



Geo³-Hydrogéologie – UR Urban & Environmental Engineering
(Département d'Architecture, Géologie, Environnement & Constructions)
Université de Liège

Bruxelles Environnement - Leefmilieu Brussel,
Brussels Capital Region, Belgium

Étude de caractérisation des eaux pluviales en Région de Bruxelles-Capitale, vulnérabilité intrinsèque du système aquifère phréatique par rapport au transfert de la pollution de surface et estimation de ses paramètres hydrodispersifs

Délivrable DOI : Caractérisation des eaux pluviales

Décembre 2023

Coordinateur du projet (ULiège) :

Dr Ir. Serge Brouyère

Partenaires scientifiques :

Caroline Thomas, Ir. Victoria Collignon, Dr Ir. Philippe Orban

Rédaction :

Caroline Thomas, Serge Brouyère, Philippe Orban

Table des matières

Résumé.....	4
Summary	6
Samenvatting.....	7
1. Introduction.....	9
2. Analyses des eaux de ruissellement de voiries et de toitures échantillonnées en Région de Bruxelles-Capitale sur la période de 2017 à 2020.....	11
2.1. Description des données.....	11
2.1.1. Sites d'échantillonnages.....	11
2.1.2. Description des événements pluvieux	12
2.1.3. Modalité d'échantillonnage	14
2.1.4. Polluants analysés	14
2.2. Analyse des données.....	15
2.2.1. Polluants quantifiés dans les eaux de ruissellement en RBC	15
2.2.2. Valeurs atypiques	21
2.2.3. Variations temporelles des concentrations mesurées dans les sites échantillonnés plusieurs fois	25
2.2.4. Statistiques descriptives et box-plots.....	28
2.2.5. Comparaison avec les données WEISS	39
2.2.6. Corrélation entre les variables	40
2.2.7. Analyse en composantes principales	41
2.2.8. Matrices auto-organisantes ou Self-Organizing-Map (SOMs).....	51
2.3. Récapitulatif sur les données acquises sur les eaux de ruissellement en RBC.....	57
3. Recherche bibliographique sur la qualité des eaux de ruissellement.....	58
3.1. Description générale de la recherche bibliographique	59
3.2. Concentrations en polluants observées dans différents types d'eau	61
3.2.1. Eaux de pluie atmosphérique sans ruissellement.....	61
3.2.2. Eaux de ruissellement provenant de toitures	63
3.2.3. Eaux de ruissellement provenant de voiries urbaines	66
3.2.4. Eaux de ruissellement provenant d'autres types de surface	73
3.3. Conclusions de la synthèse bibliographique et perspectives.....	77
4. Bibliographie.....	78
Annexe 1.....	81
Annexe 2.....	82

Annexe 3 : Données Weiss	86
A.3.1. Description de l’outil WEISS.....	86
A.3.2. Comparaison des données WEISS et les données récoltées sur les eaux de ruissellement à Bruxelles	87
A.3.2.1. Cuivre	87
A.3.2.2. Zinc	88
A.3.2.3. Acénaphylène	91
A.3.2.4. Pyrène	93
A.3.2.5. Glyphosate	95
A.3.3. Conclusion.....	98
Annexe 4 : Ressources consultées dans le cadre de la recherche bibliographique	99

Résumé

Le présent rapport décrit les travaux portant sur le volet 1 de l'étude de caractérisation des eaux pluviales en Région de Bruxelles-Capitale, vulnérabilité intrinsèque du système aquifère phréatique par rapport au transfert de la pollution de surface et estimation de ses paramètres hydrodispersifs.

Ces travaux ont consisté en l'interprétation des résultats des analyses chimiques réalisées entre 2017 et 2020 par Bruxelles Environnement sur 74 échantillons d'eau de ruissellement prélevés sur 27 sites au cours de 14 événements pluvieux. Les échantillons prélevés provenaient principalement des voiries avec différentes intensités de trafic (67 échantillons) mais également de toitures (4 échantillons) ou de sites ferroviaires (3 échantillons). Parmi les 233 paramètres analysés, ceux qui ont été fréquemment quantifiés et qui dépassent les normes sont les HAP, les métaux, les éléments majeurs et les paramètres physico-chimiques, les huiles minérales, le toluène, le phénol et des pesticides (le glyphosate, l'AMPA et le diuron). Des statistiques sur les concentrations ont été calculées pour l'ensemble du jeu de données puis par types de surfaces de ruissellement afin d'identifier les différences existantes entre les eaux de ruissellement provenant des différentes catégories de site d'échantillonnage.

Les concentrations en différents polluants dans les eaux souterraines ont également été comparées avec les données WEISS « Water Emission Inventory Support System, 2014 » afin d'essayer de trouver l'origine des polluants retrouvés dans les eaux de ruissellement. Même si les données de WEISS sont difficiles à comparer à celles qui sont mesurées dans les eaux de ruissellement, elles ont cependant inspiré différentes variables explicatives de la composition chimique des eaux de ruissellement en RBC, la variable trafic, la variable zone industrielle, la variable surface des bâtiments, la densité de population par quartier, la variable voie de tram.

Des analyses statistiques multivariées ont été réalisées afin d'identifier les corrélations existantes entre les concentrations, les caractéristiques des événements pluvieux et les variables explicatives dérivées de WEISS. Ils ont permis de montrer que le contexte (voiries, toitures, sites ferroviaires), la densité du trafic, les caractéristiques des événements pluvieux (hauteur, durée, intensité, périodes de temps sec), le salage des routes et/ou les conditions hivernales (gel/neige) influencent la composition chimique des eaux de ruissellement.

