also be added. TEB is forced with literature-based surface thermal parameters and observed or simulated atmospheric and radiation data from above roof level. Despite the simplification hypotheses, offline simulations of TEB have been shown to accurately reproduce surface energy balance, canyon air temperature, and surface temperatures observed in dense urban areas: Vancouver and Mexico City (Masson et al. 2002), Marseille (Lemonsu et al. 2004), Basel (Hamdi and Masson 2008) during dry and hot seasons. In the study by Pigeon et al. (2008), the evaluation of TEB is extended to two other seasons, fall and winter. The parameterization of the water exchanges is very simple: only the roads and the roofs can intercept water. Each road and roof has its own water reservoir with a maximum interception capacity. The source is rainfall and dewfall and lost is through evaporation and runoff. The runoff term is zero unless the computed water content exceeds the maximum interception capacity and the evaporation term is computed using the latent heat flux calculated from the urban energy balance which means that urban water use is coupled to urban microclimates and energy consumptions. This component of the model has already been studied and evaluated for a suburban catchment in Nantes (France) in Lemonsu et al. (2007).

c. *Input data*

METEOROLOGICAL DATA

The ERA-40 re-analysis (Uppala et al. 2005), produced by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) is a global dataset covering the period from September 1957 to August 2002 at a temporal resolution of 6h. For Western Europe, it has a spatial resolution of about 120 km. To increase the spatial resolution above Belgium, dynamical downscaling was applied using the limited area model (LAM) ALADIN developed by the ALADIN international team (1997) (ALADIN is running operationally at the Royal Meteorological Institute of Belgium). The method is essentially equivalent to that described by Žagar et al. 2006. We opted for a nested downscaling to 10 km resolution in 2 steps. In the first step, the ALADIN model is coupled to the ERA-40 data and run at a resolution of 40 km on a domain encompassing most of Western Europe. The results from this run are then used as initial conditions and lateral boundary conditions for a second downscaling run at 10 km resolution on a smaller domain over Belgium. For example in Qian et al. (2003) it was shown that one should not let a regional model run unattended for a long period of time. After a number of days, the model diverges from the

coupling data to arrive at some (constant) bias. To avoid this, it is necessary to *re-initialise* the downscaling run. We choose to do this daily.

Our downscaling strategy may thus be summarised in the following steps: (i) the original ERA-40 files are interpolated to 40 km resolution, (ii) these 6-hourly files serve as initial and boundary conditions for a 48h ALADIN run at 40 km resolution. These are started at 00 UTC every day, (iii) the (3-hourly) output from this first run serves as input for a 10 km run of ALADIN. However, to avoid spin-up problems, the first 12 hours are not taken into account. So we have 36 hours data left for the 10 km runs (which thus start at 12 UTC), (iv) finally, we again dismiss the first 12 hours of the run, to arrive at 24 hours of (1-hourly) ALADIN output at 10 km resolution.

IMPERVIOUS AREA ESTIMATION

The evolution of surface cover fractions over BCR was derived from Vanhuyse et al. (2006) study. This study aims to assess the evolution of the fraction of impervious surfaces in the catchment basins including BCR since the 1950s date of the acceleration of urban growth linked to widespread use of cars as a new mode of transport. Two periods were studied:

(i) From 1950s to 1980s: Vanhuyse et al. (2006) used the MURBANDY database (Fricke and Wolff 2002) available for 1955, 1970, and 1985 and then estimated the fraction of impervious surfaces using topographic maps and aerial photos. The results indicate that the percentage of impervious surfaces has increased from 26% in 1955 to 39% in 1985.

(ii) From 1980s to 2006: Vanhuyse et al. (2006), first, conducted a classification of land use on basis of a satellite image at very high resolution (UrbOrtho 0.6m, QuickBird 2.4m) dating from 2006. Then, starting from a binary classification (vegetated and impervious surfaces), they built a simple regression model between the percentage of impervious surfaces and different spectral variables derived from high-resolution satellite images. This model permitted to estimate the percentage of impervious surfaces for two previous dates (1993 and 1986) for which only high-resolution images (Landsat Thematic Mapper with 30 m resolution) are available. The results indicate that the percentage of impervious surfaces has increased from 39% in 1985 to 47% in 2006.

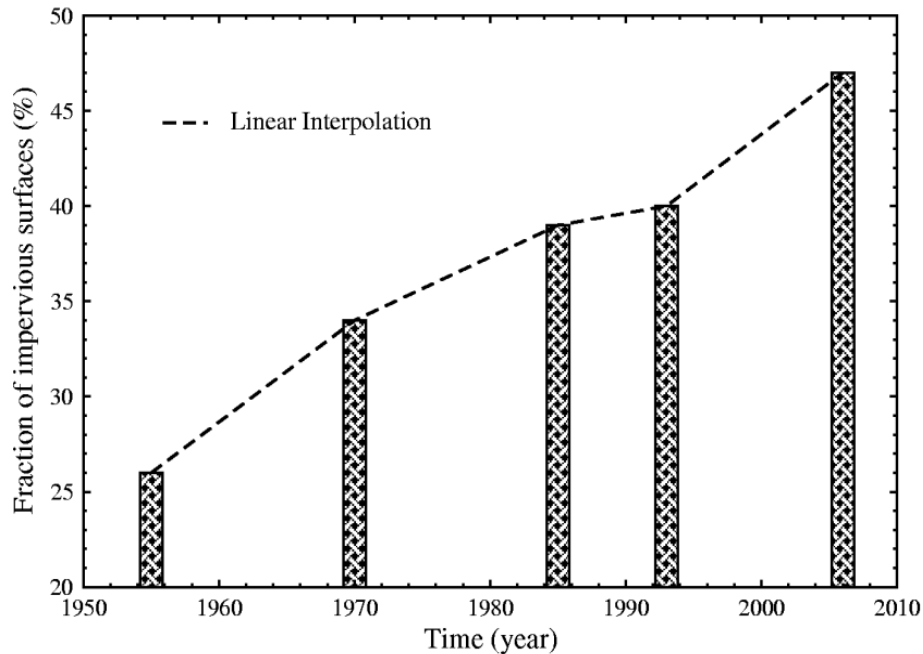


Fig 2. Evolution of the average percent imperviousness of the Brussels Capital Region from 1955 to 2006.

Figure 2 shows that the increase in impervious surfaces is very important since the 1950s, from 26% in 1955 to 47% in 2006, almost a doubling. The largest increase (both in absolute and relative terms) occurs between 1955 and 1970. Then a slight decline in the upward trend is observed. Between 1985 and 1993, there was a decline in growth due to a crisis in the real estate market during the 1980s. After 1993, the increase in impervious surface becomes again very important, remaining so until now. The results presented here reflect the reality but must be considered keeping in mind that different data information and methods were used, and therefore we should tolerate a margin of error of a few percent over the areas studied (Vanhuysse et al. 2006; Van de Voorde et al. 2008).

