



Marché de services

Institut bruxellois pour la Gestion de l'Environnement

Cahier spécial des charges 2011-02-AL

« Réseau de pluviomètres : validation des données, répartition des précipitations et projet d'étude « changement climatique et ressources en eau » en Région bruxelloise »

Rapport final

Michel Journée, Christian Tricot, Kristof Verhumst, Rafiq Hamdi et Didier Dehem

Septembre 2014

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

Tables des matières

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUCTION | 4 |
| 2 | LES DONNEES DE PRECIPITATIONS | 5 |
| 2.1 | LE RESEAU DE L'IBGE | 5 |
| 2.2 | LES SITES DE MESURE | 6 |
| 2.2.1 | Introduction à la mesure des précipitations..... | 6 |
| 2.2.2 | Analyse de qualité des sites de mesures de l'IBGE..... | 10 |
| 2.3 | LA BASE DE DONNEES DE L'IBGE..... | 18 |
| 2.4 | INSPECTION SOMMAIRE DES DONNEES | 19 |
| 3 | CORRECTIONS SE RAPPORTANT A L'ETALONNAGE | 23 |
| 3.1 | INTRODUCTION | 23 |
| 3.2 | DESCRIPTION DE LA PROCEDURE UTILISEE..... | 23 |
| 3.3 | IMPACT SUR LES DONNEES..... | 25 |
| 3.4 | CONCLUSIONS..... | 27 |
| 4 | VALIDATION ET COMPLEMENT DES DONNEES MANQUANTES | 27 |
| 4.1 | INTRODUCTION | 28 |
| 4.2 | ADAPTATION DU LOGICIEL..... | 28 |
| 4.3 | DESCRIPTION THEORIQUE DE LA VALIDATION..... | 29 |
| 4.3.1 | Les appareils en panne | 29 |
| 4.3.2 | L'estimation | 29 |
| 4.3.3 | Tests de cohérence | 33 |
| 4.4 | DESCRIPTION PRATIQUE DE LA VALIDATION..... | 33 |
| 4.4.1 | Avant le 1 août 2003..... | 34 |
| 4.4.2 | Après le 1 août 2003..... | 36 |
| 4.5 | QUELQUES EXEMPLES DE CORRECTIONS | 38 |
| 4.6 | CAS DE LA STATION DE SENNE VIANGROS..... | 40 |
| 4.7 | CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS..... | 41 |
| 5 | ANALYSE GLOBALE DES SERIES DE MESURES ET REPARTITION SPATIALE DES PRECIPITATIONS..... | 43 |
| 5.1 | APERÇU DES DONNEES CONTROLEES..... | 43 |
| 5.2 | EVOLUTION DES SOMMES CUMULEES DE PRECIPITATIONS..... | 43 |
| 5.3 | COMPARAISON PAR RAPPORT A LA SERIE DE REFERENCE DE UCCLE..... | 45 |
| 5.4 | COMPARAISON DES CUMULS AUX STATIONS..... | 46 |
| 5.5 | CARTOGRAPHIE DES PRECIPITATIONS | 48 |
| 6 | ESTIMATIONS DES PRECIPITATIONS EFFICACES | 50 |
| 6.1 | INTRODUCTION | 50 |
| 6.2 | MODELE CONSIDERE | 50 |
| 6.3 | MODELISATION DES PRECIPITATIONS EFFICACES A UCCLE DE 2005 A 2013 | 51 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 7 | CUMULS DES PRECIPITATIONS EN REGION BRUXELLOISE. ANALYSES DETAILLEES AU COURS DES 16 DERNIERES ANNEES ET TENDANCES DEPUIS LE DEBUT DU 20^E SIECLE..... | 55 |
| 7.1 | INTRODUCTION..... | 55 |
| 7.2 | LES DONNEES RECENTES DE PRECIPITATIONS A UCCLE ET LEURS STATISTIQUES..... | 55 |
| 7.3 | EVOLUTION A UCCLE DES CUMULS SAISONNIERS ET SUR LA PERIODE SEPTEMBRE A MARS DEPUIS LE DEBUT DU 20 ^E SIECLE | 57 |
| 7.4 | CONCLUSIONS..... | 61 |
| 8 | PROJET D'ETUDE « CHANGEMENT CLIMATIQUE ET RESSOURCES EN EAU ».... | 72 |
| 8.1 | METHODOLOGIE..... | 72 |
| 8.2 | RESULTATS | 74 |
| 8.2.1 | Analyse du climat présent 2001-2010 (ERA-Interim/ALARO/SURFEX) | 74 |
| 8.2.2 | Analyse des simulations « historique 1990-1999 » et « climat futur 2046-2055 » (ARPEGE/ALARO/SURFEX) | 79 |
| 8.3 | PERSPECTIVES | 82 |
| 9 | ANALYSE DE TROIS EPISODES ORAGEUX | 83 |
| 9.1 | METHODOLOGIE..... | 83 |
| 9.2 | EPISODE DU 14/05/2009..... | 83 |
| 9.3 | EPISODE DU 7/10/2009..... | 84 |
| 9.4 | EPISODE DU 10/07/2010..... | 85 |
| 10 | CONCLUSIONS..... | 87 |
| 11 | BIBLIOGRAPHIE..... | 90 |
| | ANNEXES..... | 92 |
| | ANNEXE 1 INVENTAIRE DES DONNEES PRESENTES..... | 94 |
| | ANNEXE 2 DONNEES D'ETALONNAGE JUSQUE JUILLET 2009 | 98 |
| | ANNEXE 3 ANALYSE GLOBALE DES SERIES..... | 104 |
| | ANNEXE 4 CARTES DES PRECIPITATIONS EN REGION BRUXELLOISE..... | 112 |

1 Introduction

Le marché de services 2011-02-AL intitulé « Réseau de pluviomètres : validation des données, répartition des précipitations et projet d'étude « changement climatique et ressources en eau » en Région bruxelloise » prolonge les marchés de services 2007-01-AL et 2008-02-AL.

Pour rappel, les marchés de services 2007-01-AL intitulé « Réseau de pluviomètres : validation des données et étude de répartition des précipitations en Région bruxelloise » et 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 » abordaient principalement deux thèmes. Le premier concernait la validation de la banque de données pluviométriques horaires de l'Institut bruxellois pour la Gestion de l'Environnement (IBGE). 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. On trouvera le détail des résultats de ces marchés de services dans les rapports finaux correspondants (Dehem *et al.*, 2008 ; Dehem *et al.*, 2010).

Dans le présent marché, les chapitres 2 à 4 ont trait au contrôle de qualité des pluviomètres de l'IBGE et prolongent jusqu'en juin 2011 le traitement des données qui avaient déjà été faites pour des périodes antérieures dans les deux marchés précédents (inspection sommaire de données brutes, prise en compte de l'étalonnage, contrôle de qualité et comblement des données manquantes). Pour présenter une vue d'ensemble sur le travail accompli dans ce domaine depuis le début des marchés, les rapports établis lors des précédents marchés ont été condensés, améliorés et adaptés, au besoin. Les annexes 1, 2 et 3 se rapportent à ces chapitres.

Le chapitre 5 présente d'une part une analyse globale depuis 1999 des cumuls pluviométriques des stations IBGE par comparaison avec le cumul du pluviomètre de référence de l'IRM à Uccle, et d'autre part, un nouveau jeu de cartes des précipitations moyennes sur le territoire de Bruxelles-Capitale pour la période 1999-2010. Ces nouvelles cartes sont reprises en annexe 4.

Le chapitre 6 fournit les résultats d'une étude préliminaire visant à estimer les précipitations efficaces à Uccle pour la période 2005-2013.

Le chapitre 7 reprend, en l'actualisant avec les données les plus récentes, le texte du rapport d'expertise envoyé à l'IBGE en novembre 2013. Il s'agit principalement d'une analyse statistique des précipitations mensuelles et saisonnières à Uccle sur les seize dernières années. On donne aussi l'évolution des précipitations saisonnières à Uccle depuis le début du vingtième siècle.

Le chapitre 8 résume les principaux résultats d'une étude préliminaire dédiée à l'évaluation de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau en Région bruxelloise.

Le chapitre 9 est consacré à l'analyse de trois épisodes orageux en région bruxelloise sélectionnés par l'IBGE.

Dans les conclusions, on résume les principaux résultats obtenus dans le cadre du présent marché de services.

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 officiellement jusqu'en août 2011 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. Dans la pratique, les mesures dans le réseau ont pris fin progressivement, entre juin 2011 et août 2011 suivant les stations. Les données proviennent de 14 stations de mesures dont la moitié environ a fonctionné dès l'origine du réseau. 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 étaient réalisées tous les deux à trois mois. Chaque campagne était conçue en deux vagues, l'une pour les « Précis Mécaniques », l'autre pour les « Géru ».

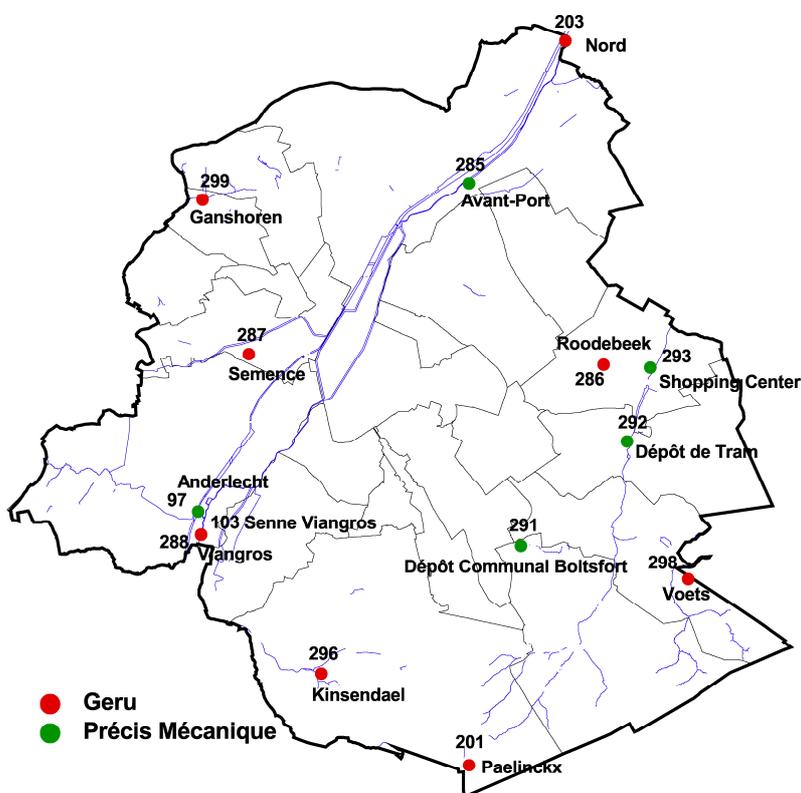


Figure 1. Réseau de l'IGBE de juin 1992 à août 2011. Chaque station est labélisée par son nom et son code.

2.2 Les sites de mesure

Une inspection des sites de mesures pluviométriques de l'IBGE a été effectuée le 10 juillet 2014 (soit trois ans après l'arrêt du réseau). L'objectif était de se faire une idée générale de la configuration de l'environnement qui avait pu exister autour des pluviomètres, notamment en ce qui concerne le type d'obstacles et leur distance aux pluviomètres.

L'estimation générale de la qualité des sites qui a été établie est qualitative et se base sur les critères de dégagement ou d'ouverture des sites établis par l'Organisation météorologique mondiale (OMM). Une analyse plus quantitative de l'état de dégagement des sites dans leur configuration actuelle (juillet 2014) aurait été possible, mais elle aurait conduit dans plusieurs cas à un résultat discutable. En effet, puisque les mesures dans les stations du réseau de l'IBGE ont été interrompues mi-2011 (au plus tard), il est possible (et même probable) que l'environnement autour de l'emplacement de chacun des pluviomètres a évolué depuis l'arrêt des mesures.

De plus, par le passé, le dégagement des sites a pu également évoluer au fil du temps depuis le début des relevés. Par exemple, la pousse de la végétation ou la mise en place d'obstacles divers, à distance plus ou moins proche des pluviomètres, a pu influencer l'ouverture des sites et, de ce fait, modifier la représentativité spatiale des mesures pluviométriques.

Pour quantifier objectivement l'évolution de l'environnement autour des appareils, il aurait fallu disposer d'observations régulières, au fil du temps, de cette caractéristique pour chacun des sites de mesure. Ces informations n'étant pas disponibles, cela justifie l'aspect uniquement qualitatif et approximatif des résultats de l'analyse que nous présenterons ici.

Nous commencerons tout d'abord par rappeler quelques éléments généraux liés à la mesure des précipitations. Nous discuterons en particulier des caractéristiques des sites de mesure nécessaires pour garantir que les données relevées soient les plus représentatives possible de la région dans laquelle les mesures sont effectuées. Nous nous basons ici essentiellement sur les recommandations publiées par l'Organisation météorologique mondiale. On trouvera des informations utiles sur les mesures de précipitations dans les références suivantes : Sevruck, 1982 ; OMM, 1994 ; Lanza *et al.*, 2005 ; Lanza and Stagi, 2008 ; OMM, 2008 ; OMM 2009.

2.2.1 Introduction à la mesure des précipitations

Par définition, les précipitations sont les produits liquides ou solides résultant de la condensation de la vapeur d'eau qui tombent des nuages (bruine, pluie, particules de glace de types divers) ou qui passent directement de l'air au sol sur lequel ils se déposent (rosée, gelée blanche, givre et brouillard).

Du point de vue climatologique et hydrologique, l'eau recueillie dans un pluviomètre devrait représenter non seulement la quantité de précipitations tombant sur le sol à l'endroit de la mesure, mais également ne montrer aucun biais systématique par rapport aux quantités de précipitations tombées dans la région environnante et que les mesures ont pour objectif de représenter. Évidemment, en cas d'averse ponctuelle, ce n'est que

par hasard qu'un site de mesure sera représentatif, vu le caractère local et très variable des averses. Cependant, admettant raisonnablement que les averses successives se répartissent au hasard dans la région, on peut penser que les relevés d'un site bien choisi seront utilisables en moyenne. En cas de pluie uniforme (pluies frontales), le site sera déjà représentatif pour chacun des épisodes successifs s'il n'est pas perturbé par des circonstances locales. En plus du type de pluviomètre, on devra ainsi s'attacher tout particulièrement au choix de l'emplacement du site et à l'installation des pluviomètres sur le site (on ne discutera pas ici de la précision du pluviomètre lui-même, indépendamment des effets du vent sur la qualité des mesures).

Installation des pluviomètres

Un pluviomètre doit être installé au-dessus d'un sol plat, avec sa surface réceptrice parfaitement horizontale. Cette horizontalité doit être vérifiée soigneusement au départ et ensuite régulièrement lors des entretiens de routine, de même que la surface réelle de réception du collecteur. Le sol autour du pluviomètre peut être recouvert de gazon, de gravier ou de galets, mais les surfaces plates et dures comme celles constituées par le béton devraient être éliminées pour éviter les entrées d'eau par rejaillissement. L'ouverture du pluviomètre devrait être à une hauteur aussi peu élevée que possible (la vitesse du vent augmentant avec la hauteur), mais suffisante pour éviter que l'eau ne rejaillisse du sol dans l'appareil. Dans les régions où il y a peu de neige, et lorsque les environs immédiats ne risquent pas — même par forte pluie — d'être recouverts en partie par des flaques d'eau, on recommande une hauteur standard de 30 cm. Là où ces conditions ne sont pas remplies, la hauteur standard préconisée est de 1 m.

Choix de l'emplacement des pluviomètres

Une source d'erreur habituelle — souvent la plus importante — pour les pluviomètres utilisés opérationnellement est le vent. Son effet est particulièrement important pour les précipitations neigeuses. Il faut prioritairement en tenir compte lors du choix de l'emplacement du pluviomètre. Les effets du vent peuvent être considérés sous deux aspects : effets sur l'efficacité de captation du pluviomètre du seul fait de sa présence et effet du site environnant sur les trajectoires du vent sur l'aire de mesure. Les premiers ont pour résultat de réduire la quantité d'eau recueillie. Quant aux effets du site, ils peuvent induire en surface, selon les cas, des surplus ou des déficits par rapport aux précipitations moyennes tombant dans la région environnante. Les perturbations engendrées par un obstacle varient directement selon le rapport entre les dimensions linéaires de l'obstacle et la vitesse de chute des précipitations.

Dans la pratique, pour pallier partiellement sinon complètement à ces inconvénients, deux solutions extrêmes sont possibles :

- On essaye de trouver un emplacement naturellement protégé de sorte que la vitesse du vent au niveau de l'ouverture du pluviomètre soit aussi faible que possible. Il faut en même temps cependant s'assurer que la pluie ne sera pas effectivement arrêtée par des obstacles environnants trop proches.
- On choisit volontairement un emplacement plus exposé et on modifie artificiellement l'environnement immédiat du pluviomètre afin de rendre

horizontal, homogène et faible l'écoulement de l'air au-dessus de l'ouverture de l'appareil.

Protection naturelle du pluviomètre au vent

Lorsque l'emplacement le permet, la surface réceptrice du pluviomètre devrait être protégée du vent dans toutes les directions par des obstacles (arbres, buissons, etc.) ayant une hauteur aussi uniforme que possible. La hauteur de ces obstacles au-dessus du pluviomètre doit être égale au moins à la moitié de la distance qui les sépare de l'appareil (pour assurer une protection efficace contre le vent), mais ne doit pas être supérieure à cette distance (pour éviter l'interception d'une partie des précipitations qui doivent atteindre le pluviomètre). L'idéal est que l'angle formé avec l'horizontale par une ligne joignant la surface réceptrice du pluviomètre au sommet des obstacles qui entourent l'appareil soit compris entre 30° et 45°. Les meilleurs sites se situent souvent dans des clairières à l'intérieur de forêts ou de vergers, au milieu d'arbres ou d'arbustes ou dans des endroits où des objets d'une autre nature jouent un rôle de brise-vent équivalent pour toutes les directions (uniformité directionnelle de l'effet brise-vent).

Dans la pratique, la condition d'uniformité de la hauteur des obstacles autour du pluviomètre est difficilement remplie. Si les obstacles proches ne sont pas uniformément répartis autour de l'appareil, ils génèrent une turbulence de l'air qui perturbe de manière variable et imprévisible les mesures. Des obstacles tels que des brise-vent constitués par une simple rangée d'arbres devraient donc, par exemple, être évités. Pour que le site soit représentatif de la région environnante, on devrait aussi éliminer les emplacements pouvant connaître des perturbations plus systématiques des trajectoires du vent (notamment, sommet de colline, dépression, sol fortement incliné dans une direction).

En conclusion, compte tenu de toutes ces restrictions, il faudra choisir un emplacement le plus abrité possible du plein vent afin de limiter les erreurs de mesure. On veillera cependant toujours à ce que les obstacles soient situés à bonne distance des appareils pour ne pas (trop) perturber les mesures du fait de modifications importantes du champ de vent (conduisant à sous-estimer ou surestimer les quantités de précipitations). D'autre part, des obstacles trop proches conduiront inévitablement à une sous-estimation des relevés.

Protection artificielle du pluviomètre au vent

Lorsqu'il n'est pas possible d'assurer naturellement une protection adéquate contre les effets du vent, il est préférable de supprimer tout obstacle situé à une distance de l'appareil inférieure à deux fois ou — mieux — quatre fois sa hauteur au-dessus de l'ouverture de celui-ci. Par obstacle, on entend normalement un objet vu du pluviomètre avec une largeur angulaire de 10° ou davantage. De cette façon, on se met à l'abri des principales perturbations du vent liées à la présence trop proche d'obstacles.

On réduit ensuite artificiellement les effets directs du vent sur l'appareil, soit en utilisant un pluviomètre enterré, soit en assurant l'horizontalité de l'écoulement de l'air au-dessus de l'orifice du capteur. L'influence du vent étant la plus faible au niveau du sol, le pluviomètre étalon de référence retenu par l'OMM pour les précipitations liquides est un pluviomètre placé dans une fosse, dont la surface réceptrice affleure au niveau du sol. Un

dispositif spécial doit aussi être installé autour de l'instrument pour éviter les rejaillissements.

Dans un réseau d'observations opérationnel, l'utilisation d'un pluviomètre enterré n'est pas pratique. On essaye alors de diminuer artificiellement la perturbation que l'appareil cause à l'écoulement du vent au-dessus de l'orifice de réception. L'OMM préconise les trois techniques suivantes, données par ordre décroissant d'efficacité :

- a) Dans les zones à végétation dense et homogène, maintenir par des tontes régulières la hauteur de la végétation au même niveau que l'ouverture du pluviomètre. Celui-ci est placé au milieu de la végétation.
- b) Dans les autres zones, renforcer l'effet des interventions mentionnées en (a) par l'emploi de palissades judicieusement disposées.
- c) Installer un écran protecteur autour du pluviomètre.

Dans la pratique, la dernière solution est habituellement la plus simple. On place alors l'ouverture du pluviomètre à une certaine hauteur et on dispose autour de lui un écran de forme appropriée. Il a été démontré à de nombreuses reprises que, lorsque leur forme est bien conçue, ces écrans permettent d'obtenir des résultats plus représentatifs qu'avec des pluviomètres non protégés exposés au vent. Comme les précipitations sous forme de neige sont beaucoup plus sensibles au vent que la pluie, les écrans de protection se révèlent particulièrement utiles dans ces conditions, même s'ils ne peuvent éliminer entièrement les déficits de capture d'eau.

Conclusions sur l'influence des sites sur la mesure des précipitations

La manière dont un pluviomètre est exposé à l'influence du vent constitue un facteur important de la qualité des mesures pluviométriques. Dans le choix d'un site, il est nécessaire de considérer les possibilités de déformation systématique du champ de vent au-dessus du pluviomètre, ainsi que les effets propres au site sur les trajectoires du vent et sa turbulence.

Contrairement par exemple aux instruments de mesure de la température et de l'humidité, qui doivent être les plus éloignés possible de l'influence de la végétation et des bâtiments, il est conseillé autour d'un pluviomètre un entourage d'arbres, d'arbustes ou d'obstacles analogues, à distance suffisante et répartis de manière uniforme, qui servent d'abris contre le vent sans provoquer de turbulence défavorable. Évidemment, le site ne doit pas être abrité au point que la présence des objets environnants puisse devenir assez perturbante pour diminuer la quantité des précipitations recueillies. Si les obstacles autour du pluviomètre ne sont pas répartis de manière uniforme, il est alors conseillé de maintenir une distance entre le pluviomètre et tout obstacle environnant égale à deux fois, et de préférence quatre fois, la hauteur de l'obstacle au-dessus de l'ouverture du pluviomètre.

Les sites très exposés au vent — recherchés ou satisfaisants pour la plupart des mesures météorologiques — ne sont généralement pas conseillés pour les pluviomètres. Si on utilise cependant ce genre de site (par ex., pour s'affranchir de manière certaine de tout effet perturbateur des obstacles environnants), on peut chercher à atténuer l'effet du vent en utilisant une protection artificielle (comme un cône de Nipher, par exemple).

2.2.2 Analyse de qualité des sites de mesures de l'IBGE

Comme mentionné dans l'introduction, nous avons effectué le 10 juillet 2014, accompagné d'un agent de l'IBGE, une visite de la plupart des sites sur lesquels étaient effectués les relevés pluviométriques. Seuls deux sites n'ont pas été visités car leurs emplacements précis ne nous étaient pas connus : il s'agit de la station 292 – Dépôt de tram (Woluwe-Saint-Pierre) et de la station 298 – Voets (Auderghem).

Les photos 1 à 11 donnent une idée de l'environnement propre à chaque site de mesure (dans leur état en juillet 2014). Les photos sont classées par ordre décroissant de la valeur relative de l'indice de qualité des sites déduite de l'examen des sites (cf. Table 1 à la suite des photos).



Photo 1. Vue du site de la station 293 – Shopping Center (Woluwe-Saint-Lambert). Le pluviomètre est un Précis Mécanique. Il est au centre de la photo.



**Photo 2. Vue du site de la station 285 – Avant-Port (Bruxelles-Ville).
Le pluviomètre est un Précis Mécanique. Il est presque au centre de la photo.**



**Photo 3. Vue du site de la station 97 – Anderlecht (sur le quai, le long du canal).
Le pluviomètre est un Précis Mécanique. Il est à droite sur la photo.
A gauche, un Ott2 appartenant à la SBGE.**



**Photo 4. Vue du site de la station 203 – Nord (Bruxelles-Ville, digue du canal).
Le pluviomètre est un Geru. Il est au centre de la photo.**



**Photo 5. Vue de l'ancien site de la station 287 – Semence (Molenbeek-Saint-Jean).
Le site initial est détruit par les travaux en cours.
Le pluviomètre était un Geru. Il était situé dans un potager au pied de l'immeuble,
vers le milieu de la photo.**



Photo 6. Vue du site des stations 103 – Senne Viangros et 288 – Viangros (Anderlecht).

Les deux pluviomètres sont des Geru, situés côte à côte sur le toit de la petite construction au centre de la photo.



Photo 7. Vue du site de la station 286 – Roodebeek (Woluwe-Saint-Lambert, parc).
Le pluviomètre est un Geru. Il est au centre de la photo.



**Photo 8. Vue du site de la station 201 – Paelinckx (Uccle, maison forestière).
Le pluviomètre est un Geru. Il est au centre de la photo.**



**Photo 9. Vue du site de la station 291 – Dépôt communal (Boitsfort).
Le pluviomètre de l'IBGE est un Précis Mécanique, au centre de la photo. A côté de
lui, un Geru appartenant à la SBGE.**



**Photo 10. Vue du site de la station 299 – Ganshoren (zone des marais).
Le pluviomètre est un Geru. Il est entouré de végétation basse, à gauche
au milieu de la photo.**



**Photo 11. Vue du site de la station 296 – Kinsendael (Uccle, parc).
Le pluviomètre est un Géru. Il est au centre de l'enclos au milieu de la photo,
entouré de végétation basse.**

La Table 1 présente les principales caractéristiques des sites de mesures utiles pour estimer leur représentativité spatiale et leur attribuer de ce fait un indice de qualité relatif. Dans la Table, les stations sont également classées par ordre décroissant de la valeur relative de l'indice de qualité des sites déduite de l'examen des sites.

Les sites de mesures sont classés en quatre groupes, fonction de la valeur relative estimée de leur indice de qualité :

- Les stations 293 – Shopping Center et 285 – Avant-Port présentent le meilleur indice de qualité (7), du fait d'un bon dégagement, sans que les sites ne soient trop exposés au vent.
- Les stations 97 – Anderlecht et 203 – Nord présentent un indice de qualité un peu inférieur (6), du fait de leur dégagement plus important, ce qui rend les mesures pluviométriques effectuées sur ses sites plus sensibles aux effets du vent. L'ancien site 287 – Semence, qui est détruit aujourd'hui, peut sans doute également être classé dans ce groupe.
- Les stations 103 – Senne Viangros, 288 – Viangros, 286 – Roodebeek, 201 – Paelinckx et 291 – Dépôt communal Boitsfort présentent un indice de qualité moyen (5) du fait principalement que le dégagement de ces sites est trop faible, avec des obstacles trop proches (arbres ou arbustes) qui doivent fausser les mesures pluviométriques dans certaines conditions (dépendantes de la direction du vent).
- Les stations 299 – Ganshoren et 296 – Kinsendael présentent les indices de qualité les plus faibles (3 et 2, respectivement) du fait du dégagement général trop faible autour des appareils de mesure. Des arbres et arbustes trop proches doivent perturber les mesures dans de nombreuses situations.
- Enfin, rappelons que les stations 292 – Dépôt de tram et 298 – Voets n'ont pas été classées dans la Table car il n'a pas été possible de visiter les sites (manque d'informations précises sur les emplacements exacts)).

Table 1. Estimation de la qualité des sites pour les stations pluviométriques de l'IBGE en ce qui concerne leur représentativité spatiale. La qualité du site (tel qu'il se présente en juillet 2014) est estimée selon une valeur d'indice comprise entre 10 (site d'excellente qualité) et 1 (site de qualité très médiocre).

| Code | Nom | Remarques sur le site de mesure | Indice de qualité |
|------------|---------------------------|---|-------------------|
| 293 | Shopping Center | Site relativement dégagé, sauf une haie au nord un peu trop proche | 7 |
| 285 | Avant-Port | Site relativement dégagé, sauf quelques arbustes proches | 7 |
| 97 | Anderlecht | Site dégagé, venteux, proche du canal | 6 |
| 203 | Nord | Site dégagé, venteux, au bord du canal | 6 |
| 287 | Semence | Site détruit, probablement assez bien dégagé, buildings relativement proches | (6) |
| 103 et 288 | Senne Viangros / Viangros | Site relativement dégagé, arbre très proche au nord, appareils en hauteur, proche du canal | 5 |
| 286 | Roodebeek | Site assez peu dégagé, arbres et arbustes trop proches | 5 |
| 201 | Paelinckx | Site assez peu dégagé, arbres et arbustes, arbustes trop proches | 5 |
| 291 | Dépôt communal Boitsfort | Site peu dégagé, arbres et arbustes trop proches, surtout au SO | 5 |
| 299 | Ganshoren | Site arboré, trop peu dégagé | 3 |
| 296 | Kinsendael | Site arboré, trop peu dégagé, surtout vers l'ouest | 2 |
| (292 | Dépôt de Tram | Station fermée en 2010, site précis inconnu) | / |
| (298 | Voets | Station fermée en 2005, site précis inconnu, potentiellement bien dégagé (site bien dégagé pour le pluviomètre SBGE)) | / |

Pour terminer, il faut rappeler que les résultats de la Table 1 ne sont qu'indicatifs puisqu'ils se rapportent à une analyse de l'environnement des sites de mesure à la date du 10 juillet 2014, soit trois ans déjà après l'arrêt des mesures dans le réseau pluviométrique de l'IBGE. De plus, ce réseau a été lancé au début des années 90 et il est évident que l'environnement autour de chaque suite de mesure a dû subir des évolutions au fil du temps. Les détails de ces évolutions ne sont pas précisément connus, ce qui empêche une analyse temporelle quantitative et objective de la qualité des sites.

2.3 La base de données de l'IBGE

L'incorporation des données horaires s'est déroulée relativement facilement. La Table 2 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 2. 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 | 10/08/2011:22 |
| 103 | Geru | Senne Viangros | 29/12/1998:22 | 30/08/2009:07 |
| 201 | Geru | Paelinckx | 31/05/1992:23 | 28/06/2011:22 |
| 203 | Geru | Nord | 31/05/1992:23 | 09/08/2011:22 |
| 285 | Précis Mécanique | Avant-Port | 29/01/2001:10 | 10/08/2011:22 |
| 286 | Geru | Roodebeek | 30/10/1998:10 | 11/08/2011:10 |
| 287 | Geru | Semence | 03/11/1997:12 | 11/08/2011:11 |
| 288 | Geru | Viangros | 20/01/1995:11 | 29/06/2011:08 |
| 291 | Précis Mécanique | Dépôt Communal Boitsfort | 31/05/1992:23 | 08/08/2011:22 |
| 292 | Précis Mécanique | Dépôt de Tram | 12/02/1993:12 | 09/08/2010:05 |
| 293 | Précis Mécanique | Shopping Center | 31/12/1991:23 | 09/08/2011:11 |
| 296 | Geru | Kinsendael | 31/05/1992:23 | 09/08/2011:12 |
| 298 | Geru | Voets | 19/06/1992:12 | 25/10/2005:11 |
| 299 | Précis Mécanique | Ganshoren | 03/06/1992:08 | 01/07/2011:09 |

2.4 Inspection sommaire des données

L'inspection sommaire des données, les inventaires et les graphes des sommes cumulées, permet de se faire une première idée de 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 décembre 2010 (cf. point 5.5). 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 comme 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. Figures 2 et 3).

Ainsi, nous pouvons facilement détecter les écarts par rapport à la tendance moyenne du réseau. La Figure 2 permet de détecter par exemple les valeurs très faibles de Ganshoren. De même, dans la Figure 3, des décrochages dans les courbes permettent de détecter des stations potentiellement à corriger : Paelinckx, Roodebeek... Le décrochage des courbes de l'IBGE en novembre et décembre 2010 par rapport aux stations d'Uccle, s'explique par le fait qu'aucune des stations de l'IBGE n'a fonctionné correctement durant cette période (cf. Figures 3 et 4).

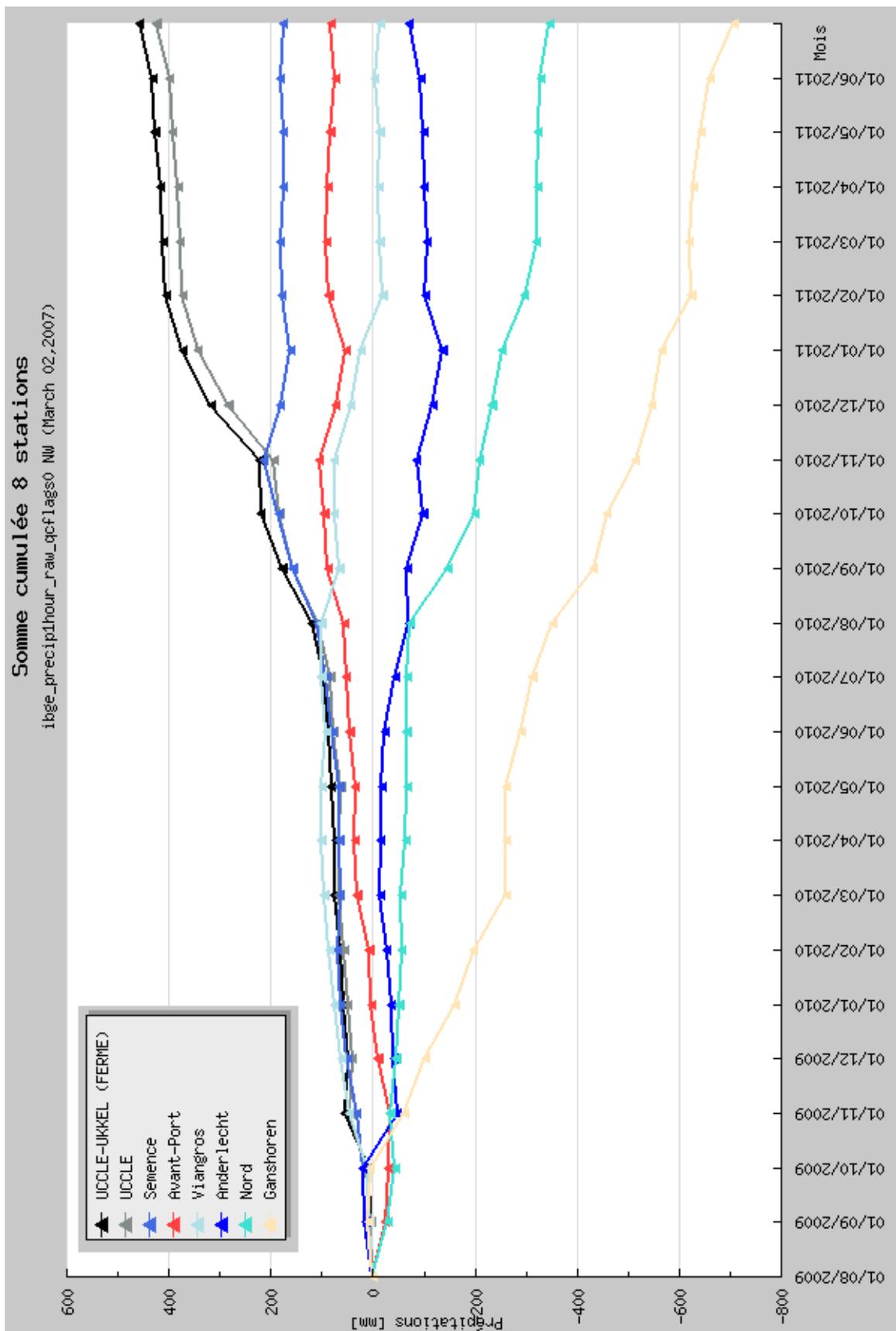


Figure 2. Sommes mensuelles cumulées des écarts par rapport à la moyenne des stations situées au nord-est de la Région Bruxelloise ainsi qu'à Uccle, pour la période juillet 2009 à juin 2011. Données brutes.

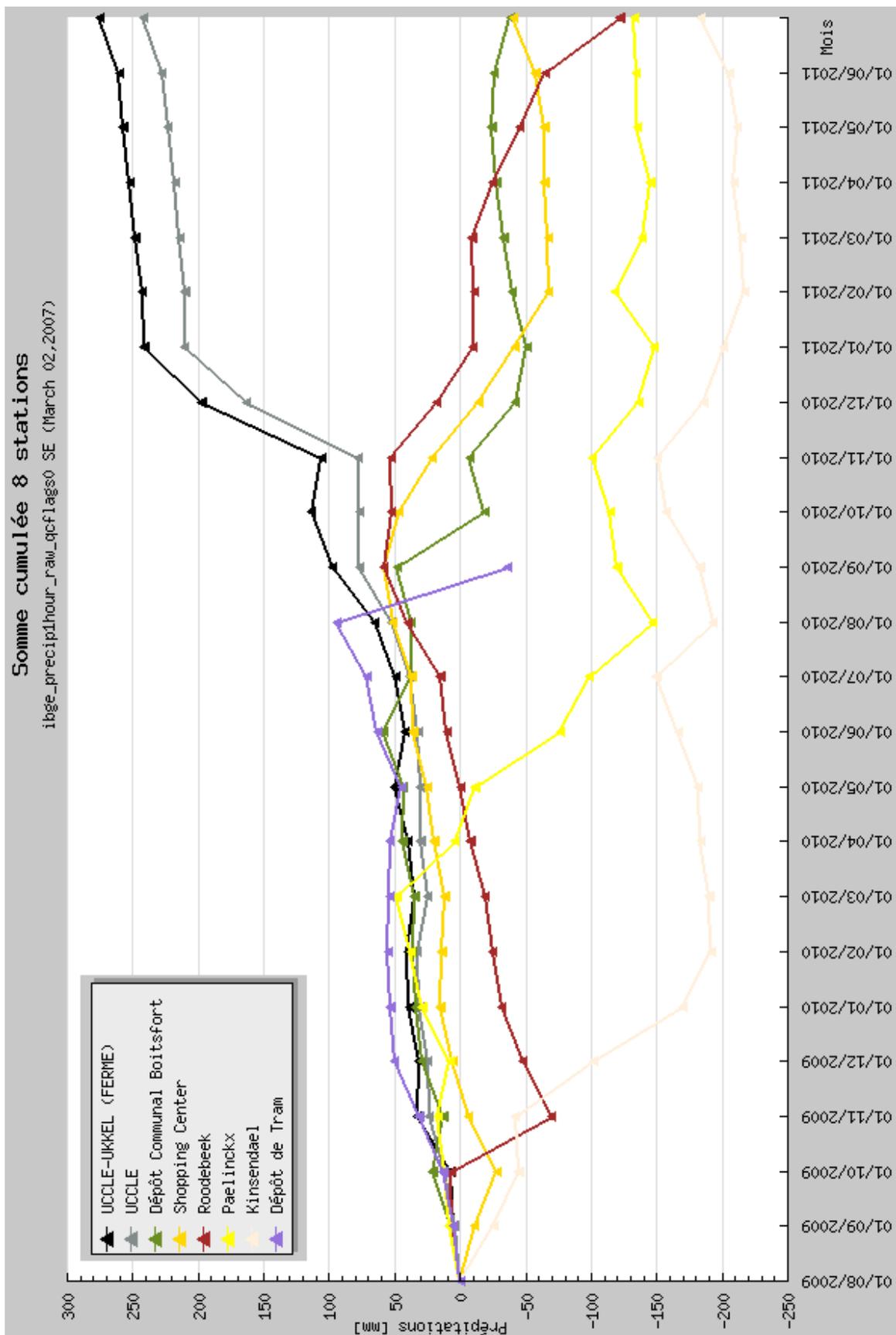


Figure 3. Sommes mensuelles cumulées des écarts par rapport à la moyenne des stations situées au sud-ouest de la Région Bruxelloise ainsi qu'à Uccle, pour la période juillet 2009 à juin 2011. Données brutes.

November 2010: ibge - prg

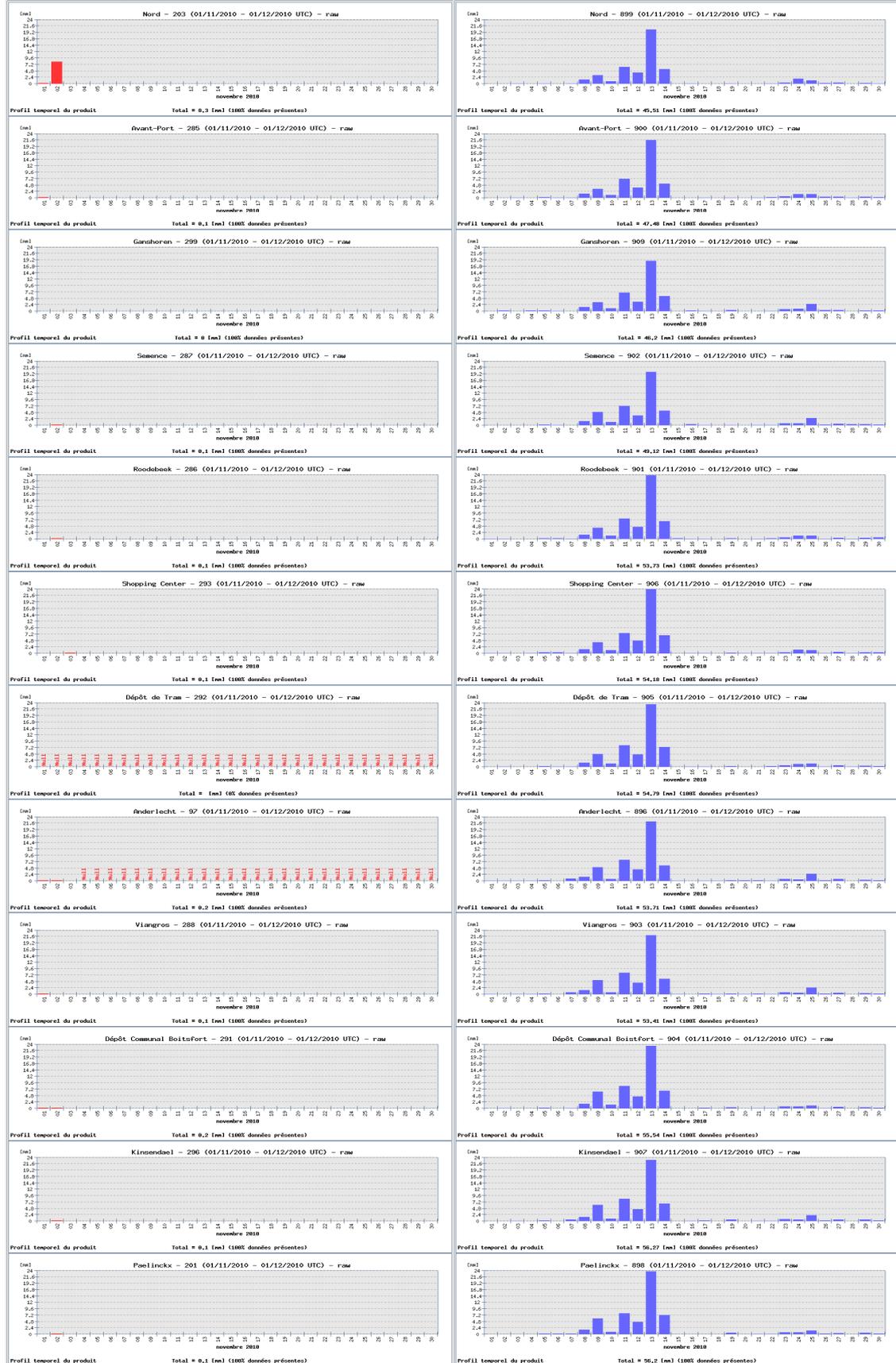


Figure 4. Données journalières de l'IBGE du mois de novembre 2010 (partie gauche) en vis-à-vis des estimations radar (partie droite). NULL pour un jour donné signifie que la donnée est absente.