Les travaux ont également consisté en une recherche bibliographique visant à caractériser les concentrations en polluants dans les eaux de ruissellement sur différents types de surface en milieu urbain. La plupart des études consultées ne portent généralement que sur un nombre limité de polluants généralement les matières en suspension, quelques métaux, différentes formes de l'azote et des phosphates, la DBO et la DCO, des HAP ou hydrocarbures.

La comparaison des résultats des analyses réalisées par Bruxelles Environnement montre que les concentrations mesurées sont du même ordre de grandeur que celles mentionnées dans la littérature. La qualité des eaux de ruissellement sur les toits et voiries de Bruxelles est donc, pour les paramètres pour lesquels la comparaison a été possible, globalement comparable à celles observées dans d'autres régions ayant un contexte climatique, socio-économique semblables. La recherche bibliographique a également permis de fournir des ordres de grandeur de concentrations pour différents paramètres dans des eaux de ruissellement sur des surfaces non étudiées par Bruxelles Environnement (différents types de toit, des cours, des zones piétonnes et des parkings) et des indications quant aux paramètres qui devraient être

intégrés dans des futures campagne d'échantillonnage (notamment, les paramètres microbiologiques, l'azote organique, les produits de traitement de toitures, les polluants émergeants (perfluorés, ...).

Summary

This report describes the work carried out on part 1 of the "Study on the characterization of rainwater in the Brussels-Capital Region, intrinsic vulnerability of the phreatic aquifer system to the transfer of surface pollution and its hydrodispersive parameters".

This work involved interpreting the results of chemical analyses carried out between 2017 and 2020 by Brussels-Environment on 74 runoff water samples taken from 27 sites during 14 rainfall events. The samples taken came mainly from roads with different traffic intensities (67 samples), but also from roofs (4 samples) and railway sites (3 samples). Of the 233 parameters analyzed, those frequently quantified and exceeding standards were PAHs, metals, major elements and physicochemical parameters, mineral oils, toluene, phenol, and pesticides (glyphosate, AMPA, and diuron). Statistics on the concentration data were calculated for the dataset as a whole and then by runoff surface type, to identify differences between runoff from different sampling site categories.

Concentrations of various pollutants in groundwater were also compared with WEISS "Water Emission Inventory Support System, 2014" data, in an attempt to identify the origin of pollutants found in runoff. Although WEISS data are difficult to compare with those measured in runoff water, they did inspire various explanatory variables for the chemical composition of runoff water in the Brussels-Capital Region (BCR): the traffic variable, the industrial zone variable, the building surface variable, the population density per district, and the tramway route variable.

Multivariate statistical analyses were carried out to identify correlations between concentrations, rainfall event characteristics, and explanatory variables derived from WEISS. They showed that the context (roads, roofs, railway sites), traffic density, rainfall event characteristics (height, duration, intensity, dry weather period), road salting and/or winter conditions (frost/snow) influence the chemical composition of runoff water.

The work also involved a literature search with the objective to characterize pollutant concentrations in runoff water on different types of surfaces in an urban environment. Most of the studies consulted focused on a limited number of pollutants, generally suspended solids, a few metals, various forms of nitrogen and phosphates, BOD and COD, PAHs, or hydrocarbons.

A comparison of the results of the analyses carried out by Brussels-Environment shows that the concentrations measured are of the same order of magnitude as those reported in the literature. The quality of runoff from roofs and roads in Brussels is therefore, for the parameters for which comparison was possible, broadly comparable to those observed in other regions with a similar climatic and socio-economic context. The literature search also provided orders of magnitude for concentrations of various parameters in runoff water from surfaces not studied by Brussels-Environment (different types of roofs, courtyards, pedestrian areas, and parking lots). This has also indicated which parameters should be included in future sampling campaigns (in particular, microbiological parameters, organic nitrogen, roof treatment products, emerging pollutants (perfluorinated compounds, etc.).

Samenvatting

Dit rapport beschrijft de uitgevoerde werkzaamheden voor deel 1 van de studie over de karakterisering van het regenwater in het Brussel Hoofdstedelijk Gewest, de intrinsieke kwetsbaarheid van het freatische watervoerende systeem ten opzicht van oppervlakteverontreiniging en de schatting van de hydrodispersieve parameters ervan.

Dit werk omvatte de interpretatie van de resultaten van chemische analyses die tussen 2017 en 2020 werden uitgevoerd door Leefmilieu-Brussel op 74 monsters van afvoer water die werden genomen op 27 plaatsen tijdens 14 regen gebeurtenissen. De genomen monsters waren voornamelijk afkomstig van wegen met verschillende verkeersintensiteiten (67 monsters), maar ook van daken (4 monsters) en spoorwegterreinen (3 monsters). Van de 233 geanalyseerde parameters, de meest gekwantificeerde parameters die de normen overschreden waren: PAK's, metalen, belangrijke elementen en fysicochemische parameters, minerale oliën, toluen, fenol en pesticiden (glyfosaat, AMPA en diuron). Concentratiestatistieken werden berekend over de hele dataset, en vervolgens per type afvoeroppervlaktes om verschillen te identificeren tussen afvoer van verschillende categorieën bemonsteringslocaties.