CLIMATE CHANGE DATA

The climate change data used in this work come from the PRUDENCE project database¹. The database provides daily time series from a variety of Regional Climate Model (RCM) simulations under control (1961-1990) and climate change (2071-2100) conditions. Almost all RCMs run at 50 km horizontal resolution, while the climate change scenarios considered are based on the SRES scenarios A2 and B2. For the needs of the present work, we used data from two members of the PRUDENCE project: the Max Planck Institute (MPI) and Météo-France (CNRM). Previous work on the validation of the models used in the PRUDENCE project with respect to historical temperature and precipitation data from Uccle, (CCI-HYDR project)², showed that the data from the aforementioned PRUDENCE members cover nearly the whole range of model variability in the database for the grid point the closest to the BCR.

¹ <http://prudence.dmi.dk>

² <http://www.kuleuven.be/hydr/CCI-HYDR.htm>

Our simulations take into account the climate change signal as follows. For each input variable of interest (long- and short-wave downward radiation, mean sea level pressure, humidity, temperature and wind speed) we calculate the deviation between scenario and control data. This is expressed as difference for temperature and as ratio for the other variables. We then use the monthly climate anomalies in order to perturb accordingly the corresponding historical climate series which will represent, after application of the perturbation, the input for the model under climate change conditions.

3. Results and Discussion

a. *Runoff response to historical urbanization*

We selected a small heterogeneous domain, (15 km x 15 km) over the BCR, centered at the city center of Brussels. We overlaid that domain over a 1-km resolution land cover classification provided by the ECOCLIMAP database. The land cover types contained in this domain are then aggregated into 4 tiles (Sea, Lake, Vegetation, and Urban) with the corresponding fractional coverage (0%, 0%, 53%, 47%) to be used as the contemporaneous land cover setting. We run SURFEX in an offline single column mode from 1th January 1960 to 31 December 1999 (40 years). The forcing parameters necessary to run the model are derived from the downscaling of the ERA-40 described in section c.1 and daily observed precipitation at Uccle. The atmospheric data consist of 1-hourly: air temperature, specific humidity, atmospheric pressure, incoming global radiation, incoming long-wave radiation, precipitation rate and wind speed. The observed daily precipitation is disaggregated into hourly values according to the downscaled ERA-40 reanalysis data.

These drivers are taken at a height of 20 m above ground level (AGL) to ensure that they are representative of the local scale (10^2 - 10^4 m). We performed model simulations according to two scenarios, which correspond to different states of urbanization:

- The "ISA-26" scenario represented a hypothetical situation with a land cover setting similar to the one of 1960 with 26 % of impervious areas. Radiative, thermal, and soil properties of the vegetation cover (albedo, roughness length, emissivity, thermal inertia, leaf area index, etc.) are taken from the ECOCLIMAP database (Masson et al. 2003). Imperviousness and vegetation properties remain fixed through the simulation.
- The "ISA-HIS" scenario represented the historical urbanization of the BCR using the evolution of surface cover fractions presented in section c.2. For this run, the surface cover fractions are updated each year using a linear interpolation. For the urban tile, SURFEX uses only one urban land-use class as input, which is characterized by a set of parameters. In this study, geometrical, thermal, and radiative properties of roofs, walls, and roads were set to values representing a typical midsize European city (see Table 1). These properties remained fixed through the simulations. Another important urban-related aspect is the anthropogenic heat. This term includes all heat emitted by human activities: traffic, release from industry, and release from residential buildings. Over the area presented in this study, releases from buildings have been shown to be the dominant component of the anthropogenic heat (Van Weverberg et al. 2008). In SURFEX, to mimic space heating, a fixed minimum internal building temperature of 19 °C is specified (Masson 2000, Masson et al. 2002, Pigeon et al. 2008). During fall or winter, internal wall and roof surface temperatures often have values below this threshold, and the heat flux between the internal volume of the building and the wall (or the roof) is directed out of the buildings. An evaluation of this parameterization of anthropogenic heat sources

against an inventory of energy consumption for the city of Toulouse (France) was performed in Pigeon et al. (2008).

Each simulation starts from the same initial conditions and runs forward for 40 years using the same climate drivers. Our assessment of urbanization effects is based on statistical analysis (using the Standard Normal Homogeneity Test, SNHT, and the Mann-Kendall trend test, MK, see Appendix) of four annually based simulated hydrologic metrics: (1) R5 the daily cumulated runoff that is exceeded by 95% of all discharges over a study period which may correspond to low flow, (2) R95 the daily cumulated discharges that is exceeded by 5% of all discharges and correspond to high flow, (3) frequency of flood events (FE), a flood condition is assumed to be a flow event that exceeds three times the 40 years median flow, (4) annual cumulative runoff and seasonal cumulative runoff ratio (the percentage ratio of runoff depth to precipitation).

Table 1. 3-D morphometric parameters of Brussels Capital Region (characterized as a typical midsize European city) and the physical properties of urban elements used in the model (from Hamdi et al. 2009).

Cover fraction		
Vegetation		0.53
Water		0.00
Urban		0.47
Morphometric parameters		
Mean building height		20 m
Local canyon height to width ratio		1
Plan aspect ratio of buildings		0.50
Frontal aspect ratio of buildings		0.50
Road properties		
Mean materials	Asphalt and concrete over dry soil	
Albedo		0.08
Emissivity		0.94
Roughness length for momentum		0.05 m
Roof properties		
Mean materials	45% tiles, 50% gravel, 5% corrugated iron	