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 août 2011. 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 jusque fin juillet 2009. 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 les données d'étalonnage postérieures à 2009, nous avons préféré une forme plus compacte et beaucoup plus lisible (cf. Figure 5).

| Étalonnage | | | | | | | | | | |
|--------------------------|------|------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------|------------|------------|-------------------------|--------------|
| NAME | CODE | 07/05/2009 | 14/09/2009 - 15/09/2009 | 28/10/2009 - 29/10/2009 | 03/03/2010 - 05/03/2010 | 09/07/2010 | 10/08/2010 | 09/02/2011 | 29/06/2011 - 01/07/2011 | 9-11/08/2011 |
| Anderlecht (PM) | 97 | | 49 - 50 | | 49 - 50 | | 51 - 50 | 52 - 50 | | 50 |
| Paelinckx (GERU) | 201 | 102 - 100 | 72 - 100 | | 104 - 100 | | 92 - 99 | 101 - 100 | 100 | |
| Nord | 203 | 100 - 100 | 96 - 100 | 103 - 99 | 102 - 100 | | 97 - 100 | 100 - 100 | | 100 |
| Avant-Port | 285 | | 49 - 50 | | 49 - 50 | | | 49 - 50 | | 50 |
| Roodebeek | 286 | 102 - 100 | 101 - 100 | | 101 - 100 | | 106 - 100 | 102 - 100 | | 100 |
| Semence | 287 | 106 - 100 | 102 - 100 | 99 - 99 | 102 - 100 | | 104 - 100 | 104 - 100 | | 100 |
| Viangros | 288 | 100 - 100 | 102 - 100 | | 104 - 100 | | 100 - 100 | 96 - 99 | 99 | |
| Dépôt Communal Boitsfort | 291 | | 51 - 50 | | 52 - 50 | | 51 - 50 | 50 - 50 | | 50 |
| Dépôt de Tram | 292 | | 51 - 50 | | 49 - 50 | | 50 | | | |
| Shopping Center | 293 | | 50 - 50 | 47 - 50 | 50 - 50 | | 50 - 50 | 49 - 50 | | 50 |
| Kinsendaël | 296 | 102 - 100 | 100 - 100 | | 104 - 100 | 100 - 100 | | 99 - 100 | | 100 |
| Ganshoren | 299 | 106 - 100 | 97 - 100 | | 103 - 100 | | 97 - 99 | 103 - 100 | 100 | |

Figure 5. Les dates d'étalonnage, et les données y afférentes, reprises dans la base de données de l'IRM. En bleu, les valeurs estimées par l'IRM.

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 ;
- $N_{après\ réglage}$ ($N_{après}$) 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) : $\frac{\text{Naprs}(t-1)}{\text{Navant}(t)}$. 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 Navant et Naprs. Le comblement des valeurs manquantes a été réalisé de manière suivante :

- si Navant est manquant, prendre la valeur Naprs nettoyage ;
- si Naprs est manquant, prendre la valeur de 100 ou 50 suivant les pluviomètres ;
- si Navant est manquant et que Naprs nettoyage est manquant aussi, prendre Naprs 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 2,0. 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 – Nord) ou erreur dans l'année de la date (26/06/2003 au lieu de 26/06/2004, pour le pluviomètre 97 – 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 8 (cf. point 4.4).

La Table 3 donne un exemple de correction pour la station Ganshoren (code 299) pour la période entre deux dates d'étalonnage : 03/06/2003 et 10/02/2004. Le facteur de correction se calcule à partir des données relatives aux étalonnages, 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 de l'annexe 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 multipliée par le facteur de correction.

Table 3. 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 (du 03/06/2003 au 10/02/2004). 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

A titre d'exemple, la Table 4 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 4. 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 |

L'impact des corrections d'étalonnage sur les données est relativement faible. Les conclusions sont similaires pour les données après juillet 2009 : la comparaison des Figures 2 et 3 avec les Figures 6 et 7 montre que ces courbes sont très proches.

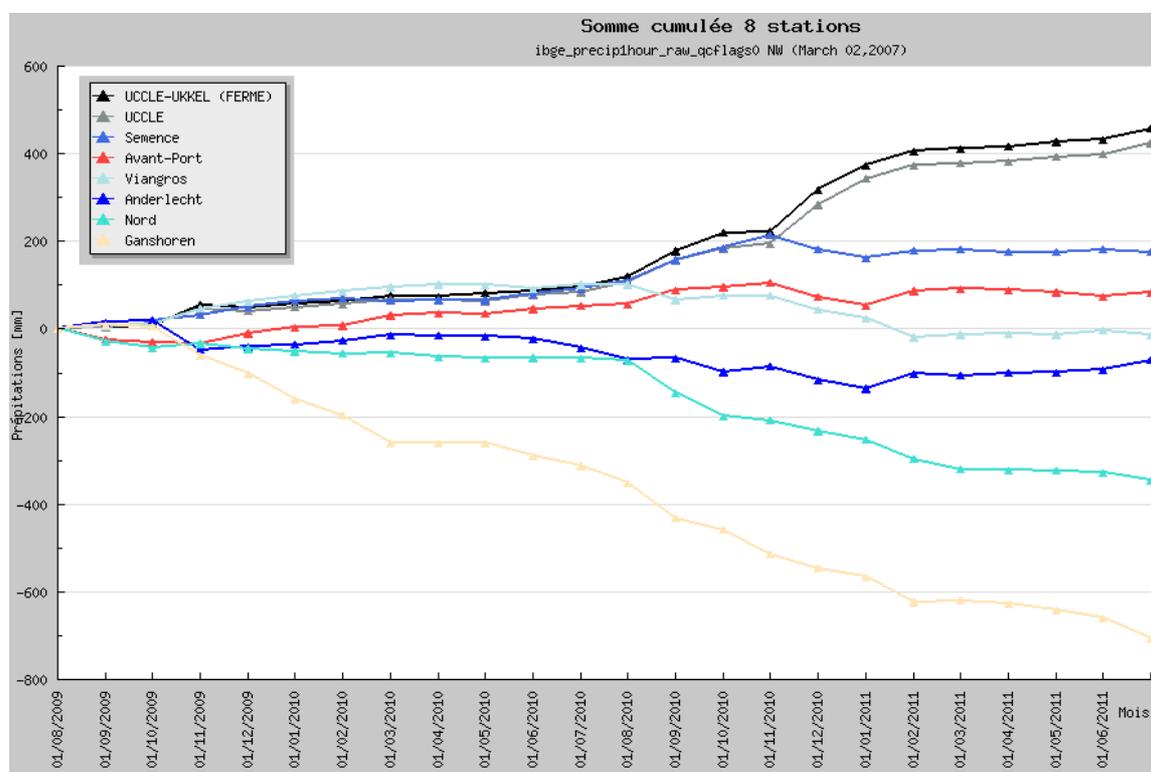


Figure 6. Sommes mensuelles cumulées des écarts par rapport à la moyenne des stations situées au nord-est de la Région Bruxelloise ainsi qu'à Uccle, pour la période juillet 2009 à juin 2011. Données après corrections relatives à l'étalonnage.

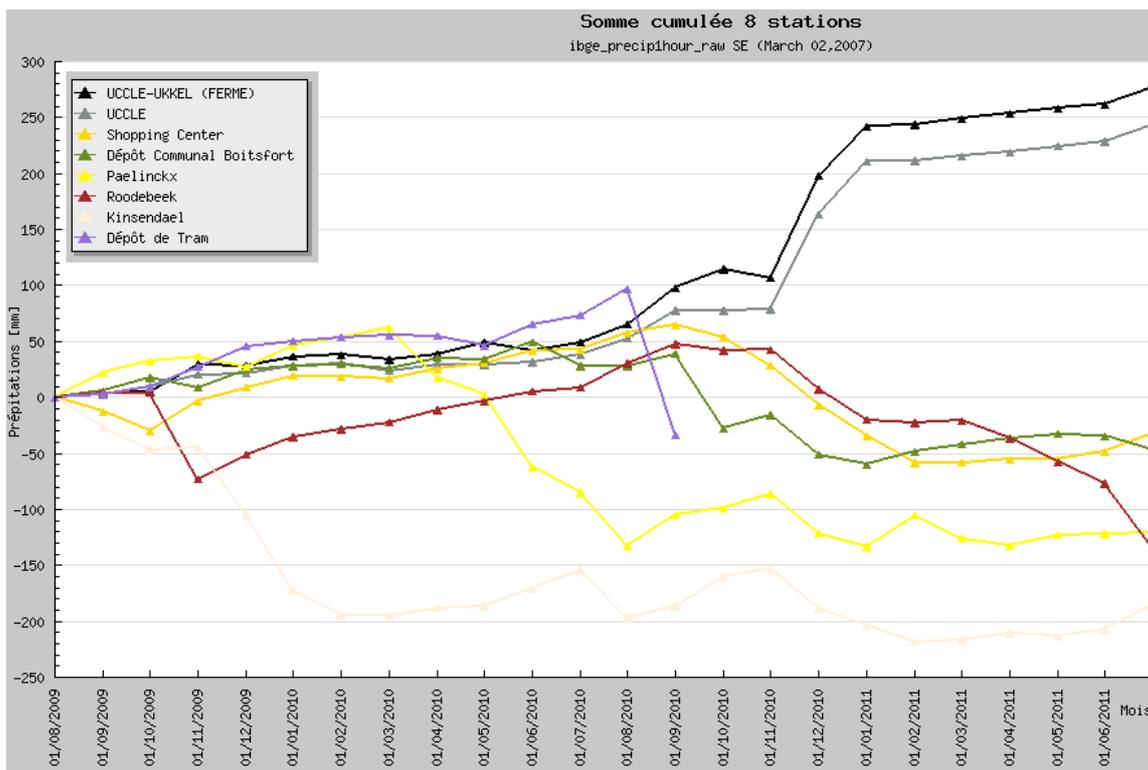


Figure 7. Sommes mensuelles cumulées des écarts par rapport à la moyenne des stations situées au sud-ouest de la Région Bruxelloise ainsi qu'à Uccle, pour la période juillet 2009 à juin 2011. Données après corrections relatives à l'étalonnage.

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.

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 développé 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. A l'occasion du présent marché, le contrôle de qualité a concerné la dernière période de mesures, du mois d'août 2009 au mois de juin 2011 (il n'y avait plus assez de stations en fonctionnement en juillet et août 2011 pour utiliser efficacement les procédures de contrôle de qualité). Le choix de commencer en 1999 fut motivé par le souhait d'avoir les meilleures données possibles sur la période de confection des cartes climatologiques : 1999 à 2010.

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 déterminées.

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.

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.

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 panne. 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. point 4.3.3). 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. point 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 5 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 6 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, les formules 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 8, elle reprend les exemples numériques des Tables 5 et 6.

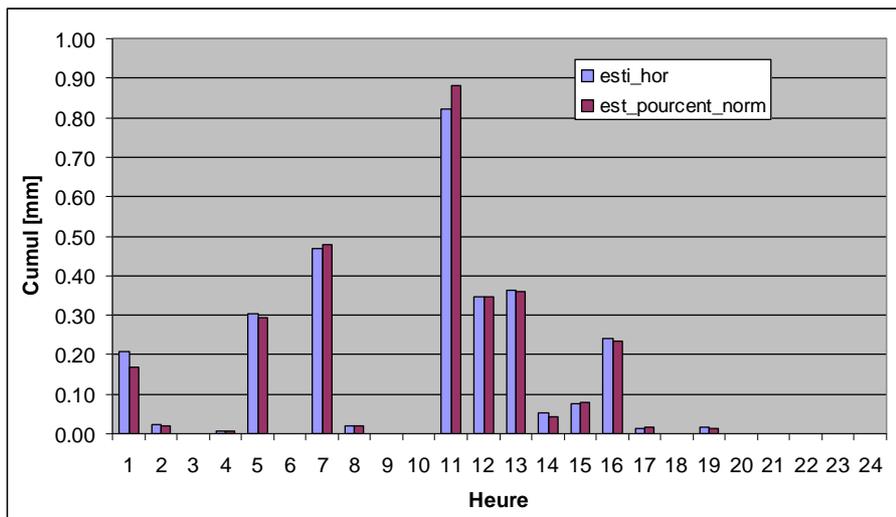


Figure 8. Différences entre les estimations horaires issues de la méthode simplifiée (esti_hor) et complète (est_pourcent_norm) dans le cas de Paelinckx, le 23 janvier 2003.

Commentaires sur l'exemple numérique de la Table 5. 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 5. 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 6. 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 6. 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 cohérence 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. $I = [\mu(P) - 3\sigma(P), \mu(P) + 3\sigma(P)]$ 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 $f(\text{RR})$ qui aurait pour effet de rendre la distribution de P plus normale. $I = f^{-1}[\mu(f(P^*)) - 3\sigma(f(P^*)), \mu(f(P^*)) + 3\sigma(f(P^*))]$ où $f(\text{RR}) = 100 \ln(1 + 10 \cdot \text{RR})$ 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 7), mais en utilisant la même méthode d'interpolation.

Table 7. Vue d'ensemble de la méthode utilisée pour la validation des données de l'IBGE. « Méthode mensuelle » correspond à la description reprise au point 4.4.1, « second passage » est décrit au point 4.4.1 et « Méthode journalière » correspond à la description reprise au point 4.4.2.

| | | | | | |
|------------------------------------|--------------------------------|--|---------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| | Juin 1992- décembre 1998 | Janvier 1999 – juillet 2003 | Août 2003 – décembre 2003 | Janvier 2004 – septembre 2007 | Octobre 2007 –juin 2011 |
| 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 | 2007-01-AL | 2007-01-AL et 2008-02-AL | 2008-02-AL | 2008-02-AL | 2008-02-AL et 2011-02-AL |

Chaque cumul horaire est estampillé d'un indice de qualité décrivant le traitement réalisé sur les données brutes (cf. Table 8). 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 8. 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 subit 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 Avant le 1 août 2003

Le mode opératoire avant le 1 août 2003. Les données ont été regardées de manière plutôt sommaire, les données radar n'ont pas été utilisées. Le réseau de contrôle (cf. point 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.

Le processus de validation s'opère en deux étapes :

Première étape À l'aide d'inspection visuelle de graphes, 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 9). 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 décalées de 24 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 utilise les renseignements sur les appareils en panne 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 24 valeurs horaires des stations en panne par interpolation (moyenne pondérée par l'inverse du carré de la distance).

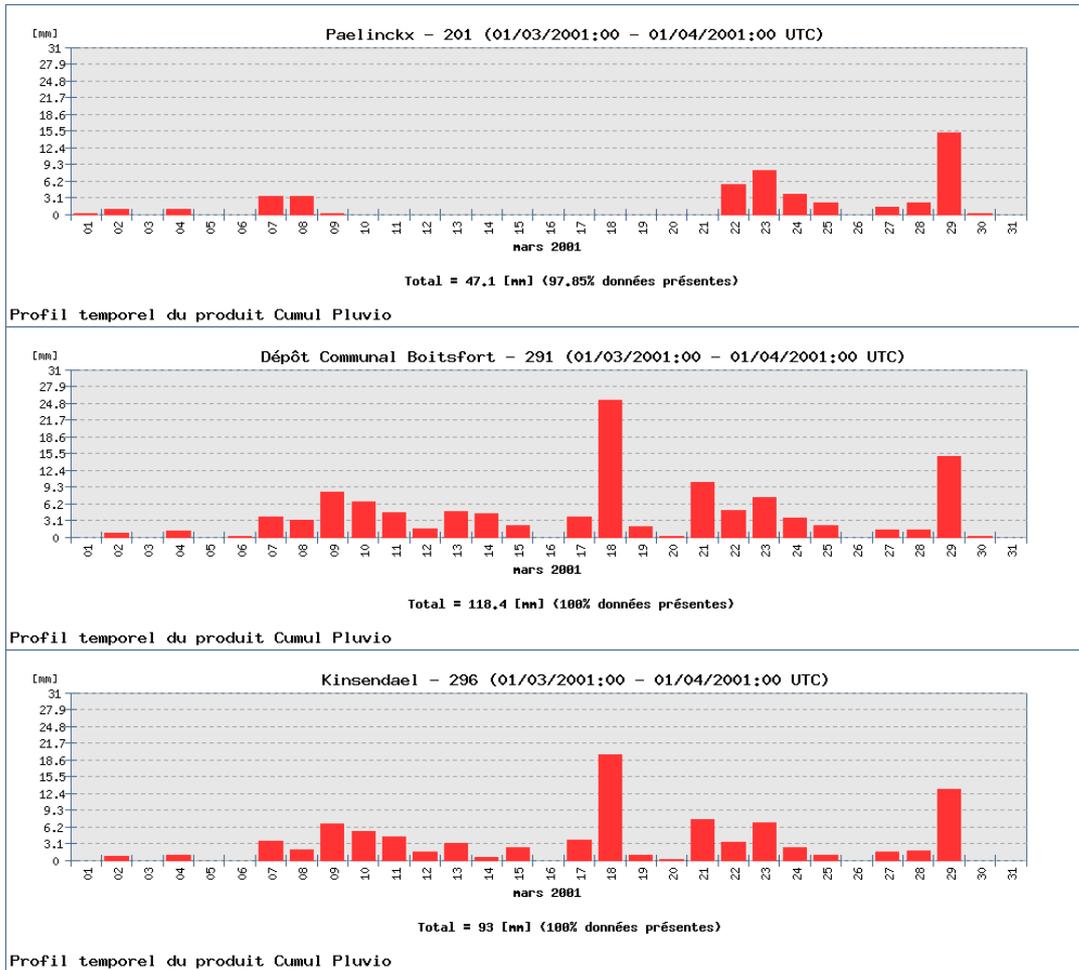


Figure 9. Profil temporel journalier mettant en évidence des données aberrantes à Paelinckx en mars 2001. L'appareil était probablement bouché.

Il est à noter que, lors du marché 2008-02-AL, les données du 1 janvier 1999 au 31 juillet 2003 identifiées comme suspectes par cette méthode ont été inspectées de manière plus détaillée avec la méthode décrite au point 4.4.2.

4.4.2 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. point 4.2) a été pris égal au réseau de l'IBGE augmenté de la station automatique chauffée de l'IRM. En 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.

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 au calcul des estimations et seront remplacées par des estimations. Le repérage des valeurs suspectes est réalisé de manière manuelle ou par inspection des sorties du logiciel qui repère ces valeurs à l'aide de tests de cohérence (cf. point 4.3.3). La détection manuelle se base sur l'inspection visuelle de graphes (cf. Figure 10) 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 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 les appareils à cumul suspect.

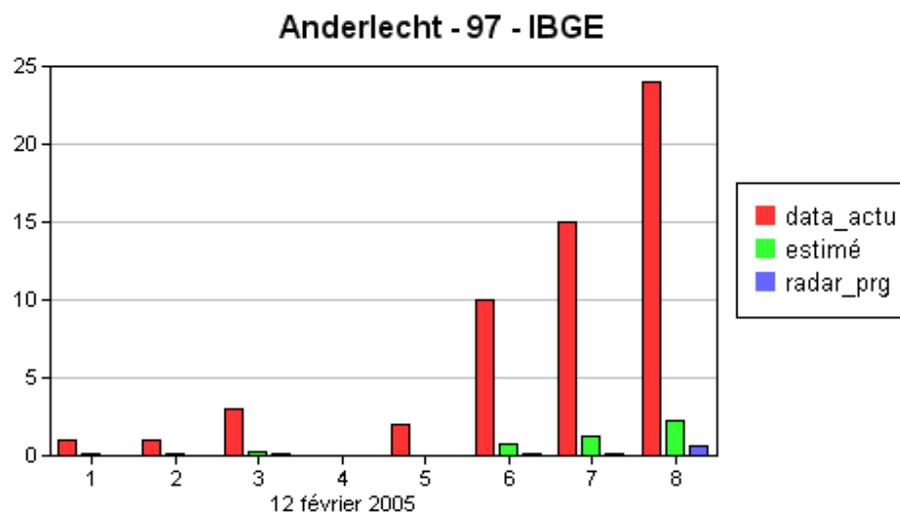


Figure 10. Exemple de graphe pour le pluviomètre Anderlecht. L'inspection de graphe permet facilement de détecter les valeurs aberrantes, ici trop élevées, de l'appareil.

¹ Pseudo rain gauge

4.5 Quelques exemples de corrections

Dans l'exemple 1 (cf. Figure 9, point 4.4.1), la station de Paelinckx n'a pas enregistré l'événement pluvieux autour du 15 mars 2001. Ces données ont été estimées.

Dans l'exemple 2 (cf. Figure 11), la station Nord n'a pas enregistré l'événement pluvieux de fin octobre- début novembre 2003. Ces données devront être estimées.

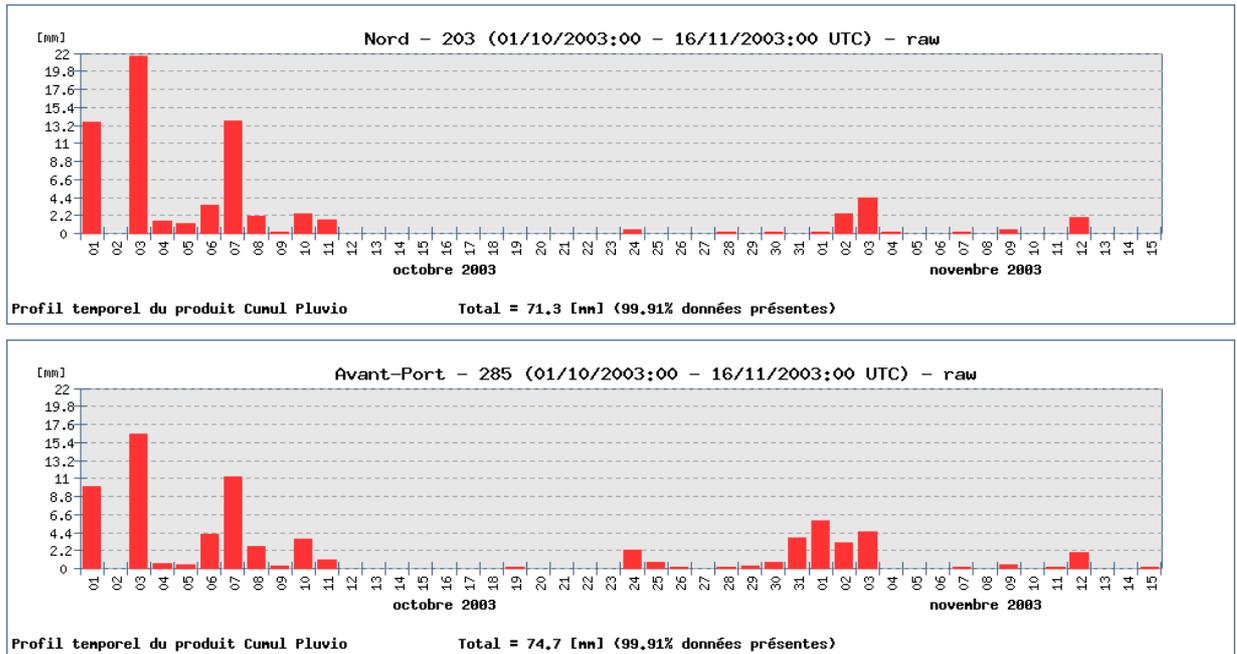


Figure 11. Illustration de l'inspection des graphes de valeurs journalière. Le diagnostic est que la station Nord n'a pas enregistré l'événement pluvieux de fin octobre, début novembre.

Dans l'exemple 3 (cf. Figure 12), 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 réel déficit pluviométrique ou les stations n'ont-elles pas bien fonctionné ?

Lors du présent marché, concernant les corrections pour cause de chute de neige, 4 épisodes neigeux ont été identifiés pour l'hiver 2009-2010 (16/12/2009 – 25/12/2009 ; 02/01/2010 – 16/01/2010 ; 29/01/2010 – 02/02/2010 ; 10/02/2010 – 14/02/2010) et 2 épisodes pour l'hiver 2010-2011 (25/11/2010 – 05/12/2010 ; 13/12/2010 - 01/01/2011). Lors de ces épisodes, les valeurs de l'ensemble des stations de l'IBGE ont été supposées identiques aux valeurs de l'appareil chauffé de l'IRM.

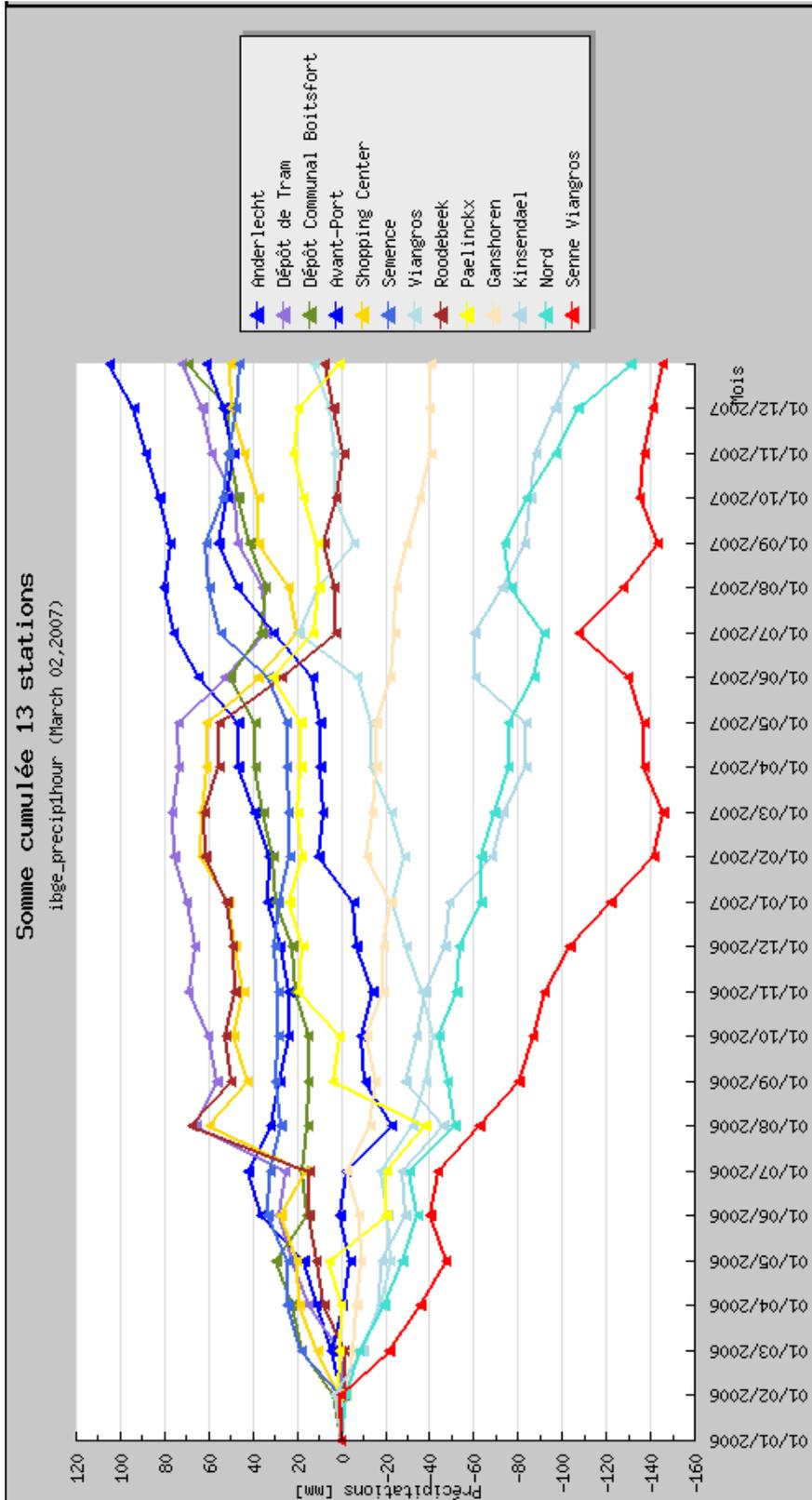


Figure 12. Somme des valeurs cumulées de précipitations validées sur la période 1 janvier 2006 au 31 décembre 2007.

4.6 Cas de la station de Senne Viangros

La station de Senne Viangros présente un cumul de précipitation 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 Figures 13 et 14 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.

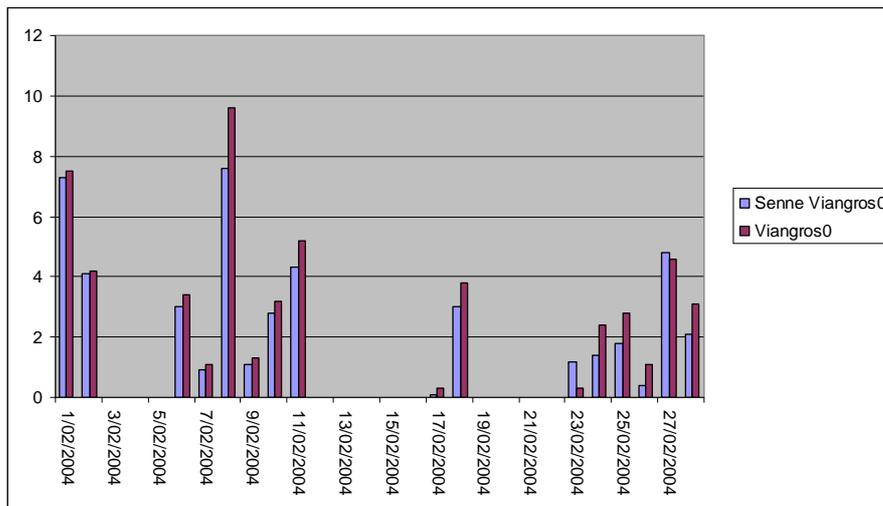


Figure 13. Comparaison des données journalières validées pour les stations Viangros et Senne Viangros pour le mois de février 2004.

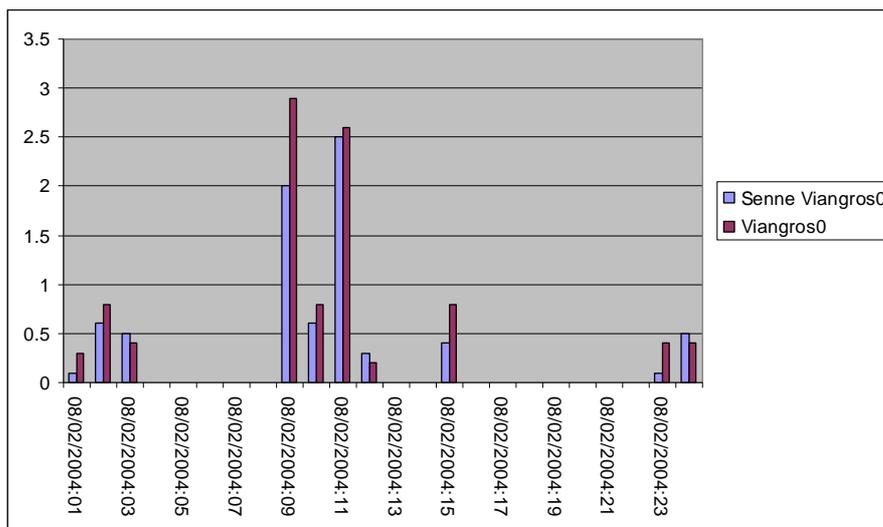


Figure 14. Comparaison des données horaires validées pour les stations de Viangros et Senne Viangros le 8 février 2004.

4.7 Conclusions et recommandations

Au terme de cette validation, l'IRM a pu 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 9.

Table 9. Extrait de la banque 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 10 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 10. Liste des 14 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 2.

| Code | Nom | Début réel | Début de la validation | Fin de la validation |
|------|--------------------------|---------------|------------------------|----------------------|
| 97 | Anderlecht | 20/03/1998:15 | 01/06/1998:00 | 01/07/2011:06 |
| 103 | Senne Viangros | 29/12/1998:22 | 01/01/1999:00 | 13/09/2010:06 |
| 201 | Paelinckx | 31/05/1992:23 | 01/07/1992:00 | 01/07/2011:06 |
| 203 | Nord | 31/05/1992:23 | 01/08/1992:00 | 01/07/2011:06 |
| 285 | Avant-Port | 29/01/2001:10 | 01/02/2001:00 | 01/07/2011:06 |
| 286 | Roodebeek | 30/10/1998:10 | 01/11/1998:00 | 01/07/2011:06 |
| 287 | Semence | 03/11/1997:12 | 01/11/1997:00 | 01/07/2011:06 |
| 288 | Viangros | 20/01/1995:11 | 01/02/1995:00 | 01/07/2011:06 |
| 291 | Dépôt Communal Boitsfort | 31/05/1992:23 | 01/06/1992:00 | 01/07/2011:06 |
| 292 | Dépôt de Tram | 12/02/1993:12 | 01/03/1993:00 | 01/07/2011:06 |
| 293 | Shopping Center | 31/12/1991:23 | 01/06/1992:00 | 01/07/2011:06 |
| 296 | Kinsendaal | 31/05/1992:23 | 01/06/1992:00 | 01/07/2011:06 |
| 298 | Voets | 19/06/1992:12 | 01/07/1992:00 | 27/10/2005:06 |
| 299 | Ganshoren | 03/06/1992:08 | 01/06/1992:08 | 01/07/2011:06 |

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). De même, les fortes précipitations de novembre 2010 n'ont été mesurées par aucune station de l'IBGE.

Les trois 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 plus tôt les appareils hors service et agir en conséquence in situ.

5 Analyse globale des séries de mesures et répartition spatiale des précipitations

5.1 Aperçu des données contrôlées

La Figure 15 fournit une vue globale des codes de qualité attribués à l'ensemble des données contrôlées de janvier 1999 à juin 2011.

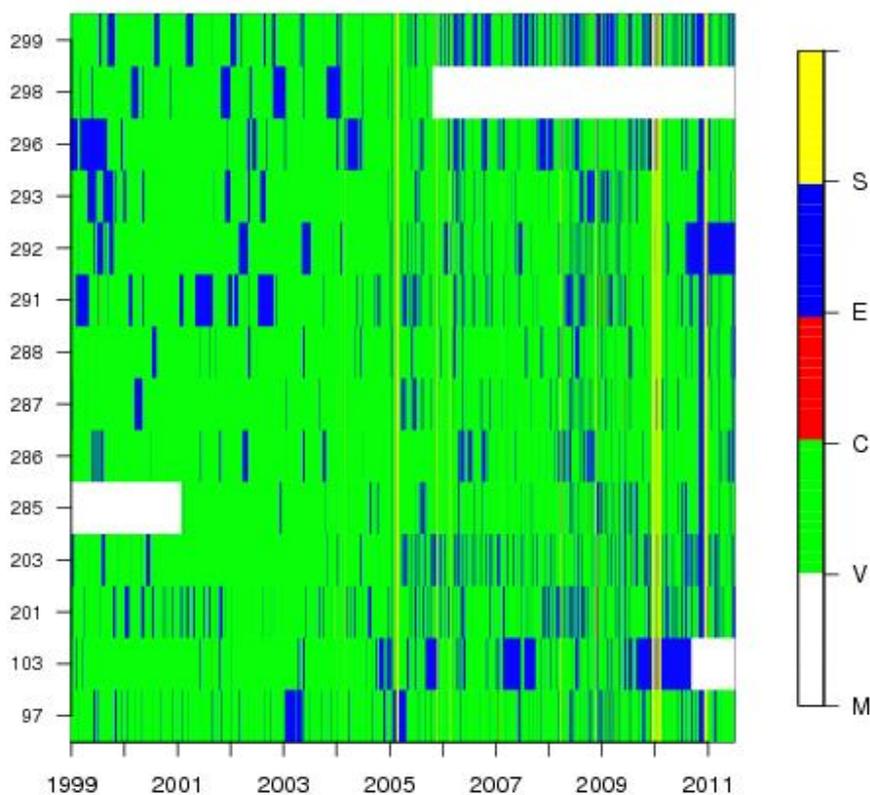


Figure 15. Aperçu des codes de qualité pour l'ensemble des stations de l'IBGE pour la période 1999-2011. M=manquant ; V=validé ; C=corrigé ; E=estimé ; S=neige (snow).

5.2 Evolution des sommes cumulées de précipitations

Les Figures 16 et 17 reprennent les sommes mensuelles cumulées pour l'ensemble des stations bruxelloises pour la période 01/07/2009 à 30/06/2011. Ces figures sont à mettre en parallèle aux Figures 6 et 7 relatives aux données étalonnées mais non contrôlées.

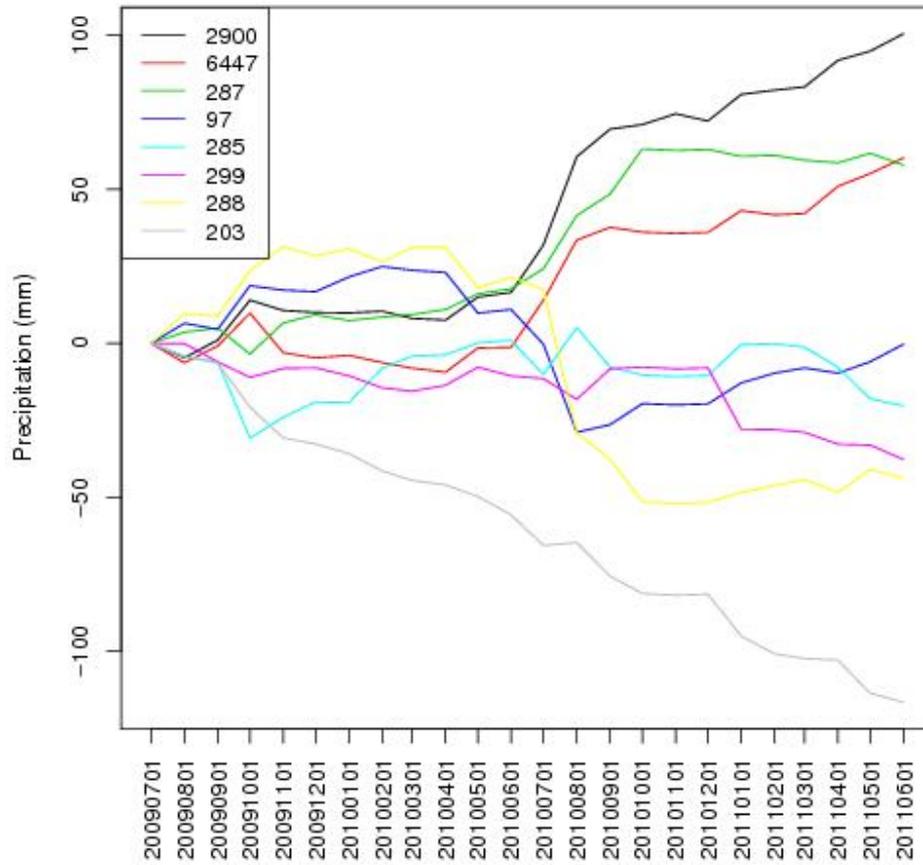


Figure 16. Sommes mensuelles cumulées des écarts par rapport à la moyenne des stations situées au nord-est de la Région Bruxelloise ainsi qu'à Uccle (2900, relevé manuel et 6447, station automatique) pour la période juillet 2009 à juin 2011. Données contrôlées.

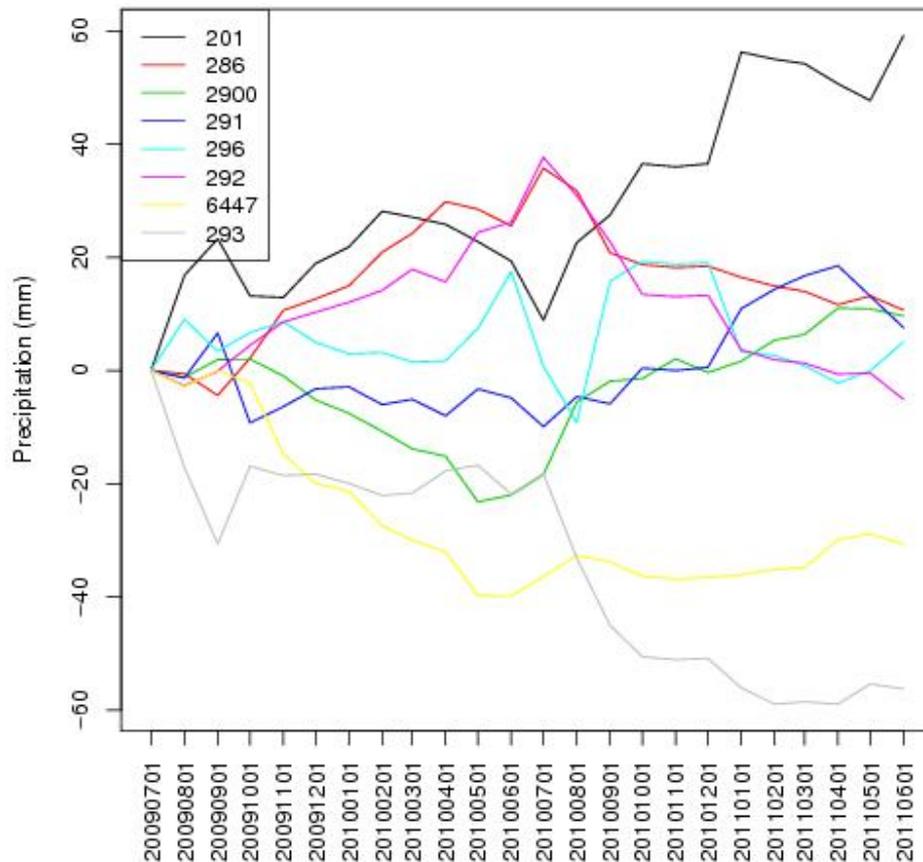


Figure 17. Sommes mensuelles cumulées des écarts par rapport à la moyenne des stations situées au sud-ouest de la Région Bruxelloise ainsi qu'à Uccle (2900, relevé manuel et 6447, station automatique) pour la période juillet 2009 à juin 2011. Données contrôlées.