De concentraties van verschillende pollutanten in het grondwater werden ook vergeleken met de WEISS-gegevens (Water Emission Inventory Support System, 2014) in een poging om de oorsprong van de pollutanten in het afvoer water te achterhalen. Hoewel de WEISS-gegevens moeilijk te vergelijken zijn met die gemeten in het afvoerwater, inspireerden ze wel verschillende verklarende variabelen voor de chemische samenstelling van het afvoerwater in het Brussel Hoofdstedelijk Gewest (BHG): de verkeersvariabele, de variabele voor het industriegebied, de variabele voor het oppervlak van gebouwen, de bevolkingsdichtheid per wijk, en de variabele voor de tramroute.

Multivariate statistische analyses werden uitgevoerd om correlaties te identificeren tussen concentraties, neerslaggebeurteniskenmerken, en de verklarende variabelen afgeleid van WEISS. Hieruit bleek dat de context (wegen, daken, spoorwegterreinen), de verkeersdichtheid, de kenmerken van neerslaggebeurtenissen (hoogte, duur, intensiteit, periode van droog weer), het strooien van wegen, en/of de winterse omstandigheden (vorst/sneeuw) van invloed zijn op de chemische samenstelling van afvoerwater.

Het werk bestond ook uit een literatuuronderzoek gericht op het karakteriseren van de concentraties van pollutanten in afvoerwater op verschillende soorten oppervlakken in een stedelijke omgeving. De meeste geraadpleegde studies richtten zich op een beperkt aantal verontreinigende stoffen, meestal zwevende deeltjes, enkele metalen, verschillende vormen van stikstof en fosfaten, BZV en CZV, PAK's en koolwaterstoffen.

Een vergelijking van de resultaten van de analyses uitgevoerd door Leefmilieu-Brussel toont aan dat de gemeten concentraties van dezelfde grootteorde zijn als deze vermeld in de literatuur. De kwaliteit van het afvoerwater van daken en wegen in Brussel is dus, voor de parameters waarvoor een vergelijking mogelijk was, in grote lijnen vergelijkbaar met de kwaliteit die wordt waargenomen in andere regio's met een vergelijkbare klimatologische en sociaaleconomische context. Het literatuuronderzoek leverde ook ordes van grootte op voor de concentraties van verschillende parameters in het afvoerwater van oppervlakken die niet door Leefmilieu-Brussel werden bestudeerd (verschillende soorten daken, binnenpleinen, voetgangerszones en parkings). Dat heeft ook aanwijzingen geven over welke parameters

moeten in toekomstige bemonsteringscampagnes opgenomen worden (in het bijzonder microbiologische parameters, organische stikstof, producten voor de behandeling van daken, opkomende verontreinigende stoffen (geperfluoreerde producten, enz.).

1. Introduction

L'imperméabilisation des sols des villes modifie radicalement le cycle naturel de l'eau, et accroît le ruissellement superficiel par temps de pluie. Depuis le 19^{ème} siècle, les eaux de ruissellement sont récoltées et envoyées dans le réseau d'assainissement et généralement mélangées aux eaux usées. Cependant l'accroissement de l'imperméabilisation, l'étalement urbain et la densification impliquent de gérer des débits croissants dans des canalisations qui finissent par être sous-dimensionnées. Ceci entraîne deux problèmes : l'augmentation de la fréquence des inondations et le déversement des eaux du réseau d'assainissement vers les eaux de surface (Tedoldi, 2020). Cette imperméabilisation diminue également la recharge naturelle vers les eaux souterraines.

La Région de Bruxelles-Capitale ne fait pas exception, elle est, en effet, majoritairement équipée d'un système d'assainissement unitaire où les eaux usées et les eaux de ruissellement circulent dans les mêmes canalisations. Pour éviter les inondations en cas de fortes pluies, et parce que la capacité des stations d'épuration est limitée, de nombreux déversoirs d'orage sont construits à des endroits stratégiques. Ils permettent à l'excès d'eau d'être déversé directement (sans traitement) dans les rivières. Cela exerce une pression importante sur les rivières réceptrices (principalement la Senne). (Antoine, 2021)

Pour gérer ces problèmes, il est nécessaire de repenser la politique de gestion des eaux pluviales notamment en gérant les eaux pluviales à la source. Ceci consiste à gérer les eaux de pluies là où elles tombent plutôt que de les évacuer vers les réseaux d'assainissement. Les eaux de pluies sont ainsi récoltées en amont des réseaux d'assainissement et infiltrées dans le sol vers les eaux souterraines. La Région de Bruxelles Capitale souhaite généraliser la mise en œuvre d'infiltration des eaux pluviales mais certaines interrogations demeurent sur cette pratique. Quelles sont les substances polluantes présentes dans les eaux susceptibles d'être infiltrées vers les eaux souterraines et quels sont les risques que ces polluants atteignent la nappe ?

Pour répondre à ces interrogations une étude a été effectuée par le Groupe d'Hydrogéologie et de Géologie de l'Environnement de l'Université de Liège (HGE-ULiège) dans le cadre d'une convention avec Bruxelles Environnement. Cette convention a deux objectifs principaux (1) caractériser la qualité chimique des eaux pluviales en milieu urbain et (2) cartographier la vulnérabilité intrinsèque du système phréatique bruxellois par rapport au risque de transfert de pollution des eaux de ruissellement vers les eaux souterraines.