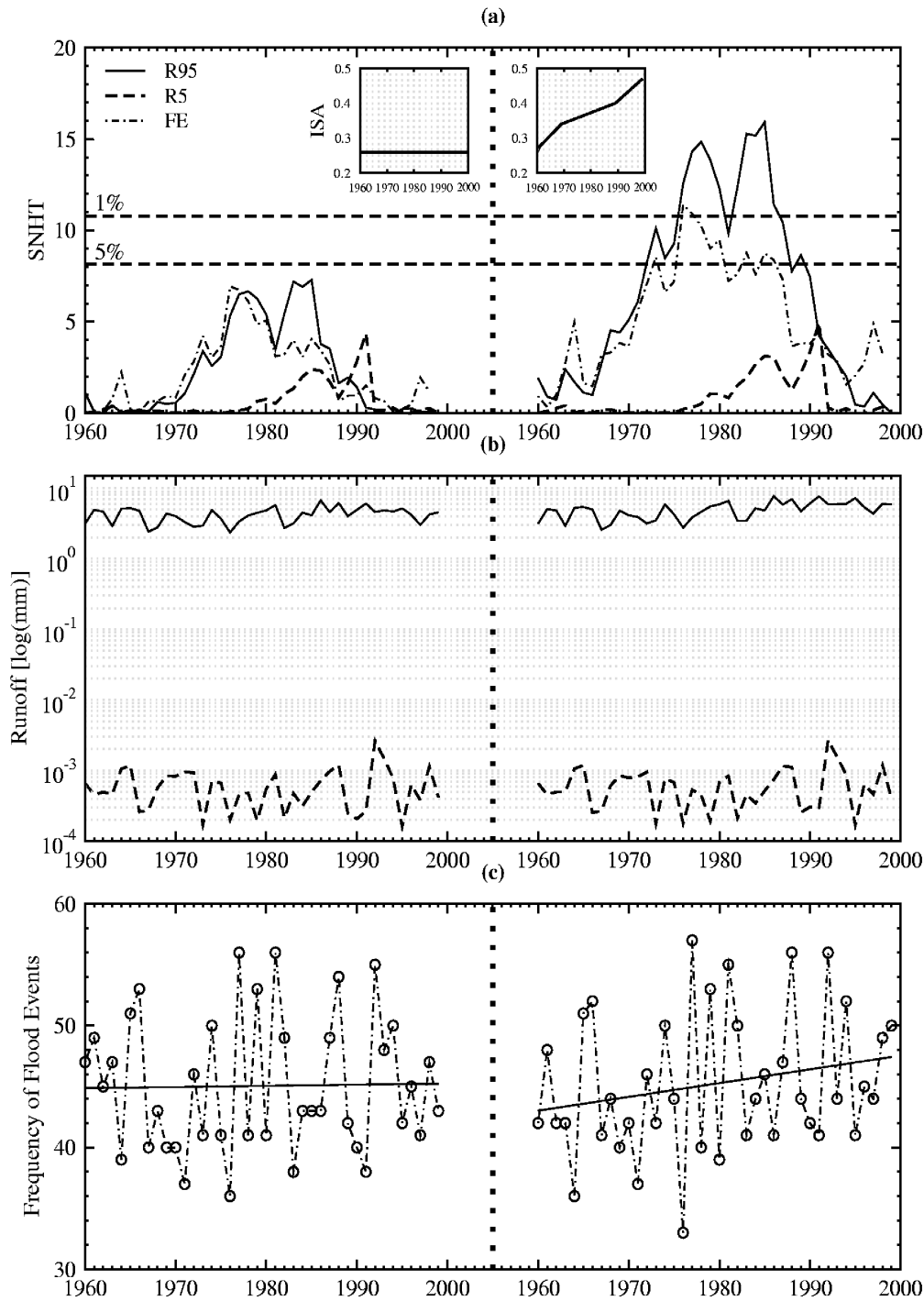
Cover fraction	
Albedo	0.14
Emissivity	0.90
Roughness length for momentum	0.15 m
Wall properties	
Mean materials	Plaster, concrete, brick
Albedo	0.14
Emissivity	0.90

Figure 3a presents results of the SNHT applied to annual times series of R5, R95, and FE for the two scenarios of urbanization ISA-26 (left) and ISA-HIS (right). Dashed lines gives the 5% and 1% critical value. For ISA-26 the SNHT shows no significant break in the time series of R5, R95, and FE. However, for ISA-HIS the SNHT statistics of both R95 and FE is above the critical value of 5% for the year 1972, corresponding to 35% of imperviousness, while for R5 no significant break could be detected. This means that a change could be detected in the annual series of R95 and FE when imperviousness exceed 35%. This results is consistent with previous works suggesting the existence of a threshold percent impervious cover above which the hydrological response of an urbanizing watershed changes more dramatically (Brun and Band 2000). For example, recently, Hejazi and Moglen (2008) used a continuous streamflow model to examine the effects of climate and land use change on flow duration in six urbanizing watersheds in the Maryland Piedmont region. Results show that an additional 10% increase in imperviousness, from 20.5% to 30.5%, produces no significant change in the simulated flow durations and not until imperviousness is increased from 20.5% to 40.5% does land use change lead to significant increasing trend in high flow.

Figure 3b present the annual value of R5 and R95 and figure 3c shows the annual value of the frequency of flood event with the linear trend for the two scenarios of urbanization ISA-26 (left) and ISA-HIS (right). Table 2 summarizes the results of the Mann-Kendall test and the trend magnitude value. Significant trends are shown in bold, at a 5% level of significance. Contrarily to scenario ISA-26 where no significant trends were identified, in scenario ISA-HIS, significant increasing trend in high flow and the frequency of flood events were identified. The simulated high flow exhibit an increase of 32% and the frequency of flood events increased by 2.25 events for each 10% increase in ISA fraction. The increasing trend in peak flow is rational and consistent with the literature on the effects of urbanization on flood magnitudes. Urbanization can demonstrably reduce infiltration rates on the land surface and runoff response times (Chang 2007), resulting in higher flow peaks and larger total streamflow volume (Lange et al., 2001; Hejazi and Markus, 2009), and increase in flood frequency. For example, recently, Yang et al. (2009) analyzed the USGS streamflow data (1979-2003) of 16 small watersheds in the White River (IN, USA), basin. Results derived from the 16 watersheds show that urban intensity has a significant impact on the frequency of flood events which increases by 3.9 events for every 10% increase in ISA fraction. ISA-HIS simulation shows no increasing trend in low flow with the

addition of imperviousness. Past studies from the literature indicated mixed results on the effect of urbanization on low flow with increasing trend (Konrad and Booth 2002) and decreasing trend (Paul and Meyer 2001). Thus the effect on low flow is still an open research question.

Fig. 3. (a) Results of the SNHT applied to annual times series of R5, R95, and FE for the two



scenarios of urbanization ISA-26 (left) and ISA-HIS (right). Dashed lines gives the 5% and 1% critical value, (b) the annual value of R5 and R95, and (c) the annual value of the frequency of flood event with the linear trend for the two scenarios of urbanization ISA-26 (left) and ISA-HIS (right).

Table 2. Mann-Kendall statistics (Z-value) from the analysis of time series of R5, R95, FE and annual cumulative surface runoff, evapotranspiration, and observed precipitation with estimates of the trend magnitude (\square). Significant trends at 95% ($\square 1.96$) confidence level are marked bold.