5.3 Comparaison par rapport à la série de référence de Uccle

Les séries d'observation du réseau de l'IBGE ont été comparées à la série de référence de Uccle (P50). Pour chaque série, l'analyse s'est effectuée sur la période de recouvrement maximale. Une telle analyse permet par exemple de mettre en évidence certaines erreurs qui ne peuvent être détectées lors d'une analyse au pas de temps journalier des données. A titre d'exemple, ces erreurs peuvent être des dérives instrumentales, des ruptures d'homogénéité dues à des changements d'instrument ou des modifications dans l'environnement de la station.

La Figure 18 illustre les résultats obtenus pour la station 97 (Anderlecht). Les totaux annuels ainsi que le cumul des précipitations depuis l'ouverture de la station d'Anderlecht sont comparés aux valeurs correspondantes du P50 de Uccle. Les figures similaires pour l'ensemble des stations du réseau de l'IBGE sont reprises à l'annexe 3. Aucune des erreurs mentionnées ci-dessus n'a été mise en évidence par cette analyse. Aucune correction supplémentaire ne sera donc apportée aux séries.

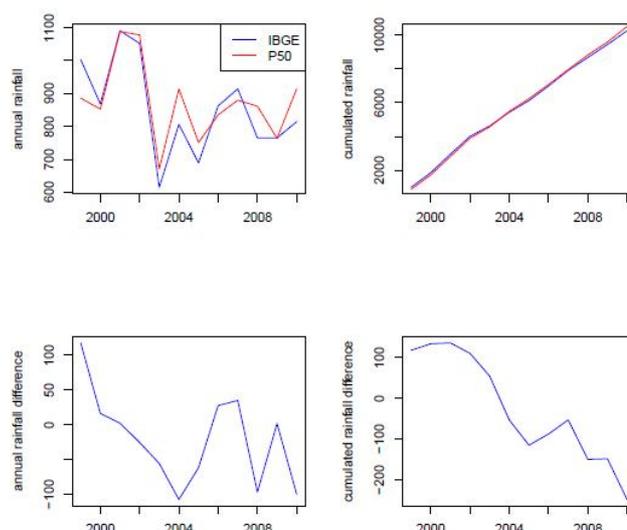


Figure 18. Comparaison de la série d’observations de la station d’Anderlecht au P50 de Uccle : cumuls annuels (en haut à gauche), différence annuelle (en bas à gauche), valeur cumulée depuis l’ouverture de la station (en haut à droite) et différence entre ces cumuls (en bas à droite).

5.4 Comparaison des cumuls aux stations

La période de comparaison s’étend du 01/01/1999 au 31/12/2010.

Cette période de 12 ans 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, 11 stations ont été en activité du début à la fin. Ces stations sont reprises à la Table 11. Si nous avons choisi une période plus longue, débutant au 01/01/1993, l’ensemble des stations disponibles aurait été réduit à 6 (cf. Table 2), 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.

Table 11. Liste des 11 stations utilisées. Période : 01/01/1999-31/12/2010.

| <i>Code</i> | <i>Nom de la station</i> |
|-------------|--------------------------|
| 201 | Paelinckx |
| 296 | Kinsendaël |
| 291 | Dépot Communal Boitsfort |
| 288 | Viangros |
| 97 | Anderlecht |
| 292 | Dépôt de Tram |
| 293 | Shopping Center |
| 286 | Roodebeek |
| 287 | Semence |
| 299 | Ganshoren |
| 203 | Nord |

La Figure 19 reprend les résultats obtenus pour les cumuls annuels tandis que la Figure 20 donne les résultats pour les moyennes saisonnières. Le déficit de la station Nord peut être expliqué par la relation entre cumul et altitude. On remarque également que la station 201 – Paelinckx présente le cumul total le plus élevé sur toute la période. Ce fait peut également être expliqué par la relation entre cumul et altitude.

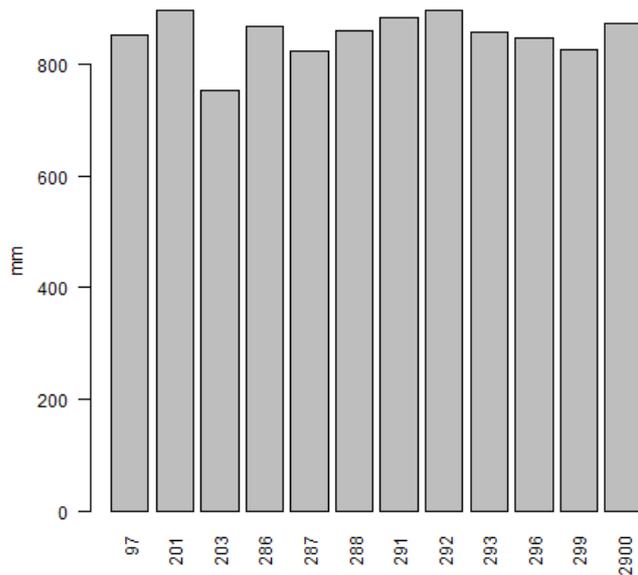


Figure 19. Comparaison sur la période 01/01/1999 au 31/12/2010 des moyennes annuelles des quantités de précipitations pour les stations de l'IBGE reprises à la Table 11 et le pluviomètre de Uccle (2900).

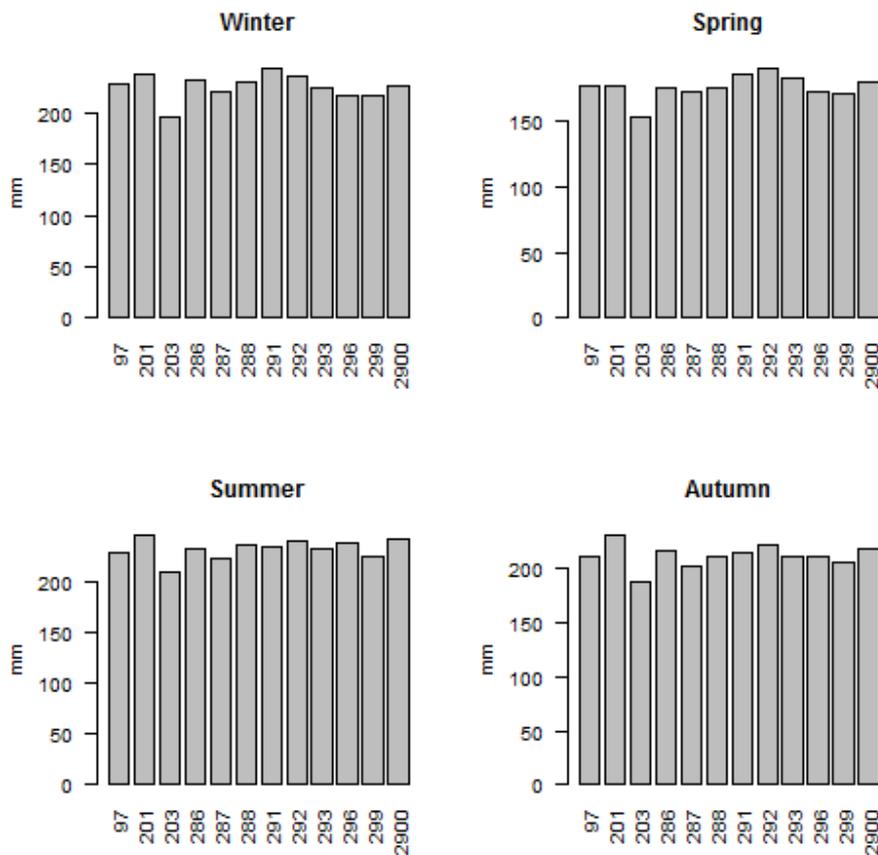


Figure 20. Comparaison sur la période 01/01/1999 au 31/12/2010 des moyennes saisonnières des quantités de précipitations pour les stations de l'IBGE reprises à la Table 11 et le pluviomètre de Uccle (2900).

5.5 Cartographie des précipitations

La période 01/01/1999-31/12/2010 a été sélectionnée pour l'obtention des cartes des précipitations sur le territoire de la Région bruxelloise aux échelles annuelle, saisonnière et mensuelle (à noter que la cartographie relative à l'hiver se base sur la période décembre 1998 à février 2010). Cette période de 12 ans 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 1999-2010. De ces douze stations, nous avons exclu la station de Senne Viangros en raison du déficit anormalement élevé qu'elle présente (cf. point 4.6). Ces onze stations sont représentées à la Figure 1 de l'annexe 4.

Les cartes ont été obtenues par l'interpolation spatiale des valeurs moyennes annuelles, saisonnières et mensuelles de ces 11 stations ainsi que de la station de l'IRM à Uccle.

L'interpolation a été réalisée par une méthode de type spline (thin plate spline interpolation). Cette méthode 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 Schatzman (2002).

Lors des marchés de services précédents, au cours desquels des cartes des précipitations en Région bruxelloise avaient déjà été établies, il avait été décidé de réajuster les moyennes pour la période retenue (p.ex. 1999-2008 dans le cas du marché précédent) par rapport à la période standard de 30 ans 1971-2000 en se basant sur les relevés effectués à la station de l'IRM à Uccle. La moyenne annuelle des précipitations à Uccle est en effet plus élevée de près de 8% si l'on calcule cette moyenne sur la période 1999-2008 par rapport à la période 1971-2000. Ceci s'explique notamment par le fait que les années 2001 et 2002 qui ont été 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. La moyenne annuelle à Uccle sur la période 1999-2008 est de 881,6 mm, alors que la normale climatologique pour la période de référence 1971-2000 est de 820,3 mm.

Dans le cas des cartes établies lors du présent marché, aucun réajustement de ce type n'a été appliqué, et ce pour plusieurs raisons. Tout l'abord, la moyenne annuelle des précipitations à Uccle de 1999 à 2010 n'est supérieure que de 2,5% par rapport à la nouvelle période climatologique de référence 1981-2010. Ensuite, si l'on analyse les moyennes saisonnières et annuelles, on constate que le rapport de ces moyennes calculées selon les 2 périodes varie significativement au cours de l'année. Par exemple, les moyennes 1999-2010 pour le printemps sont plus faibles de 4%, alors qu'elles sont plus élevées de 7,5% en été. De même, les moyennes 1999-2010 de juillet sont plus élevées de 18% tandis que celles de juin sont plus faibles de 25%. Il nous paraît dès lors hasardeux de tenter d'appliquer tout type de réajustement des moyennes 1999-2010 vers la période climatologique de référence 1981-2010 étant donné que ce réajustement doit varier temporellement ainsi que spatialement, bien que l'estimation ne soit possible que à Uccle.

L'ensemble des cartes obtenues aux échelles mensuelle, saisonnière et annuelle est repris à l'annexe 4. 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, similaires à celles déjà énoncées à l'occasion du précédent marché de service. On observe tout d'abord que l'été et l'hiver présentent les cumuls saisonniers les plus élevés, le printemps étant la saison où il pleut le moins. Au niveau mensuel, les cumuls les plus importants sont observés durant les mois de juillet et août alors que le mois le plus sec est le mois d'avril.

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 4 illustre ce résultat à l'échelle annuelle et il est également bien visible pour les quatre saisons. Lors du précédent marché de service, il avait été conclu que ce gradient était corrélé à l'orographie de la Région bruxelloise.

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 Estimations des précipitations efficaces

6.1 Introduction

Dans le cadre d'une réflexion sur la recharge des eaux souterraines à Bruxelles, il a été proposé de mener une étude préliminaire à propos de l'estimation des précipitations efficaces en région Bruxelloise.

Il est tout d'abord essentiel de noter que plusieurs définitions coexistent pour le concept de « précipitations efficaces ». Dans le contexte de l'agriculture, les précipitations efficaces correspondent à la fraction des précipitations contenue dans la zone racinaire des cultures et disponible pour la croissance des plantations (Dakshinamurti *et al.*, 1961). En hydrologie, il s'agit de la fraction des précipitations qui contribuent à un écoulement. En hydrogéologie, finalement, les précipitations efficaces sont la fraction des précipitations qui atteignent la nappe phréatique (Thiery, 1977; Martin and Gilley, 1993 ; Vallet *et al.*, 2013). C'est cette dernière définition qui a été retenue.

Dans le cadre de cette étude, un modèle simple a été implémenté afin d'estimer les précipitations efficaces à Uccle pour la période 2005-2013.

6.2 Modèle considéré

L'estimation des précipitations efficaces se base sur la méthode développée par le Service Géologique National (SGN) situé à Orléans (Thiery, 1977). Dans cette méthode, le sol est modélisé par un réservoir d'une hauteur donnée (typiquement 100 mm) qui contient l'eau disponible pour les plantations. Le niveau d'eau dans ce réservoir fluctue en fonction de la différence entre les quantités de précipitations et l'évapotranspiration réelle: hausse en niveau en cas de différence positive (i.e., excès de précipitations par rapport à l'évapotranspiration réelle) et baisse de niveau sinon. L'évapotranspiration réelle est égale à l'évapotranspiration potentielle (qui peut être estimée via une adaptation de la formule de Penman (Gellens et Gellens, 1992)) lorsque la somme des quantités de précipitations et de la réserve d'eau dans le sol est suffisante. L'évapotranspiration réelle est sinon égale à la quantité maximale d'eau disponible pour les plantations (i.e., somme des

précipitations et de la réserve d'eau dans le sol). Lorsque le niveau d'eau dans le réservoir atteint le niveau maximum, l'excédent s'infiltre en dessous de la zone racinaire et atteint la nappe phréatique. Cet excédent correspond aux précipitations efficaces. La Figure 21 schématise ce modèle.

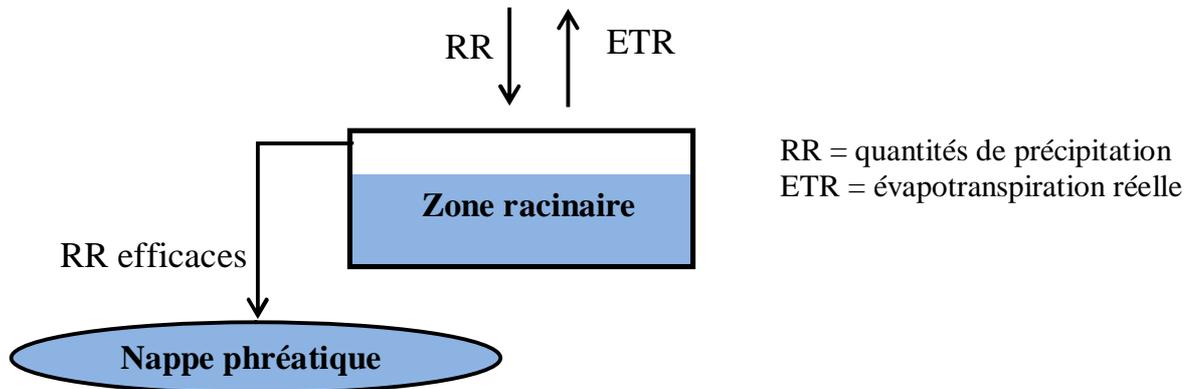


Figure 21. Modèle du réservoir, Service Géologique National (SGN) (Thiery, 1977)

Ce modèle est initialisé en hiver lorsque le sol est généralement saturé en eau (i.e., niveau d'eau maximum dans le réservoir) suite à l'activité ralentie de la végétation en cette saison. L'état du modèle est mis à jour quotidiennement à partir des observations de quantité de précipitations et des estimations de l'évapotranspiration potentielle. Dans cette analyse, nous ne tenons pas compte d'un éventuel ruissellement en surface, ce qui est une hypothèse raisonnable pour des surfaces planes et perméables.

Ce simple modèle a également été considéré dans l'étude de Vallet et al. (2013) consacrée aux glissements de terrain dans les Alpes françaises. Dans ce cas, une attention particulière a été apportée à la modélisation du ruissellement et à l'estimation de la réserve, notamment par des mesures sur terrain.

6.3 Modélisation des précipitations efficaces à Uccle de 2005 à 2013

Les valeurs journalières de précipitations efficaces ont été estimées à la station d'Uccle pour la période 2005/01/01 - 2013/08/31. Les quantités de précipitations sont observées par le pluviomètre automatique de la station synoptique et l'évapotranspiration potentielle est estimée pour une surface couverte de gazon. Les figures suivantes illustrent sous diverses formes les résultats obtenus :

- Figure 22 : évolution journalière des précipitations, précipitations efficaces, évapotranspirations potentielle et réelle et réserve du sol en eau du 1 janvier 2012 au 31 août 2013;
- Figure 23 : évolution des cumuls des précipitations et précipitations efficaces;
- Figure 24 : cumuls annuels des précipitations et précipitations efficaces;
- Figure 25 : cumuls mensuels moyens des précipitations et précipitations efficaces;
- Figure 26 : comparaison des cumuls mensuels des précipitations et précipitations efficaces pour 2005 et 2010.

Ces résultats nous mènent aux conclusions suivantes:

- En moyenne sur 2005-2012, la nappe phréatique est essentiellement rechargée entre les mois de novembre et mars (activité ralentie de la végétation), tandis que les précipitations entre les mois d'avril et octobre servent principalement à la croissance de la végétation (Figure 25).
- Depuis le 1 janvier 2012, la réserve d'eau dans le sol a été totalement épuisée dans le courant des mois de septembre 2012, juillet 2013 et août 2013 (Figure 22).
- En moyenne, 35% des précipitations annuelles atteignent la nappe phréatique. Pour la période 2005-2012, ce rapport a varié de 18,6% (2005) à 46,9% (2010) (Figures 23 et 24). Cette différence résulte des quantités de précipitations importantes observées entre août et décembre 2010, tandis que l'automne 2005 a été plutôt sec (Figure 26).

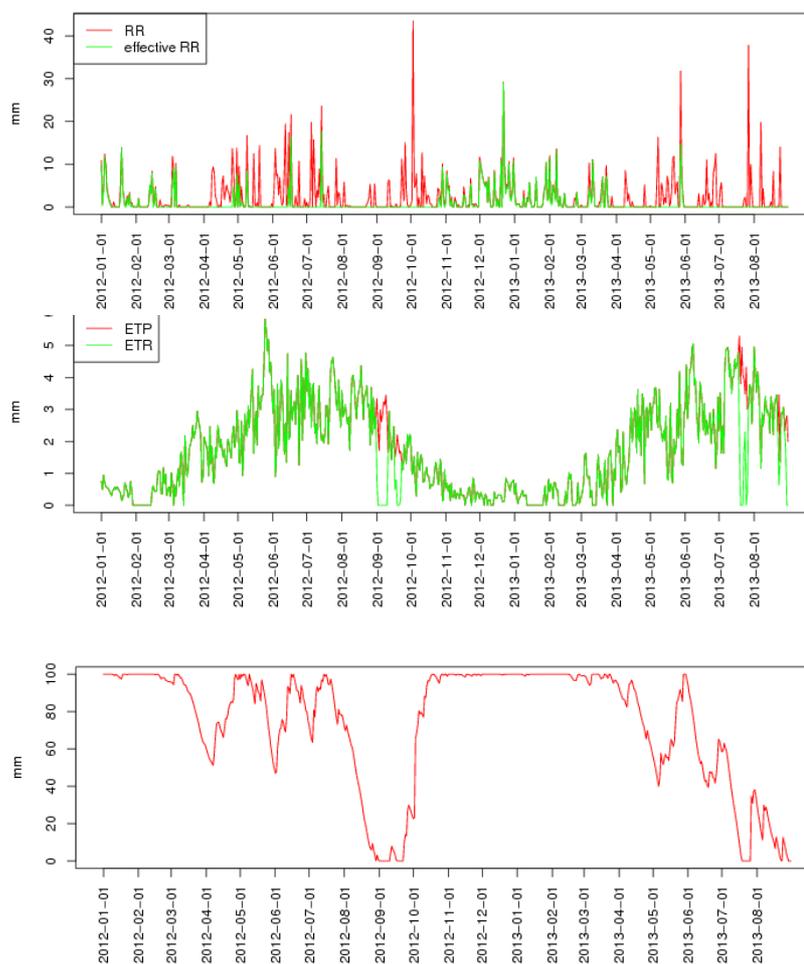


Figure 22. Séries journalières pour la période du 1 janvier 2012 au 31 août 2013 à Uccle des paramètres suivants :

- **quantités de précipitations (RR) et précipitations efficaces (effective RR) ;**
- **évapotranspiration potentielle (ETP) et réelle (ETR) ;**
- **réserve d'eau dans la zone racinaire.**

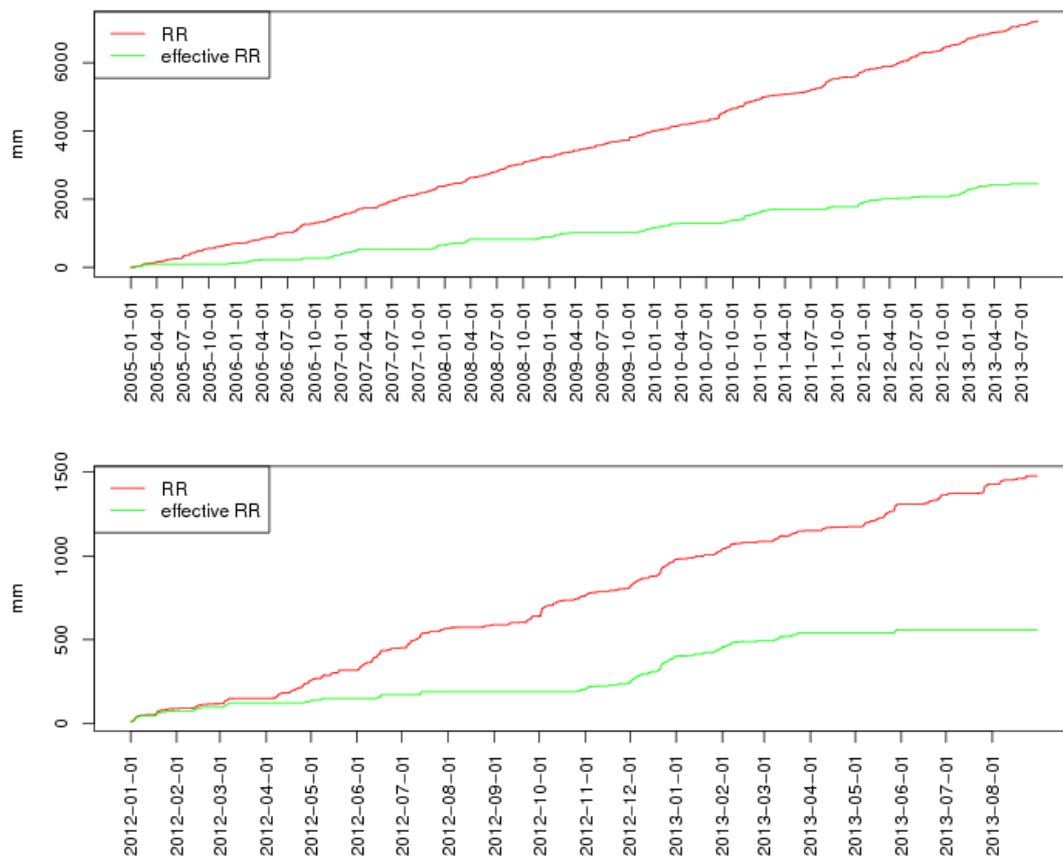


Figure 23. Evolution des cumuls des précipitations et précipitations effectives à Uccle depuis le 1 janvier 2005 (haut) et le 1 janvier 2012 (bas) jusqu'au 31 août 2013. Le rapport des pentes des droites de régression pour la période 2005-2013 vaut 0,35.

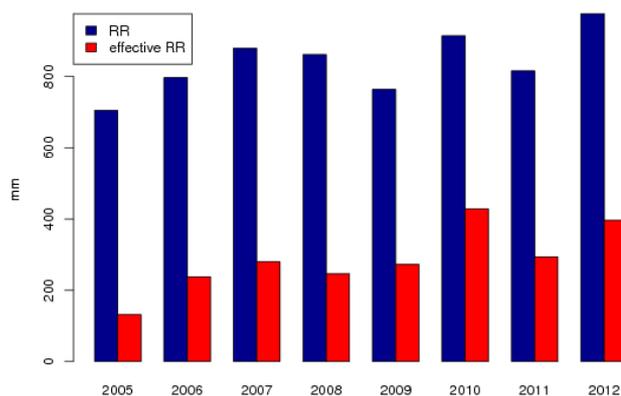


Figure 24. Cumuls annuels des précipitations et précipitations effectives à Uccle pour la période 2005-2012. Le rapport moyen des cumuls annuels des précipitations effectives par rapport aux précipitations observées s'élève à 0,34.

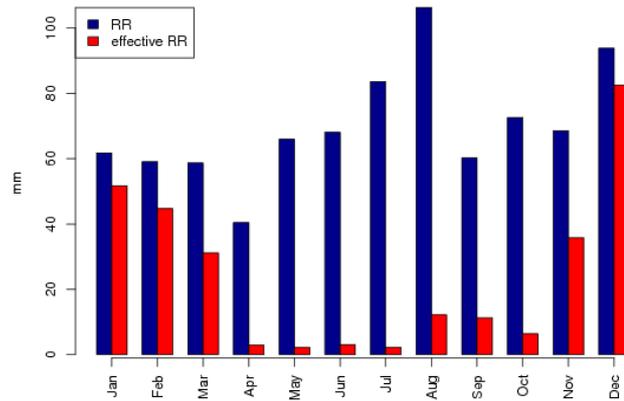


Figure 25. Cumuls mensuels moyens des précipitations et précipitations effectives à Uccle pour la période 2005-2012.

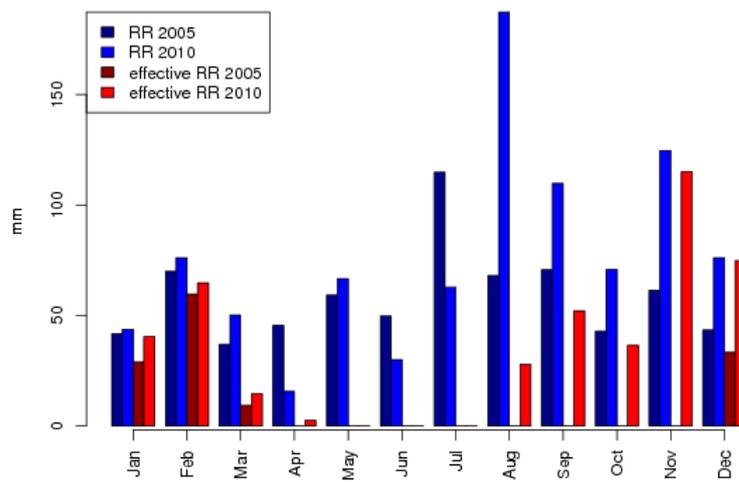


Figure 26. Cumuls mensuels des précipitations et précipitations effectives à Uccle pour 2005 (faible cumul annuel des précipitations effectives) et 2010 (cumul annuel des précipitations effectives élevé).

7 Cumuls des précipitations en Région bruxelloise.

Analyses détaillées au cours des 16 dernières années et tendances depuis le début du 20^e siècle.

7.1 Introduction

Dans le cadre des missions d'expertises prévues dans le cahier des charges « IBGE 2011-02_ALI » et dans le cadre d'une réflexion sur la recharge des eaux souterraines à Bruxelles, il a été demandé à l'IRM un avis d'expertise sur les données de précipitations en Région bruxelloise sur la période récente couvrant les 16 dernières années, ainsi qu'une analyse de tendance des précipitations saisonnières et sur 7 mois, de septembre à mars, depuis le début du 20^e siècle .

En particulier, il a été demandé de transmettre à l'IBGE les précipitations mensuelles sur la période de juin 1998 à mai 2014 (ainsi que leurs valeurs normales) et d'analyser si certains cumuls pluviométriques ont présenté récemment des anomalies importantes.

7.2 Les données récentes de précipitations à Uccle et leurs 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 belge 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 de précipitations à Uccle depuis 1981

La partie supérieure de la Table 12 donne les cumuls mensuels, saisonniers et annuels entre juin 1998 et mai 2014 (cette période a été choisie pour avoir 16 saisons complètes 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 donne quelques statistiques pour les mêmes types de cumuls que dans la partie supérieure du tableau. Pour le calcul des valeurs moyennes et des valeurs seuils correspondant à diverses périodes de retour moyennes, la période retenue ici est la période de référence 1981-2010. Cette période, recommandée par l'Organisation Météorologique Mondiale, permet de coller au plus près au climat le plus récent. On accepte 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. Bien sûr, l'hypothèse retenue n'est valable que si le climat est relativement 'stable' sur la période retenue, ce qui peut être considéré comme le cas ici.

Pour les valeurs extrêmes (maximales et minimales absolues), on les a mentionnées dans la Table en considérant les valeurs observées entre 1981 et 2013/2014.

En résumé, les statistiques données dans la Table 12 pour les différents types de cumuls pluviométriques comportent donc :

Pour la période 1981-2010 :

- 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.

Pour la période 1981-2013/2014 :

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

A titre d'exemple, pour l'hiver (colonne 'HIV'), on a un cumul moyen de 220,5 mm entre 1981 et 2010, une médiane de 218,6 mm pour la série de valeurs, avec une valeur maximale de 365,9 mm en 1995 et une valeur minimale de 120,5 mm en 1985.

Pour définir le caractère d'anormalité 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 152,6 mm correspond à une période de retour moyenne de 10 ans et une valeur (excédentaire, dite « très anormale ») de 300,4 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 12, pour les cumuls saisonniers et annuels entre 1998/1999 et 2013/2014, 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 1981-2010). Visuellement, par comparaison avec les couleurs attribuées aux valeurs-seuils dans la partie inférieure du tableau, on détermine rapidement le niveau d'anormalité d'une valeur particulière. Ainsi, on observe :

- Pour l'hiver, un cumul excédentaire « très anormal » (en 2002). Remarquons que l'hiver 2000 est également très proche du seuil excédentaire « très anormal ». A titre d'exemple, rappelons que l'hiver 2002 comprend les mois de décembre 2001, janvier 2002 et février 2002.
- Pour le printemps, un cumul excédentaire « très exceptionnel » en 2001 et trois cumuls déficitaires « très exceptionnels » (en 2004, 2014 et surtout 2011).
- Pour l'été, deux cumuls excédentaires « très anormaux » (en 2002 et 2011). Remarquons que l'été 2004 est également très proche du seuil excédentaire « très anormal ».
- Pour l'automne, deux cumuls excédentaires « très anormaux » (en 1998 et 2001) et un cumul déficitaire « très anormal » (en 1999).
- Pour l'année civile, un cumul déficitaire « très anormal » en 2003 (presque « exceptionnel »), un cumul excédentaire « très anormal » en 2002 (très proche du seuil « exceptionnel »), et un cumul excédentaire « très exceptionnel » en 2001. Remarquons que ces deux cumuls excédentaires sont les deux valeurs les plus élevées du cumul annuel depuis le début des relevés à Bruxelles-Uccle en 1833.

7.3 Evolution à Uccle des cumuls saisonniers et sur la période septembre à mars 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 27 à 30 donnent sous forme de bâtonnets, pour chacune des saisons, les cumuls relevés entre 1901 et 2014 (ou 2013 pour l'été et l'automne). 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 1901-2014 (ou 2013).

A l'échelle du siècle, la tendance globale des précipitations saisonnières est (quasi) nulle pour les saisons intermédiaires (printemps et automne) et à la hausse pour l'été et surtout l'hiver. A partir de droites de régression linéaire, on estime l'augmentation à environ 18% pour l'hiver depuis le début du 20^e siècle et à environ 8% pour l'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%, qui est le seuil de signification retenu habituellement).

Au-delà des cumuls saisonniers, la Figure 31 donne sous forme de bâtonnets les cumuls relevés entre 1901 et 2014 pour la période de 7 mois entre les mois de septembre et de mars. Cette période est donc à cheval sur deux années consécutives et l'année qui est attribuée à une valeur est l'année de fin de la période. La période de septembre à mars a été introduite ici car elle est considérée comme la période la plus pertinente pour la recharge annuelle des nappes aquifères en Région bruxelloise.

Comme pour les cumuls hivernaux et estivaux, on observe pour ce cumul, à l'échelle du siècle, une tendance à la hausse (environ 10%). Dans le cas de cet indicateur aussi, il faut signaler que sa variabilité interannuelle est importante et que la tendance donnée par la

droite de régression linéaire n'est pas statistiquement significative, selon le seuil de signification habituellement retenu.

En examinant les figures pour chacune des périodes considérées, on peut mettre en évidence un certain nombre d'éléments. On commencera par l'examen des 16 années les plus récentes (certains résultats sont ici à mettre en relation avec des éléments déjà signalés à l'occasion de l'analyse de la Table 12 au point 7.2), puis on poursuivra par l'examen des dernières décennies et enfin on examinera l'évolution depuis 1901 des cumuls pluviométriques considérés. Dans cette partie du rapport, quand on parle de *valeur moyenne ou de moyenne (à long terme)*, on se réfère à la moyenne du cumul considéré sur le long terme (moyenne entre 1901 et 2014 (ou 2013, selon les cas)). On observe :

Pour l'hiver (cf. Figure 27) :

Entre 1999 et 2013, on distingue deux périodes dans le comportement des cumuls hivernaux. Entre 1999 et 2004, les cumuls sont tous supérieurs à la moyenne à long terme (égale à 203,8 mm) ; 2000 et 2002 ont en particulier connu des cumuls supérieurs à 300 mm. Par la suite, les années sont variables : 2005, 2008, 2010, 2011 et 2014 ont connu des valeurs quasi normales, 2007, 2012 et 2013 des cumuls excédentaires, 2006 et 2009 des cumuls déficitaires. Toutes ces valeurs restent cependant relativement « normales » en comparaison avec la valeur moyenne.

Si l'on se concentre sur les dernières décennies, on remarque, qu'après des hivers déficitaires dans les années 1970, les précipitations hivernales ont tendance à être généralement supérieures à la valeur moyenne.

Depuis 1901, sur l'ensemble de la période, seules trois périodes présentent au moins 5 années successives avec des cumuls hivernaux similaires (par rapport à la valeur moyenne) : une période déficitaire de 8 ans entre 1902 et 1909, une période déficitaire de 6 ans entre 1969 et 1974 et une période excédentaire de 6 ans entre 1999 et 2004.

Pour le printemps (cf. Figure 28) :

Entre 1999 et 2014, on observe surtout des groupements d'années successives présentant une même tendance. Tout d'abord, entre 1999 et 2001, les cumuls printaniers sont supérieurs à la moyenne à long terme (178,5 mm) ; en particulier, 2001 présente un excès très important. Ensuite, entre 2002 et 2005, les cumuls sont inférieurs à la moyenne (principalement en 2004). Entre 2006 et 2008, les cumuls printaniers sont variables autour de la moyenne (avec 2006 et 2008 présentant des cumuls excédentaires relativement marqués). De 2009 à 2011, les cumuls sont déficitaires, avec une valeur remarquablement basse en 2011. En 2012 et 2013, les cumuls repassent au-dessus de la valeur moyenne. Enfin, en 2014, on retrouve un cumul largement inférieur à la valeur moyenne.

Si l'on se concentre sur les dernières décennies, on remarque, après le déficit record du printemps 1976, une suite presque systématique de cumuls excédentaires jusqu'à la fin des années 1980, et par la suite une oscillation autour de la valeur moyenne, avec cependant des cumuls printaniers déficitaires relativement plus marqués que les cumuls excédentaires.

Depuis 1901, sur l'ensemble de la période, seules trois périodes présentent au moins 5 années successives avec des cumuls printaniers similaires (par rapport à la valeur moyenne) : une période déficitaire de 10 ans entre 1952 et 1961 et deux périodes excédentaires entre 1977 et 1981 (5 ans) et entre 1983 et 1989 (7 ans), interrompues seulement par le printemps 1982 légèrement déficitaire.

Pour l'été (cf. Figure 29) :

Entre 1998 et 2013, on observe trois périodes dans les cumuls estivaux. Tout d'abord, entre 1998 et 2001, les cumuls sont chaque fois légèrement déficitaires, proches de la moyenne à long terme (220,5 mm). Ensuite, l'été 2002 est un été très pluvieux, suivi en 2003 d'un été relativement sec. Par la suite, de 2004 à 2013, les cumuls estivaux sont tous supérieurs à la moyenne (en particulier 2004 et 2011), à l'exception des étés 2009 et 2013, déficitaires.

Si l'on se concentre sur les dernières décennies, on remarque que les années 1970 sont souvent caractérisées par des valeurs déficitaires, que les années 1980 et 1990 sont marquées par une variabilité importante et que le début du 21^e siècle a connu des cumuls généralement excédentaires.

Depuis 1901, sur l'ensemble de la période, seules trois périodes présentent au moins 5 années successives avec des cumuls estivaux similaires (par rapport à la valeur moyenne) : une période excédentaire de 7 ans entre 1914 et 1920 (mais avec 5 valeurs très proches de la moyenne), une période déficitaire de 5 ans entre 1997 et 2001 (mais avec des valeurs chaque fois proches de la moyenne) et une autre période excédentaire de 5 ans entre 2004 et 2008.

Pour l'automne (cf. Figure 30) :

Entre 1998 et 2013, on distingue deux périodes dans le comportement des cumuls automnaux. Entre 1998 et 2001, les cumuls sont très variables d'une année à l'autre : des excès très importants en 1998 et 2001, un déficit relativement marqué en 1999 et une année 2000 relativement normale. Ensuite, entre 2002 et 2012, les cumuls sont à nouveau variables autour de la valeur moyenne à long terme (210,7 mm), mais sans année particulièrement remarquable (2006 et 2011 présentent néanmoins des déficits relativement importants et 2010 un excès assez important).

Si l'on se concentre sur les dernières décennies, on remarque une variabilité parfois importante des cumuls automnaux autour de la valeur moyenne, sans que des caractéristiques ne ressortent de manière évidente à l'échelle des décennies successives.

Depuis 1901, sur l'ensemble de la période, quatre périodes présentent au moins 5 années successives avec des cumuls automnaux similaires (par rapport à la valeur moyenne) : une période excédentaire de 5 ans entre 1922 et 1926, puis trois périodes déficitaires, chaque fois d'une durée de 5 ans : entre 1945 et 1949, entre 1968 et 1972 et entre 1976 et 1980.

Pour le cumul sur la période de septembre à mars (cf. Figure 31) :

Remarque : pour ce cumul, on caractérise plus précisément les valeurs les plus remarquables par leur niveau d'anormalité déterminé à partir des données sur la période 1901-2014, en utilisant les mêmes critères que ceux définis au point 7.2, en fonction des valeurs des périodes de retour moyennes considérées.

Après un déficit « très anormal » (presque « exceptionnel ») en 1996 et des années 1997 et 1998 encore déficitaires, les cumuls entre 1999 et 2003 sont tous excédentaires, avec une valeur « très exceptionnellement » élevée en 2002 et une valeur « exceptionnellement » excédentaire en 1999. Entre 2004 et 2007, les valeurs sont inférieures à la valeur moyenne à long terme (égale à 473,4 mm) tout en restant « normales ». Ensuite, entre 2008 et 2014, les cumuls sont variables autour de la moyenne, sans être particulièrement remarquables ; ils restent en effet relativement proches de cette valeur moyenne. Le cumul de 2013 est supérieur à la valeur moyenne, tout en restant « normal », et la valeur de 2014 est très légèrement inférieure à la valeur moyenne.

Si l'on se concentre sur les dernières décennies, on remarque tout d'abord que les cumuls de la décennie 1970 sont plutôt déficitaires, avec en particulier un cumul « très exceptionnellement » faible en 1973 et une valeur « très anormalement » déficitaire en 1972. A contrario, le cumul de l'année 1975 est pour sa part « très exceptionnellement » élevé. Ensuite, la décennie 1980 présente des valeurs généralement excédentaires, avec des cumuls « très anormalement » élevés en 1987 et 1988. La décennie 1990 présente des valeurs variant autour de la valeur moyenne. Cette décennie se caractérise par trois cumuls largement excédentaires : un excès « très anormal » en 1994 et des cumuls « exceptionnellement » élevés en 1995 et 1999. Il y a également un cumul « très anormalement » déficitaire en 1996. Le début de la décennie 2000 connaît des valeurs largement excédentaires : un cumul « très anormalement » élevé en 2001 et surtout le record absolu « très exceptionnel » en 2002. Ensuite, entre 2003 et 2014, les cumuls restent relativement proches de la valeur moyenne et oscillent autour de celle-ci. On notera cependant les quatre années consécutives avec des valeurs inférieures à la moyenne, entre 2004 et 2007.

Depuis 1901, sur l'ensemble de la période, seules quatre périodes présentent au moins 5 années successives avec des cumuls similaires (par rapport à la valeur moyenne) : une période faiblement déficitaire de 5 ans entre 1901 et 1906, une période légèrement excédentaire de 5 ans entre 1923 et 1927, une période largement déficitaire de 5 ans entre 1969 et 1973 et une période largement excédentaire de 5 ans entre 1999 et 2003.

Pour illustrer l'évolution plus récente des cumuls entre septembre et mars, nous avons considéré les valeurs et les tendances sur deux périodes plus courtes et plus proches de la période actuelle. Tout d'abord, la Figure 32 donne sous forme de bâtonnets les cumuls observés sur les 7 mois entre 1981 et 2014. Visuellement, on détecte rapidement une année déficitaire ou excédentaire d'après la position du bâtonnet, selon qu'il est en dessous ou au-dessus de la moyenne sur la période 1981-2014 (505,1 mm). Ensuite, la Figure 33 donne sous forme de bâtonnets les cumuls relevés sur les 7 mois entre 1990 et 2014. On détecte ici aussi rapidement une année déficitaire ou excédentaire d'après la position du bâtonnet, selon qu'il est en dessous ou au-dessus de la moyenne sur la période 1990-2014 (497,5 mm).