Ce présent rapport concerne la première phase de l'étude sur la caractérisation de la qualité chimique des eaux de pluie en milieu urbain. Ce rapport s'articule en quatre parties :

- dans la première partie, les résultats des analyses des eaux de ruissellement échantillonnées en Région de Bruxelles sont analysés et interprétés afin de mettre en évidence la présence potentielle de substances polluantes ;
- la seconde partie concerne une recherche bibliographique sur la qualité des eaux de ruissellement plus spécifiquement en milieu urbain pour compléter les analyses de terrain ; des tableaux reprenant les concentrations attendues de substances polluantes dans les eaux de ruissellement en milieu urbain en fonction de leur origine sont élaborés d'après cette recherche bibliographique et les analyses réalisées à Bruxelles;

En plus de ce rapport, une note complémentaire a été réalisée. Elle dresse une liste spécifique des substances polluantes pertinentes selon le milieu récepteur (eau de surface et eau souterraine) des eaux de ruissellement.

2. Analyses des eaux de ruissellement de voiries et de toitures échantillonnées en Région de Bruxelles-Capitale sur la période de 2017 à 2020

2.1. Description des données

2.1.1. Sites d'échantillonnages

Entre 2017 et 2020, les eaux de ruissellement produites par 14 événements pluvieux ont été échantillonnées par Bruxelles Environnement. 27 sites ont été échantillonnés et 74 échantillons ont été récoltés au total. Chaque site n'a donc pas été échantillonné à chaque événement pluvieux.

La Figure 1 montre la localisation des 27 sites d'échantillonnage d'eau de ruissellement dans la Région de Bruxelles-Capitale. La majorité des sites sont localisés le long/ou à proximité du canal et de la Senne. Les sites échantillonnés concernent uniquement de l'eau de ruissellement et pas des eaux mixtes contenant un mélange d'eaux usées et de ruissellement. Ils ont été choisis pour leur diversité en termes de surface de ruissellement, de trafic, leur accessibilité, leur proximité les uns des autres, et s'ils permettaient de récolter suffisamment d'eau de ruissellement (Antoine, 2021).

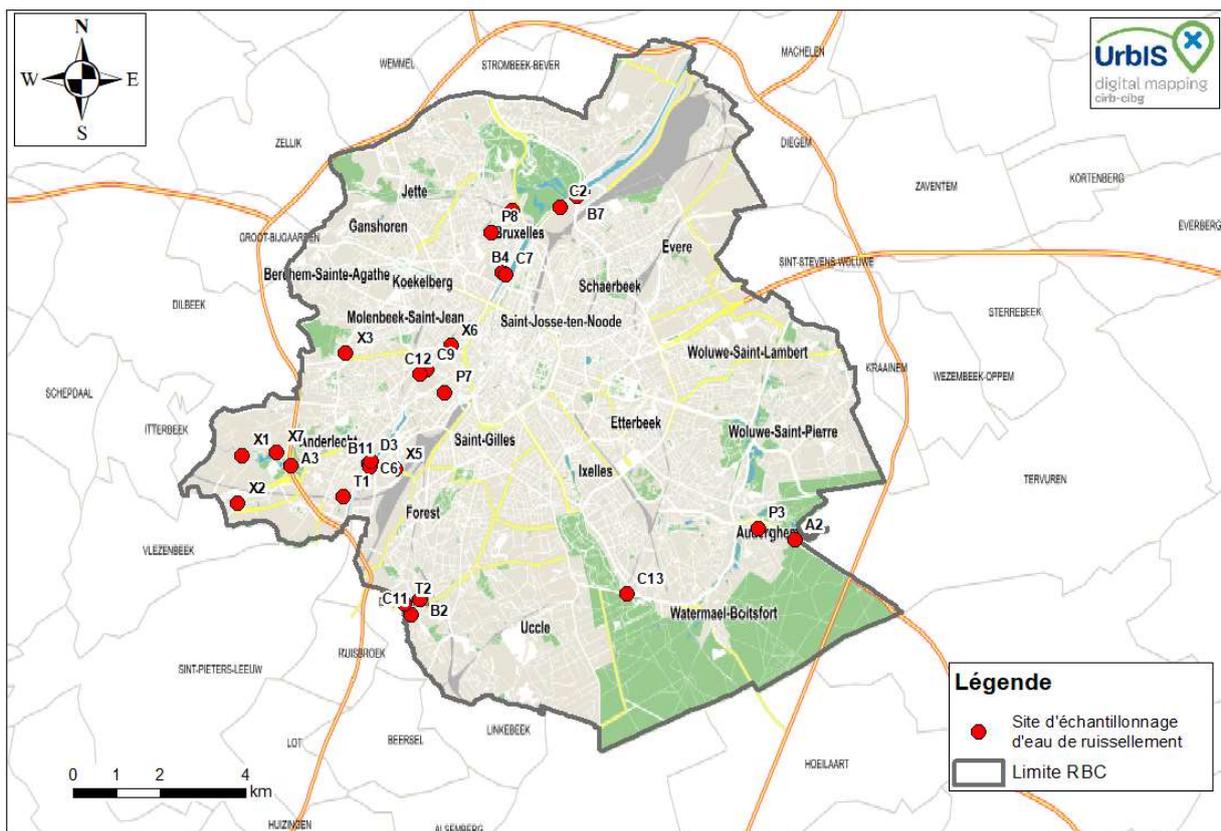


Figure 1 : Localisation des 27 sites d'échantillonnage d'eau de ruissellement en Région de Bruxelles Capitale

Les eaux de ruissellement échantillonnées proviennent principalement d'autoroutes ou des voiries urbaines mais quelques échantillons ont été récoltés sur des voies ferroviaires ou après ruissellement sur des toitures. Les sites échantillonnés ont été classés en 6 catégories en fonction du contexte (route,

toitures et sites ferroviaires) et de l'intensité du trafic pour les routes. Ces 6 catégories sont présentées dans le Tableau 1. Pour chaque catégorie sont indiqués le nombre d'échantillons, le nombre de sites échantillonnés et le nombre d'événements pluvieux. Un descriptif plus détaillé des sites d'échantillonnage se trouve en annexe 1 (Tableau 29).