	R5	R95	FE	Surface runoff	Evapotranspiration	Precipitation
Z-value	ISA-26	-0.08	1.53	0.27	1.72	0.87
	ISA-HIS	0.20	3.48	3.27	3.90	-2.97
Trend magnitude	ISA-26	0	0.02	0	1.88	0.66
	ISA-HIS	0	0.07	0.10	3.9	-1.91

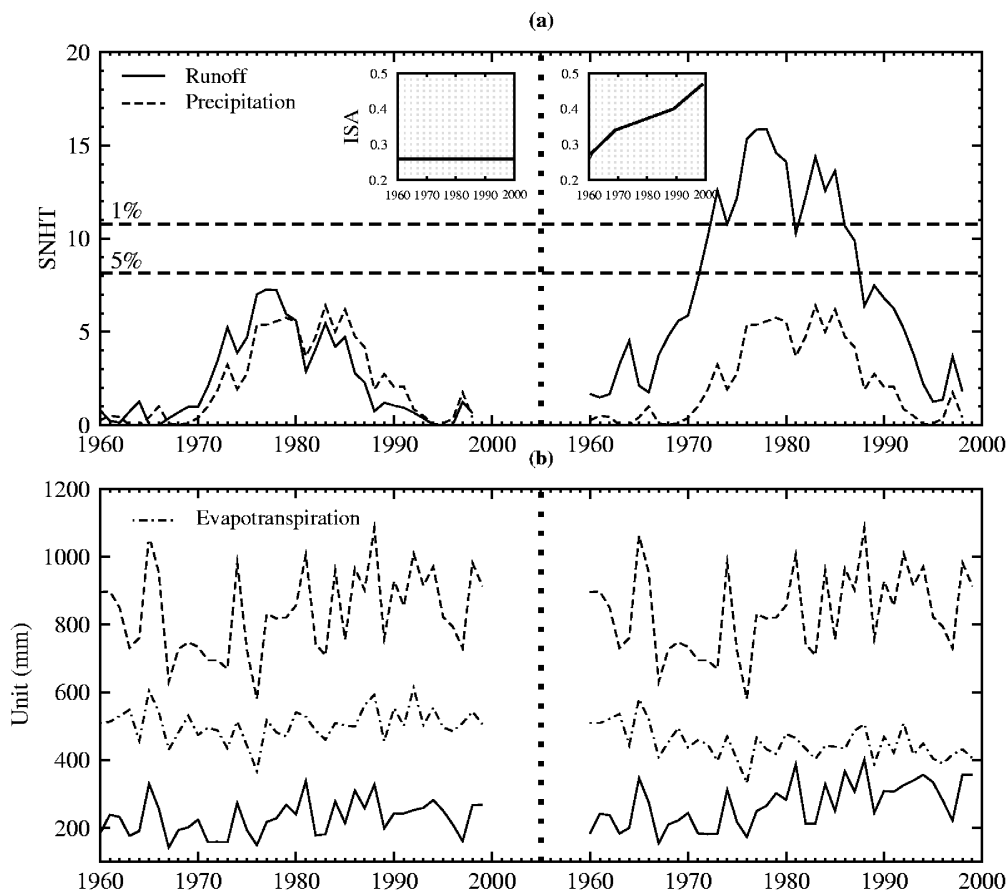


Fig 4. (a) Results of the SNHT applied to the times series of annual cumulative surface runoff (ACR) and observed precipitations (ACP) and (b) the annual cumulative value of surface runoff, evapotranspiration (ACE), and observed precipitation.

Figure 4a presents results of the SNHT applied to the times series of annual cumulative surface runoff (ACR) and observed precipitations (ACP). For ISA-26 the SNHT shows no significant break in the time series of ACR and ACP. However, for ISA-HIS the SNHT does show an abrupt change of cumulative surface runoff when imperviousness exceeds 35%. Figure 4b presents the

annual cumulative value of surface runoff, evapotranspiration (ACE), and observed precipitation and table 2 summarizes the results of the Mann-Kendall test with the trend magnitude values. While no significant trend is detected for ACP, in scenario ISA-HIS, significant increasing (decreasing) trends in ACR (ACE) were identified. The simulated ACR increased by 40% for every 10% increase in ISA fraction. For year 2000, multiplying the annual runoff depth by the drainage watershed area of the Brussels Capital Region, ACR is estimated at $5.90 \cdot 10^{10}$ l. Mentens et al. (2006) found similar value ($6.14 \cdot 10^{10}$ l) by applying an empirical rainfall-runoff models to the Brussels Capital Region. The increasing trend in runoff volume is consistent with previous works (Weng 2001 ; Smith et al. 2002 ; Chang 2007 ; Franczyk and Chang 2009). Lange et al. (2001) reported similar result using a physically-based rainfall-runoff model to assess the regional impacts of urbanization on water resources in the 250 km² Natuf catchment (Israel). They found that urbanization on 7.7% of the area results in an increase of 35% in annual runoff volume.

Table 3. The simulated increase of seasonal runoff ratio for winter (CRR_{DJF}), spring (CRR_{MAM}), summer (CRR_{JJA}), and fall (CRR_{SON}) corresponding to 10% increase in ISA fraction. Significant trends at 95% confidence level are marked bold.

	Winter	Spring	Summer	Fall
CRR	10%	18%	40%	32%

Table 3 presents the simulated increase in seasonal runoff ratio corresponding to 10% increase in ISA fraction. Except for winter, significant increasing trend were identified. The largest increases in runoff ratio (40%) have occurred during the summer season where the largest decrease of evapotranspiration (-13%) were found. This result is in agreement with the flood history of the Brussels Capital Region derived from the BIM-IBGE¹ (Brussels Instituut voor Milieubeheer). In fact, between 1993 and 2005, while no significant trend was observed in summer thunderstorms 75% of flood events occurred between June and September.

b. Runoff response to climate change

In order to examine the surface runoff response due solely to changing climate, urbanization is kept constant at present (year 2006) conditions while climate is perturbed according to the predictions from both the CNRM and MPI models. We performed model simulations according to three scenarios:

- The "ISA-47" scenario represented a hypothetical situation with a land cover setting similar to the one of 2006 with 47% of impervious areas. Climate drivers are obtained from the downscaling of the ERA-40 described in section c.1 and daily observed precipitation at Uccle.
- The "CNRM-47" scenario with 47% of impervious areas where climate drivers are perturbed according to the CNRM model predictions.

¹ <http://www.ibgebim.be>

- The "MPI-47" scenario with 47% of impervious areas and climate drivers perturbed according to the MPI model predictions.