En comparant les Figures 31 à 33, on constate que les tendances pour les cumuls de septembre à mars, illustrées par les droites de régression linéaire, dépendent de la période considérée. Sur la période centennale (entre 1901 et 2014, cf. Figure 31), la tendance est positive, indiquant globalement une tendance à l'augmentation des cumuls sur cette

période (environ +10%). Sur une période plus récente de 34 ans (entre 1981 et 2014, cf. Figure 32), la tendance est légèrement négative, indiquant globalement une faible tendance à la diminution des cumuls sur les 7 mois (environ -4%). Enfin, sur une période encore plus courte de 25 ans (1990-2014), on n'observe globalement quasi pas de tendance (cf. Figure 33). Il faut cependant signaler que les variabilités interannuelles des cumuls pour les trois périodes considérées sont importantes autour des valeurs moyennes. Cette variabilité est évidemment tout aussi – si pas plus – pertinente que les évolutions globales sur les périodes considérées si l'on veut comprendre la dynamique de la recharge des nappes phréatiques en Région bruxelloise.

7.4 Conclusions

Evolution à long terme des cumuls pluviométriques à Uccle

A l'échelle séculaire, entre le début du 20^e siècle et 2013/14, les cumuls saisonniers des précipitations à Uccle présentent soit une tendance globale à la hausse (environ 18% en hiver et 8% en été), soit (quasi) pas de tendance (au printemps et en automne). Si l'on examine les cumuls sur la période de 7 mois entre les mois de septembre et de mars, on observe également une tendance globale à la hausse depuis 1901 (environ +10%). Ces résultats globaux doivent être cependant relativisés dans la mesure où la variabilité interannuelle (et sur des périodes de quelques années) des cumuls est importante (cf. Figures 27 à 31). De ce fait, les significations statistiques des tendances à la hausse sont relativement faibles.

Contrairement au réchauffement significatif observé en région bruxelloise depuis le début du 20^e siècle, on peut conclure de l'analyse des données présentées dans le présent rapport que l'on observe jusqu'ici qu'une évolution relativement faible pour les cumuls de précipitations à l'échelle de la saison ou de l'année depuis le début du 20^e siècle. A plus petites échelles temporelles, on note cependant des variations parfois importantes des cumuls d'une année à l'autre, ou d'un groupe d'années à l'autre, au cours d'une décennie ou d'une décennie à l'autre.

Evolution des cumuls pluviométriques au cours des dernières années

L'examen plus détaillé des 16 dernières années (1998/1999 à 2013/2014) 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, cf. la Table au point 7.2).

Contrairement à l'analyse présentée au point 7.3, on utilise ici comme période de référence pour définir le caractère d'anormalité d'un cumul la période de 30 ans actuellement utilisée comme référence par l'IRM, à savoir : 1981-2010 (cf. point 7.2). Pour définir le caractère éventuellement anormal des cumuls observés au cours des 16

années les plus récentes, on les compare aux cumuls mesurés au cours de la période de référence. Rappelons que l'on appelle « normale » ou « valeur normale » d'un cumul, sa valeur moyenne sur la période de référence 1981-2010.

A l'échelle annuelle, sur les 16 dernières années, on observe qu'à l'exception de l'année 2000 (qui présente une valeur tout juste en dessous de la valeur normale), les années entre 1999 et 2002 sont plus arrosées qu'en moyenne (cf. la Table 12 qui donne une valeur normale de 852,4 mm sur la période de référence 1981-2010). L'année excédentaire record de 2001 (1088,5 mm) peut être qualifiée de « très exceptionnellement » pluvieuse et 2002 (1077,8 mm) de « très anormalement » (presque « exceptionnellement ») pluvieuse. Ensuite, de 2003 à 2011, les cumuls annuels sont variables autour de la valeur normale. Le cumul le plus faible (670,5 mm en 2003) est qualifié de « très anormalement » déficitaire (très proche d'un déficit « exceptionnel »). La fin de la série se caractérise par un cumul annuel 2012 qui est la valeur la plus importante depuis 2003, mais qui reste un cumul « normal », et par un cumul 2013 inférieur à la normale (il est quasiment égal à la valeur moyenne sur le 20^e siècle, égale à 812,8 mm).

Toujours pour les 16 dernières années, on observe que les cumuls saisonniers qualifiés d'au moins « très anormaux » furent plus souvent (3 fois sur 5) caractérisés par des excès de précipitations (plutôt que par des déficits).

Saison par saison, on constate que les dernières années se caractérisent comme suit :

- **Pour l'hiver** : de 1999 à 2004, les cumuls sont supérieurs à la valeur normale (égale à 220,5 mm), mais seul 2002 présente un excès « très anormal ». Ensuite, de 2005 à 2011, les cumuls sont inférieurs à la normale (à l'exception de 2007, en excès), mais aucune valeur n'est « très anormale ». Finalement, 2012 et 2013 sont des hivers plus arrosés qu'en moyenne, alors que l'hiver 2014 l'est moins, mais ces trois cumuls restent « normaux ».
- **Pour le printemps** : après un excès « très exceptionnel » en 2001, les cumuls sont déficitaires entre 2002 et 2005, mais aucun n'est « très anormal », à l'exception notoire de 2004 qui présente un déficit « très exceptionnellement » faible. Ensuite, de 2006 à 2014, les cumuls printaniers sont variables autour de la normale (égale à 187,8 mm), avec deux déficits encore une fois « très exceptionnels », en 2011 et en 2014.
- **Pour l'été** : de 1998 à 2001, les cumuls sont inférieurs à la normale (égale à 224,6 mm), mais aucun déficit n'est « très anormal ». Ensuite, à l'exception de 2003 qui présente un déficit « normal », les cumuls estivaux sont tous en excès jusqu'en 2008, mais seule la valeur de 2002 est « très anormalement » élevée (c'est également presque le cas pour le cumul en 2004, qui est « anormalement élevé »). Le cumul en 2009 repasse du côté des valeurs (« normalement ») déficitaires, puis les années 2010 à 2012 redeviennent des années excédentaires, avec le cumul estival de 2011 « très anormalement » élevé. Enfin, l'été 2013 présente une valeur relativement déficitaire, mais « normale ».
- **Pour l'automne** : de 1998 à 2004, les cumuls sont variables autour de la normale (égale à 219,9 mm), avec des valeurs « très anormalement » excédentaires en 1998 et 2001 et un déficit « très anormal » en 1999. De 2005 à 2012, les cumuls

sont généralement inférieurs à la normale, sans atteindre le seuil des cumuls « très anormalement » déficitaires ; les cumuls ne sont excédentaires qu'en 2009, 2010 et 2013, mais sans atteindre, eux non plus, le seuil des valeurs « très anormales ».

Pour les cumuls de septembre à mars (soit 7 mois, représentant la période annuelle la plus intéressante pour la recharge des nappes phréatiques), l'évolution suivante est constatée par rapport à la valeur normale (égale à 505,4 mm). Les cumuls sont tout d'abord déficitaires entre 1996 et 1998, avec un déficit « très exceptionnel » en 1996 et « très anormal » en 1997. Ensuite, entre 1999 et 2002, les cumuls sont excédentaires (sauf en 2000), avec une valeur « très anormalement » élevée en 1999 et « très exceptionnellement » élevée en 2002. Ensuite, de 2003 à 2007, les cumuls sont déficitaires par rapport à la normale, mais ils restent « normaux », à l'exception de 2006 où le cumul est presque « très anormalement » faible. Enfin, entre 2008 et 2014, les cumuls sont variables autour de la valeur normale, mais ils restent tous « normaux ».

Table 12. Partie supérieure : précipitations mensuelles, saisonnières et annuelles mesurée à Uccle entre septembre 1998 et mai 2014.

Partie inférieure : valeurs moyennes (normales) **sur la période 1981-2010** et **valeurs sur cette période 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). MIN et MAX donnent respectivement **les valeurs extrêmes observées sur la période 1981-2013/2014** et **an_min** et **an_max** 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 | AUT | AN |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1998 | | | | | | 87.7 | 43.8 | 64.7 | 139.1 | 128.7 | 87.8 | 81.7 | | | 195.9 | 355.6 | |
| 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 | 122.2 | 886.0 |
| 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 | 254.9 | 852.2 |
| 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 | 367.3 | 1088.5 |
| 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 | 223.1 | 1077.8 |
| 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 | 160.4 | 670.5 |
| 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 | 228.9 | 913.7 |
| 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 | 182.1 | 751.1 |
| 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 | 137.1 | 835.0 |
| 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 | 194.5 | 879.5 |
| 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 | 210.8 | 861.5 |
| 2009 | 62.9 | 57.1 | 68.2 | 47.1 | 43.1 | 64.5 | 73.1 | 34.7 | 29.1 | 105.0 | 98.0 | 80.8 | 163.3 | 158.4 | 172.3 | 232.1 | 763.6 |
| 2010 | 43.8 | 76.1 | 50.2 | 15.7 | 66.6 | 30.0 | 62.8 | 187.4 | 109.8 | 70.8 | 124.7 | 76.2 | 200.7 | 132.5 | 280.2 | 305.3 | 914.1 |
| 2011 | 90.5 | 44.0 | 22.4 | 25.8 | 22.5 | 72.3 | 55.6 | 189.3 | 83.1 | 48.8 | 8.5 | 152.1 | 210.7 | 70.7 | 317.2 | 140.4 | 814.9 |
| 2012 | 86.4 | 30.0 | 32.9 | 104.1 | 63.4 | 133.1 | 115.7 | 22.5 | 51.6 | 119.4 | 44.7 | 172.7 | 268.5 | 200.4 | 271.3 | 215.7 | 976.5 |
| 2013 | 53.6 | 55.3 | 64.2 | 25.8 | 132.5 | 55.3 | 65.6 | 48.3 | 58.1 | 77.5 | 102.6 | 77.1 | 281.6 | 222.5 | 169.2 | 238.2 | 815.9 |
| 2014 | 70.1 | 66.2 | 18.0 | 20.1 | 54.1 | | | | | | | | 213.4 | 92.2 | | | |
| Moyenne 1998-2013 | 75.2 | 69.4 | 58.1 | 48.3 | 65.7 | 65.0 | 84.8 | 92.1 | 70.9 | 77.6 | 74.6 | 91.0 | 235.7 | 172.1 | 241.8 | 223.0 | 873.4 |
| Période : 1981-2014 | JAN | FEB | MAR | APR | MAI | JUN | JUL | AUG | SEP | OCT | NOV | DEC | HIV | PRIN | ETE | AUT | AN |
| Moyenne 1981-2010 | 76.1 | 63.1 | 70.0 | 51.3 | 66.5 | 71.8 | 73.5 | 79.3 | 68.9 | 74.5 | 76.4 | 81.0 | 220.5 | 187.8 | 224.6 | 219.9 | 852.4 |
| MIN | 2.6 | 9.3 | 4.2 | 0.0 | 19.0 | 19.5 | 19.8 | 10.4 | 9.2 | 6.0 | 8.5 | 27.1 | 120.5 | 70.7 | 107.4 | 109.2 | 639.5 |
| an_min | 1997 | 1986 | 1993 | 2007 | 1990 | 1988 | 1989 | 1983 | 2006 | 1995 | 2011 | 1987 | 1985 | 2011 | 1983 | 1995 | 1989 |
| te- (≥ 100 ans) | 6.2 | 10.6 | 10.0 | 1.7 | 19.3 | 20.5 | 22.9 | 11.9 | 11.3 | 11.1 | 25.2 | 28.9 | 123.9 | 103.7 | 108.0 | 110.0 | 648.5 |
| e- (≥ 30 ans) | 14.6 | 13.6 | 23.6 | 5.80 | 19.9 | 22.8 | 30.0 | 15.5 | 16.3 | 32.1 | 32.3 | 33.1 | 131.7 | 105.4 | 109.3 | 111.8 | 669.5 |
| ta- (≥ 10 ans) | 29.4 | 14.5 | 25.0 | 21.8 | 29.7 | 29.6 | 33.3 | 30.2 | 27.9 | 38.1 | 40.6 | 42.6 | 152.6 | 110.6 | 143.7 | 135.6 | 700.5 |
| a- (≥ 6 ans) | 36.9 | 28.7 | 28.9 | 24.1 | 39.3 | 35.0 | 34.8 | 34.7 | 30.3 | 46.7 | 54.5 | 51.2 | 162.4 | 130.6 | 167.1 | 149.2 | 750.0 |
| n (médiane) | 72.3 | 64.5 | 69.7 | 46.4 | 60.2 | 71.1 | 68.1 | 62.0 | 59.7 | 71.6 | 72.5 | 77.0 | 218.6 | 193.6 | 219.6 | 211.9 | 859.1 |
| a+ (≥ 6 ans) | 119.6 | 93.2 | 102.6 | 72.3 | 99.3 | 101.6 | 113.7 | 130.9 | 96.6 | 105.0 | 98.3 | 102.7 | 272.6 | 240.7 | 285.2 | 275.2 | 946.6 |
| ta+ (≥ 10 ans) | 124.9 | 96.7 | 113.7 | 94.5 | 106.2 | 117.1 | 123.5 | 181.2 | 120.7 | 117.5 | 106.6 | 110.5 | 300.4 | 254.3 | 315.6 | 310.3 | 1006.2 |
| e+ (≥ 30 ans) | 143.9 | 113.4 | 138.2 | 108.1 | 116.6 | 123.3 | 134.0 | 203.3 | 198.8 | 128.9 | 126.4 | 170.2 | 310.5 | 276.6 | 341.7 | 367.8 | 1078.2 |
| te+ (≥ 100 ans) | 150.8 | 151.5 | 139.8 | 126.4 | 128.1 | 127.0 | 137.6 | 222.8 | 199.2 | 132.7 | 160.1 | 171.4 | 349.3 | 276.6 | 357.9 | 377.0 | 1085.4 |
| MAX | 153.8 | 167.8 | 140.5 | 134.3 | 133.0 | 133.1 | 139.2 | 231.2 | 199.4 | 134.4 | 174.6 | 172.7 | 365.9 | 276.6 | 364.8 | 380.9 | 1088.5 |
| an_max | 2004 | 2002 | 2008 | 2001 | 1984 | 2012 | 1988 | 1996 | 2001 | 1982 | 1991 | 2012 | 1995 | 2001 | 1992 | 1984 | 2001 |

Précipitations Uccle - Hiver 1901-2014 (mm)

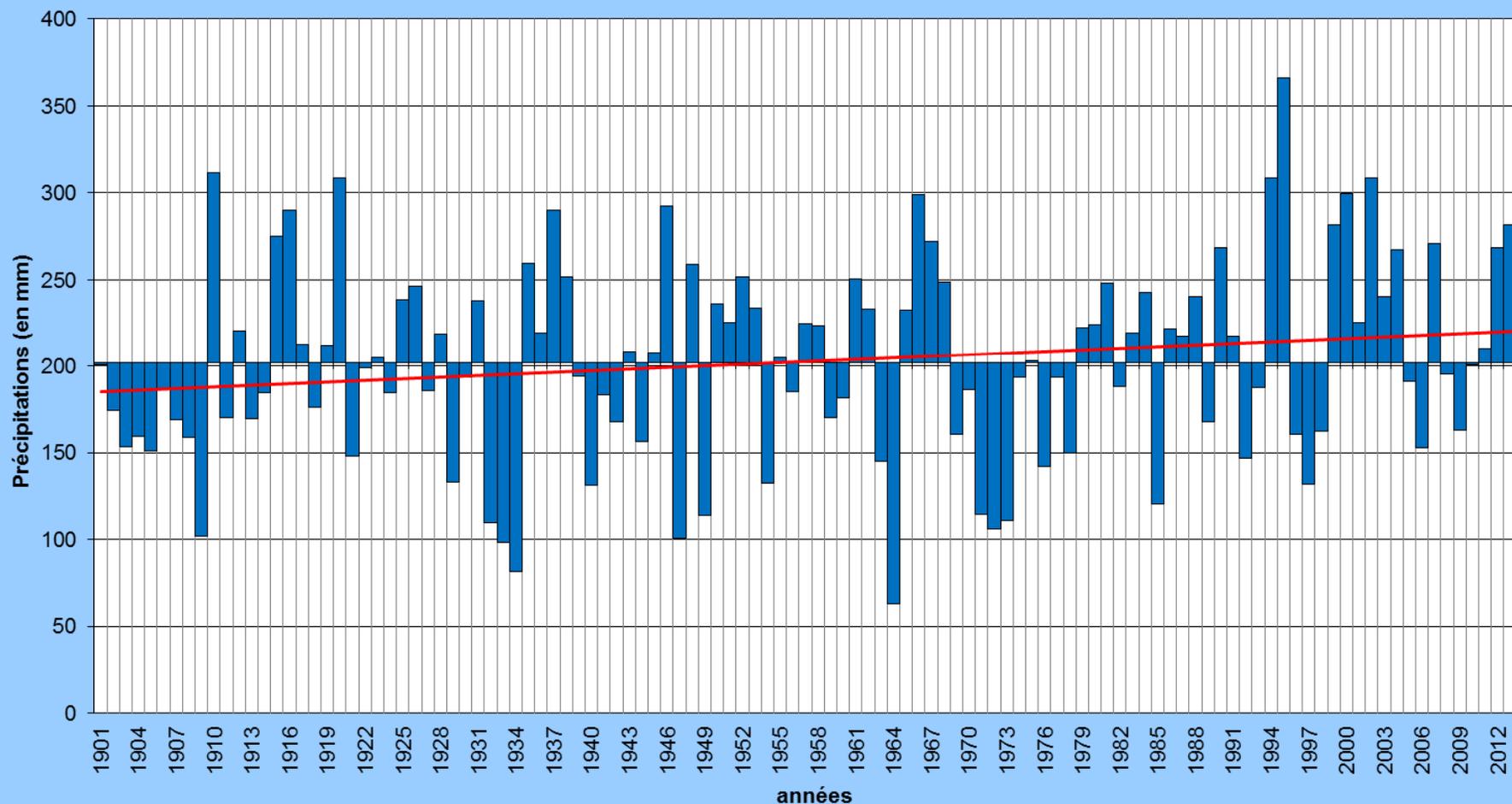


Figure 27. Précipitations hivernales (les trois mois consécutifs de décembre à février) à Uccle sur la période 1901-2014 (en mm). L'année reprise sur le graphique est celle de la fin de la période des trois mois consécutifs. Les bâtonnets donnent les valeurs annuelles par rapport à la moyenne sur la période totale (202,8 mm). La droite rouge traversant le graphique est la droite de régression linéaire sur la période.

Précipitations Uccle - Printemps 1901-2014 (mm)

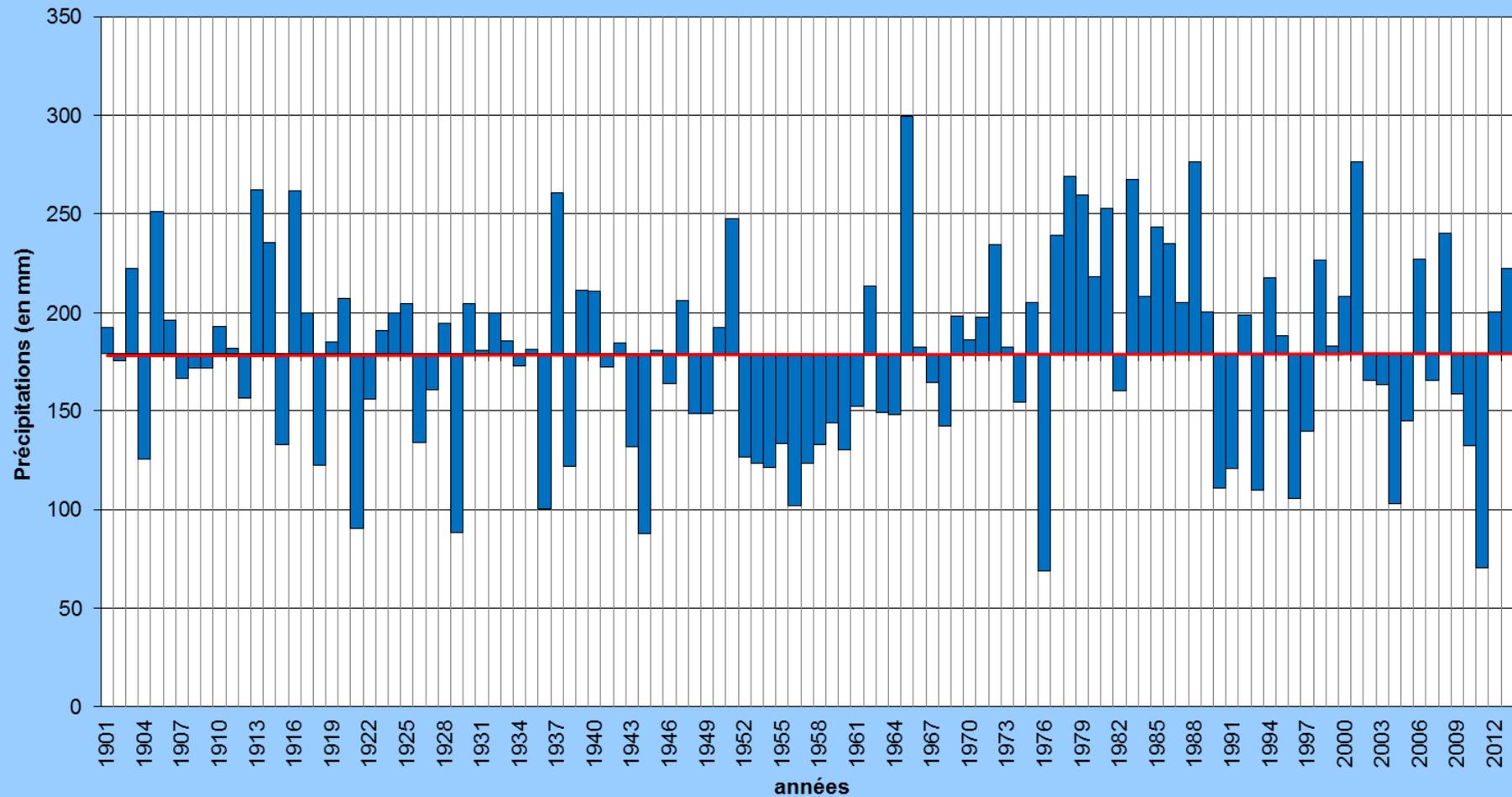


Figure 28. Précipitations printanières (mars-mai) à Uccle sur la période 1901-2014 (en mm). Les bâtonnets donnent les valeurs annuelles par rapport à la moyenne sur la période totale (178,5 mm). La droite rouge traversant le graphique est la droite de régression linéaire sur la période (droite quasi horizontale, dans ce cas).

Précipitations Uccle - Eté 1901-2013 (mm)

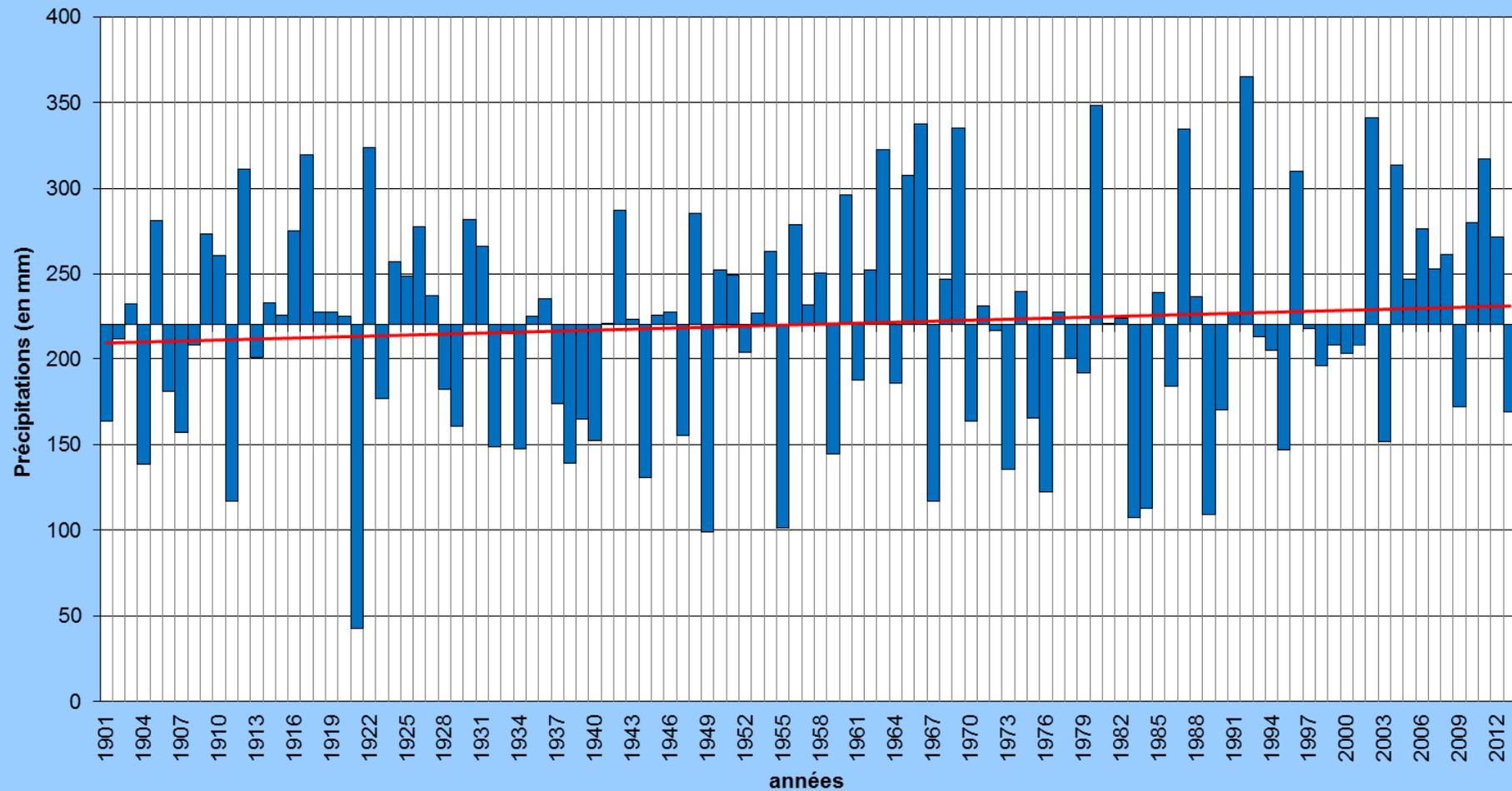


Figure 29. Précipitations estivales (juin-août) à Uccle sur la période 1901-2013 (en mm). Les bâtonnets donnent les valeurs annuelles par rapport à la moyenne sur la période totale (220,5 mm). La droite rouge traversant le graphique est la droite de régression linéaire sur la période.

Précipitations Uccle - Automne 1901-2013 (mm)

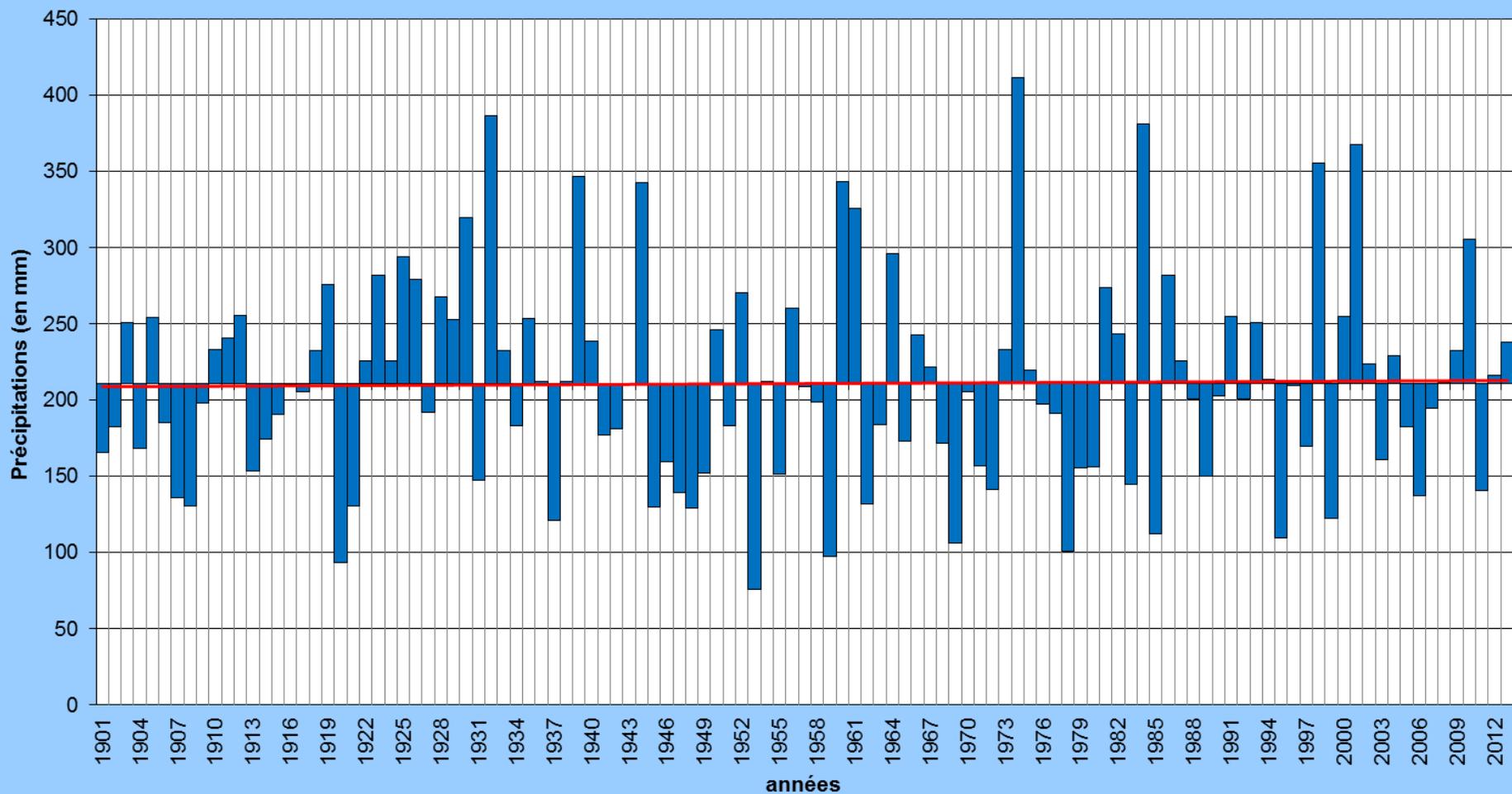


Figure 30. Précipitations automnales (septembre-novembre) à Uccle sur la période 1901-2013 (en mm). Les bâtonnets donnent les valeurs annuelles par rapport à la moyenne sur la période totale (210,7 mm). La droite rouge traversant le graphique est la droite de régression linéaire sur la période (droite quasi horizontale, dans ce cas).

Précipitations Uccle - Septembre-Mars 1901-2014 (mm)

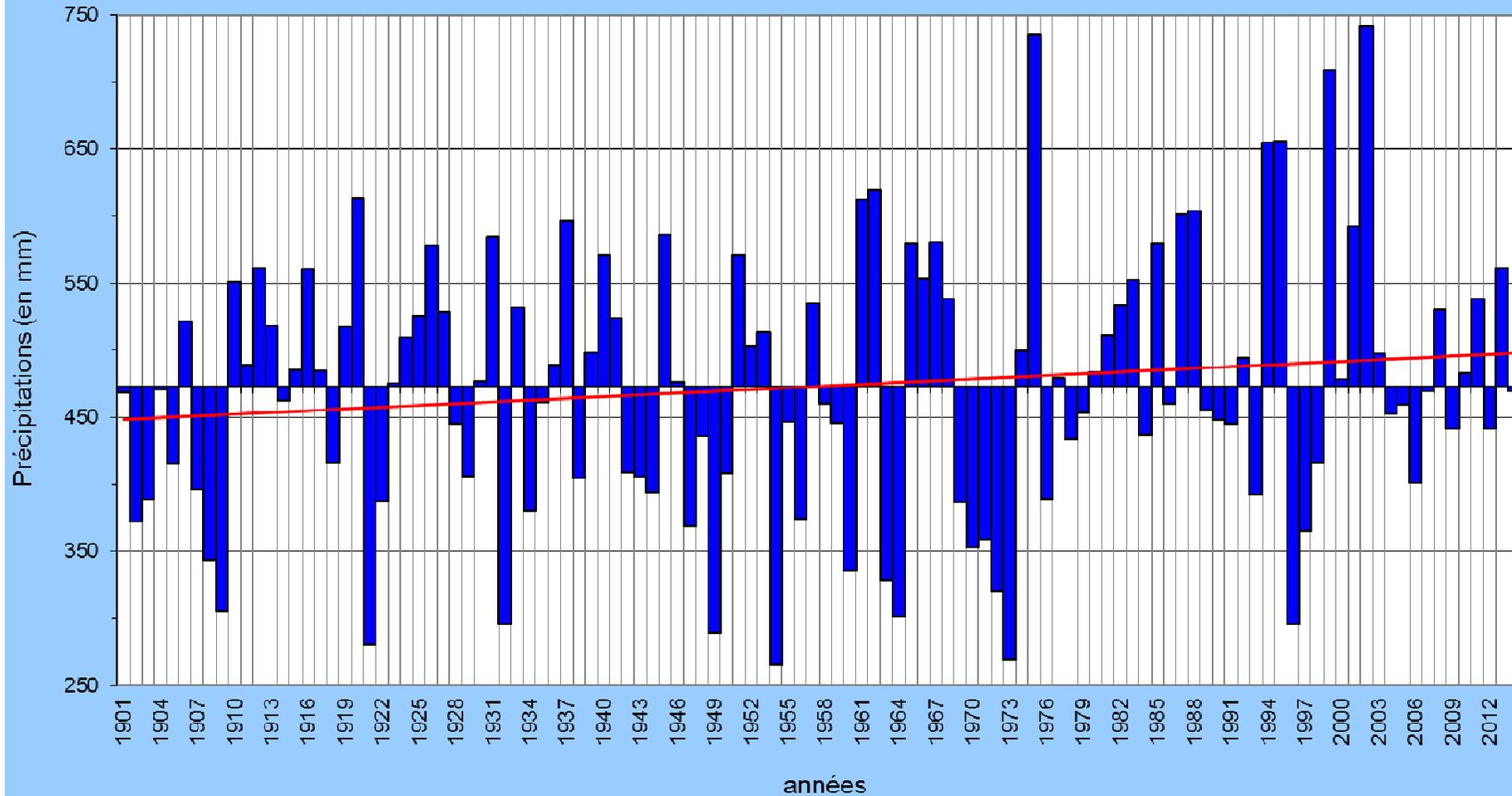


Figure 31. Précipitations sur la période de 7 mois entre septembre et mars à Uccle sur la période 1901-2014 (en mm). Les années indiquées sur l'axe des abscisses correspondent à l'année de la fin de chaque période de 7 mois. Les bâtonnets donnent les valeurs annuelles par rapport à la moyenne sur la période totale (473,4 mm). La droite rouge traversant le graphique est la droite de régression linéaire sur la période.

Précipitations Uccle - Septembre-Mars 1981-2014 (mm)

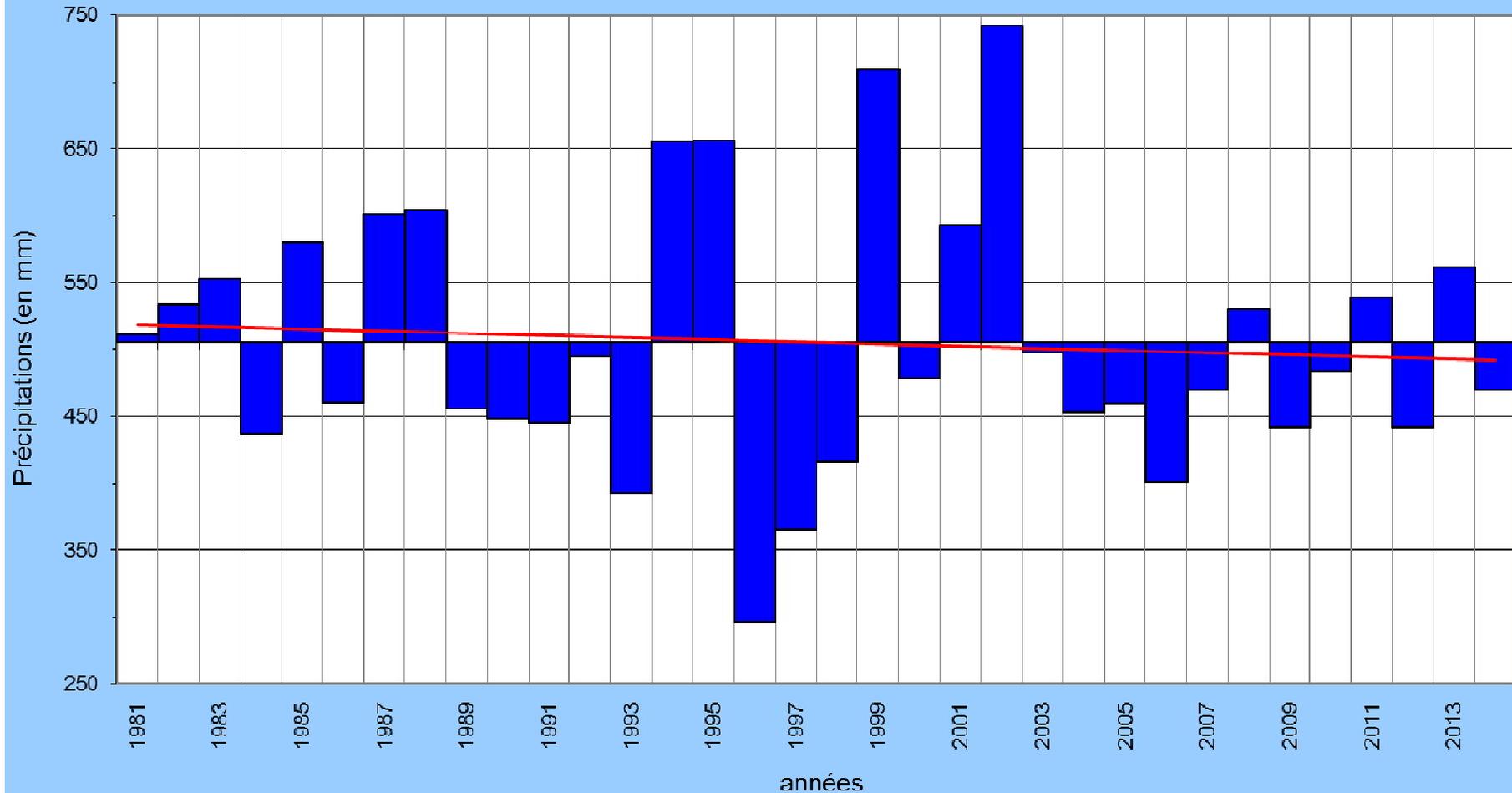


Figure 32. Précipitations sur la période de 7 mois entre septembre et mars à Uccle sur la période 1981-2014 (en mm). Les années indiquées sur l'axe des abscisses correspondent à l'année de la fin de chaque période de 7 mois. Les bâtonnets donnent les valeurs annuelles par rapport à la moyenne sur la période totale (505,1 mm). La droite rouge traversant le graphique est la droite de régression linéaire sur la période.

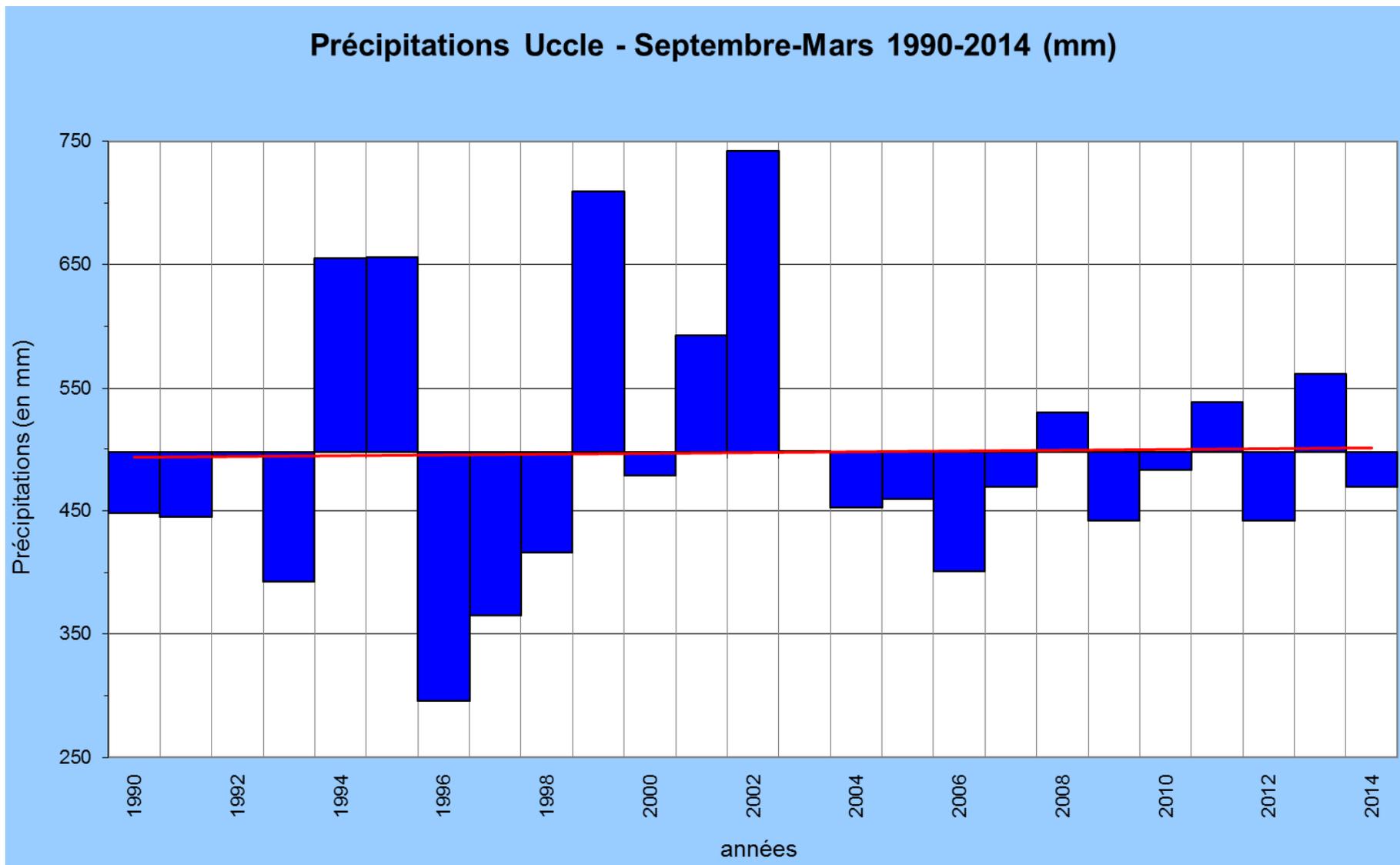


Figure 33. Précipitations sur la période de 7 mois entre septembre et mars à Uccle sur la période 1990-2014 (en mm). Les années indiquées sur l'axe des abscisses correspondent à l'année de la fin de chaque période de 7 mois. Les bâtonnets donnent les valeurs annuelles par rapport à la moyenne sur la période totale (497,5 mm). La droite rouge traversant le graphique est la droite de régression linéaire sur la période.