Tableau 1 : Catégories de sites échantillonnés et résumé de la campagne

classes	numéro	groupes	nb échantillons	nb sites	Codes des sites	nb événements pluvieux
Route	1	Autoroutes (>20 000 véhicules par jour)	11	2	A2, A3	9
	2	Routes urbain dense (10 000 - 20 000 véhicules par jour)	23	8	B2, B4, B6, B7, B11, X2, X3, X5,	9
	3	Routes urbain moyen (3000-10 000 véhicules par jour)	27	8	C2, C6, C7, C9, C11, C12, C13, X6,	9
	4	Routes urbain faible (< 3000 véhicules par jour)	6	3	D3, X1, X7	6
		Routes (total)	67	21	Tous ci-dessus	12
Toit	5	Toitures	4	4	P2, P3, P7, P8	1
Train	6	Sites ferroviaires	3	2	T1, T2	2

2.1.2. Description des événements pluvieux

Les 74 échantillons ont été récoltés au cours de 14 événements pluvieux survenus entre 2017 et 2020. Les échantillonnages ont eu lieu principalement en période hivernale entre novembre et mars (Figure 2). Un seul échantillonnage a eu lieu en dehors de cette période, celui qui a concerné uniquement les toitures en juin 2019.

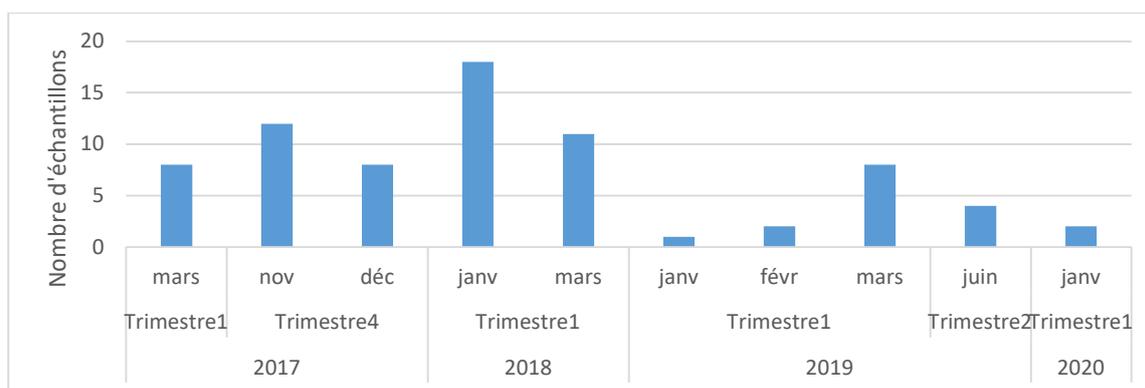


Figure 2: Répartition temporelle des événements pluvieux échantillonnés en RBC entre 2017 et 2020

Pour caractériser ces événements pluvieux, les pluviomètres du réseau FLOWBRU ont été utilisés. 16 pluviomètres sont situés en Région de Bruxelles-Capitale (Figure 3). Ils mesurent les précipitations avec un pas de temps de 5 minutes. Sur base des polygones de Thiessen, chaque site d'échantillonnage d'eau de ruissellement a pu être associé au pluviomètre le plus proche. Chaque événement pluvieux échantillonné a ainsi pu être caractérisé en termes de hauteur (mm), de la durée (hh : mm), de l'intensité moyenne (mm/h), de l'intensité maximale (mm /h) évaluée avec un intervalle de 5 min de la pluie et la période de

temps sec (j) précédent l'évènement. Cette période de temps sec a été calculée en considérant une pluie significative de 1mm. Il faut en effet une quantité de pluie suffisante pour déclencher un ruissellement.