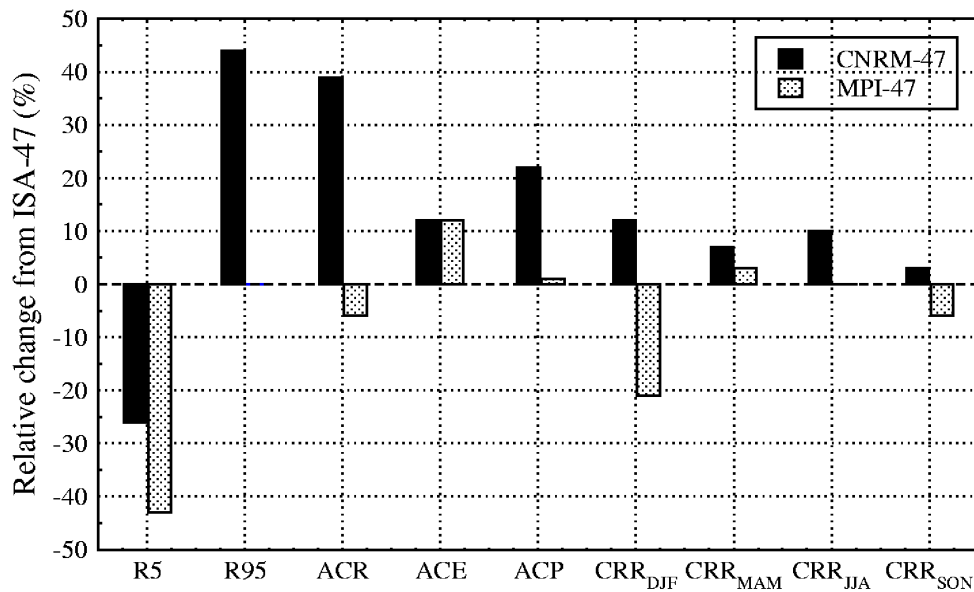


Fig 5. The relative changes between the CNRM-47 and the ISA-47 scenarios on one hand, and between the MPI-47 and the ISA-47 scenario on the other hand, in terms of R5, R95, ACR, ACE, ACP, and seasonal cumulative runoff ratio for winter (CRR_{DJF}), spring (CRR_{MAM}), summer (CRR_{JJA}), and fall (CRR_{SON}).

Figure 5 presents the relative changes between the CNRM-47 and the ISA-47 scenarios on one hand, and between the MPI-47 and the ISA-47 scenario on the other hand, in terms of R5, R95, ACR, ACE, ACP, and seasonal cumulative runoff ratio for winter (CRR_{DJF}), spring (CRR_{MAM}), summer (CRR_{JJA}), and fall (CRR_{SON}). For both scenarios, a decrease of low flow (R5) is observed. MPI-47 has the largest impact with a decrease of 43%, while CNRM-47 is smaller (26%). Hydrological change under CNRM-47 scenario suggests a tendency towards enhancing the higher flows, R95 increase by 44% while under MPI-47 scenario it remains essentially unchanged relative to the ISA-47 scenario. The annual cumulative surface runoff (ACR) increases also approximately by 39% while a small decrease (6%) is simulated for MPI-47 scenario. In all seasons, the cumulative runoff ratio predicted by the CNRM-47 scenario increases relative to the ISA-47 one. The increase is more profound during winter (+12%) and summer (+10%). However, a decrease of 21% of the winter cumulative runoff ratio is simulated under the MPI-47 scenario. The overall increasing trend in R95, ACR, and seasonal cumulative runoff ratio under the CNRM climate conditions is mainly due to the fact that CNRM predicts a much wetter future than observed historically, annual cumulative precipitation increases by 22%, or even predicted by the MPI climate model (+1%). So even though CNRM also predicts a warmer climate condition in the future, in both scenarios the increase in annual cumulative evapotranspiration is 12%, precipitation seems to be more dominant than evapotranspiration.

These results indicate that:

- Climate change has a greater impact on low flows than urbanization. Hejazi and Moglen (2007) studied the single and joint effects of land use and climate change on low flow in the Maryland Piedmont region (USA). They reported similar results and concluded that

precipitation had a greater impact on low flows than urbanization in six urbanizing watersheds in that region.

- In term of high flow and annual cumulative runoff (R95, ACR), historical urbanization and the precipitation increase scenario (CNRM-47) have approximately the same increasing trend, (32%, 40%) and (44%, 39%) respectively. However, during summertime where floods happen frequently in the BCR due to the total runoff increase, historical urbanization induced a greater impact on cumulative runoff ratio than precipitation increase scenario (CNRM-47). When comparing the contribution of historical urbanization (40%) and precipitation increase (10%), the average contribution of urbanization is 4 times greater than that of the increase in precipitation. Reynard et al. (2001) used a continuous-flow simulation model to assess future impacts of climate change and land use changes on floods in large watersheds in the United Kingdom. They found that urbanization has a large effect on flood regimes, increasing both the frequency and magnitude of floods, significantly beyond the changes due to climate change.

d. *Runoff response to climate change and future urbanization*

This section concerns the effects of jointly changing imperviousness and climate. This section is of value because it will address what will be the combined effect of urban growth and climate change on the surface runoff of the BCR. We performed model simulations according to four scenarios:

- The "CNRM-57" scenario with 57% (+10%) of impervious areas where climate drivers are perturbed according to the CNRM model predictions.
- The "CNRM-67" scenario with 67% (+20%) of impervious areas where climate drivers are perturbed according to the CNRM model predictions.
- The "MPI-57" scenario with 57% (+10%) of impervious areas where climate drivers are perturbed according to the MPI model predictions.
- The "MPI-67" scenario with 67% (+20%) of impervious areas where climate drivers are perturbed according to the MPI model predictions.

Figure 6 and 7 present the relative changes between CNRM-47, CNRM-57, CNRM-67 and the ISA-47 scenario and between MPI-47, MPI-57, MPI-67 and the ISA-47 scenario, in terms of R5, R95, ACR, ACE, ACP, and seasonal cumulative runoff ratio. The results indicate that the climate change prediction of both models have a greater influence on low flow (R5) behavior than the assumed 10% or even 20% increase in imperviousness in the BCR. For R95 and ACR the increase in the level of imperviousness by 10%: (i) led to more increasing trends under CNRM-57 scenario 74% and 65% respectively (instead of 44% and 39% for CNRM-47) and (ii) shifted the unchanged and slightly decreasing trend of R95 and ACR under the MPI-47 scenario to increasing trend (14% and 11% instead of 0% and -6%). When the level of imperviousness is increased by 20% the increase of high flow and the accumulated runoff is exacerbated for both models. Scenario CNRM-67 has the largest impact with an increase of 143% and 114% for R95 and ACR, respectively, while MPI-67 scenario is smaller (56% and 44%). Figure 6 and 7 show also that for both model predictions the increase in imperviousness by 20%: (i) shifted the increasing trend in the accumulated evapotranspiration (+12% under the CNRM-47 and MPI-47 scenarios) to decreasing trend -20% and -18% under the CNRM-67 and MPI-67 scenarios respectively, and (ii) in all seasons the increase in the seasonal cumulated runoff ratio is

exacerbated, the CNRM-67 has the largest impact during winter (80%) and the MPI-67 has the largest impact during spring (56%).