8 Projet d'étude « Changement climatique et ressources en eau »

A l'occasion du marché IBGE 2008-02-AL, le cycle hydrologique de la Région bruxelloise a été étudié d'une manière globale à l'aide d'un modèle de surface urbain (modèle SURFEX/TEB) pour les conditions climatiques récentes et pour deux scénarios climatiques particuliers correspondant à la fin du 21^e siècle. Une série d'expériences préliminaires pour estimer la sensibilité des composantes du cycle hydrologique en fonction des conditions climatiques et du taux d'imperméabilisation de la surface ont été réalisées. Les importances relatives des conditions climatiques et du taux d'imperméabilisation ont été illustrées (nous renvoyons au rapport final du marché 2008-02-AL pour le détail des principaux résultats obtenus). Dans le cadre du présent marché, l'approche de modélisation du cycle hydrologique et du bilan thermique de la Région bruxelloise entamée à l'occasion du marché 2008-02-AL a été poursuivie. Il est à noter que dans le cadre de ce marché, au vu des moyens disponibles, il n'a pas été possible de réaliser de nouvelles simulations. L'étude s'est donc portée sur l'analyse des résultats de simulations climatiques existantes à l'IRM. Néanmoins, une analyse spécifique du cycle hydrologique a été réalisée. De plus, la présente étude se distingue de l'analyse présentée dans le marché IBGE 2008-02-AL par les aspects suivants :

- analyse du climat présent à partir des réanalyses ERA-Interim au lieu de ERA-40.
- utilisation des sorties du modèle global ARPEGE au lieu des résultats du projet PRUDENCE.
- downscaling par le modèle meso-échelle ALARO (4km) au lieu de ALADIN (10 km).
- utilisation explicite (online) du modèle de surface SURFEX lors du *downscaling* par ALARO.
- analyse complète du cycle hydrologique, et non limitée au ruissellement.

8.1 Méthodologie

Modèle climatique régional ALARO

Le modèle de prévisions régionales ALARO a été développé par l'IRM dans le cadre du consortium international ALADIN (<http://www.cnrm.meteo.fr/aladin/>). Ce modèle est utilisé à l'IRM pour la prévision numérique du temps en Belgique à une résolution horizontale de 4 km.

Une version climatique du modèle régional ALARO a été récemment développée à l'IRM afin d'améliorer la représentation du climat à l'échelle de la Belgique. En effet, à l'échelle planétaire, les modèles de circulation atmosphérique générale ont habituellement une résolution spatiale comprise entre 200 et 500 km. A de telles échelles, on ne peut représenter que des tendances générales sur les continents. Des modèles climatiques régionaux possédant une résolution spatiale de l'ordre de 20 km à 50 km ont été utilisés ces dernières années pour simuler le climat de l'Europe (voir, par exemple, les scénarios climatiques actuels et futurs issus du projet européen ENSEMBLES et du projet international CORDEX). Mais, à cette échelle, ces modèles sont encore incapables de représenter les systèmes météorologiques à plus petite échelle, comme les orages ou les systèmes de vents régionaux qui peuvent fortement influencer les systèmes anthropiques ou naturels, par exemple en provoquant des précipitations exceptionnellement fortes. Dans le modèle ALARO à 4 km de résolution, une nouvelle paramétrisation de la microphysique des nuages et des précipitations a été implémentée. Récemment, cette nouvelle version du modèle a été utilisée afin de commencer à simuler la climatologie régionale en Belgique. En particulier, les valeurs extrêmes de la température maximale estivale en Belgique, sont relativement bien reproduites (Hamdi *et al.*, 2012). Ce résultat est lié au traitement cohérent de la convection profonde et de l'interaction nuage-rayonnement, ce qui est très important quand on augmente la résolution spatiale dans les études régionales d'impact des changements climatiques.

Plus récemment, le modèle ALARO a de plus été explicitement couplé avec le modèle de surface SURFEX, développé par Météo-France. Ce modèle de surface permet de mieux représenter les processus de surfaces par la modélisation des bilans d'eau et d'énergie à la surface du sol et dans la partie du sol en interaction plus ou moins directe avec l'atmosphère. Ce schéma de surface contient quatre modules permettant de décrire les échanges d'eau et d'énergie sur quatre types de surface: mer, lac, végétation et zone urbaine. En particulier, le module TEB (Town Energy Balance) permet de calculer les bilans thermique et hydrique en ville. Le couplage ALARO-SURFEX fournit une meilleure modélisation du processus d'interaction surface-air, par rapport à la simple paramétrisation par défaut de l'ancien schéma de surface ISBA d'ALARO.

Simulation climat présent

Dans le présent marché, le modèle ALARO-SURFEX a été utilisé avec une résolution de 4km pour simuler le « **climat présent** » à l'échelle de la Région bruxelloise sur la période 2001-2010. Pour ce faire, les conditions aux limites ont été définies à partir des réanalyses ERA-INTERIM de l'ECMWF (Centre européen) qui fournit des données météorologiques à une résolution horizontale entre 70 et 80 km sur l'Europe pour la période 1981-2010. Cette simulation fournit une simulation de référence pour le climat présent pour la Région bruxelloise.

Ensuite, afin d'augmenter encore la résolution spatiale des résultats, le modèle de surface SURFEX a été utilisé en mode offline avec une résolution spatiale de 1 km sur un domaine centré sur la ville de Bruxelles et ses environs. Ce modèle offline a été forcé sur la période 2001-2010 par les sorties du modèle ALARO-SURFEX en utilisant la base de données ECOCLIMAP (Masson *et al.*, 2003 ; Faroux *et al.*, 2013) qui fournit précisément des caractéristiques de la surface à une résolution horizontale de 1 km.

Scénarios climatiques

Le modèle climatique régional ALARO-SURFEX a également été utilisé pour fournir une simulation dynamique à haute résolution horizontale (4 km) pour la Région bruxelloise et ses environs à partir de scénarios climatiques obtenus à l'échelle planétaire avec un modèle à résolution horizontale moins fine. En particulier, le scénario d'émissions de gaz à effet de serre SRES A1B du GIEC (IPCC, 2000) a été considéré et le scénario climatique à l'échelle planétaire issu du modèle global ARPEGE de Météo-France correspondant à ce scénario d'émissions a été utilisé comme forçage aux limites du modèle ALARO-SURFEX. Ceci a mené à une simulation climatique pour la région bruxelloise autour de l'horizon 2050 (période 2046-2055) selon le scénario d'émission A1B (simulation « **climat futur** »). Afin de pouvoir quantifier les variations climatiques, cette simulation « climat futur » est comparée à une simulation « **historique** » qui résulte d'un *downscaling* par le modèle ALARO-SURFEX des sorties du modèle global ARPEGE pour des concentrations *observées* en gaz à effets de serre. Ainsi, les simulations « climat futur » et « historique » résultent exactement des mêmes modèles. Seules les concentrations en gaz à effets de serre sont différentes. Les différences entre ces deux simulations peuvent donc être attribuées à l'évolution de ces concentrations. Dans cette étude, la simulation historique correspond à des concentrations relatives à la décennie 1990-1999. Comme précédemment pour le climat présent, le modèle SURFEX a aussi été utilisé en mode offline à une résolution de 1 km pour la simulation « climat futur » et la simulation historique.

8.2 Résultats

Les sorties de ces différentes simulations climatiques (climat présent 2001-2010, simulation historique 1990-1999 et simulation climat futur 2046-2055) ont été analysées par rapport aux paramètres suivants :

- température de l'air à 2m (°C) / balance d'énergie en surface,
- quantités de précipitations (mm/jour),
- évapotranspiration (mm/jour),
- ruissellement (mm/jour),
- infiltration (mm/jour).

Chaque simulation fournit une série de valeurs horaires pour chaque paramètre et chaque point de grille. Ces valeurs horaires sont, en fonction du paramètre, moyennées ou sommées pour générer des valeurs journalières relatives à la période 08 :00 à 08 :00 le lendemain (heure de Bruxelles), ceci afin de permettre une comparaison cohérente avec les observations du réseau climatologique de l'IRM.

Ces séries de valeurs journalières ont été comparées pour trois points de grille représentant respectivement un climat urbain (centre de Bruxelles), un climat suburbain (Uccle) et un climat rural (Brussegem). Les choix des deux derniers points de grille se justifient par l'existence de stations climatologiques pour lesquelles des relevés quotidiens de température de l'air et de quantités de précipitations sont disponibles. L'objectif est également d'examiner si le modèle permet de distinguer significativement un climat urbain et un climat campagnard, notamment du point de vue thermique et de celui des composantes du cycle hydrologique.

Au niveau de la modélisation, chaque point de grille correspond à une combinaison de différents types de surface (« ville », « végétation », « mer », etc). Ainsi, le centre de Bruxelles est paramétrisé à 90% comme « ville » et à 10% comme « végétation » ; Uccle est à 60% « ville » et à 40% « végétation » ; et Brussegem est totalement du type « végétation ». En chaque point de grille, les calculs sont faits séparément pour les différents types de surface et les résultats ensuite sont pondérés pour obtenir la valeur finale.

8.2.1 Analyse du climat présent 2001-2010 (ERA-Interim/ALARO/SURFEX)

Dans un premier temps, l'analyse du climat présent 2001-2010 permet d'identifier les capacités et les limites du modèle. Les Figures 34 à 38 ci-dessous représentent le cycle annuel moyen des différents paramètres considérés (cf. plus haut). Ce cycle annuel moyen est estimé par une moyenne glissante sur une fenêtre de 90 jours des données journalières ERA-Interim/ALARO/SURFEX.

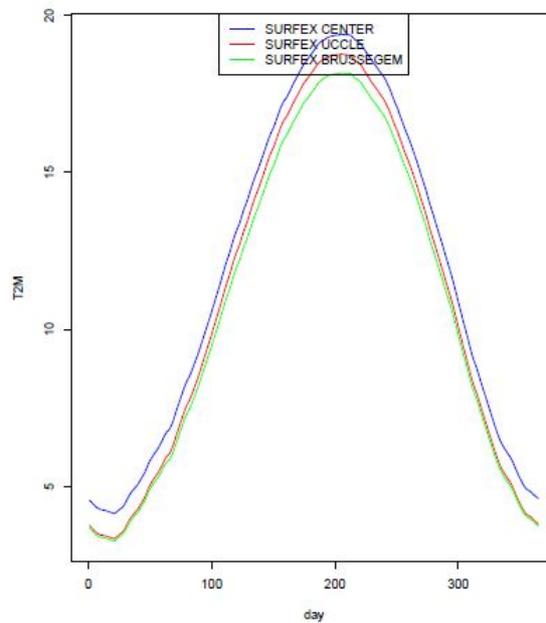


Figure 34. Cycle annuel moyen pour la période 2001-2010 de la température de l'air à 2m aux trois points de grille considérés.

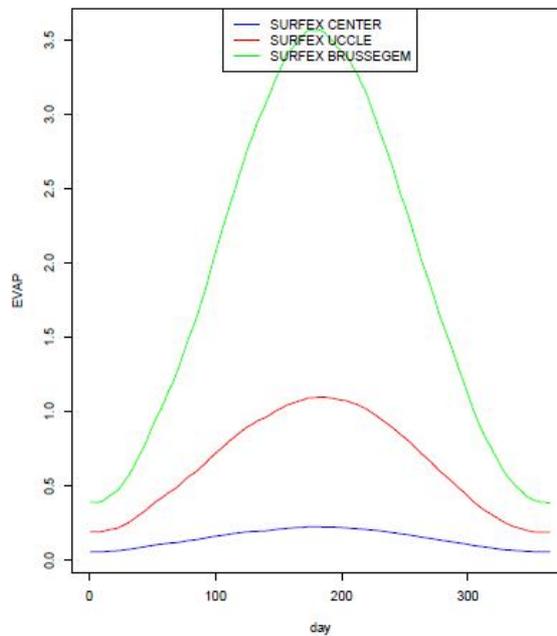


Figure 35. Cycle annuel moyen pour la période 2001-2010 de l'évapotranspiration (mm/jour) aux trois points de grille considérés.

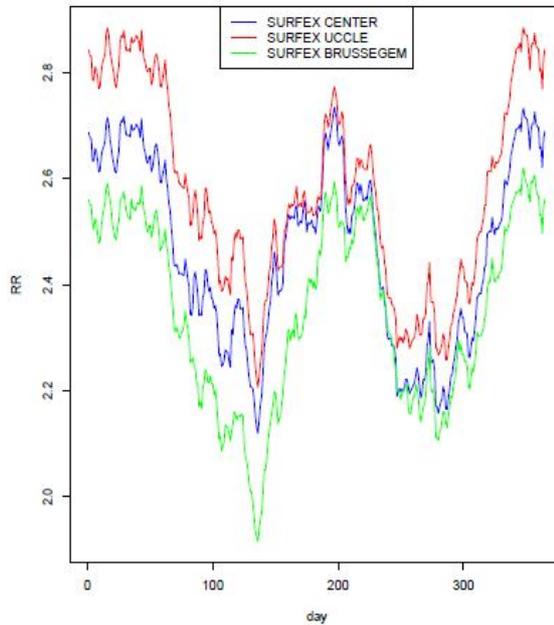


Figure 36. Cycle annuel moyen pour la période 2001-2010 des quantités de précipitations (mm/jour) aux trois points de grille considérés.

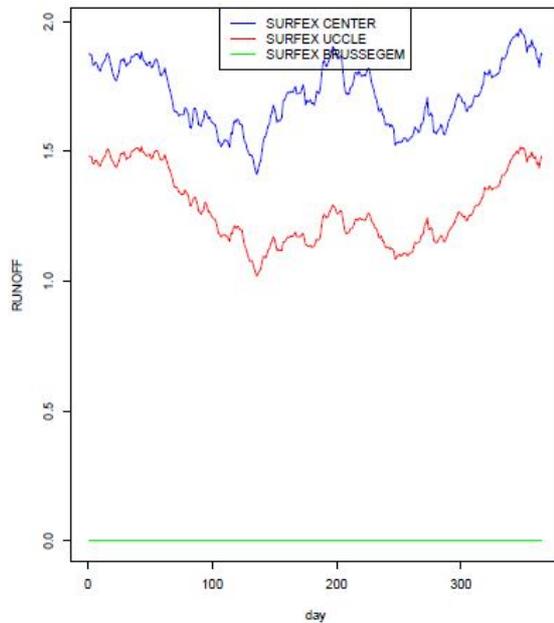


Figure 37. Cycle annuel moyen pour la période 2001-2010 du ruissellement (mm/jour) aux trois points de grille considérés.

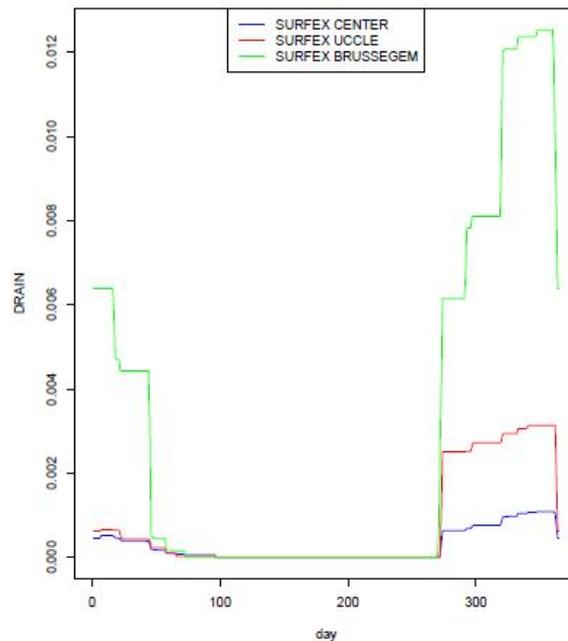


Figure 38. Cycle annuel moyen pour la période 2001-2010 de l'infiltration (mm/jour) aux trois points de grille considérés.

Concernant les surfaces de type « végétation », aucun ruissellement n'est observé et l'infiltration dans le sol est quasiment nulle. Cela s'explique du fait que la paramétrisation de ce type de surface dans le modèle SURFEX correspond à une absorption totale des précipitations par la couche superficielle jusqu'à saturation. Cette modélisation sera affinée dans une prochaine version de SURFEX afin d'estimer un ruissellement et une infiltration plus réalistes pour les surfaces « végétation ». Dans le cas de la paramétrisation « ville », aucune évaporation n'est calculée. En conséquence, le cycle hydrologique modélisé dans cette étude se résume aux composantes suivantes :

- quantités de précipitations
- évapotranspiration par la végétation
- ruissellement dans les zones urbaines

La Figure 39 illustre, à titre d'exemple pour le mois de mai 2006, la cohérence entre les quantités de précipitations et le ruissellement aux 3 points de grille considérés.

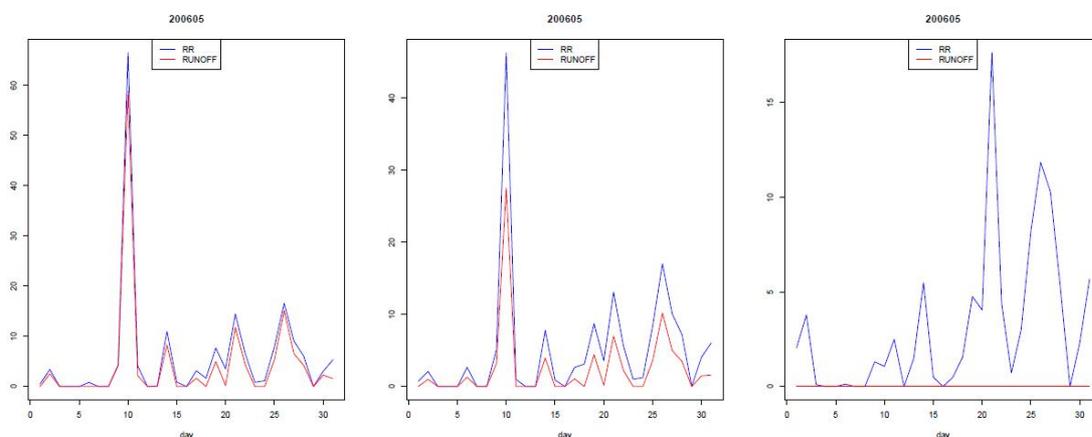


Figure 39. Evolution des quantités de précipitations quotidiennes et du ruissellement quotidien modélisés pour le mois de mai 2006 aux 3 points de grille considérés (centre de Bruxelles à gauche, Uccle au centre, Brussegem à droite).

Finalement, les estimations de quantités de précipitations et de température de l'air peuvent être comparées aux observations à Uccle et Brussegem. Les Figures 40 et 41 comparent le cycle annuel moyen des quantités de précipitations (cf. Figure 40) et de la température de l'air (cf. Figure 41) selon que ce cycle est estimé à partir des sorties de modèles ou à partir des observations. Concernant les quantités de précipitations, les sorties du modèles sont surestimées à Uccle (+ 7,4%) et sous-estimées à Brussegem (-5%) en moyenne annuelle. Les observations indiquent des précipitations plus abondantes à Brussegem (+3,1% par rapport à Uccle) tandis que le modèle estime des précipitations plus élevées à Uccle (+ 8,7%). Néanmoins, le modèle reproduit un cycle annuel dont le minimum est en avril et le maximum en été. En particulier, le modèle reproduit convenablement la convection (donnant lieu à des précipitations sous forme d'averses) durant l'été.

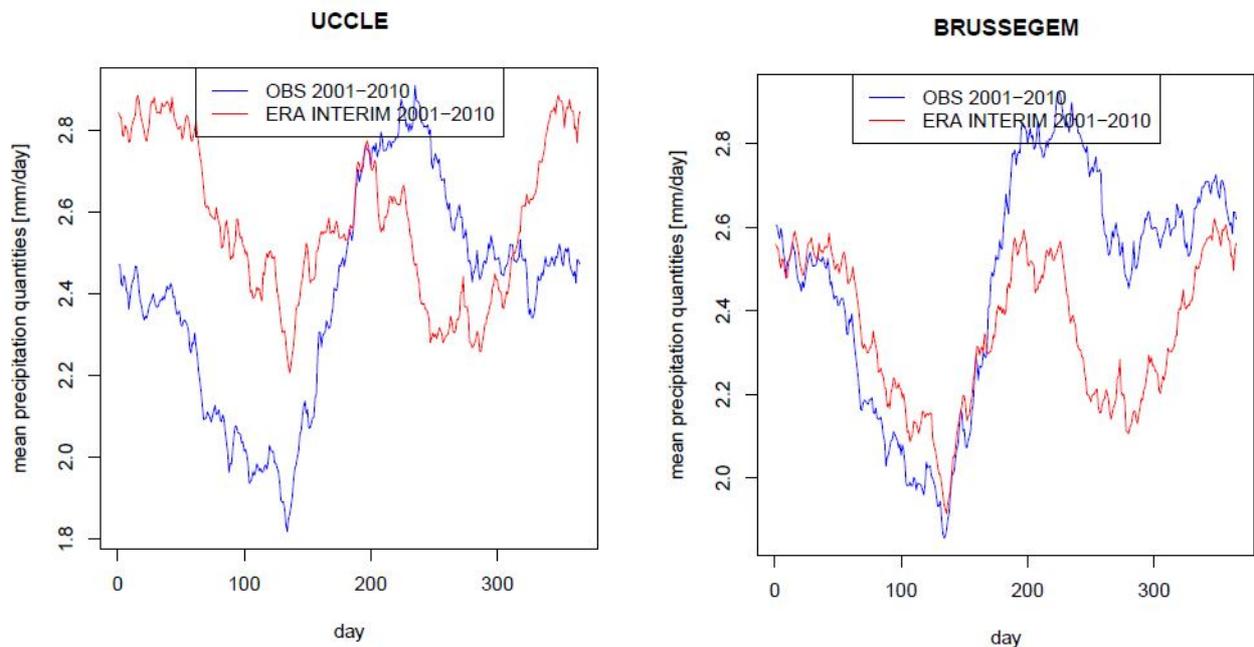


Figure 40. Cycle annuel moyen des précipitations à Uccle (gauche) et Brussegem (droite) estimé à partir des sorties de modèle (rouge) et des observations (bleu).

Concernant le cycle annuel de la température de l'air, les sorties de modèle reproduisent relativement fidèlement les observations. Selon les observations, les températures à Uccle sont légèrement plus élevées qu'à Brussegem en moyenne annuelle (+0,15°C). Cette différence est confirmée par les modèles (+0,35°C à Uccle par rapport à Brussegem).

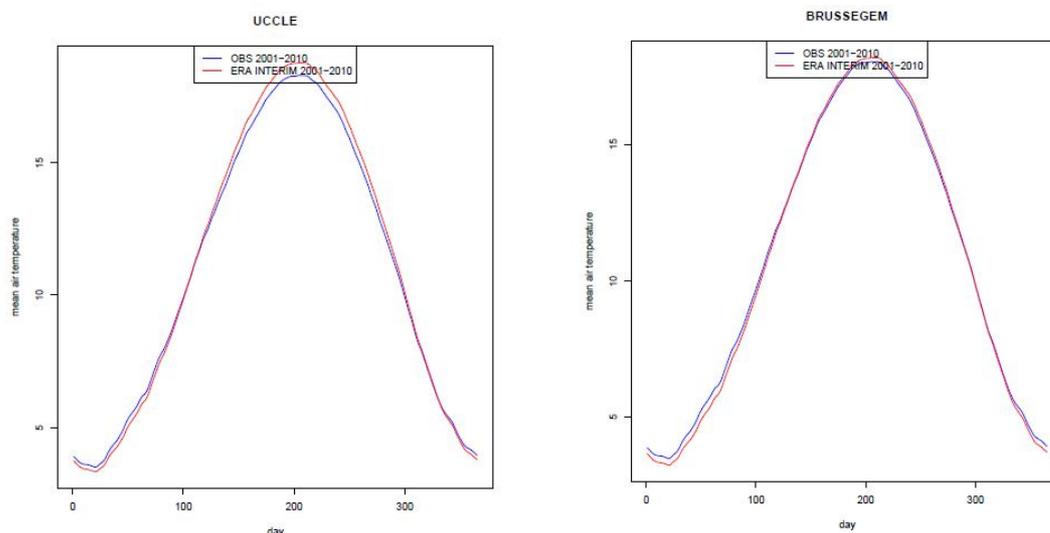


Figure 41. Cycle annuel moyen de la température de l'air à Uccle (gauche) et Brussegem (droite) estimé à partir des sorties de modèle (rouge) et des observations (bleu).

8.2.2 Analyse des simulations « historique 1990-1999 » et « climat futur 2046-2055 » (ARPEGE/ALARO/SURFEX)

Les Figures 42 à 46 comparent le cycle annuel moyen aux 3 points de grille et pour les 5 paramètres étudiés selon qu'il est estimé à partir du climat présent (ERA-Interim/ALARO/SURFEX), de la simulation historique et de la simulation « climat futur ». Comme pour le « climat présent », ce cycle est estimé par une moyenne glissante sur une fenêtre de 90 jours des données journalières.

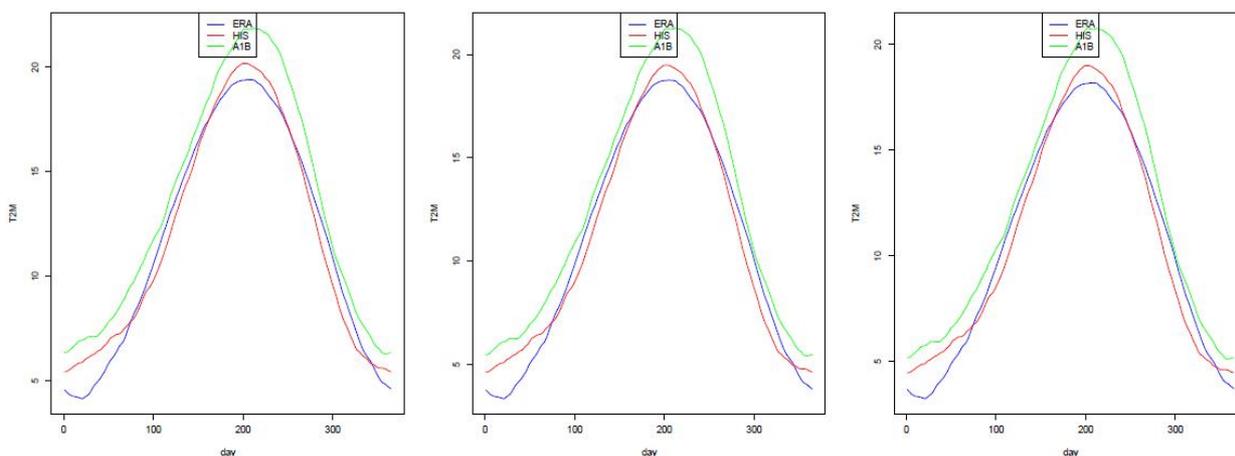


Figure 42. Cycle annuel moyen de la température de l'air au centre de Bruxelles (gauche), à Uccle (centre) et Brussegem (droite) pour le climat présent (ERA, en bleu), la simulation historique (HIS, en rouge) et la simulation « climat futur » (A1B, en vert).

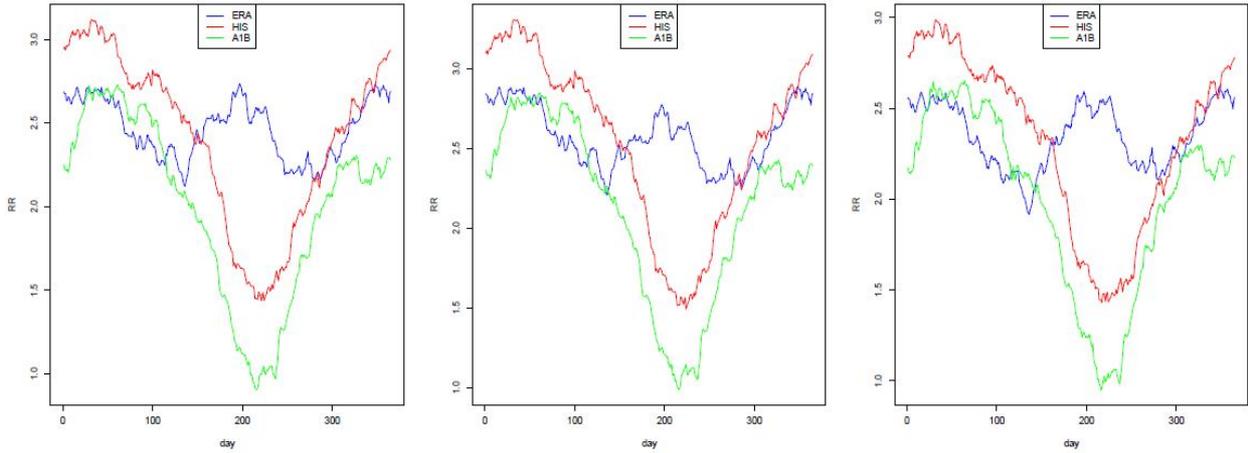


Figure 43. Cycle annuel moyen des quantités de précipitations au centre de Bruxelles (gauche), à Uccle (centre) et Brussegem (droite) pour le climat présent (bleu), la simulation historique (rouge) et la simulation « climat futur » (vert).

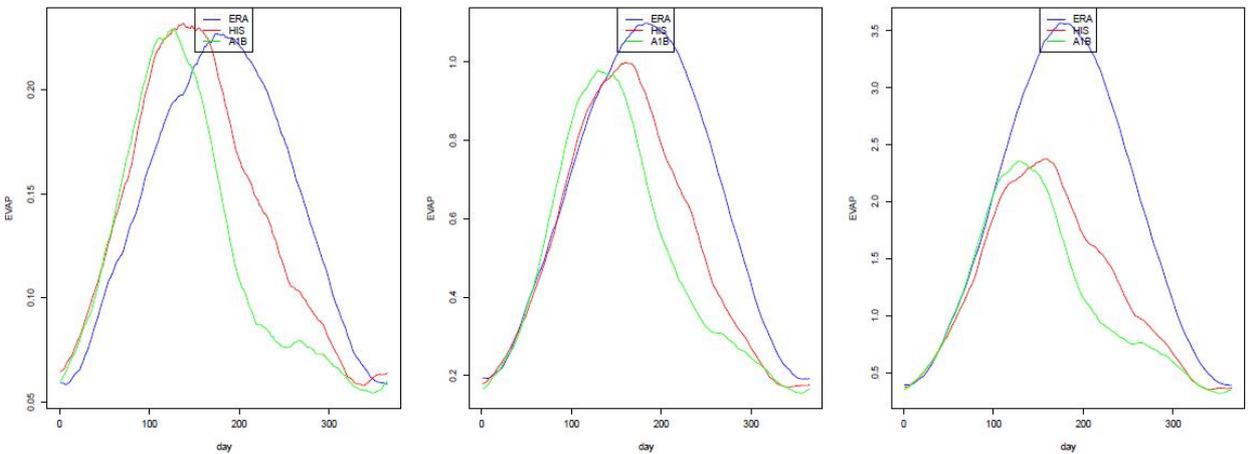


Figure 44. Cycle annuel moyen de l'évapotranspiration au centre de Bruxelles (gauche), à Uccle (centre) et Brussegem (droite) pour le climat présent (bleu), la simulation historique (rouge) et la simulation « climat futur » (vert).

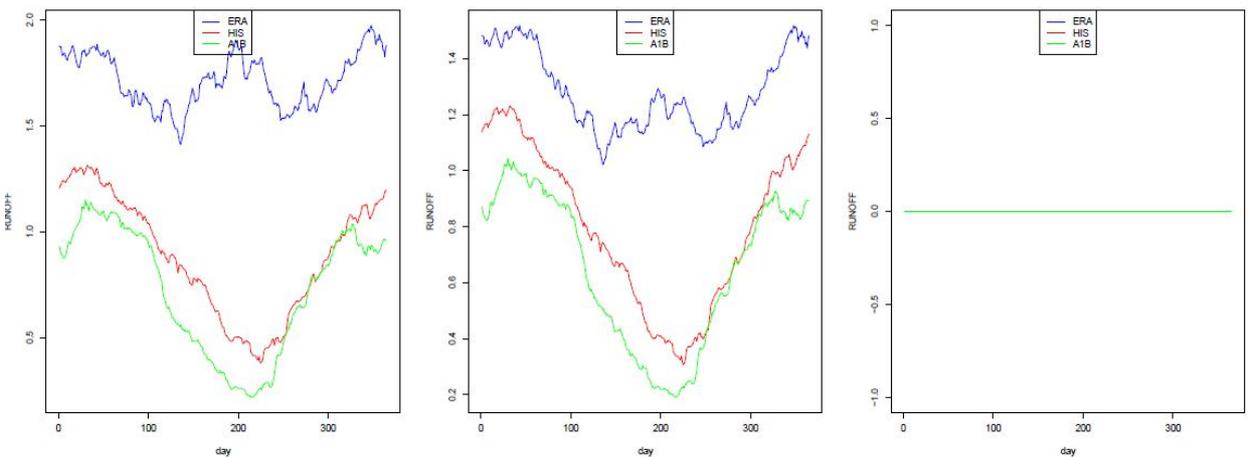


Figure 45 Cycle annuel moyen du ruissellement au centre de Bruxelles (gauche), à Uccle (centre) et Brussegem (droite) pour le climat présent (bleu), la simulation historique (rouge) et la simulation « climat futur » (vert).

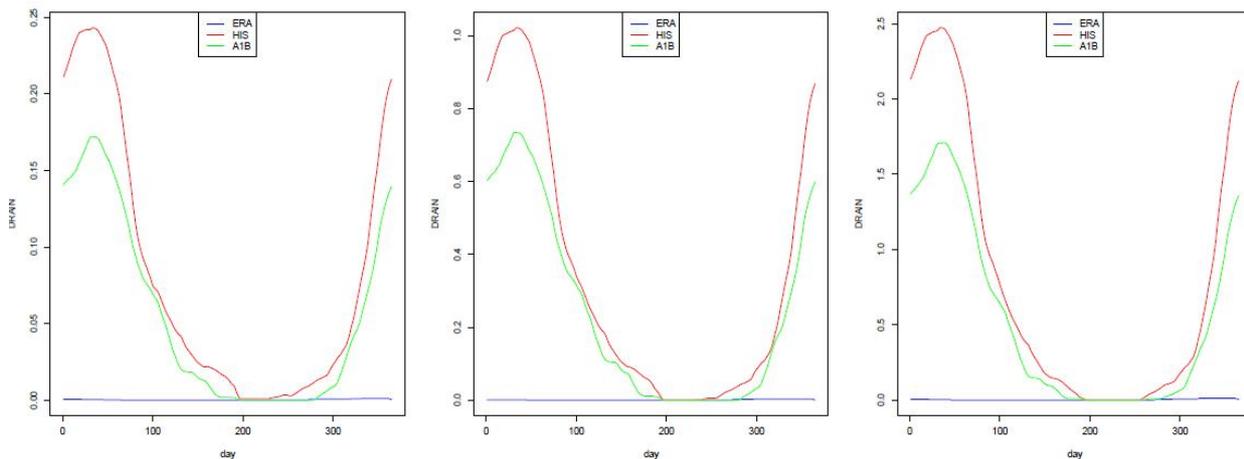


Figure 46 Cycle annuel moyen de l'infiltration au centre de Bruxelles (gauche), à Uccle (centre) et Brussegem (droite) pour le climat présent (bleu), la simulation historique (rouge) et la simulation « climat futur » (vert).

Ces résultats indiquent :

- une hausse des températures à l'horizon 2050 de l'ordre de 1,5°C en moyenne annuelle. En moyenne annuelle, aucune différence significative n'est observée entre les trois points de grille considérés.
- une baisse des quantités de précipitations à l'horizon 2050 de l'ordre de 0,4 mm/jour en moyenne annuelle (i.e., autour de 150 mm/an, soit -16%). Les sorties des simulations climatiques ARPEGE/ALARO/SURFEX présentent néanmoins un cycle annuel moyen trop marqué par rapport au climat présent ERA-Interim/ALARO/SURFEX. Le cycle annuel simulé indique des variations annuelles moyennes de plus de 50% entre un maximum en hiver et un minimum en été. Ce minimum en été s'explique, tout au moins en partie, par la difficulté des modèles climatiques globaux tels celui utilisé dans cette étude (modèle global ARPEGE) de modéliser correctement les précipitations de type convectif.
- une baisse du ruissellement et de l'infiltration comme conséquence directe de la baisse des quantités de précipitations

Pour terminer, la Figure 47 représente l'évolution du cycle diurne moyen pour l'été des flux d'énergie en surface pour Bruxelles et Brussegem. Cette évolution est quantifiée par la différence entre les simulations « climat futur » 2046-2055 et les simulations historiques 1990-1999. A midi, le flux de chaleur latente au centre-ville diminue de 10 Wm⁻² par rapport à aujourd'hui, tandis qu'en environnement rural, il diminue de l'ordre de 20 Wm⁻². Cette diminution de la chaleur latente est compensée par une augmentation de la chaleur sensible. Ceci indique que, en été, la température de l'air en milieu urbain augmentera dans le futur moins que celle en milieu rural. Au cours de la journée, le rayonnement solaire incident (non représenté à la Figure 47) augmente, au centre de Bruxelles et à Brussegem, de l'ordre de 20 Wm⁻² à midi. Le rayonnement infrarouge incident nocturne (non représenté) augmente d'un peu moins de 10 Wm⁻² au centre-ville et à la station sub-urbaine de Uccle.

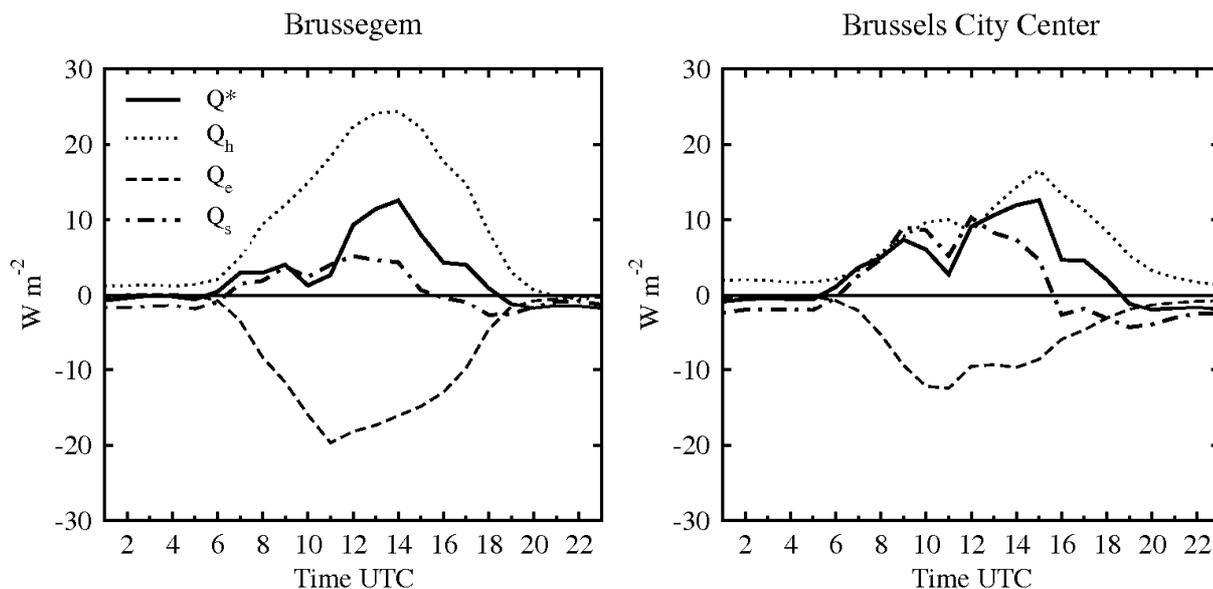


Figure 47. Evolution du cycle diurne estival moyen des flux d'énergie en surface pour Bruxelles et Brussegem (i.e., différence entre les simulations « climat futur » 2046-2055 et les simulations historiques) : Q^* = flux net d'énergie ; Q_h = flux de chaleur sensible ; Q_e = flux de chaleur latente, Q_s = flux de stockage d'énergie.

Il est à noter que ces résultats se basent sur l'analyse d'un seul modèle global selon un seul scénario d'émissions.

8.3 Perspectives

L'analyse préliminaire réalisée dans le cadre de ce présent marché pourrait être étendue selon les aspects suivants :

- Les résultats obtenus lors de cette étude ont soulevés plusieurs questions, notamment concernant la paramétrisation du bilan hydrologique dans le modèle de surface SURFEX. Afin de tenter d'expliquer en détail les résultats observés, il est indispensable de se plonger dans les équations du modèle afin d'acquérir une meilleure compréhension de ce modèle pour l'étude du cycle hydrologique.
- Exploitation d'une nouvelle version du modèle de surface SURFEX qui permet une modélisation plus complexe de la balance pour les surfaces de type « végétation ». En particulier, on peut espérer une modélisation plus réaliste du ruissellement et de l'infiltration pour ces surfaces.
- Analyse spatiale sur un domaine de 30 km x 30 km centré sur Bruxelles à une résolution de 1 km plutôt que ciblée sur certains points de grille prédéfinis.
- Analyse du climat présent ERA-Interim/ALARO/SURFEX pour une période de 30 ans (1981-2010, période de référence standard actuelle pour le « climat présent ») afin de permettre l'analyse d'événements extrêmes et de les comparer avec les observations, quand c'est possible.
- Projections climatiques à partir de la nouvelle version du modèle ARPEGE et des nouveaux scénarios d'émissions suivant les résultats les plus récents du GIEC. En particulier, les scénarios RCP 4.5 (scénario le plus proche du scénario A1B) et RCP 8.5 (« business as usual ») pourraient être considérés. Des simulations seraient réalisées afin d'analyser les changements climatiques à court terme (autour de 2030), moyen terme (autour de 2050) et long terme (fin du 21^e siècle).

9 Analyse de trois épisodes orageux

Dans le cadre de ce marché de services, il nous a été demandé d'analyser trois épisodes orageux en Région bruxelloise. Cette analyse consiste en une cartographie horaire et journalière des quantités de précipitations observées en Région bruxelloise grâce au réseau de pluviomètres de l'IBGE. Les dates choisies sont les suivantes : 14/05/2009, 7/10/2009 et le 10/07/2010. Le 7/10/2009, on a mesuré des pluies horaires particulièrement intenses et les cumuls journaliers dans plusieurs stations correspondaient à des périodes de retour moyennes supérieures à 10 ans. Les deux autres dates correspondent à des pluies ayant fait l'objet de l'intervention du Fonds de calamités. Ces dates ont également été choisies en tenant compte de la date de fin de la base de données contrôlées (30 juin 2011).