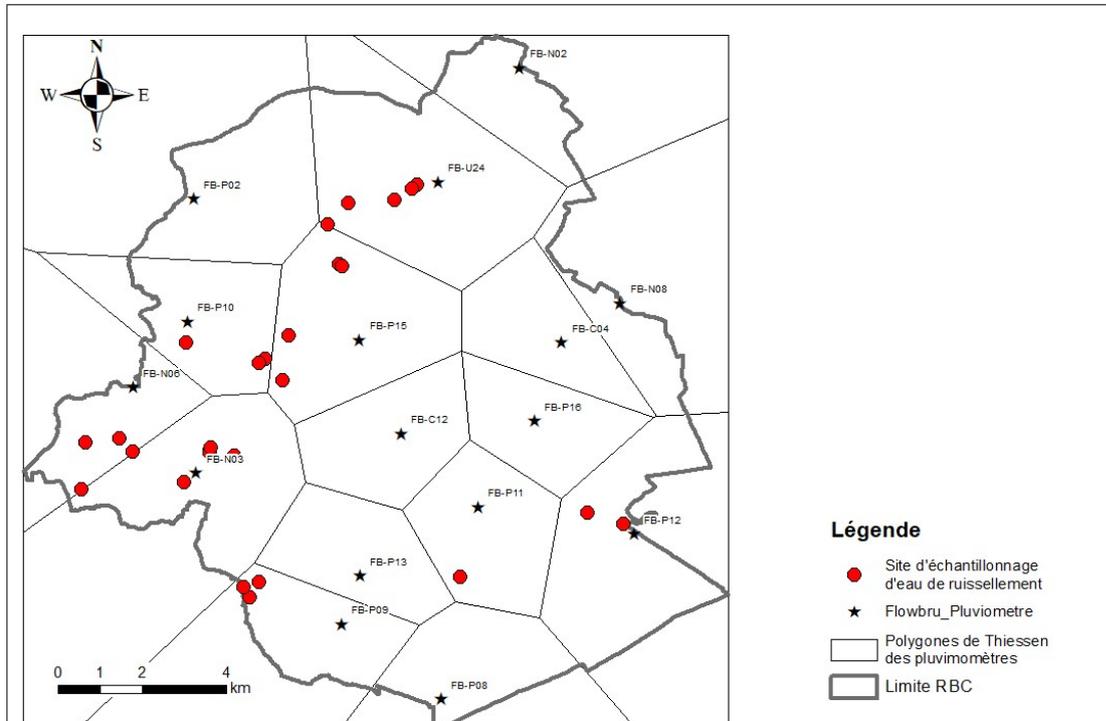


Figure 3 : Localisation des pluviomètres du réseau FLOWBRU, les polygones de Thiessen associés et les stations d'échantillonnage d'eau de ruissellement

Les statistiques générales (minimum, maximum, moyenne, médiane, P90) des évènements pluvieux de l'ensemble des échantillons sont illustrées dans le Tableau 2 et la Figure 4. Il est possible de constater que les évènements échantillonnés concernent des pluies de relativement faible intensité et qu'il n'y a pas d'évènement extrême qui a été échantillonné. Les hauteurs des précipitations ont varié entre 0,4 mm et 13,7 mm avec une médiane à 4,9 mm. Les périodes de temps secs précédant les évènements pluvieux varient entre quelques heures et 9 jours et sont généralement courtes, entre 2 et 3 jours.

Tableau 2 : Statistiques générales des évènements pluvieux des 74 échantillons d'eau de ruissellement

Statistique	H (mm)	Durée (hh : mm)	I moy (mm/h)	I max(mm/h)	Période de temps sec (j) pluie>1mm
min	0,4	00:20:00	0,2	1,2	0,40
moyenne	5,3	02:42:06	1,5	4,8	2,97
médiane	4,9	02:40:00	1,1	3,6	2,26
p90	10,82	04:43:30	2,05	8,04	7,19
max	13,7	06:25:00	6,1	22,8	9,48

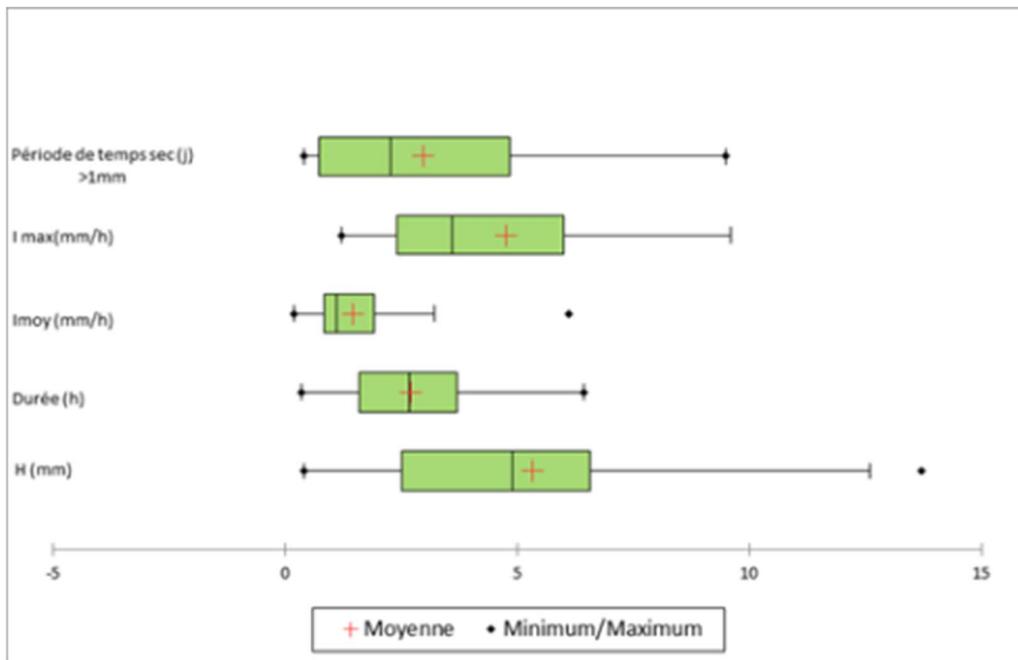


Figure 4 : Boxplot décrivant les caractéristiques statistiques de l'ensemble des événements pluvieux.

2.1.3. Modalité d'échantillonnage

8l d'eau de ruissellement ont été prélevés dans un bidon pour chaque échantillon. Un si grand volume a dû être prélevé en raison des nombreuses analyses chimiques qui ont été effectuées. Les eaux de ruissellement ont été recueillies soit avec un seau dans les réseaux séparatifs soit avec une pelle à aliments lorsque l'eau était recueillie directement sur la route. Le seau, la pelle, ainsi que le bidon (8 litres) étaient fabriqués en plastique neutre (polypropylène) et rincés trois fois avec l'eau de ruissellement avant l'échantillonnage. Les échantillons ont été stockés à température ambiante et apportés au laboratoire dans les 24 heures pour la mise en bouteille, l'ajout de stabilisateurs et la réfrigération (Antoine, 2021).