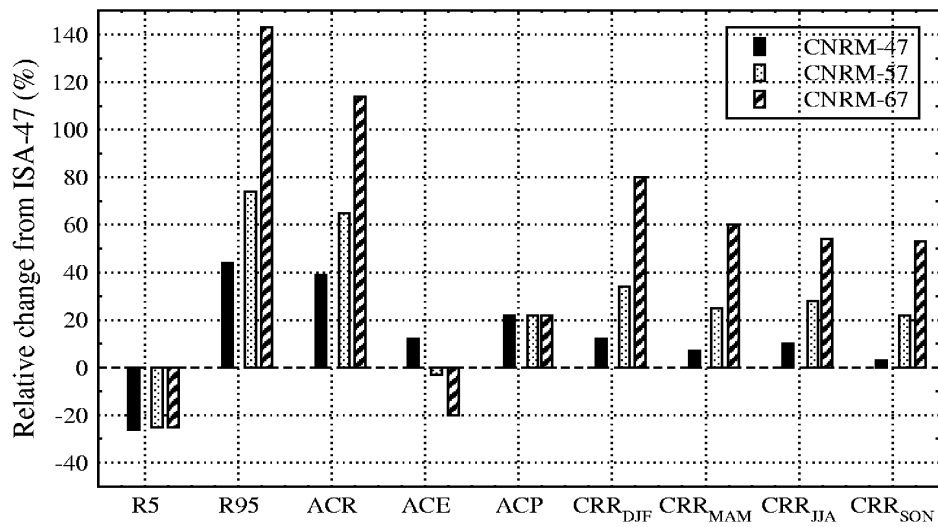


Fig 6. The relative changes between CNRM-47, CNRM-57, CNRM-67 and the ISA-47 scenario in terms of R5, R95, ACR, ACE, ACP, and seasonal cumulative runoff ratio.

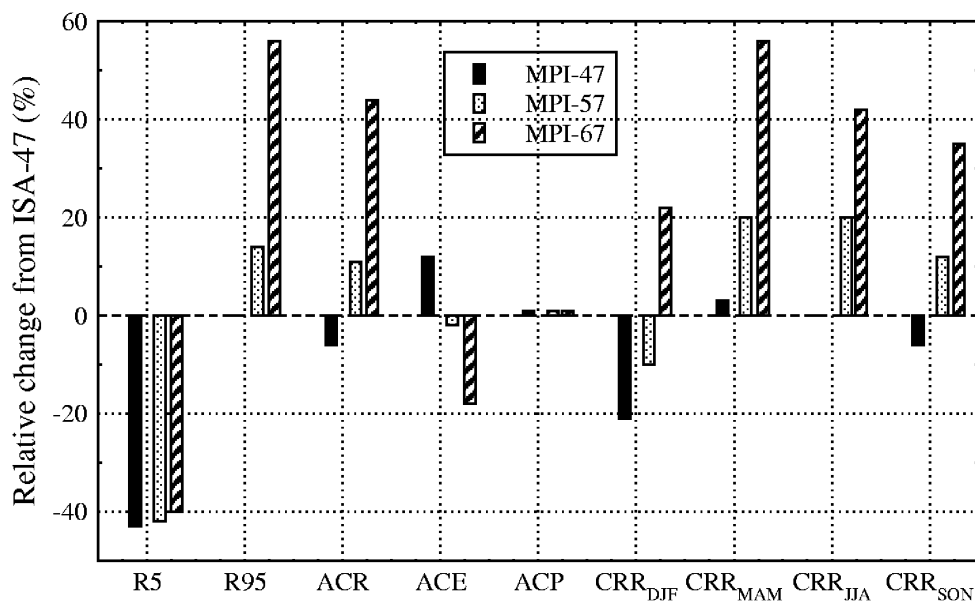


Fig 7. The relative changes between MPI-47, MPI-57, MPI-67 and the ISA-47 scenario, in terms of R5, R95, ACR, ACE, ACP, and seasonal cumulative runoff ratio.

These results indicate that:

- Changes in precipitation depths (under the CNRM scenario) are more influential than temperature changes (under the MPI scenario) in driving future trends in high flow,

annual accumulated runoff, and seasonal accumulated runoff ratio in the study area.

- The assumed 10% increase in imperviousness in the BCR is able to counteract the increase in evapotranspiration due to the warmer climate predictions.
- When combining the effect of future urbanization (+20% of imperviousness) and precipitation scenario together, the increase in high flow is exacerbated.

Overall, these findings further support the amplification of surface runoff that has been found in previous climate and land-cover changes studies (Hejazi and Moglen 2008 ; Franczyk and Chang 2009 ; Hejazi and Markus 2009).

4. Conclusion

The present study aimed at assessing how the surface runoff of the Brussels Capital Region (BCR) responded to historical urbanization and how it will respond in cases of climate changes and/or future urbanization. Results from our simulations indicates:

Effect of historical urbanization

- A change could be detected in the annual series of cumulative surface runoff, high flow, and the frequency of flood events when imperviousness exceed 35%.
- The simulated high flow exhibit an increase of 32%, the annual cumulative runoff increased by 40%, and the frequency of flood events increased by 2.25 events for each 10% increase in ISA fraction.
- The largest increases in seasonal runoff ratio (40%) have occurred during the summer season.

Effect of climate change

- Climate change has a greater impact on low flows than urbanization.
- In term of high flow and annual cumulative runoff, historical urbanization and the precipitation increase scenario have approximately the same increasing trend, (32%, 40%) and (44%, 39%) respectively. However, during summertime where floods happen frequently in the Brussels Capital Region due to the total runoff increase, the average contribution of urbanization is 4 times greater than that of the increase in precipitation.

Effect of climate change and future urbanization

- Changes in precipitation depths are more influential than temperature changes in driving future trends in high flow, annual accumulated runoff, and seasonal accumulated runoff ratio in the BCR.
- The assumed 10% increase in imperviousness in the BCR is able to counteract the increase in evapotranspiration due to the warmer climate predictions.
- When combining the effect of future urbanization (+20% of imperviousness) and precipitation scenario together, the increase in high flow is exacerbated.

These conclusions are of value to planners concerned with the uncertainty of the effects of both global climate change and land use change on the surface runoff of the Brussels Capital Region.