9.1 Méthodologie

Les cartes de cumuls pluviométriques horaires et journaliers ont été réalisées par interpolation spatiale des données pluviométriques en surface disponibles pour la Belgique dans les bases de données de l'IRM. Les données utilisées proviennent des réseaux de pluviomètres de l'IBGE, du SPW ainsi que de l'IRM (réseau AWS et réseau climatologique pour les cumuls journaliers).

Même si le domaine d'intérêt se limite à la Région bruxelloise, les cartes ont été calculées pour l'ensemble du territoire belge. La cartographie en Région bruxelloise s'obtient par l'extraction de ce domaine. Cette façon de procéder permet une vue globale des précipitations observées en Belgique. D'autre part, les observations en dehors de la Région bruxelloise, mais à proximité de celles-ci, contribuent à l'estimation du champ de précipitations dans cette région. L'interpolation spatiale a été effectuée par krigeage ordinaire après estimation d'un variogramme à partir des données à interpoler.

9.2 Episode du 14/05/2009

Comme illustré à la Figure 48, les orages du 14/05/2009 ont essentiellement touché les parties nord et est de la Région bruxelloise, où des cumuls de l'ordre de 30 mm ont été observés sur une période de 24h. Ce cumul est le résultat de deux périodes orageuses plus courtes : une première de 14h à 17h et une seconde de 19h à 21h. Le cumul horaire maximum en Région bruxelloise de 15,7 mm a été observé à la station 285 (Avant-port) entre 15h à 16h (cf. Figure 49).

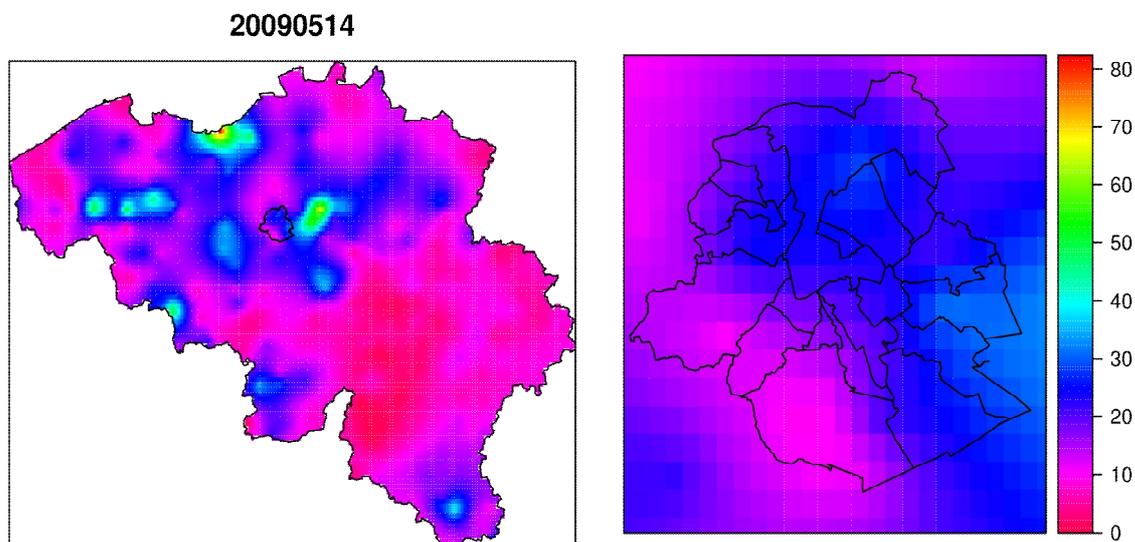


Figure 48. Répartition spatiale du cumul des précipitations observées entre le 14/05/2009 à 8h (heure de Bruxelles) et le 15/05/2009 à 8h (heure de Bruxelles).

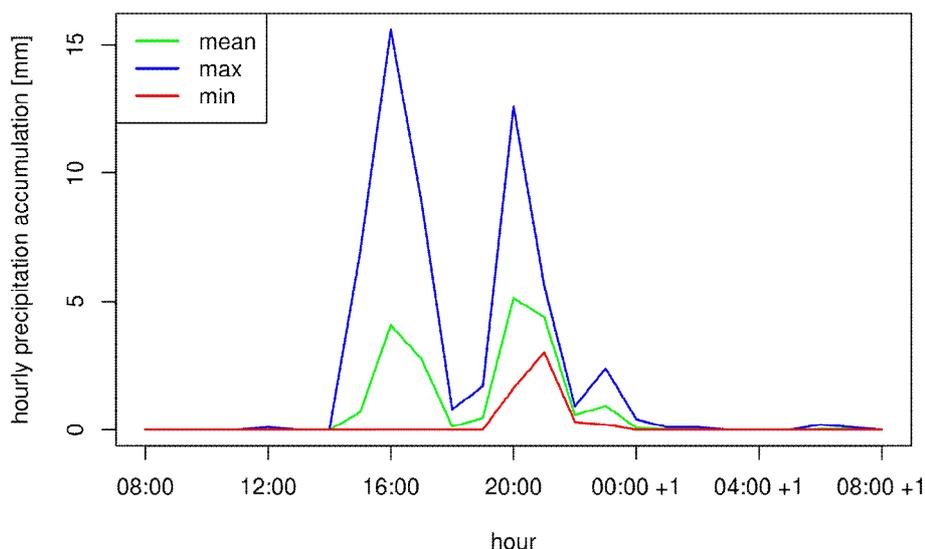


Figure 49. Evolution des cumuls horaires des précipitations entre le 14/05/2009 à 8h et le 15/05/2009 à 8h dans les stations de l'IBGE : moyenne et valeurs extrêmes pour la Région bruxelloise.

9.3 Episode du 7/10/2009

Comme illustré à la Figure 50, les orages du 7/10/2009 ont touché principalement les parties sud et est de la Région bruxelloise. Les cumuls observés en Région bruxelloise sur une période de 24h varient de 24,7 mm (station 285 – Avant-port) à 75,2 mm (station 293 – Shopping Center). Ces cumuls sont essentiellement le résultat de précipitations observées entre 19h et 21h. Un cumul horaire maximum de 30,3mm a été observé à la station 293 – Shopping Center entre 19h et 20h (cf. Figure 51).

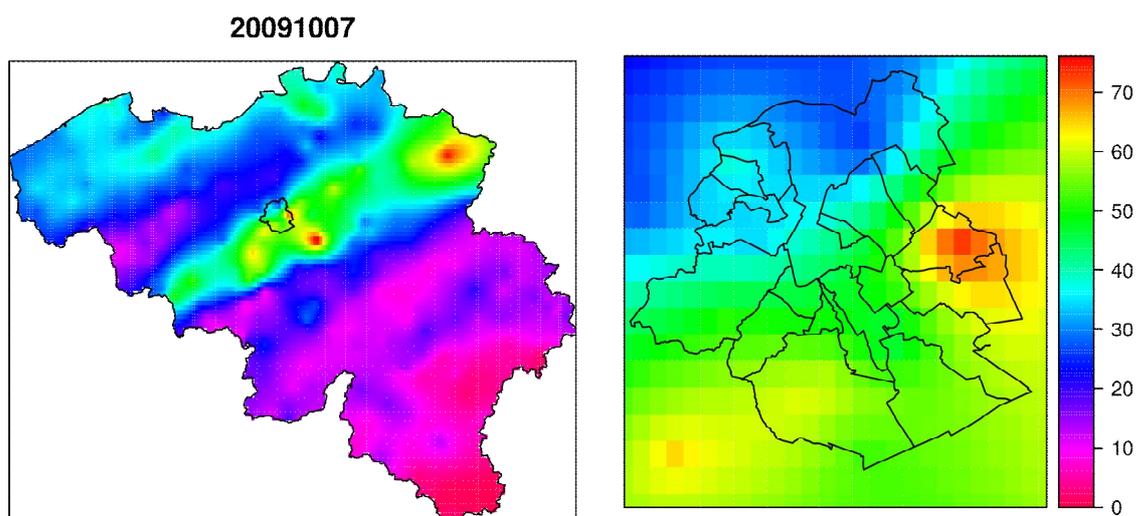


Figure 50. Répartition spatiale du cumul des précipitations observées entre le 07/10/2009 à 8h (heure de Bruxelles) et le 08/10/2009 à 8h (heure de Bruxelles).

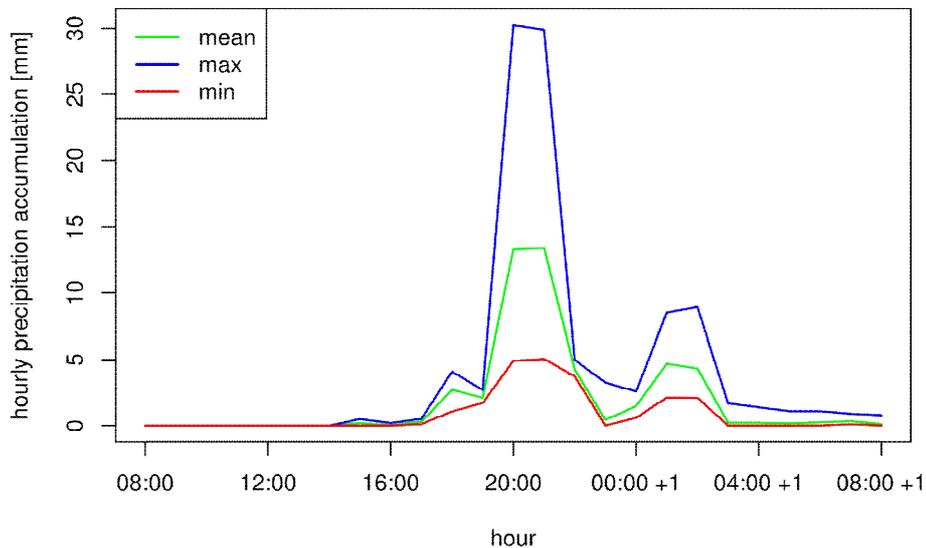


Figure 51. Evolution des cumuls horaires des précipitations entre le 07/10/2009 à 8h et le 08/10/2009 à 8h dans les stations de l'IBGE : moyenne et valeurs extrêmes pour la Région bruxelloise.

9.4 Episode du 10/07/2010

Comme illustré à la Figure 52, les orages du 10/07/2010 ont touché la région bruxelloise de manière relativement uniforme. Les cumuls observés en région bruxelloise sur une période de 24h varient de 17,8 mm (station 288 – Viangros) à 23,6 mm (station 286 – Roodebeek). Ces cumuls sont essentiellement le résultat de précipitations observées entre 19h et 22h. Un cumul horaire maximum de 19,1mm a été observé à la station 287 – Semence entre 20h et 21h (cf. Figure 53).

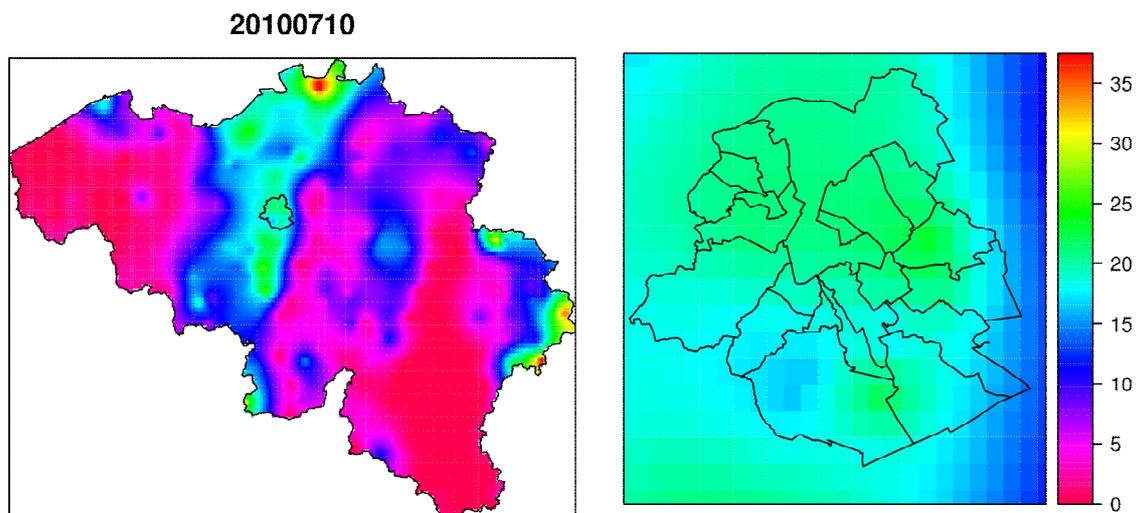


Figure 52. Répartition spatiale du cumul des précipitations observées entre le 10/07/2010 à 8h (heure de Bruxelles) et le 11/07/2010 à 8h (heure de Bruxelles).

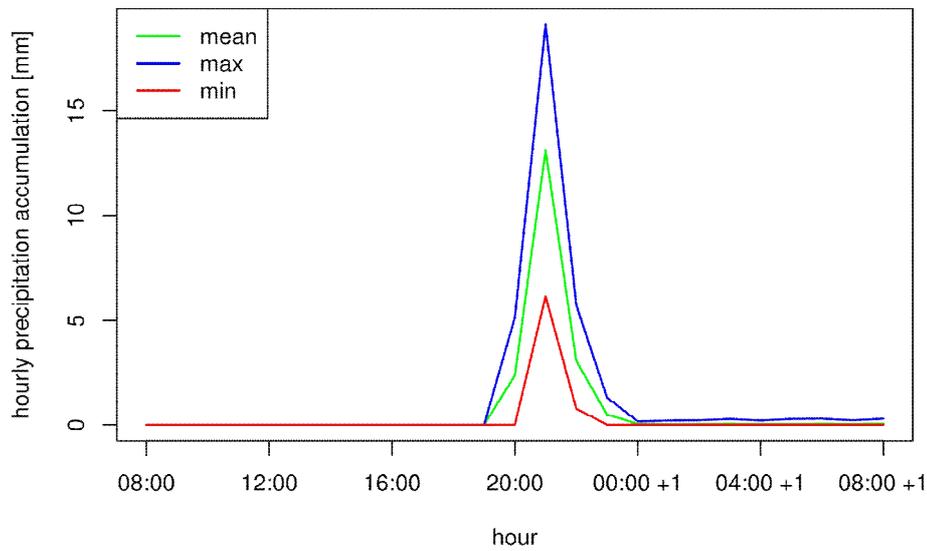


Figure 53. Evolution des cumuls horaires des précipitations entre le 10/07/2010 à 8h et le 11/07/2010 à 8h dans les stations de l'IBGE : moyenne et valeurs extrêmes pour la Région bruxelloise.

10 Conclusions

Le réseau de l'IBGE peut être considéré comme unique en Belgique vu sa densité spatiale et son historique de vingt ans de mesures de quantités horaires de précipitations. La qualité des mesures fut globalement bonne durant toute la période de mesures. Le réseau a été interrompu mi-2011, mais il reste un outil incomparable pour mener des études climatologiques en Région bruxelloise pour la période récente (1992 à 2011). Les principales caractéristiques de ce réseau ont été présentées dans le chapitre 2.

L'exploitation des données de précipitations de l'IBGE est l'aboutissement d'une chaîne de traitements : mesure, acheminement des données, contrôle de qualité et comblement des données manquantes. Vu la densité du réseau de l'IBGE, une donnée manquante peut être remplacée par une estimation relativement « fiable ». L'augmentation du nombre d'estimations ira cependant de pair avec une uniformisation des données, ce qui gommara des effets locaux (par exemple, par temps d'orage). Par contre, la dérive des appareils menant à des surestimations ou sous-estimations systématiques ne pourra que partiellement être récupérée par les corrections relatives à l'étalonnage.

Recommandations pour l'entretien et la gestion des pluviomètres automatiques

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.

Le travail de contrôle de qualité des données pluviométriques horaires de l'IBGE permet de mettre en évidence différentes situations qui influencent négativement la qualité des données. Nous avons par exemple constaté à plusieurs reprises 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 parfois mal calibrés durant de longues périodes (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 car il était patent que la surestimation de l'appareil provenait d'une non-réalisation des corrections d'étalonnage.

Enfin, les données de Senne Viangros ne nous semblent pas exploitables, l'appareil sous-estimant systématiquement les précipitations par rapport à ses proches voisins : Viangros et Anderlecht (cf. le point 4.6).

Les 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. Le fait que les données du réseau de l'IBGE n'étaient pas télémesurées en temps (quasi-)réel explique la plupart des difficultés rencontrées lors du contrôle de qualité. Suite à l'expérience acquise durant les marchés

avec l'IBGE et d'après notre expérience à l'IRM, nous pouvons conclure que le modus operandi de la partie « mesure » de la chaîne de traitement des données d'un réseau pluviométrique automatique et opérationnel devrait comporter les éléments suivants :

1. la télémesure des données en temps réel, par exemple avec le réseau GPRS,
2. la surveillance journalière des mesures, à l'aide par exemple de graphes de valeurs cumulées (ou d'autres types de rapports),
3. en plus des visites de routine (de type prévention), suite à l'inspection des rapports dont il est question ci-dessus, l'instauration de visites ciblées en vue d'agir le plus rapidement possible in situ en cas de panne ou de dérive d'un appareil.

Le contrôle de qualité : description du travail effectué

Dans le présent marché, les données pluviométriques horaires après juillet 2009 ont été incorporées dans la procédure de contrôle de qualité. Il en est de même pour les dates d'étalonnage sur lesquelles un contrôle très minutieux a été réalisé (cf. chapitre 3). Nos recommandations précédentes 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 avons constaté l'importance d'une collecte minutieuse des données lors des étalonnages, puisque chaque valeur du nombre de basculements a des répercussions sur un grand nombre de données via le facteur de correction.

Dans le présent marché de service, le contrôle de qualité manuel, effectué par un opérateur, a été réalisé pour la période allant d'août 2009 à juin 2011 (cf. chapitre 4). La Table 7 résume la répartition du travail relatif au contrôle de qualité réalisé au cours des trois marchés de services consécutifs.

Signalons que les hivers 2009-2010 et 2010-2011 ont été marqués par plusieurs épisodes de chutes de neige lors desquels les mesures des pluviomètres non-chauffés de l'IBGE ne sont pas pertinentes. Les mesures du pluviomètre chauffé de l'IRM à Uccle ont été considérées comme référence pour ces périodes.

A la fin du présent marché, on dispose donc d'une base de données pluviométriques horaires de l'IBGE validée en détail sur une période de plus de dix ans (janvier 1999 à juin 2011). Cette base de données contrôlées a été transmise à l'IBGE. Signalons que pour la période 1992-1998, les données ont été validées lors du premier marché de manière moins approfondie (« méthode mensuelle », cf. Table 7).

Analyse globale

Dans la première partie du chapitre 5, les séries de mesure contrôlées de chaque station de l'IBGE ont été comparées à la série pluviométrique de référence de la station de l'IRM à Uccle (pluviomètre P50). Une analyse de ce type permet d'identifier des erreurs éventuelles qui ne peuvent être détectées lors de l'analyse au pas de temps journalier, telles des dérives instrumentales, des ruptures d'homogénéité dues à des changements d'instrument ou des modifications dans l'environnement de la station. Aucune erreur « manifeste » de ce type n'a pu être détectée, de sorte qu'aucune correction supplémentaire n'a été apportée à la base des données contrôlées.

Cartographie des précipitations

Dans la seconde partie du chapitre 5, les cartes des moyennes pluviométriques mensuelles, saisonnières et annuelle sur la Région bruxelloise ont été mises à jour. En particulier, la période de référence a été étendue par rapport aux marchés précédents, elle couvre maintenant la période de 1999 à 2010.

L'examen de la carte annuelle indique le gradient orienté nord-ouest/sud-est, qui semble correspondre à un effet orographique sur les précipitations, à savoir une augmentation des cumuls annuels avec l'altitude. Cet effet a été analysé en détails lors des précédents marchés.

Les cartes saisonnières indiquent 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 pour ses précipitations plus intenses, dont les manifestations les plus énergétiques sont les orages.

Précipitations efficaces

Un modèle simple a été implémenté pour l'estimation des précipitations efficaces à Uccle depuis le 1 janvier 2005 (cf. chapitre 6). Cette étude montre que les mois de novembre à mars sont les plus propices à la recharge des nappes phréatiques. En moyenne sur la période 2005-2013, 35% des précipitations annuelles atteignent la nappe phréatique.

Evolution des précipitations depuis le début du 20^e siècle

Comme le montre le chapitre 7, à l'échelle séculaire, entre 1901 et 2014, les cumuls saisonniers des précipitations à Uccle présentent soit une tendance à la hausse (environ +18% en hiver et +8% en été), soit quasiment pas de tendance (au printemps et en automne). Si l'on examine les cumuls sur la période de 7 mois entre septembre et mars (période proposée par l'IBGE, car propice à la recharge des eaux souterraines), on observe également une tendance à la hausse depuis 1901 (environ +10%).

Changements climatiques en Région bruxelloise

Une étude préliminaire à propos de l'évolution du cycle hydrologique en Région bruxelloise dans le cadre des changements climatiques a été réalisée (cf. chapitre 8). Cette étude a mis en évidence les forces et les limites de la modélisation considérée, et permet dès lors de baliser la méthodologie à considérer dans une éventuelle prochaine étude plus approfondie.

Analyse d'épisodes orageux

Une analyse spatio-temporelle de trois épisodes orageux (14/05/2009, 7/10/2009, et le 10/07/2010) a été réalisée afin d'identifier pour chacun les zones les plus touchées en Région bruxelloise, ainsi que les caractéristiques principales de la dynamique des précipitations mesurées (cf. chapitre 9). Dans le futur, les estimations pluviométriques radar, calibrées à l'aide des mesures en surface, pourraient être utilisées pour encore améliorer le genre d'analyse spatiale effectuée ici.

11 Bibliographie

- Dakshinamurti C., Saxena P. and E. Rao, 1961. Evaluation of Effective Rainfall and Irrigation from Ground-water Measurements. *Letters to Nature* 190: 1100-1101.
- David K., Dorey M. and D. Smith, 1999. What's the point? Interpolation and extrapolation with a regular grid DEM. *IV International Conference on GeoComputation*, Fredericksburg, VA, USA.
- Dehem D. et Ch. Tricot, 2004. Étude d'une méthodologie de contrôle de qualité de données pluviométriques (marché MS/212/2001/04). *Rapport final*. Institut royal météorologique de Belgique, 46 p.
- Dehem D., Mohymont B. et Ch. Tricot, 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.
- Dehem D., Tricot Ch., Wylleman P. et R. Hamdi, 2010. 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 (cahier spécial des charges 2008-02-AL). *Rapport final*. Institut royal météorologique de Belgique, 130 p.
- Faroux S., Kaptué Tchuenté A. T., Roujean J.-L., Masson V., Martin E. and P. Le Moigne, 2013. ECOCLIMAP-II/Europe: a twofold database of ecosystems and surface parameters at 1 km resolution based on satellite information for use in land surface, meteorological and climate models, *Geosci. Model Dev.*, 6, 563-582.
- Gellens F. et D. Gellens, 1992. L'évapotranspiration potentielle en Belgique: variabilité spatiale et temporelle. Publication de l'Institut Royal Météorologique. *Série A*, n° 130.
- Givone C., 1997. Circulation et contrôle des données climatologiques à Météo-France. *La Météorologie*, 8° série - n°20 - décembre 1997. 10 p.
- Hamdi R., Van de Vyver H. and P. Termonia, 2012. New cloud and microphysics parameterisation for use in high-resolution dynamical downscaling: Application for summer extreme temperature over Belgium. *International Journal of Climatology*, DOI: 10.1002/joc.2409.
- IPCC, Special Report on Emission Scenarios, 2000.
- Kelway P. S. and S. I. Herbert, 1969. Short-term rainfall analysis. *Weather*, 24(9), 342-354.
- Kincaid, D. and W. Cheney, 2002. Numerical Analysis (3rd edition), Brooks/Cole. ISBN 0-534-38905-8, chapter 6.
- Lanza L. G. and L. Stagi, 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).

Martin D. and J. Gilley, 1993. Effective precipitation. National Engineering Handbook, Chapter 2: Irrigation Water Requirements. United States Department of Agriculture: 2/142 - 2/154.

Masson V., Champeaux J.-L., Chauvin F., Meriguet C. and R. Lacaze, 2003. A global database of land surface parameters at 1km resolution in meteorological and climate models, *J. Climate*, 16, 1261-1282.

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.

OMM, 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).

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.

Thiery D., 1977. Calcul de pluie efficace au pas journalier avec les sous-programmes CLIMAT et CLIDAT. Service Géologique National, Département hydrogéologie, Orléans, France. 77-SGN-211-HYD.

Vallet A., Bertrand C. and J. Mudry, 2013. Effective rainfall: a significant parameter to improve understanding of deep-seated rainfall triggering landslide – a simple computation temperature based method applied to Séchilienne unstable slope (French Alps). *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 10, 8945–8991.

Annexes

Annexe 1

Inventaire des données présentes

(cf. chapitre 2, point 2.4 : *Inspection sommaire des données*).

Table 1. Inventaire mensuel des données de l'IBGE avant traitement par l'IRM du 01 janvier 1999 au 31 août 2011. 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. Ce tableau ne donne aucune indication sur la vraisemblance des données, il mentionne juste le nombre de données horaires présentes.

| 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 |

| CODE | NAME | YEAR | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|------|-----------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 97 | Anderlecht | 2001 | 744 | 671 | 743 | 720 | 743 | 719 | 744 | 742 | 720 | 743 | 717 | 744 |
| 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 |

| CODE | NAME | YEAR | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|------|-----------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 291 | Dépôt Communal Boits. | 2004 | 744 | 696 | 744 | 720 | 744 | 720 | 744 | 744 | 720 | 744 | 720 | 744 |
| 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 |

| CODE | NAME | YEAR | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|------|-----------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 285 | Avant-Port | 2008 | 744 | 696 | 743 | 720 | 744 | 720 | 744 | 744 | 720 | 744 | 720 | 744 |
| 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 | 743 | 718 | 743 | 720 | 743 |
| 103 | Senne Viangros | 2009 | 744 | 672 | 649 | 720 | 744 | 720 | 744 | 703 | | | | |
| 201 | Paelinckx | 2009 | 744 | 672 | 743 | 720 | 744 | 720 | 744 | 744 | 720 | 744 | 720 | 744 |
| 203 | Nord | 2009 | 744 | 672 | 744 | 720 | 744 | 720 | 744 | 744 | 720 | 744 | 720 | 744 |
| 285 | Avant-Port | 2009 | 744 | 672 | 744 | 720 | 744 | 720 | 744 | 744 | 720 | 744 | 720 | 744 |
| 286 | Roodebeek | 2009 | 744 | 672 | 743 | 720 | 744 | 720 | 744 | 744 | 720 | 744 | 720 | 744 |
| 287 | Semence | 2009 | 744 | 672 | 743 | 720 | 744 | 720 | 744 | 744 | 720 | 744 | 720 | 744 |
| 288 | Viangros | 2009 | 744 | 672 | 744 | 720 | 744 | 720 | 744 | 744 | 720 | 744 | 720 | 744 |
| 291 | Dépôt Communal Boits. | 2009 | 744 | 672 | 743 | 720 | 744 | 720 | 744 | 744 | 720 | 744 | 720 | 744 |
| 292 | Dépôt de Tram | 2009 | 744 | 672 | 743 | 720 | 744 | 720 | 744 | 744 | 720 | 744 | 720 | 744 |
| 293 | Shopping Center | 2009 | 744 | 672 | 743 | 720 | 744 | 720 | 744 | 744 | 720 | 744 | 720 | 744 |
| 296 | Kinsendael | 2009 | 744 | 672 | 743 | 720 | 744 | 720 | 744 | 744 | 720 | 744 | 720 | 744 |
| 299 | Ganshoren | 2009 | 744 | 672 | 743 | 720 | 744 | 720 | 744 | 744 | 720 | 744 | 720 | 744 |
| 97 | Anderlecht | 2010 | 743 | 672 | 742 | 719 | 743 | 720 | 743 | 743 | 719 | 744 | 58 | 60 |
| 201 | Paelinckx | 2010 | 744 | 672 | 743 | 720 | 744 | 720 | 744 | 744 | 720 | 744 | 720 | 744 |
| 203 | Nord | 2010 | 744 | 672 | 743 | 720 | 744 | 720 | 744 | 744 | 720 | 744 | 720 | 744 |
| 285 | Avant-Port | 2010 | 744 | 672 | 743 | 720 | 744 | 720 | 744 | 744 | 720 | 744 | 720 | 744 |
| 286 | Roodebeek | 2010 | 744 | 672 | 743 | 720 | 744 | 720 | 744 | 744 | 720 | 744 | 720 | 744 |
| 287 | Semence | 2010 | 744 | 672 | 743 | 720 | 744 | 720 | 744 | 744 | 720 | 744 | 720 | 744 |
| 288 | Viangros | 2010 | 744 | 672 | 743 | 720 | 744 | 720 | 744 | 744 | 720 | 744 | 720 | 744 |
| 291 | Dépôt Communal Boits. | 2010 | 744 | 672 | 743 | 720 | 744 | 720 | 744 | 744 | 720 | 744 | 720 | 744 |
| 292 | Dépôt de Tram | 2010 | 744 | 672 | 743 | 720 | 744 | 720 | 744 | 197 | | | | |
| 293 | Shopping Center | 2010 | 744 | 672 | 743 | 720 | 744 | 720 | 744 | 744 | 720 | 744 | 720 | 744 |
| 296 | Kinsendael | 2010 | 744 | 672 | 743 | 720 | 744 | 720 | 744 | 744 | 720 | 744 | 720 | 744 |
| 299 | Ganshoren | 2010 | 744 | 672 | 743 | 720 | 744 | 720 | 744 | 744 | 720 | 744 | 720 | 744 |
| 97 | Anderlecht | 2011 | 744 | 671 | 743 | 720 | 743 | 719 | 744 | 238 | | | | |
| 201 | Paelinckx | 2011 | 744 | 672 | 743 | 720 | 744 | 670 | | | | | | |
| 203 | Nord | 2011 | 744 | 672 | 743 | 720 | 744 | 720 | 744 | 214 | | | | |
| 285 | Avant-Port | 2011 | 744 | 672 | 743 | 720 | 744 | 720 | 744 | 238 | | | | |
| 286 | Roodebeek | 2011 | 744 | 672 | 743 | 720 | 744 | 720 | 744 | 250 | | | | |
| 287 | Semence | 2011 | 744 | 672 | 743 | 720 | 744 | 720 | 744 | 251 | | | | |
| 288 | Viangros | 2011 | 744 | 672 | 743 | 720 | 744 | 680 | | | | | | |
| 291 | Dépôt Communal Boits. | 2011 | 744 | 672 | 743 | 720 | 744 | 720 | 744 | 190 | | | | |
| 293 | Shopping Center | 2011 | 744 | 672 | 743 | 720 | 744 | 720 | 744 | 203 | | | | |
| 296 | Kinsendael | 2011 | 744 | 672 | 743 | 720 | 744 | 720 | 744 | 204 | | | | |
| 299 | Ganshoren | 2011 | 744 | 672 | 743 | 720 | 744 | 720 | 9 | | | | | |

Annexe 2

Données d'étalonnage jusque juillet 2009

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

La Table 2 ci-dessous reprend les dates d'étalonnage, et les données y afférentes, reprises dans la base de données de l'IRM jusqu'en juillet 2009 (cf. dans le texte pour la période ultérieure). 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 2. 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 | |

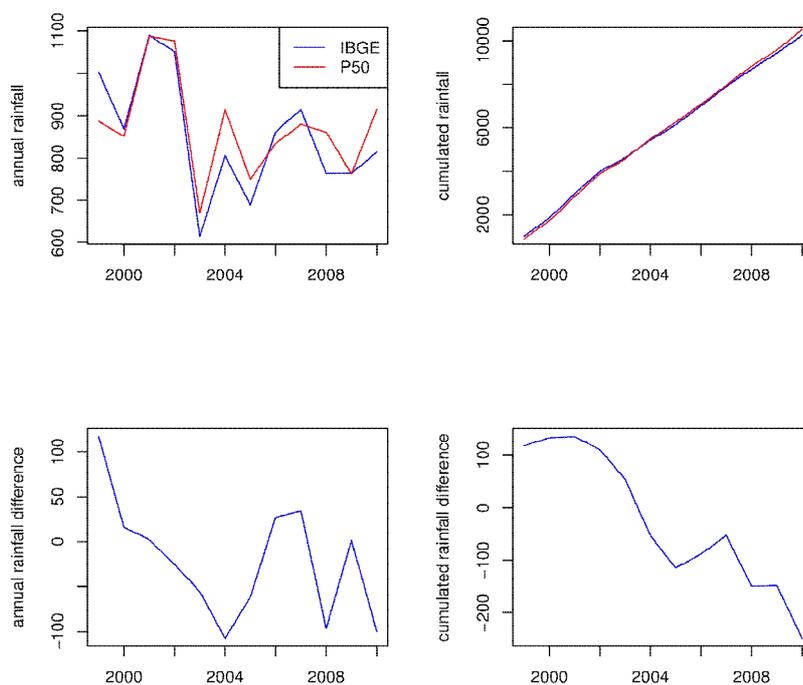
Annexe 3

Analyse globale des séries

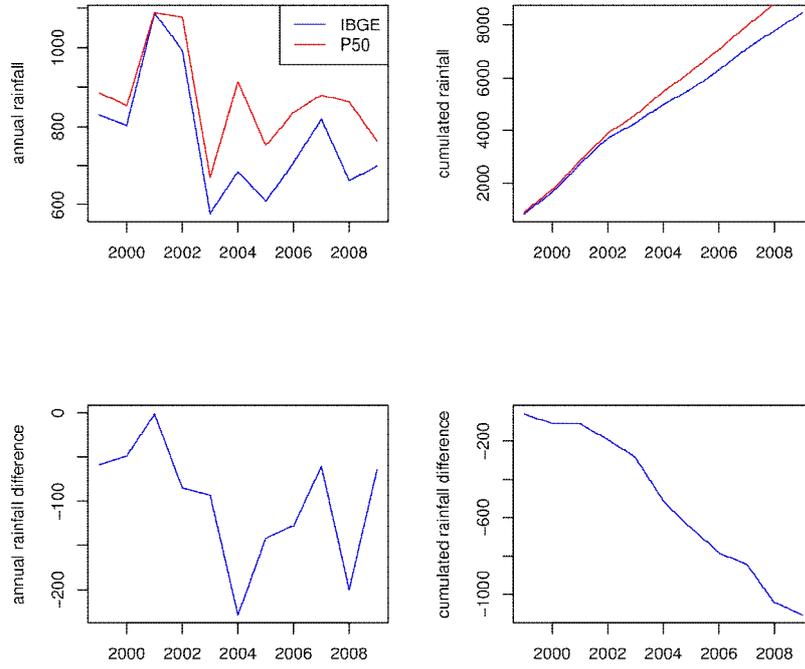
(cf. chapitre 5, point 5.3 : *Comparaison par rapport à la série de référence de Uccle*)

Cette annexe reprend l'ensemble des figures discutées au point 5.3 du texte. Ces figures comparent les séries pluviométriques des stations du réseau IBGE à la série du pluviomètre de référence P50 de l'IRM à Uccle. On se reportera à la légende de la Figure 18 dans le texte pour l'explication des figures.