Un site d'eau de ruissellement d'une autoroute (A2), a fait l'objet d'une procédure d'échantillonnage particulière. Une petite partie de l'eau de ruissellement du réseau séparatif a été détournée dans un tuyau relié à un grand bidon équipé d'un robinet. Le bidon est vidé et rincé avant un événement pluvieux et un échantillon est prélevé dans le bidon à la fin de l'événement. Ce système a permis d'échantillonner la qualité moyenne (et non ponctuelle) de 6 événements de ruissellement (Antoine, 2021).

L'échantillonnage des eaux de toitures s'est fait en plaçant les bidons de récoltes juste avant les citernes d'eaux pluviales, ceci afin de récolter des eaux pluviales telles qu'elles arriveraient dans le dispositif d'infiltration (donc après circulation sur les toitures et dans les gouttières et autres tuyauteries ramenant ces eaux pluviales vers les rez-de-chaussée).

2.1.4. Polluants analysés

233 substances ou paramètres ont été analysés au cours des différentes campagnes menées par Bruxelles-Environnement. Les prélèvements ont été effectués par Bruxelles Environnement et les analyses par le laboratoire SGS Belgium SA. Les principaux paramètres analysés sont :

- les paramètres physico-chimiques : EC, pH, t°, DBO, DCO, MES,

- certains éléments majeurs/mineurs : Ca, Na, Cl, NO₃, NO₂, NH₄, PO₄, SO₄, P,
- les métaux et métalloïdes totaux et dissous : As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn, Al, Fe,
- les HAP,
- de nombreux pesticides,
- les composés organiques volatils chlorés,
- des hydrocarbures chlorés,
- les huiles minérales,
- les BETX,
- les additifs de carburants MTBE et ETBE,
- à partir de 2019, le bisphénol A, certains alkylphénols, les chlorophénols.

La liste détaillée de ces 233 substances est disponible en annexe 2 (Tableau 30). La liste des polluants à analyser a été définie par Bruxelles Environnement sur base des substances citées dans la littérature des eaux de ruissellement et sur base des substances retrouvées et/ou présentant des objectifs de qualité dans les eaux souterraines et dans les eaux de surface dans le cadre du monitoring de la Directive Cadre Eau à Bruxelles. Cela a permis de dresser une liste de 55 substances. Comme les laboratoires analysent généralement plusieurs substances en même temps, des substances additionnelles ont été ajoutées, ce qui a étendu la liste à 233 substances (Antoine, 2021).

La plupart des biocides utilisés pour l'entretien des toitures n'ont pas été analysés dans les eaux de toitures à l'exception du diuron, monolinuron et terbutryne.

2.2. Analyse des données

2.2.1. Polluants quantifiés dans les eaux de ruissellement en RBC

Les 233 substances analysées sont listées dans les Tableaux 3 à 7. Dans ces tableaux, les pourcentages de quantification pour chaque substance sont indiqués, ainsi que le nombre d'analyses dépassant les normes imposées dans différentes législations. Les normes qui ont été prises en compte sont les normes pour les eaux de surface¹, pour les eaux souterraines² et les sols³ en Région de Bruxelles Capitale mais aussi les

¹ Les normes de qualité physico-chimique pour les eaux de surface (en vigueur depuis 2016) les et normes de qualité chimique de base pour les eaux de surface (en vigueur depuis 2016) de l'AGRBC du 17/12/2015 modifiant l'AGRBC du 24/03/2011 établissant des normes de qualité environnementale, des normes de qualité de base et des normes chimiques pour les eaux de surface contre la pollution causée par certaines substances dangereuses et autres polluants.

Les normes de qualité environnementale (NQE) pour les eaux de surface bruxelloises de l'AGRBC du 17/12/2015 modifiant l'AGRBC du 24/03/2011 établissant des normes de qualité environnementale, des normes de qualité de base et des normes chimiques pour les eaux de surface contre la pollution causée par certaines substances dangereuses et autres polluants.

² Les normes de qualité et les valeurs seuils définies dans l'arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale du 10 juin 2010 relatif à la protection des eaux souterraines contre la pollution et la détérioration et son arrêté modificatif du 26 mai 2016.

³ Les normes d'assainissement définies dans l'annexe 2 de l'Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale du 29/03/2018 fixant les normes d'assainissement et les normes d'intervention (M.B. 02/05/2018)

normes pour les eaux souterraines de la Région flamande⁴. Les normes qui ont été considérées sont multiples parce qu'il existe de multiples récepteurs pour les eaux de ruissellement à savoir le sol, les eaux de surface et les eaux souterraines. De plus, pour les eaux souterraines, peu de normes de qualité ou de valeurs seuils ont été fixées en RBC étant donné que les substances polluantes figurant sur la liste minimale des paramètres polluants pertinents pour les eaux souterraines ne sont pas considérées à risque en Région de Bruxelles-Capitale au titre de la directive fille pour la protection des eaux souterraines (2006/118/CE) . C'est pourquoi il est intéressant de comparer les concentrations mesurées dans les eaux de ruissellement à d'autres normes comme celles des eaux de surface ou des eaux des sols qui sont définies pour plus de substances même si ces normes sont généralement plus élevées que celles définies pour les eaux souterraines.