Appendix

Statistical Analysis

a. Mann-Kendall trend test (MK)

In order to test whether there is a significant trend in climate data a nonparametric Mann-Kendall test has been performed (Mann, 1945; Kendall, 1975). The test is based on the S statistics defined as follows:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i)$$

where x_i are the sequential data indexed according to the magnitude of i and n the data set length and sgn is the sign function:

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } x_j - x_i > 0 \\ 0 & \text{if } x_j - x_i = 0 \\ -1 & \text{if } x_j - x_i < 0 \end{cases}$$

If $n \geq 8$ the distribution of S can be approximated by a normal distribution. Under the null hypothesis, i.e., assuming no trend exists, the mean and variance of S are:

$$\mu_S = 0 \quad ; \quad \sigma_S^2 = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$$

The standardized test statistics Z is calculated by:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sigma_S} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sigma_S} & \text{if } S < 0 \end{cases}$$

For a two-tailed test, the null hypothesis is rejected at significance level α if $|Z| > Z_{\alpha/2}$ where $Z_{\alpha/2}$ is the value of the standard normal distribution with an exceedance probability $\alpha/2$.

The trend magnitude β is given by Hirsch et al. (1982):

$$\beta = \text{Median} \left[\frac{x_j - x_i}{j - i} \right]$$

b. The standard normal homogeneity test (SNHT)

Let x_i , $i=1, \dots, n$ denote a candidate series required to be tested for homogeneity. The null hypothesis assumes that the values are independent and identically distributed, whereas the alternative hypothesis assumes a stepwise shift in the mean. In the SNHT the T statistic is calculated comparing the mean of the first k years of the record with the mean of the last $n-k$ years:

$$T(k) = k \bar{x}_1^2 - (n-k) \bar{x}_2^2, \quad k=1, \dots, n$$

where:

$$z_1 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{[x_i - \bar{x}]^2}{\sigma^2}, \quad z_2 = \frac{1}{n-k} \sum_{i=k+1}^n \frac{[x_i - \bar{x}]^2}{\sigma^2},$$

\bar{x} and σ are the mean value and the standard deviation respectively. Values of T can be plotted over time. If the maximum value of $T(k)$ is higher than a critical value, the null hypothesis (i.e., no break exists) will be rejected. For $n=40$ at a significance level of 5%, the critical value equals 8.151 and for a significance level of 1%, the critical value equals 10.771 (Khaliq and Ouarda, 2007).

References

- ALADIN international team, 1997: The ALADIN project: Mesoscale modelling seen as a basic tool for weather forecasting and atmospheric research. *WMO Bull.*, **46**, 317-324.
- Best, M. J., A. Beljaars, J. Polcher, and P. Viterbo, 2004: A Proposed Structure for Coupling Tiled Surfaces with the Planetary Boundary Layer. *J. of Hydromet.*, **5**, 1271-1278.
- Bowling, L. C., P. Storck, and D. P. Lettenmaier, 2000: Hydrological effects of logging in western Washington, United States. *Water Resources Association*, **36**, 3223-3240.
- Brandes, D., G. J. Cavallo, and M. L. Nilson, 2005: Base flow trends in urbanizing watersheds of the Delaware river basin. *Journal of the American Water Resources Association*, **41**, 1377-1391.
- Brun, S. E., and L. E. Band, 2000: Simulating runoff behavior in an urbanizing watershed. *Computers, Environment and Urban Systems*, **24**, 5-22.
- Chang, H., 2007: Comparative streamflow characteristics in urbanizing basins in the Portland Metropolitan Area, Oregon, USA. *Hydrological Processes*, **21**, 211-222.
- Cuo, L., D. P. Lettenmaier, M. Alberti, and J. E. Richey, 2009: Effects of a century of land cover and climate change on the hydrology of the Puget Sound basin. *Hydrological Processes*, **23**, 907-933.
- Dumenil, H., and E. Todini, 1992: A rainfall-runoff scheme for use in the Hamburg climate model. *Climate Dynamics*, **12**, 21-35.
- Franczyk, J. and H. Chang, 2009: The effects of climate change and urbanization on the runoff of the Rock Creek basin in the Portland metropolitan area, Oregon, USA. *Hydrological Processes*, **23**, 805-815.
- Fricke, R., and E. Wolff, 2002: The MURBANDY project: development of land use and network databases for the Brussels area (Belgium) using remote sensing and aerial photography. *Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinform.*, **4**, 33-50.
- Hamdi, R., and V. Masson, 2008: Inclusion of a drag approach in the Town Energy Balance (TEB) scheme: offline 1-D evaluation in a street canyon. *J. Appl. Meteor. Clim.*, **47**, 2627-2644.
- Hamdi, R., A. Deckmyn, P. Termonia, G. R. Demarée, P. Baguis, S. Vanhuyse, and E. Wolff, 2009: Effects of Historical Urbanization in the Brussels Capital Region on Surface Air Temperature Time Series: A Model Study. *J. Appl. Meteor. Clim.*, **48**, 2181-2196.
- Hejazi, M. I., and G. E. Moglen, 2007: Regression-based approach to low flow prediction in the Maryland Piedmont region under joint climate and land use change. *Hydrological Processes*, **21**, 1793-1801.
- Hejazi, M. I., and G. E. Moglen, 2008: The effect of climate and land use change on flow duration in the Maryland Piedmont region. *Hydrological Processes*, **22**, 4710-4722.
- Hejazi, M. I., and M. Markus, 2009: Impacts of Urbanization and Climate variability on Floods in Northeastern Illinois. *Journal of Hydrological Engineering*, **14**, 606-616.