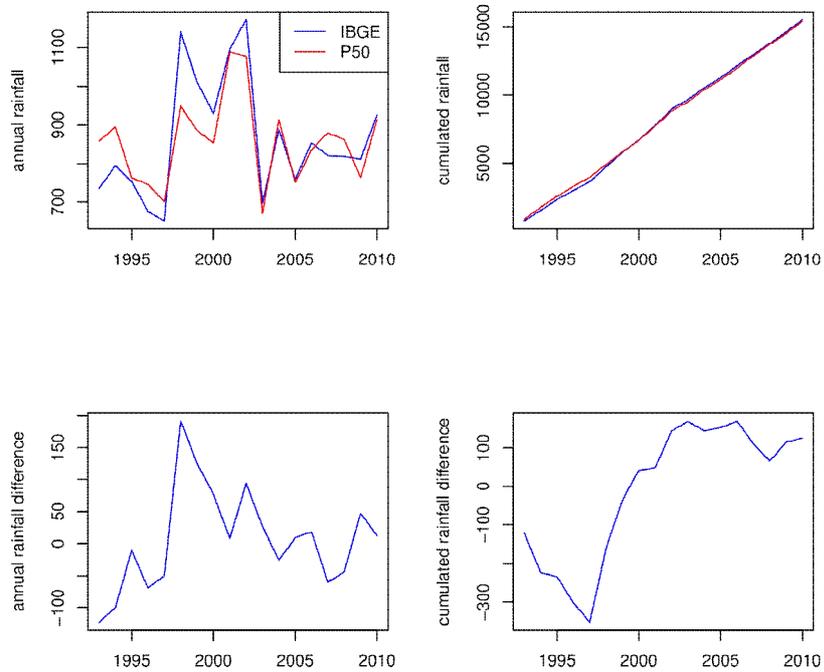
97 - Anderlecht



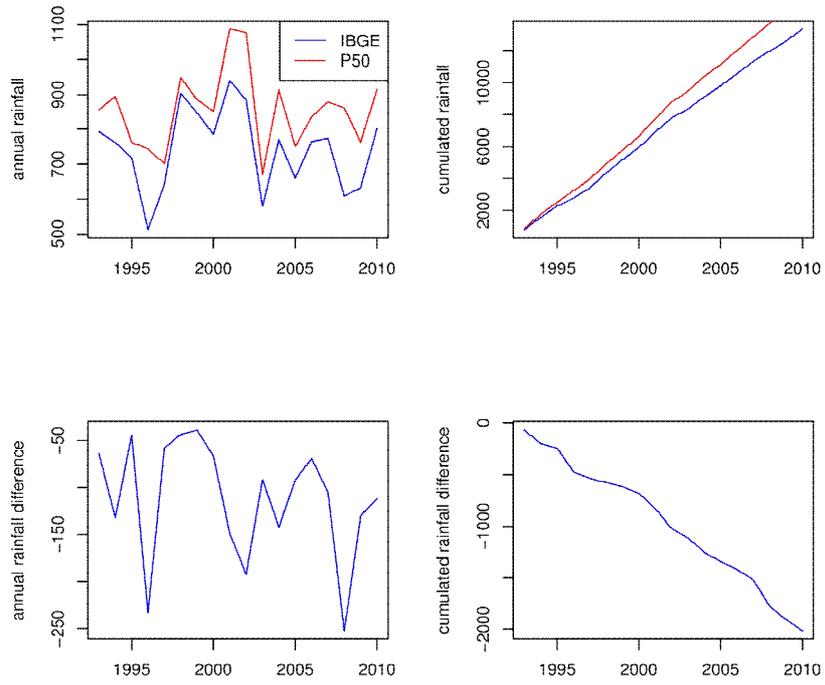
103 – Senne Vlangros



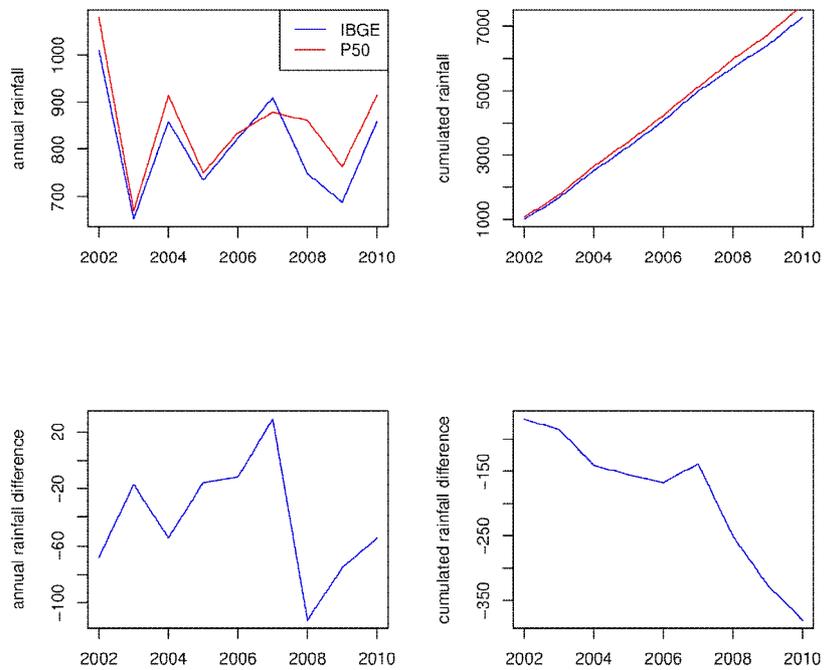
201 – Paelinckx



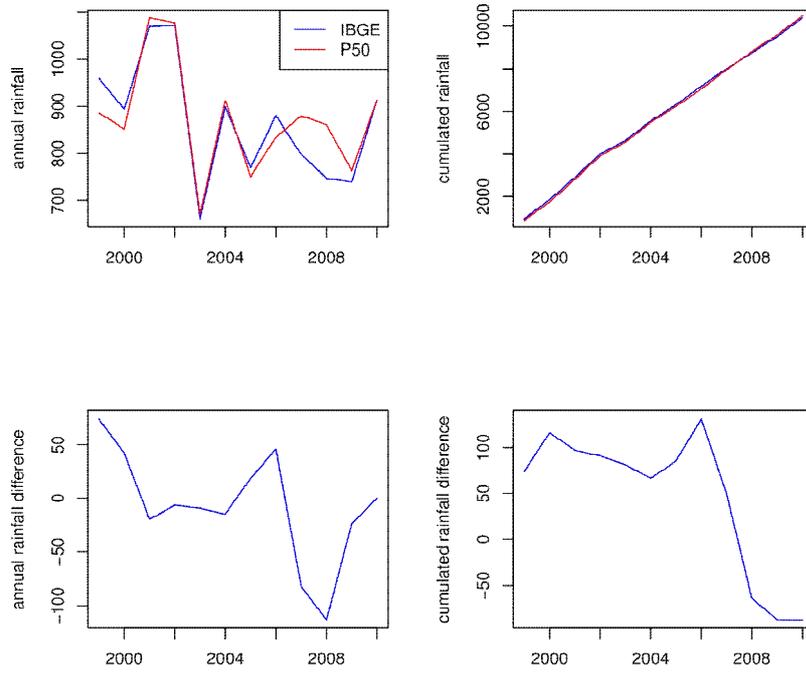
203 – Nord



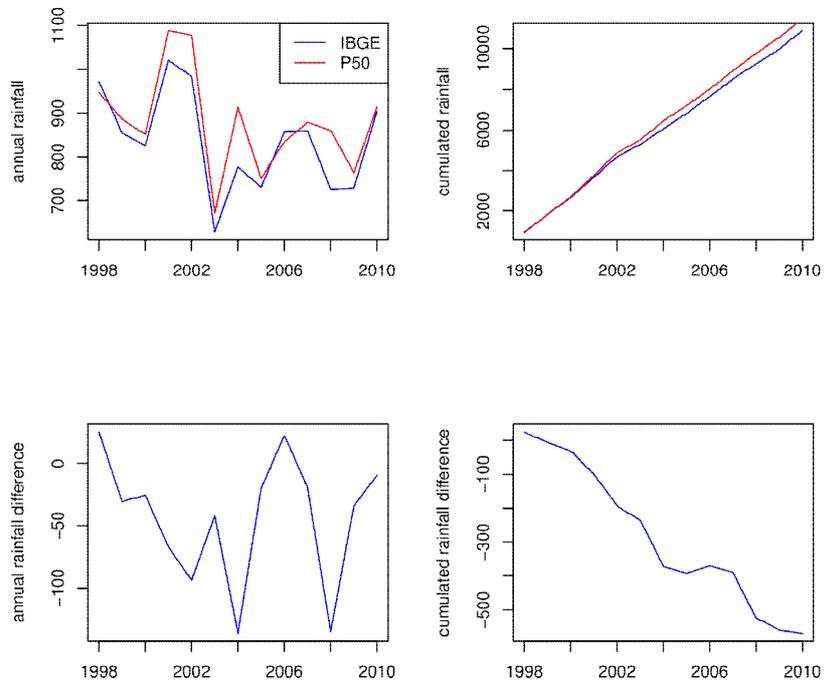
285 – Avant-Port



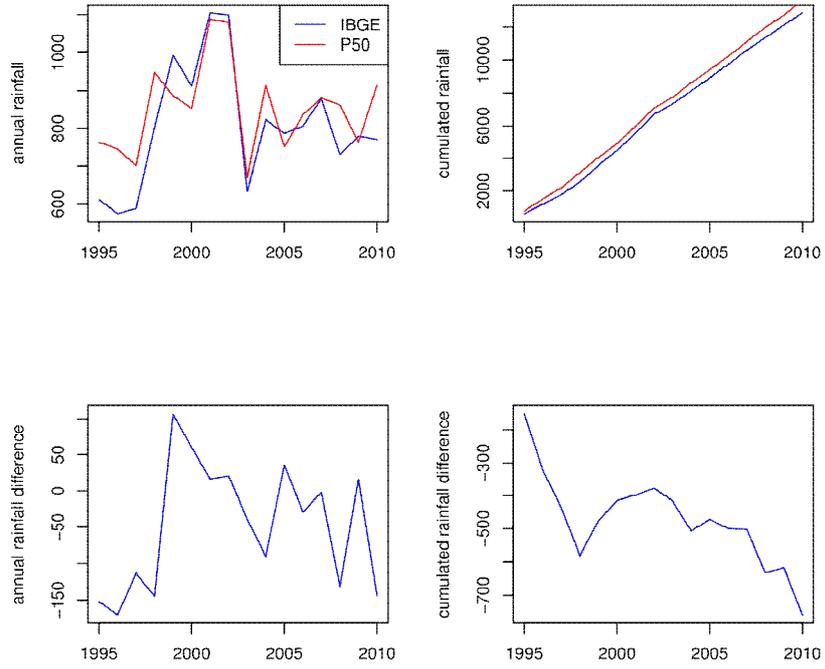
286 – Roodebeek



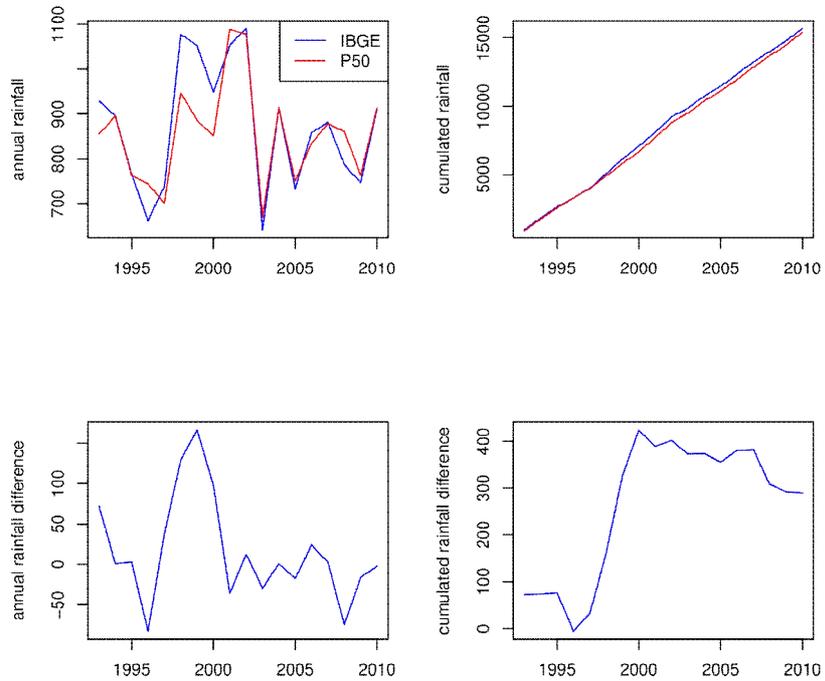
287 – Semence



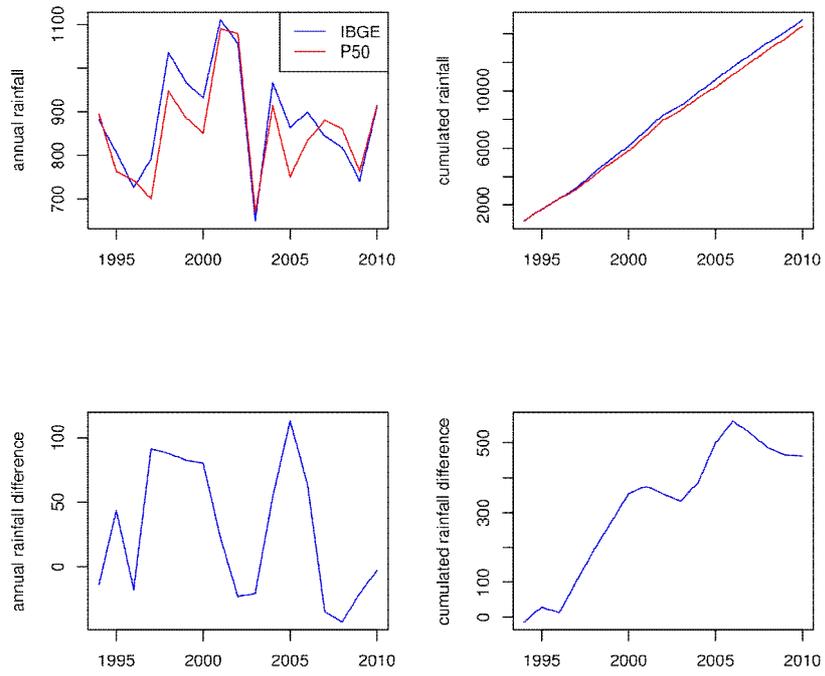
288 – Vlangros



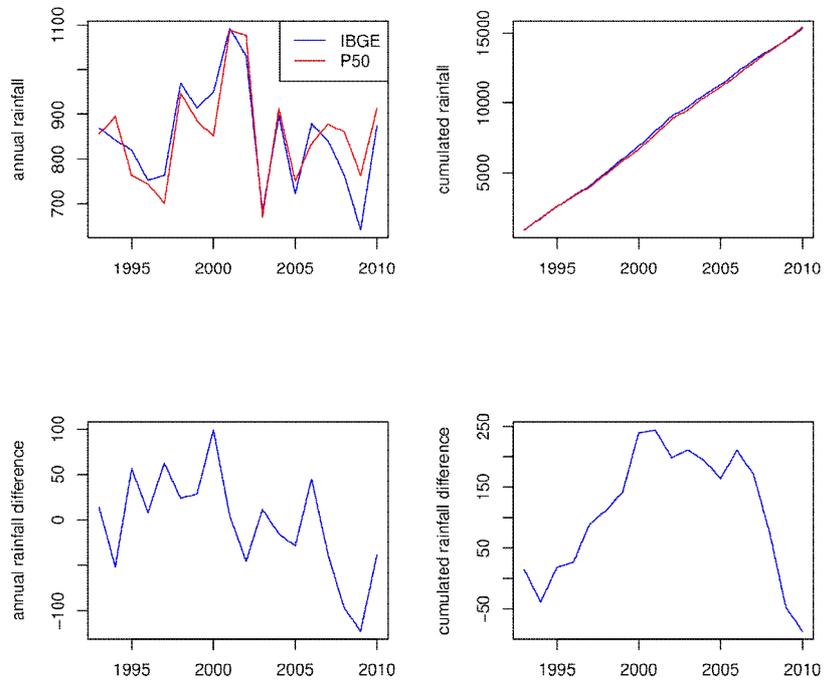
291 – Depot Communal Boitsfort



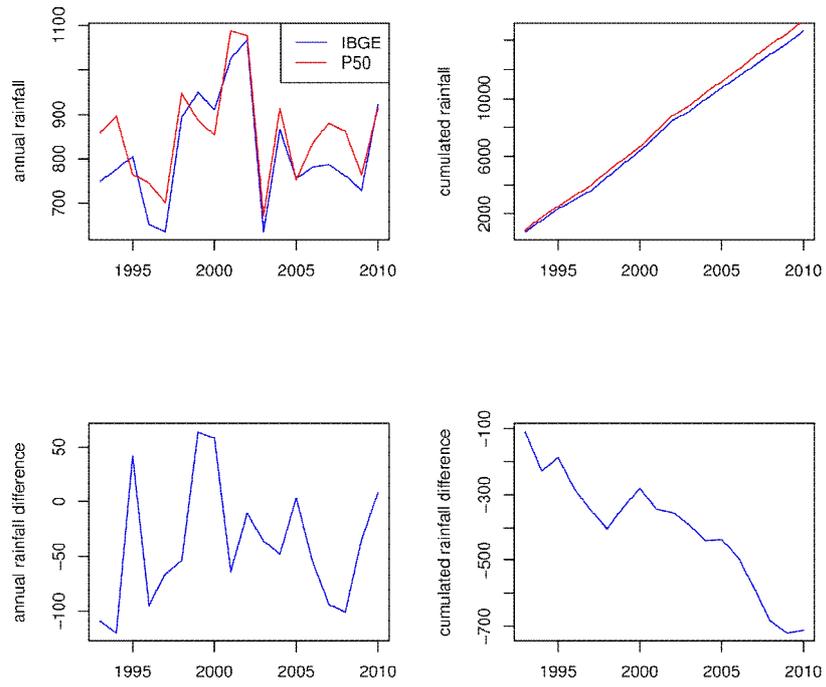
292 – Depot de Tram



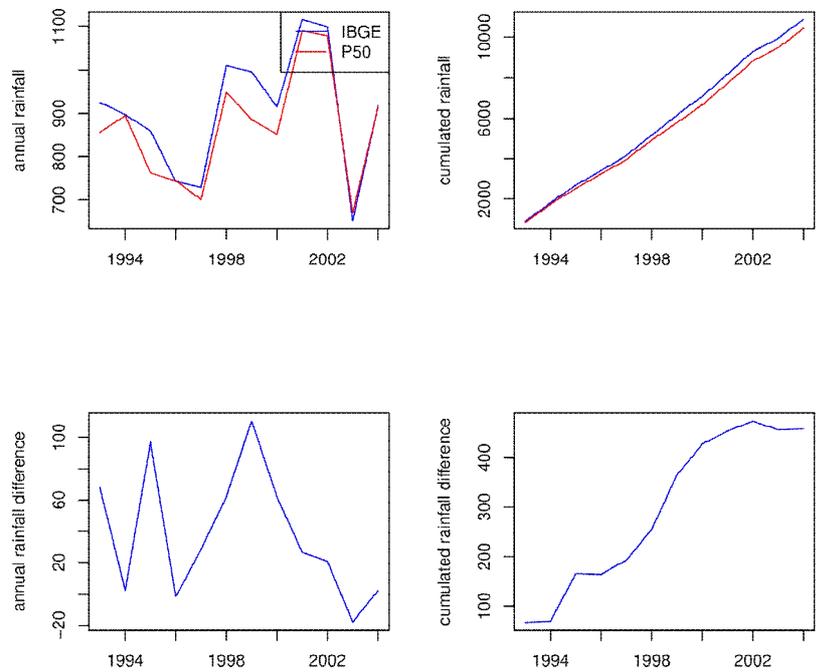
293 – Shopping Center



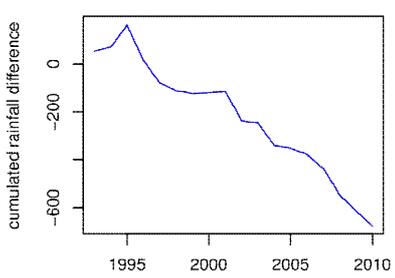
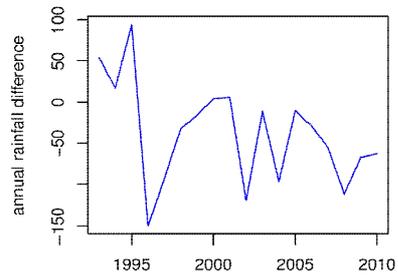
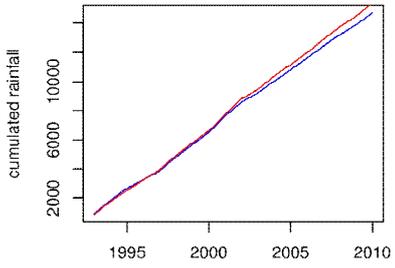
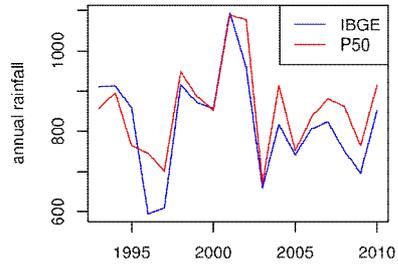
296 – Kinsendael



298 – Voets



299 – Ganshoren



Annexe 4

Cartes des précipitations en Région bruxelloise

(cf. chapitre 5, point 5.5 : *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 01/01/1999-31/12/2010. 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 (décembre 1998 – février 2010).

Onze stations du réseau de l'IBGE ainsi que la station de l'IRM à Uccle ont été utilisées pour l'obtention des cartes (cf. **Figure 1**).

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).

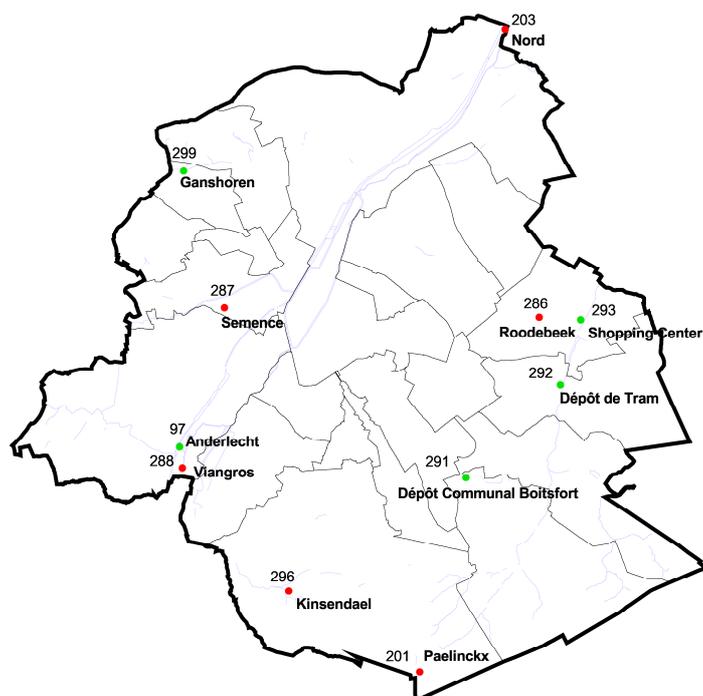


Figure 1. Les onze stations du réseau de l'IBGE retenues pour la confection des cartes. Les stations représentées en rouge sont de type GERU, celles en vert sont de type Précis Mécanique. Chaque station est labélisée par son nom et son code.

Les cartes sont obtenues à partir d'une climatologie sur la Région bruxelloise (cf. Table 3). Cette climatologie est construite en moyennant d'abord les données aux stations sur la période retenue.

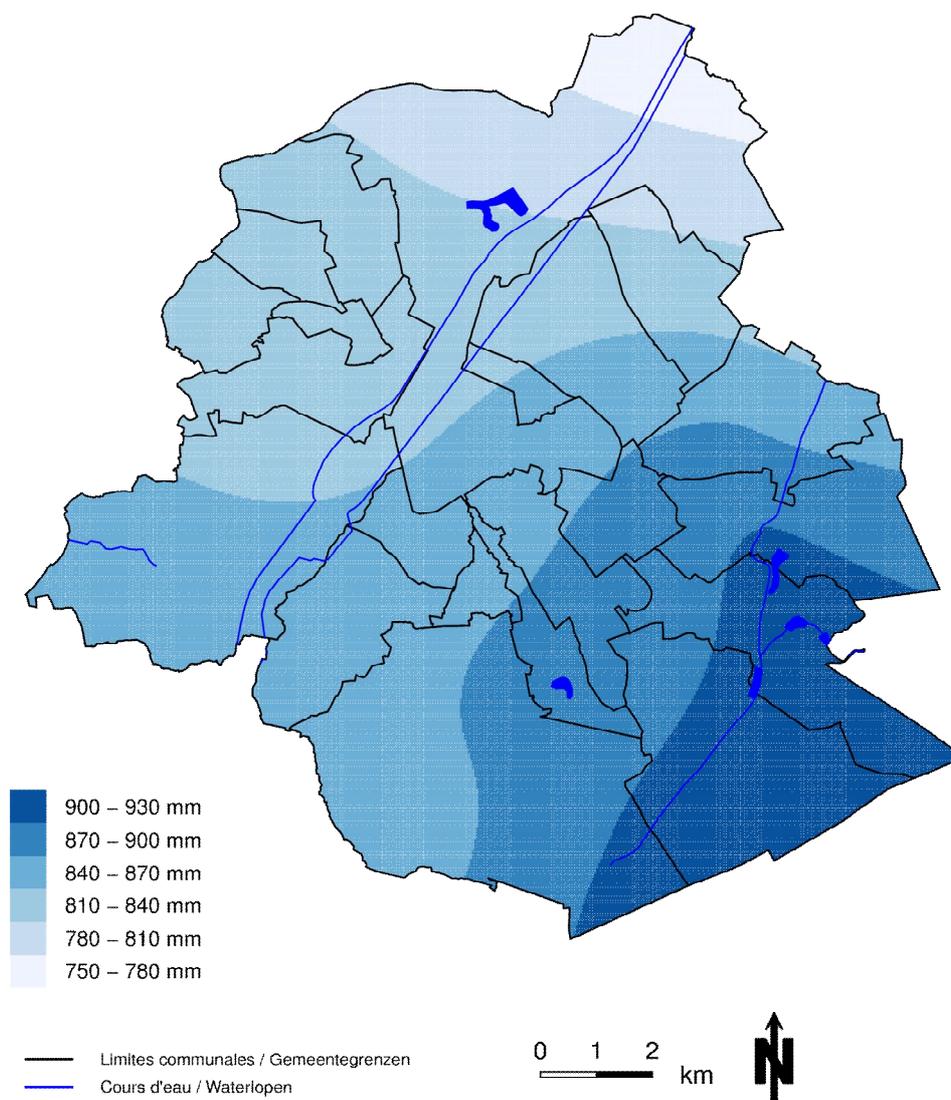
Table 3. Moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles sur la période 1999-2010 pour les 11 stations retenues pour la cartographie des précipitations moyennes en Région bruxelloise.

| code | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | hiver | printemps | été | automne | année |
|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|-------|-----------|-------|---------|-------|
| 97 | 80.2 | 75.4 | 71.1 | 47.5 | 59.3 | 51.3 | 87.2 | 89.7 | 60.1 | 72.1 | 78.3 | 81.5 | 240.3 | 178 | 228.2 | 210.4 | 853.8 |
| 201 | 78.9 | 79.8 | 68.8 | 48 | 60.4 | 57.2 | 86 | 103.6 | 72.3 | 79.1 | 80.6 | 83.6 | 244.2 | 177.2 | 246.9 | 231.8 | 898.3 |
| 203 | 65.8 | 64 | 59.5 | 40.4 | 54 | 48 | 71.2 | 91 | 55.4 | 60.6 | 71.1 | 73.2 | 203.8 | 153.9 | 210.2 | 186.9 | 754.2 |
| 286 | 77.8 | 77.8 | 66.6 | 48.9 | 59.9 | 51.9 | 89.6 | 91.4 | 63.8 | 70.9 | 82.2 | 86.3 | 241.7 | 175.4 | 232.9 | 216.8 | 867.2 |
| 287 | 71.7 | 72.4 | 67.9 | 41.9 | 63.4 | 49.5 | 84.4 | 89.9 | 59.6 | 66.6 | 76.8 | 80.9 | 226.6 | 173.2 | 223.8 | 202.9 | 825 |
| 288 | 77.3 | 75 | 69.4 | 48.3 | 58.6 | 55.5 | 90.3 | 89.9 | 60.8 | 72.6 | 78.7 | 83.2 | 237.2 | 176.3 | 235.7 | 212 | 859.6 |
| 291 | 80.9 | 80.4 | 72.9 | 48.7 | 64.5 | 55.5 | 84.8 | 93.7 | 61.7 | 71.6 | 81.2 | 89.3 | 252.3 | 186.1 | 234 | 214.4 | 885.2 |
| 292 | 77.5 | 79.4 | 73.6 | 52.7 | 65 | 55 | 93.2 | 92.1 | 67.9 | 73.1 | 81 | 86.5 | 245.3 | 191.4 | 240.2 | 221.9 | 897.1 |
| 293 | 73.9 | 75.2 | 67.9 | 51.7 | 63.2 | 53.2 | 90 | 89.4 | 61.8 | 70.8 | 78.2 | 82.6 | 231.9 | 182.9 | 232.6 | 210.7 | 857.9 |
| 296 | 73.7 | 72.2 | 63 | 46.6 | 63.7 | 57.2 | 83.3 | 97.1 | 63.5 | 72.8 | 75.3 | 80.2 | 227.4 | 173.3 | 237.6 | 211.5 | 848.7 |
| 299 | 72.8 | 70.1 | 64.9 | 44.4 | 62.4 | 50.7 | 86.6 | 88.1 | 61.4 | 66.3 | 78.9 | 80.5 | 223.9 | 171.8 | 225.4 | 206.4 | 827.1 |
| 2900 | 75.3 | 76.3 | 66 | 49.7 | 64.9 | 57.6 | 89.7 | 95.7 | 66.9 | 72.2 | 79.1 | 81.1 | 233.1 | 180.6 | 243 | 218.2 | 874.5 |

Les valeurs mentionnées sont donc des cumuls pour des années ou des saisons « moyennes ». 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.

Région de Bruxelles–Capitale
Précipitations annuelles

Brussels Hoofdstedelijk Gewest
Jaarlijkse Neerslag



Source: données pluviométriques issues du réseau de mesures Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2010

Bron : neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2010

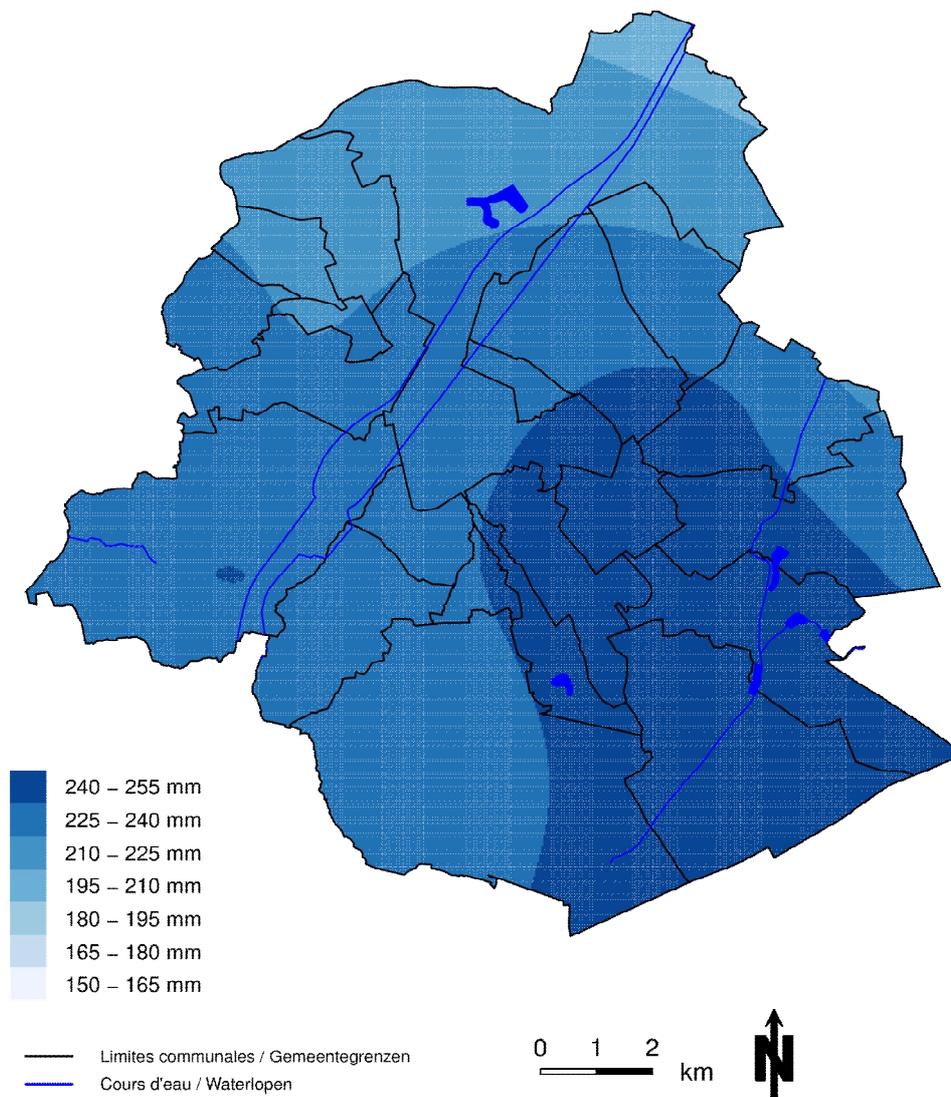
Bruxelles Environnement IBGE – Division Nature, Eau et Forêt
 Cartographie : IRM – juin 2014
 Réalisé avec Brussels URbIS © – Distribution & Copyright CIRB

Leefmilieu Brussel BIM – Afdeling Natuur, Water en Bos
 Cartografie : KMI – Juni 2014
 Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS © – Verdeling & Copyright CIBG



Région de Bruxelles-Capitale
Précipitations hivernales

Brussels Hoofdstedelijk Gewest
Winterneerslag



Source: données pluviométriques issues du réseau de mesures Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2010

Bron: neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2010

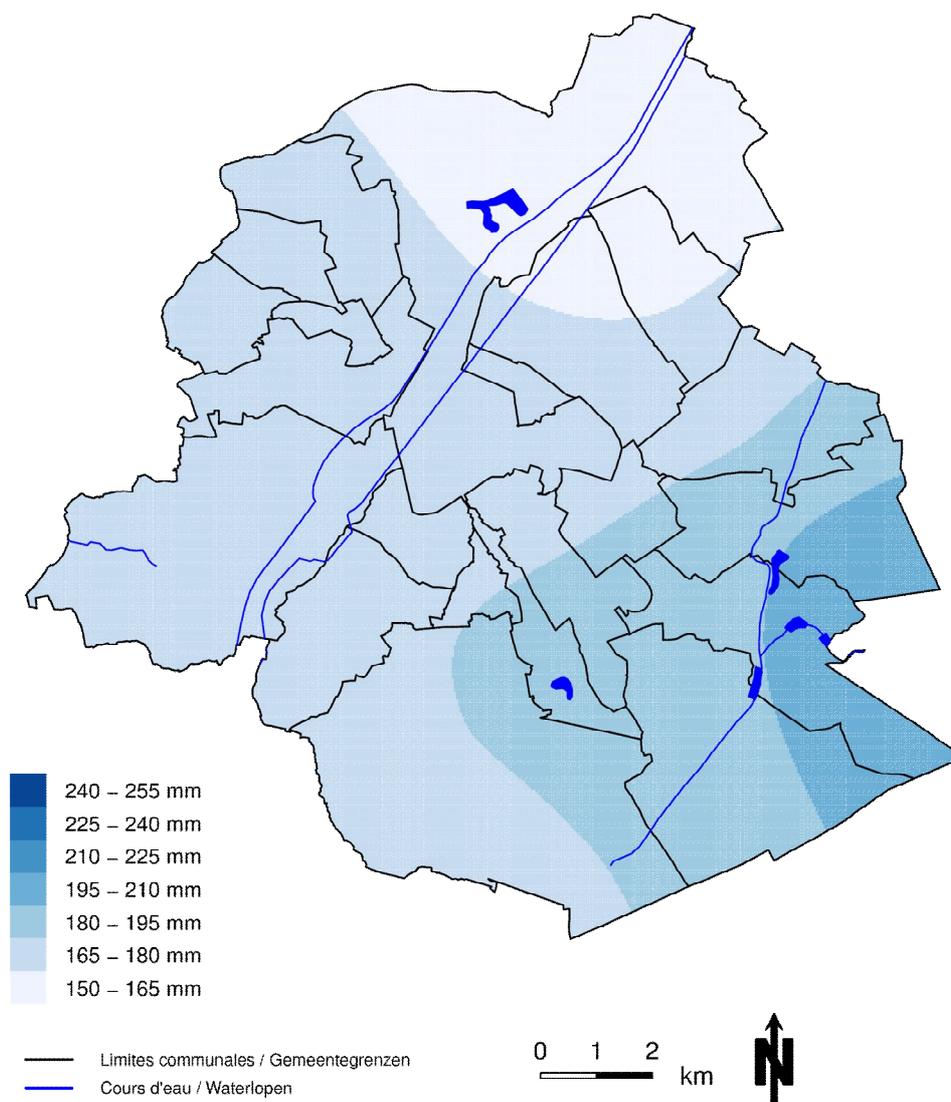
Bruxelles Environnement IBGE – Division Nature, Eau et Forêt
 Cartographie: IRM – juin 2014
 Réalisé avec Brussels URbIS © – Distribution & Copyright CIRB

Leefmilieu Brussel BIM – Afdeling Natuur, Water en Bos
 Cartografie: KMI – Juni 2014
 Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS © – Verdeling & Copyright CIBG



Région de Bruxelles-Capitale
Précipitations printanières

Brussels Hoofdstedelijk Gewest
Lenteneerslag



Source: données pluviométriques issues du réseau de mesures Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2010

Bron : neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2010

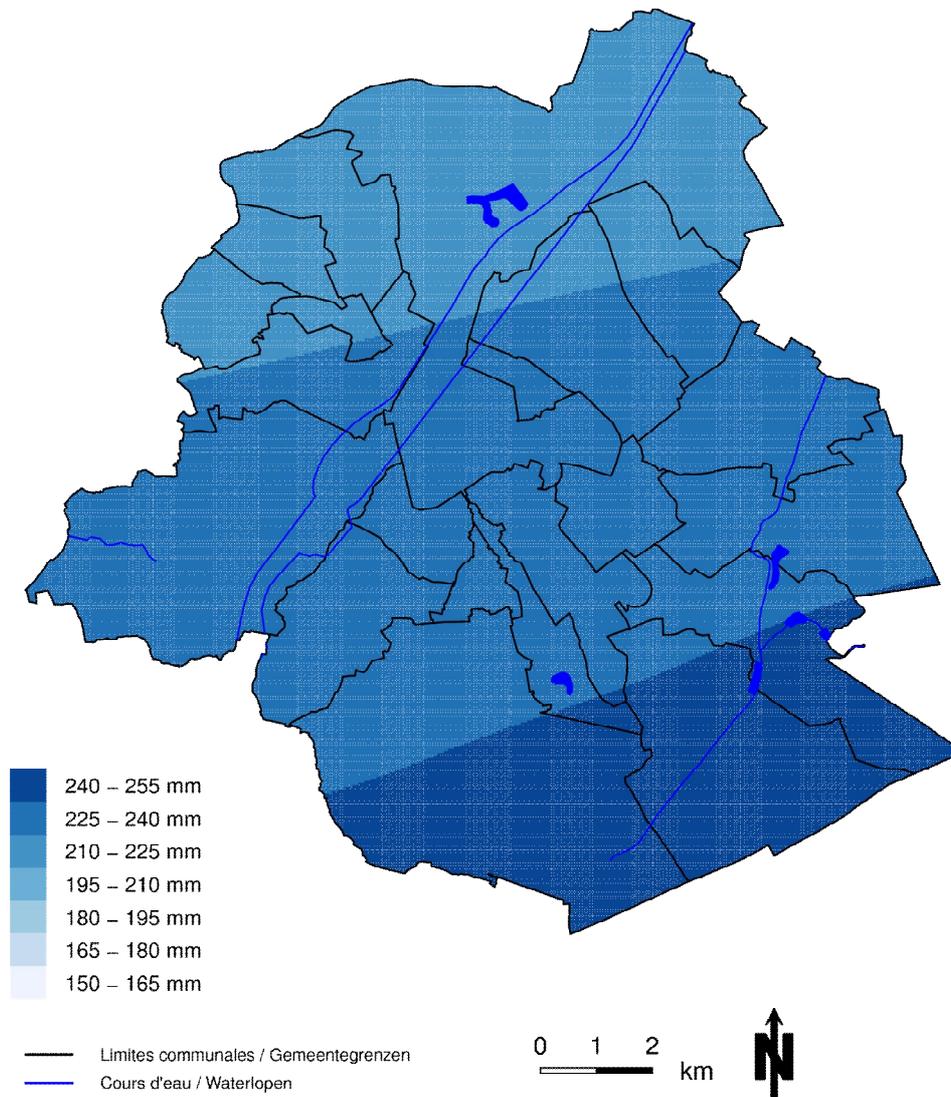
Bruxelles Environnement IBGE – Division Nature, Eau et Forêt
 Cartographie : IRM – juin 2014
 Réalisé avec Brussels URbIS © – Distribution & Copyright CIRB

Leefmilieu Brussel BIM – Afdeling Natuur, Water en Bos
 Cartografie : KMI – Juni 2014
 Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS © – Verdeling & Copyright CIBG



Région de Bruxelles-Capitale
Précipitations estivales

Brussels Hoofdstedelijk Gewest
Zomerneerslag



Source: données pluviométriques issues du réseau de mesures Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2010

Bron : neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2010

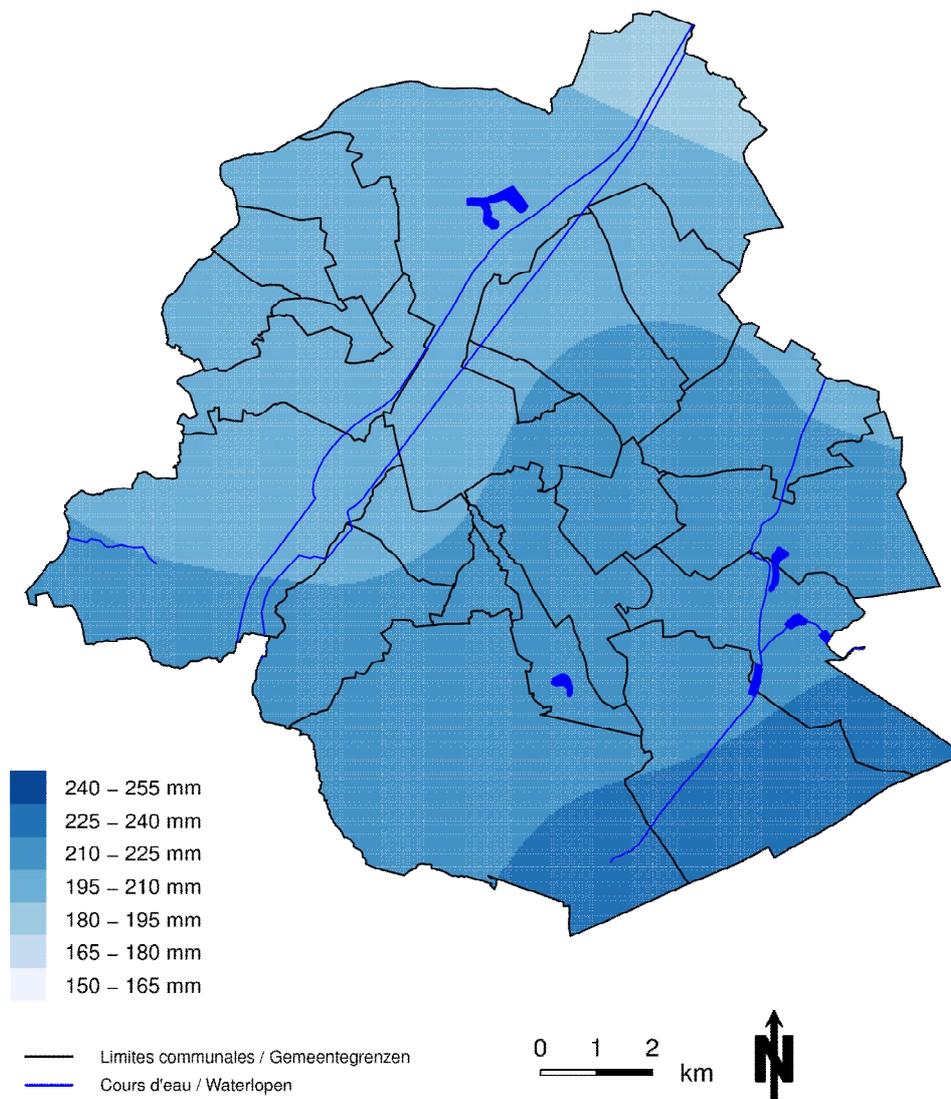
Bruxelles Environnement IBGE – Division Nature, Eau et Forêt
 Cartographie : IRM – juin 2014
 Réalisé avec Brussels URbIS © – Distribution & Copyright CIRB

Leefmilieu Brussel BIM – Afdeling Natuur, Water en Bos
 Cartografie : KMI – Juni 2014
 Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS © – Verdeling & Copyright CIBG



Région de Bruxelles-Capitale
Précipitations automnales

Brussels Hoofdstedelijk Gewest
Herfstneerslag



Source: données pluviométriques issues du réseau de mesures Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2010

Bron : neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2010

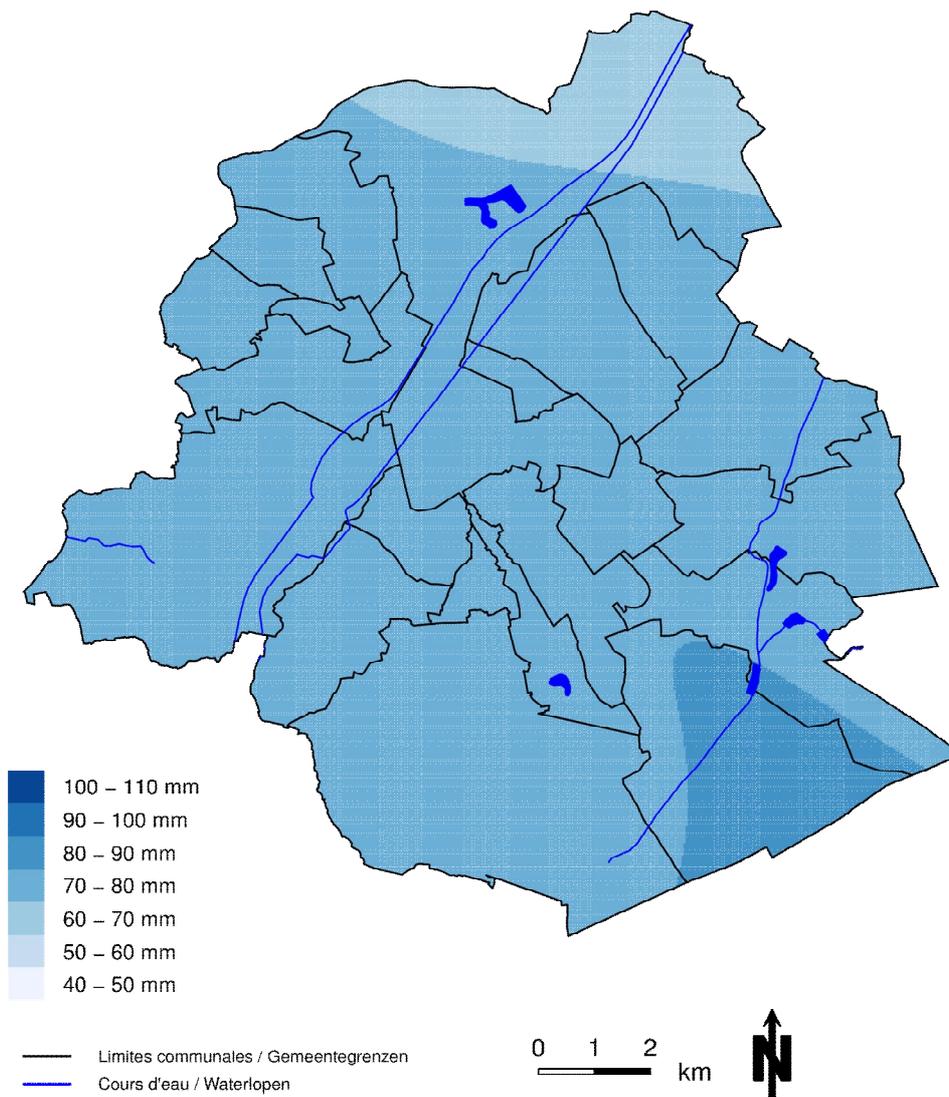
Bruxelles Environnement IBGE – Division Nature, Eau et Forêt
 Cartographie : IRM – juin 2014
 Réalisé avec Brussels URbIS © – Distribution & Copyright CIRB

Leefmilieu Brussel BIM – Afdeling Natuur, Water en Bos
 Cartografie : KMI – Juni 2014
 Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS © – Verdeling & Copyright CIBG



Région de Bruxelles–Capitale
Précipitations de janvier

Brussels Hoofdstedelijk Gewest
Neerslag van januari



Source: données pluviométriques issues du réseau de mesures Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2010

Bron: neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2010

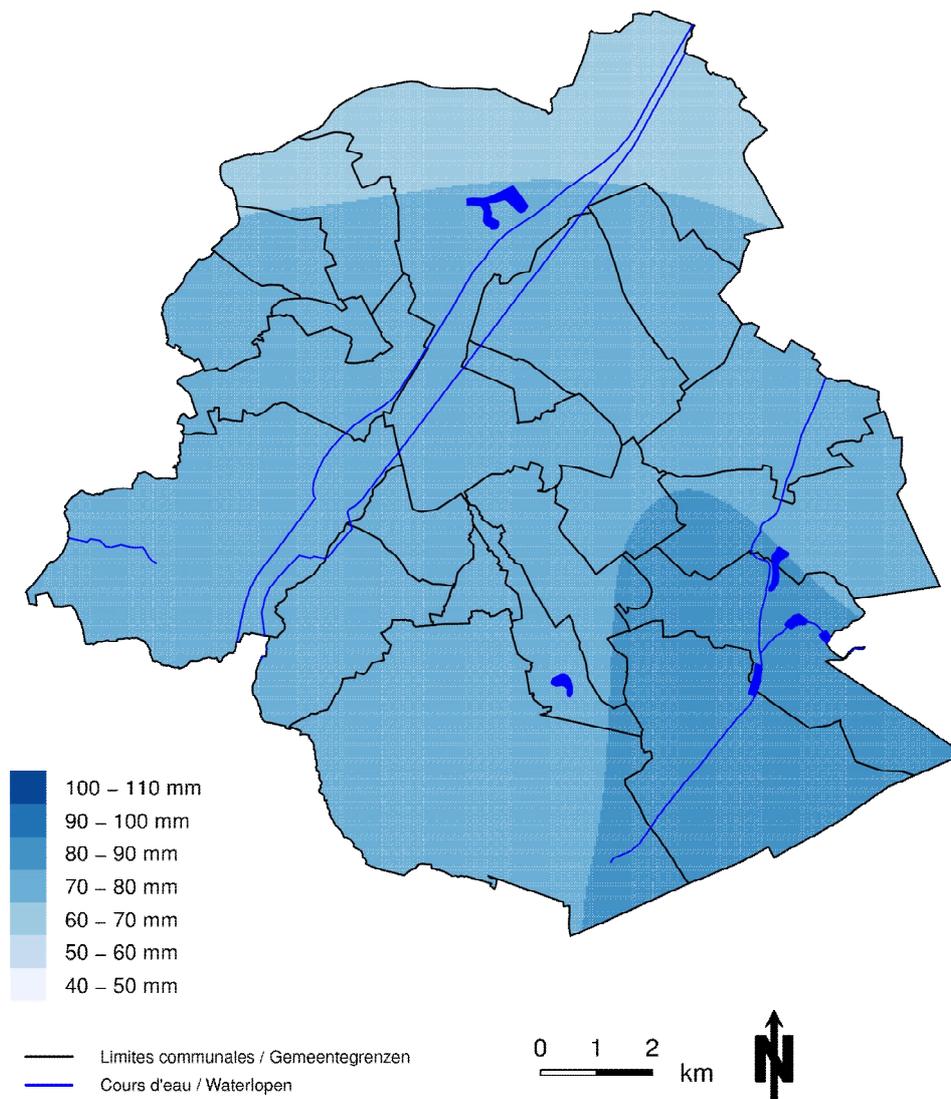
Bruxelles Environnement IBGE – Division Nature, Eau et Forêt
 Cartographie: IRM – juin 2014
 Réalisé avec Brussels URbIS © – Distribution & Copyright CIRB

Leefmilieu Brussel BIM – Afdeling Natuur, Water en Bos
 Cartografie: KMI – Juni 2014
 Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS © – Verdeling & Copyright CIBG



Région de Bruxelles-Capitale
Précipitations de février

Brussels Hoofdstedelijk Gewest
Neerslag van februari



Source: données pluviométriques issues du réseau de mesures Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2010

Bron : neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2010

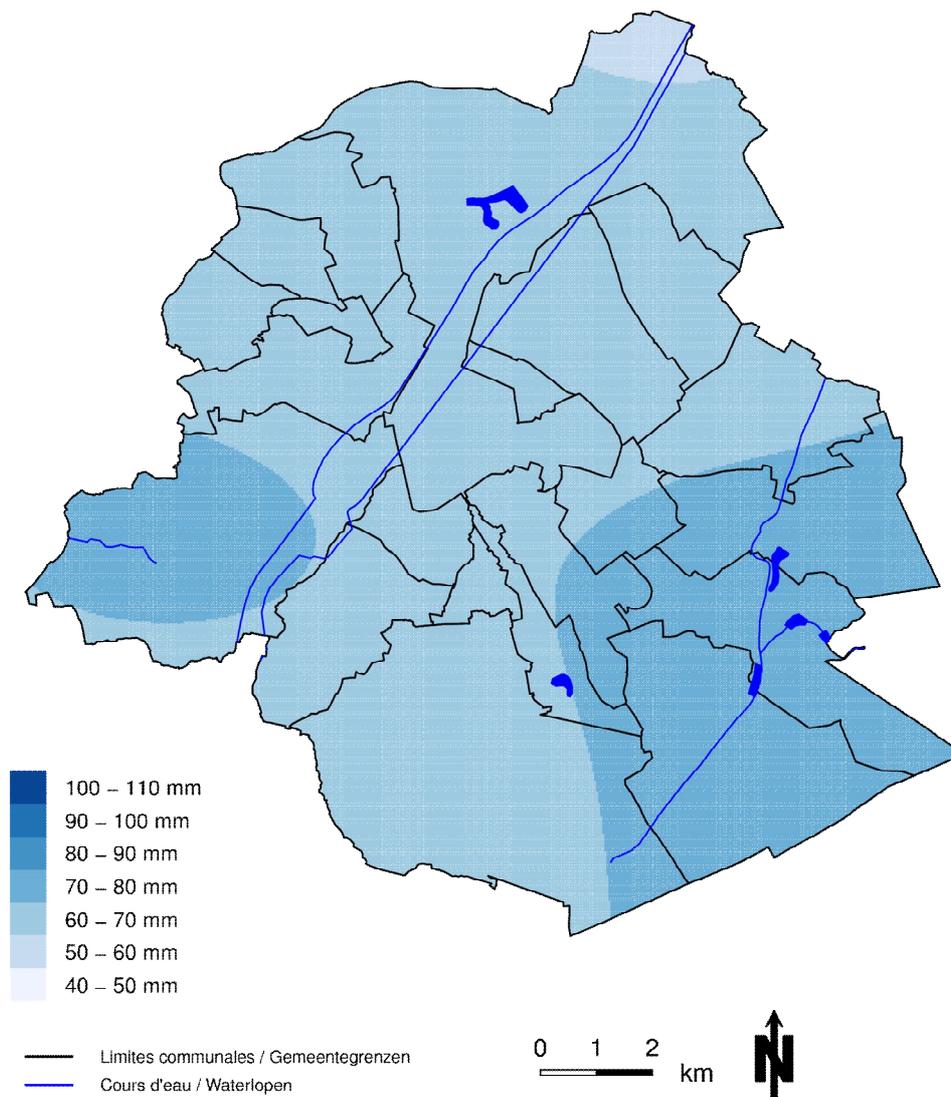
Bruxelles Environnement IBGE – Division Nature, Eau et Forêt
 Cartographie : IRM – juin 2014
 Réalisé avec Brussels URbIS © – Distribution & Copyright CIRB

Leefmilieu Brussel BIM – Afdeling Natuur, Water en Bos
 Cartografie : KMI – Juni 2014
 Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS © – Verdeling & Copyright CIBG



Région de Bruxelles-Capitale
Précipitations de mars

Brussels Hoofdstedelijk Gewest
Neerslag van maart



Source: données pluviométriques issues du réseau de mesures Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2010

Bron : neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2010

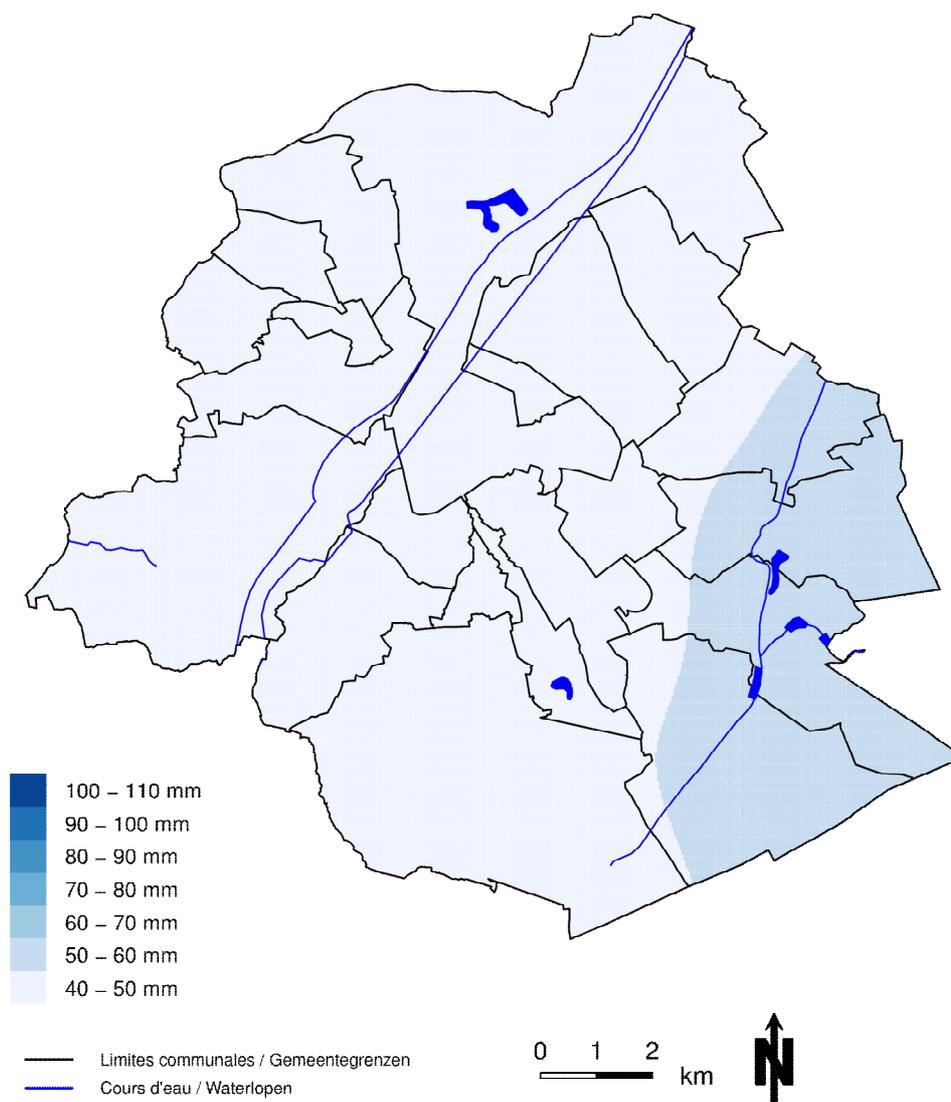
Bruxelles Environnement IBGE – Division Nature, Eau et Forêt
 Cartographie : IRM – juin 2014
 Réalisé avec Brussels URbIS © – Distribution & Copyright CIRB

Leefmilieu Brussel BIM – Afdeling Natuur, Water en Bos
 Cartografie : KMI – Juni 2014
 Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS © – Verdeling & Copyright CIBG



Région de Bruxelles-Capitale
Précipitations de avril

Brussels Hoofdstedelijk Gewest
Neerslag van april



Source: données pluviométriques issues du réseau de mesures Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2010

Bron : neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2010

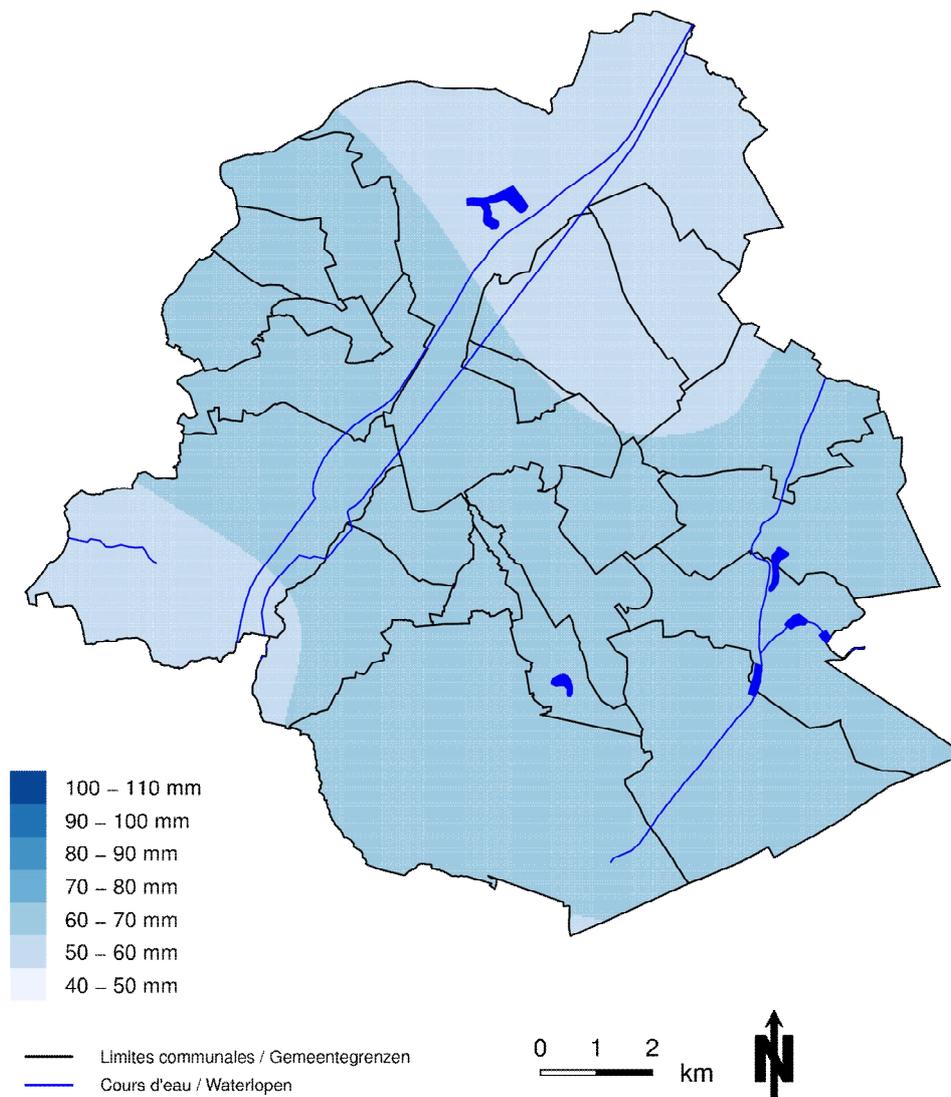
Bruxelles Environnement IBGE – Division Nature, Eau et Forêt
Cartographie : IRM – juin 2014
Réalisé avec Brussels URbIS © – Distribution & Copyright CIRB

Leefmilieu Brussel BIM – Afdeling Natuur, Water en Bos
Cartografie : KMI – Juni 2014
Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS © – Verdeling & Copyright CIBG



Région de Bruxelles-Capitale
Précipitations de mai

Brussels Hoofdstedelijk Gewest
Neerslag van mei



Source: données pluviométriques issues du réseau de mesures Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2010

Bron : neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2010

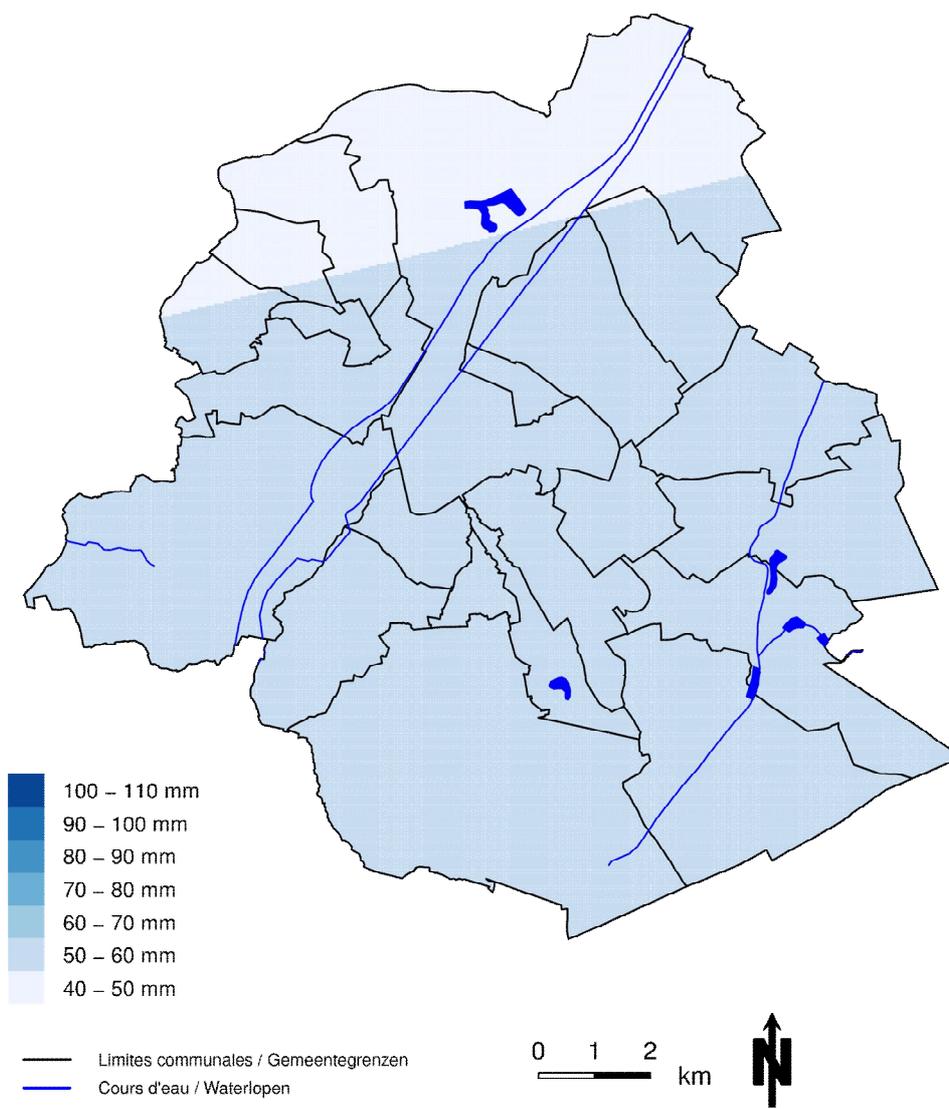
Bruxelles Environnement IBGE – Division Nature, Eau et Forêt
 Cartographie : IRM – juin 2014
 Réalisé avec Brussels URbIS © – Distribution & Copyright CIRB

Leefmilieu Brussel BIM – Afdeling Natuur, Water en Bos
 Cartografie : KMI – Juni 2014
 Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS © – Verdeling & Copyright CIBG



Région de Bruxelles-Capitale
Précipitations de juin

Brussels Hoofdstedelijk Gewest
Neerslag van juni



Source: données pluviométriques issues du réseau de mesures Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2010

Bron : neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2010

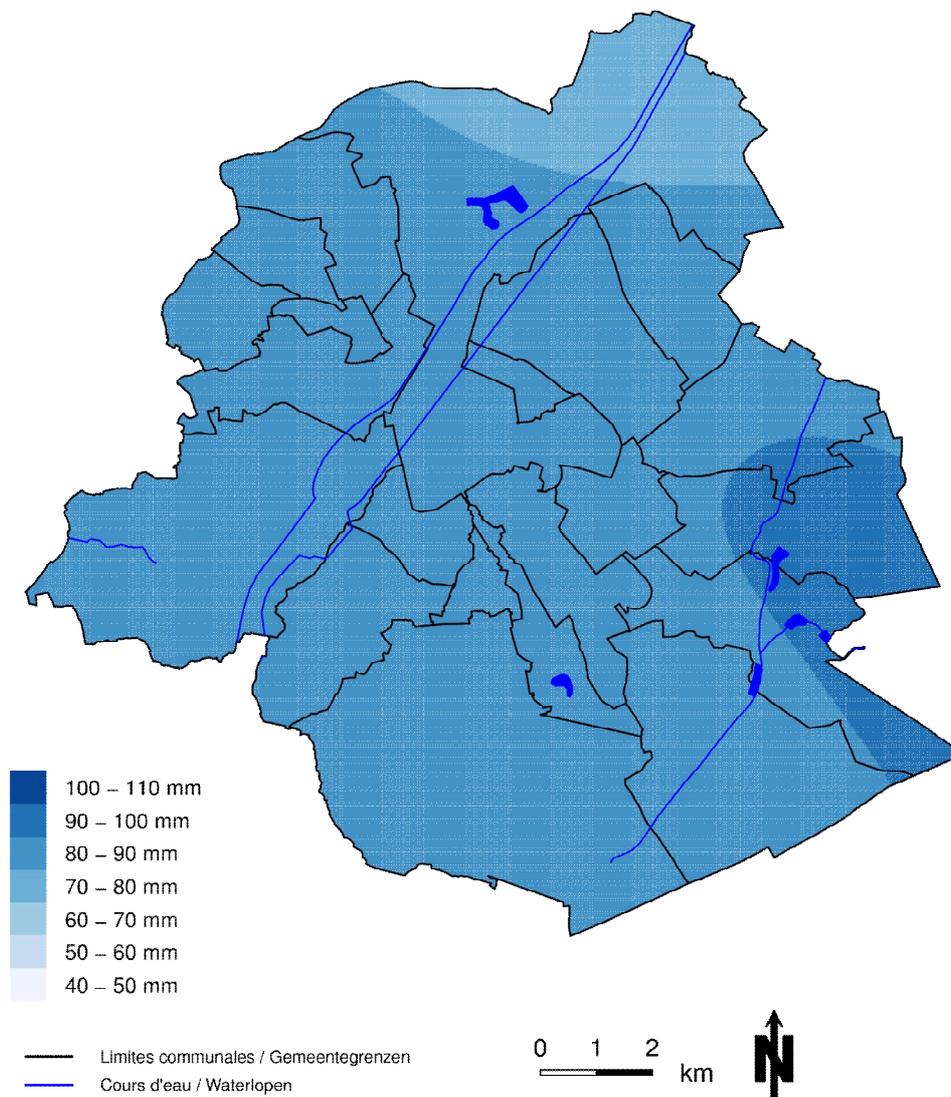
Bruxelles Environnement IBGE – Division Nature, Eau et Forêt
 Cartographie : IRM – juin 2014
 Réalisé avec Brussels URbIS © – Distribution & Copyright CIRB

Leefmilieu Brussel BIM – Afdeling Natuur, Water en Bos
 Cartografie : KMI – Juni 2014
 Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS © – Verdeling & Copyright CIBG



Région de Bruxelles-Capitale
Précipitations de juillet

Brussels Hoofdstedelijk Gewest
Neerslag van juli



Source: données pluviométriques issues du réseau de mesures Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2010

Bron : neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2010

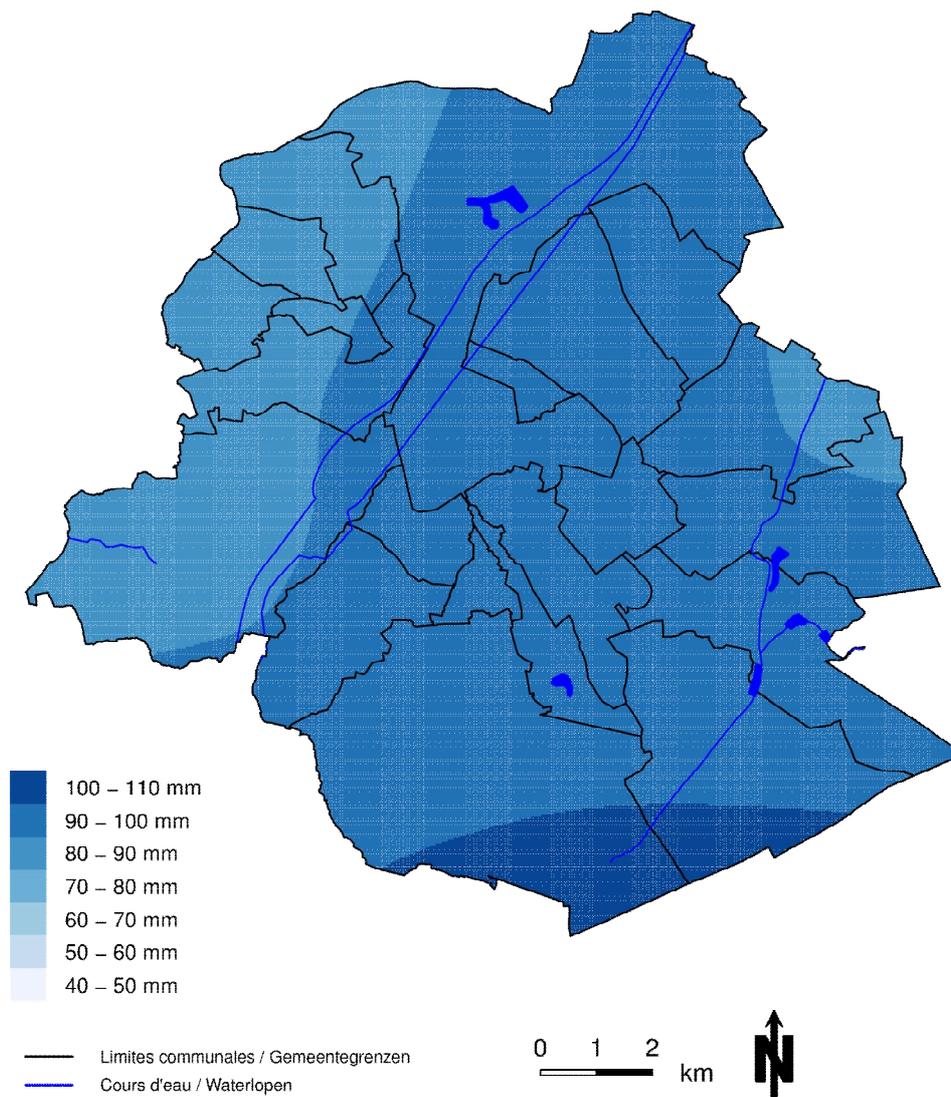
Bruxelles Environnement IBGE – Division Nature, Eau et Forêt
 Cartographie : IRM – juin 2014
 Réalisé avec Brussels URbIS © – Distribution & Copyright CIRB

Leefmilieu Brussel BIM – Afdeling Natuur, Water en Bos
 Cartografie : KMI – Juni 2014
 Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS © – Verdeling & Copyright CIBG



Région de Bruxelles-Capitale
Précipitations de août

Brussels Hoofdstedelijk Gewest
Neerslag van augustus



Source: données pluviométriques issues du réseau de mesures Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2010

Bron : neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2010

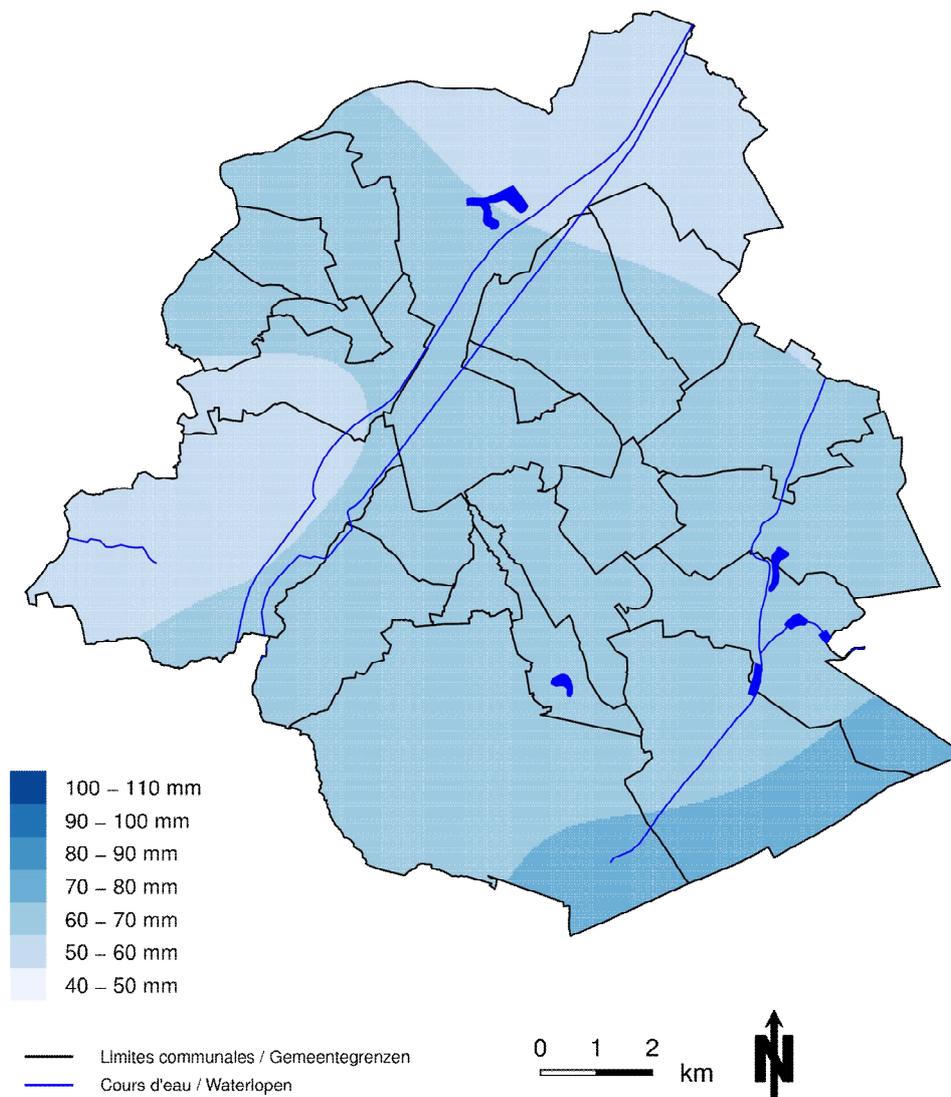
Bruxelles Environnement IBGE – Division Nature, Eau et Forêt
 Cartographie : IRM – juin 2014
 Réalisé avec Brussels URbIS © – Distribution & Copyright CIRB

Leefmilieu Brussel BIM – Afdeling Natuur, Water en Bos
 Cartografie : KMI – Juni 2014
 Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS © – Verdeling & Copyright CIBG



Région de Bruxelles-Capitale
Précipitations de septembre

Brussels Hoofdstedelijk Gewest
Neerslag van september



Source: données pluviométriques issues du réseau de mesures Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2010

Bron : neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2010

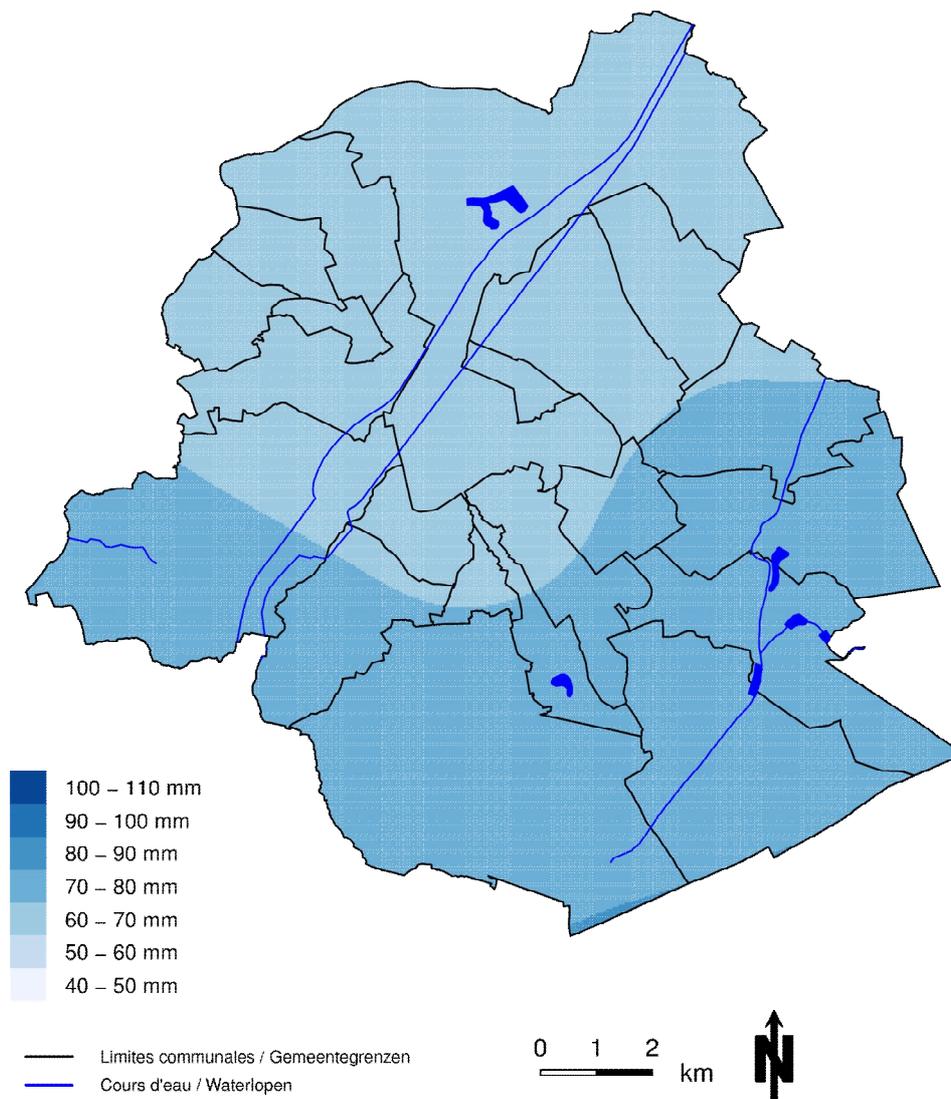
Bruxelles Environnement IBGE – Division Nature, Eau et Forêt
 Cartographie : IRM – juin 2014
 Réalisé avec Brussels URbIS © – Distribution & Copyright CIRB

Leefmilieu Brussel BIM – Afdeling Natuur, Water en Bos
 Cartografie : KMI – Juni 2014
 Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS © – Verdeling & Copyright CIBG



Région de Bruxelles-Capitale
Précipitations de octobre

Brussels Hoofdstedelijk Gewest
Neerslag van oktober



Source: données pluviométriques issues du réseau de mesures Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2010

Bron : neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2010

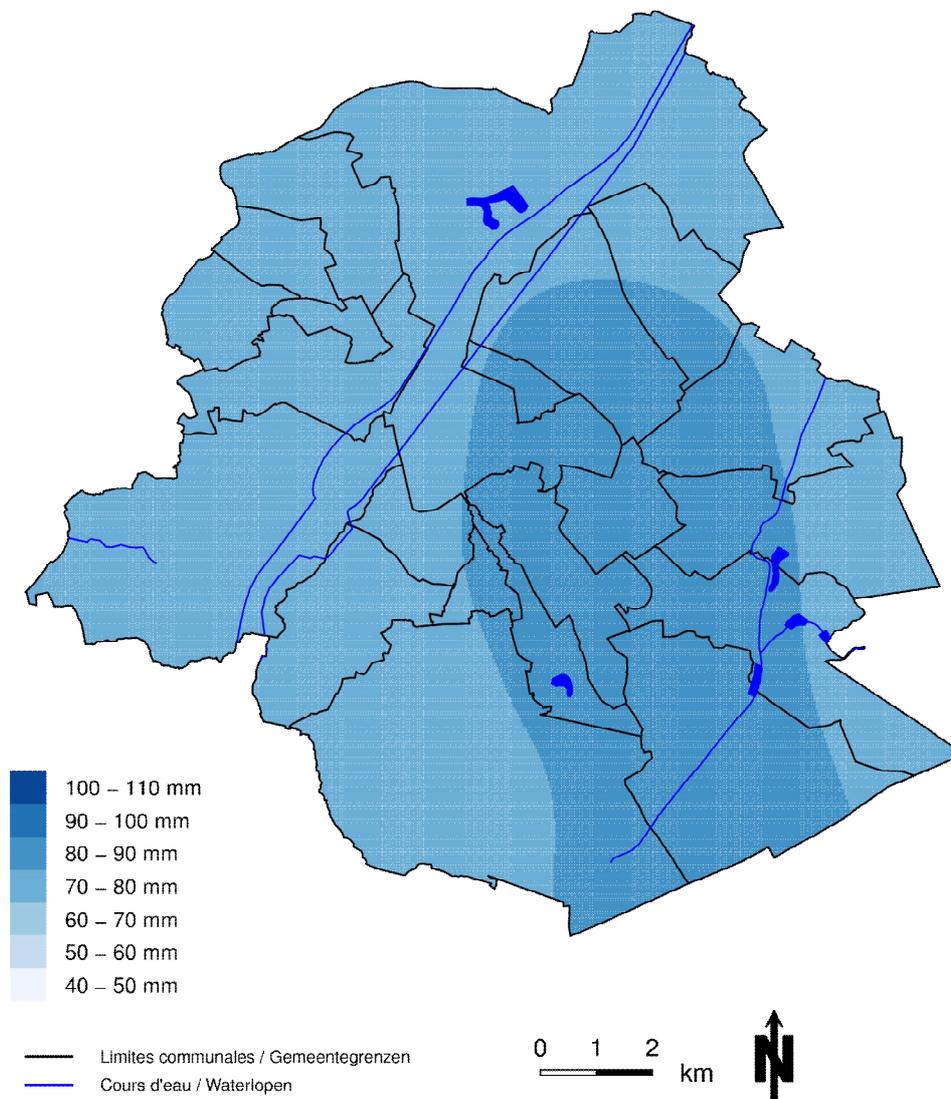
Bruxelles Environnement IBGE – Division Nature, Eau et Forêt
 Cartographie : IRM – juin 2014
 Réalisé avec Brussels URbIS © – Distribution & Copyright CIRB

Leefmilieu Brussel BIM – Afdeling Natuur, Water en Bos
 Cartografie : KMI – Juni 2014
 Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS © – Verdeling & Copyright CIBG



Région de Bruxelles-Capitale
Précipitations de novembre

Brussels Hoofdstedelijk Gewest
Neerslag van november



Source: données pluviométriques issues du réseau de mesures Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2010

Bron : neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2010

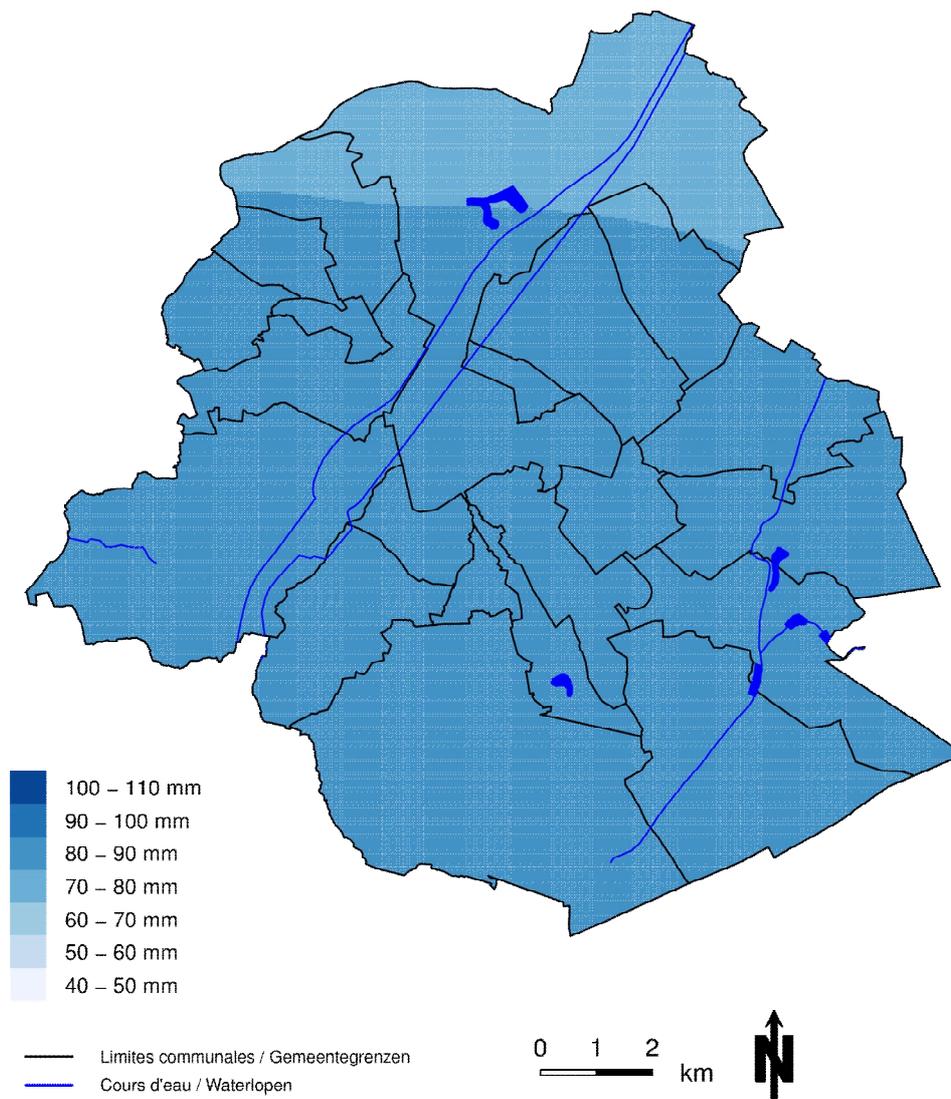
Bruxelles Environnement IBGE – Division Nature, Eau et Forêt
 Cartographie : IRM – juin 2014
 Réalisé avec Brussels URbIS © – Distribution & Copyright CIRB

Leefmilieu Brussel BIM – Afdeling Natuur, Water en Bos
 Cartografie : KMI – Juni 2014
 Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS © – Verdeling & Copyright CIBG



Région de Bruxelles-Capitale
Précipitations de décembre

Brussels Hoofdstedelijk Gewest
Neerslag van december



Source: données pluviométriques issues du réseau de mesures Bruxelles Environnement IBGE de 1999 à 2010

Bron : neerslaggegevens van het meetnet van Leefmilieu Brussel BIM van 1999 tot 2010

Bruxelles Environnement IBGE – Division Nature, Eau et Forêt
 Cartographie : IRM – juin 2014
 Réalisé avec Brussels URbIS © – Distribution & Copyright CIRB

Leefmilieu Brussel BIM – Afdeling Natuur, Water en Bos
 Cartografie : KMI – Juni 2014
 Verwezenlijkt door middel van Brussels URbIS © – Verdeling & Copyright CIBG