- Hirsh, R. M., J. R. Slack, and R. A. Smith, 1982: Techniques of trend analysis for monthly water-quality data. *Water Resources Research*, **18**, 107-121.
- Huang, L., J. Lia, D. Zhaoa, and J. Zhub, 2008: A fieldwork study on the diurnal changes of urban microclimate in four types of ground cover and urban heat island of Nanjing, China. *Build. Environ.*, **43**, 7-17.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007: Summary for Policymaker. In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, USA.
- Khaliq, M. N., and T. B. M. J. Ouarda, 2007: On the critical values of the standard normal homogeneity test (SNHT). *International Journal of Climatology*, **27**, 681-687.
- Kendall, M. G., 1975: *Rank Correlation Methods*. 4ed. Charles Griffin.
- Konrad, C. P., and D. B. Booth, 2002: Hydrological trends associated with urban development for selected streams in the Puget Sound Basin, Western Washington. US Geological Survey Water Resources Investigations Report 02-4040. US Geological Survey, US Department of the Interior: Tacoma, Washington, 40pp.
- Kundewicz, Z. W., L. J. Mata, N. W. Arnell, P. Döll, P. Kabat, B. Jiménez, K. A. Miller, T. Oki, Z. Sen, and I. A. Shiklomanov, 2007: Freshwater resources and their management. In *Climate Change 2007: Impacts Assessment, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ, Hanson CE (eds). Cambridge University Press: Cambridge; 173-210.
- Lange, J., C. Leibundgut, S. Husary, R. Nativ, M. A. Hassan, and A. P. Schick, 2001: A field-based hydrological model to study the impacts of urbanization on regional water resources. *International Association of Hydrological Sciences*, **268**, 255-261.
- Lemonsu, A., C. S. B. Grimmond, and V. Masson, 2004: Modeling the surface energy balance of an old Mediterranean city core. *J. Appl. Meteor.*, **43**, 312-327.
- Lemonsu, A., V. Masson, and E. Berthier, 2007: Improvement of the hydrological component of an urban soil-vegetation-atmosphere-transfer model. *Hydrological Processes*, **21**, 2100-2111.
- Le Moigne, P., 2009: SURFEX scientific documentation. Note de centre (CNRM/GMME), Météo-France, Toulouse, France, 211 pp.
- Mann, H. B., 1945: Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, **13**, 245-259.
- Masson, V., 2000: A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Bound.-Layer Meteor.*, **94**, 357-397.
- Masson, V., C. S. B. Grimmond, and T. R. Oke, 2002: Evaluation of the Town Energy Balance (TEB) scheme with direct measurements from dry districts in two cities. *J. Appl. Meteor.*, **41**, 1011-1026.
- Masson, V., J.-L. Champeaux, F. Chauvin, C. Meriguet, and R. Lacaze, 2003: A global database of land surface parameters at 1km resolution in meteorological and climate models. *J. Climate*, **16**, 1261-1282.
- Mentens, J., D. Raes, M. Hermy, 2006: Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century?. *Landscape and Urban Planning*, **77**, 217-226.

- Mitchell, V. G., H. A. Cleugh, C. S. B. Grimmond, and J. Xu, 2008: Linking urban water balance and energy balance models to analyse urban design options. *Hydrological Processes*, **22**, 2891-2900.
- Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe, 1970: River flow forecasting through conceptual models part I— A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, **10**, 282-290.
- Noilhan, J., and S. Planton, 1989: A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 536-549.
- Oke, T. R., 1982: The energetics basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **108**, 1-24.
- Olivera, F., and B. B. DeFee, 2007: Urbanization and its effects on runoff in the Whiteoak Bayou Watershed, Texas. *Journal of the American Water Resources Association*, **43**, 170-182.
- Paul, M. J., and J. L. Meyer, 2001: Streams in the urban landscape. *Annual Review of Ecology and Systematics*, **32**, 333-365.
- Pigeon, G., M. A. Moscicki, J. A. Voogt, V. Masson, 2008: Simulation of fall and winter surface energy balance over a dense urban area using the TEB scheme. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **102**, 159-171.
- Qian, J.-H., A. Seth, and S. Zebiak, 2003: Reinitialized versus continuous simulations for regional climate downscaling. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 2857-2874.
- Reynard, N. S., C. Prudhomme, and S. M. Crooks, 2001: The flood characteristics of large U. K. rivers: Potential effects of changing climate and land use. *Climatic Change*, **48**, 343-359.
- Sanchez-Gomez, E., S. Somot, and A. Mariotti, 2009: Future changes in the Mediterranean water budget projected by an ensemble of regional climate models. *Geophysical Research Letter*, In press.
- Shouraseni S. R., and F. Yuan, 2009: Trends in extreme temperatures in relation to urbanization in twin cities metropolitan area, Minnesota. *J. Appl. Meteor. Clim.*, **48**, 669-679.
- Smith, A. J., M. L. Baeck, J. E. Morrison, P. Sturdevant-Rees, D. F. Turner-Gillespie, and P. D. Bates, 2002: The regional Hydrology of extreme floods in an urbanizing drainage basin. *Journal of Hydrometeorology*, **3**, 267-282.
- Uppala, S.M., P.W. Kallberg, A.J. Simmons, U. Andrae, V. da Costa Bechtold, M. Fiorino, J.K. Gibson, J. Haseler, A. Hernandez, G.A. Kelly, X. Li, K. Onogi, S. Saarinen, N. Sokka, R.P. Allan, E. Andersson, K. Arpe, M.A. Balmaseda, A.C.M. Beljaars, L. van de Berg, J. Bidlot, N. Bormann, S. Caires, F. Chevallier, A. Dethof, M. Dragosavac, M. Fisher, M. Fuentes, S. Hagemann, E. Holm, B.J. Hoskins, L. Isaksen, P.A.E.M. Janssen, R. Jenne, A.P. McNally, J-F. Mahfouf, J-J. Morcrette, N.A. Rayner, R.W. Saunders, P. Simon, A. Sterl, K.E. Trenberth, A. Untch, D. Vasiljevic, P. Viterbo, J. Woollen, 2005: The ERA-40 re-analysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 2961-3012.
- Van de Voorde, T., J. Vlaeminck, and F. Canters, 2008: Comparing different approaches for mapping urban vegetation cover from Landsat ETM+ data: a case study on Brussels. *Sensors*, **8**, 3880-3902.
- Vanhuysse S., J. Depireux, E. Wolff, 2006: Etude de l'évolution de l'imperméabilisation du sol en région de Bruxelles-Capitale. Université Libre de Bruxelles, IGEAT, Brussels, Belgium, 60 pp.
- Van Weverberg, K., K. De Ridder, and A. Van Rompaey, 2008: Modeling the contribution of the Brussels Heat Island to a long temperature time series. *J. Appl. Meteor. Clim.*, **47**, 976-990.

- Wang, J., Y. Hong, J. Gourley, P. Adhikari, L. Li, and F. Su, 2009: Quantitative assessment of climate change and human impacts on long-term hydrologic response: a case study in a sub-basin of the Yellow River, China. *International Journal of Climatology*, in press.
- Weng, Q., 2001: Modeling urban growth effects on surface runoff with the integration of remote sensing and GIS. *Environmental Management*, **28**, 737-748.
- Woldeamlak, S. T., O. Batelaan, and F. De Smedt, 2007: Effects of climate change on the groundwater system in the Grote-Nete catchment, Belgium. *Hydrogeology Journal*, **15**, 891-901.
- Yang, G., L. C. Bowling, K. A. Cherkauer, B. C. Pijanowski, and D. Niyogi, 2009: Hydroclimatic response of watersheds to urban intensity-An observational and modeling based analysis for the White River basin, Indiana. *Journal of Hydrometeorology*, In press.
- Yuan, F., and M. E. Bauer, 2007: Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. *Remote Sens. Environ.*, **106**, 375-386.
- Žagar, N., M. Žagar, J. Cedilnik, G. Gregorič, J. Rakovec, 2006: Validation of mesoscale low-level winds obtained by dynamical downscaling of ERA-40 over complex terrain. *Tellus*, **58A**, 445-455.