Les polluants quantifiés sur **plus de 20% des échantillons** des eaux de ruissellement à Bruxelles et dont les concentrations sont ponctuellement supérieures aux normes sont (Tableau 3) :

- la majorité des HAP,
- certains métaux dissous : Fe, Cu, Zn, Pb, Cr,
- la plupart des métaux totaux : Al, Cu, Zn, Pb, Cr, Ni, Hg, Cd,
- les éléments majeurs et les paramètres physico-chimiques,
- les huiles minérales dont les normes ne sont pas définies pour les eaux de surface et souterraines à Bruxelles mais qui dépassent les normes sols et les normes pour les eaux souterraines en Flandre,
- 3 pesticides (ou métabolites) : le glyphosate, l'AMPA et le diuron,
- un seul composé aromatiques volatils : le toluène,
- le phénol.

⁴ VVM. 2016. Révision de l'annexe « Milieukwaliteitsnormen en milieukwantiteitscriteria voor grondwater », Vlarem II : Besluit van de Vlaamse regering van 1 juni 1995 houdende algemene en sectorale bepalingen inzake milieuhygiëne

Tableau 3 : Polluants analysés dans les eaux de ruissellement en RBC, fréquemment quantifiés (>20%) et supérieurs aux normes

substance	groupe méthode	Nb total d'analyses	% quantification	Nb > ESU	Nb > ESO (RBC)	Nb > sol (RBC)	Nb > ESO Vlaanderen	Nb > ESO Vlanderen seuil VI
Toluène	Composés aromatiques volatils	74	21,6	1	-	0	-	-
NH4	El. maj.+ param.	74	91,9	-	17	-	14	10
NA	El. maj.+ param.	74	100,0	-	-	-	74	-
Ca	El. maj.+ param.	74	100,0	-	-	-	74	-
CZV	El. maj.+ param.	74	95,9	70	-	-	-	-
TSS	El. maj.+ param.	74	100,0	64	-	-	-	-
BZV-5	El. maj.+ param.	74	78,4	38	-	-	-	-
Cl	El. maj.+ param.	74	98,6	19	19	-	10	19
Ec at 25°C	El. maj.+ param.	74	100,0	15	-	-	7	10
PO4	El. maj.+ param.	74	32,4	15	-	-	0	2
pH	El. maj.+ param.	74	100,0	2	-	-	-	-
P	El. maj.+ param.	74	78,4	1	22	-	-	-
NO2	El. maj.+ param.	74	98,6	0	61	-	31	44
Indeno(123-cd)pyrène	HAP	74	87,8	-	-	65	-	-
PAH's up to 16	HAP	74	27,0	-	-	-	69	-
Benzo(ghi)perylène	HAP	74	91,9	74	-	-	-	-
Pyrène	HAP	74	94,6	68	-	1	-	-
Benzo(b)fluoranthène	HAP	74	91,9	68	-	22	-	-
Benzo(k)fluoranthène	HAP	74	87,8	66	-	13	-	-
Fluoranthène	HAP	74	93,2	66	-	-	-	-
Acenaphthène	HAP	74	44,6	44	-	0	-	-
Benzo(a)anthracène	HAP	74	90,5	38	-	-	-	-
Benzo(a)pyrène	HAP	74	90,5	37	-	25	-	-
Phénanthrène	HAP	74	98,6	36	-	0	-	-
Antracène	HAP	74	67,6	26	-	-	-	-
Chrysène	HAP	74	90,5	11	-	13	-	-
Dibenzo(a,h)anthracène	HAP	74	55,4	3	-	4	-	-
Acenaphthylène	HAP	74	36,5	2	-	0	-	-
Total C-10 - C-40	Huiles minérales	74	78,4	-	-	43	74	-
C-28 - C-32	Huiles minérales	57	87,7	-	-	-	57	-
C-20 - C-24	Huiles minérales	57	84,2	-	-	-	57	-
C-24 - C-28	Huiles minérales	57	84,2	-	-	-	57	-
C-32 - C-36	Huiles minérales	57	77,2	-	-	-	57	-
C-16 - C-20	Huiles minérales	57	73,7	-	-	-	57	-
C-36 - C-40	Huiles minérales	57	63,2	-	-	-	57	-
C-12 - C-16	Huiles minérales	57	38,6	-	-	-	57	-
C-22 - C-30	Huiles minérales	17	76,5	-	-	-	17	-
C30-C40	Huiles minérales	17	70,6	-	-	-	17	-
C-12 - C-22	Huiles minérales	17	58,8	-	-	-	17	-
Fer (Fe) dissous	métaux dissous	74	97,3	-	-	-	71	-
Cuivre (Cu) dissous	métaux dissous	74	97,3	67	-	4	0	-
Zinc (Zn) dissous	métaux dissous	74	73,0	36	-	3	2	3
Chrome (Cr) dissous	métaux dissous	74	89,2	18	-	1	0	-
Plomb (Pb) dissous	métaux dissous	74	35,1	4	6	5	4	5
Fer (Fe) total	métaux totaux	74	100,0	-	-	-	74	-
Aluminium (Al) total	métaux totaux	74	100,0	-	-	-	73	-
Cuivre (Cu) total	métaux totaux	74	100,0	59	-	58	46	-
Zinc (Zn) total	métaux totaux	74	100,0	53	-	53	28	55
Plomb (Pb) total	métaux totaux	74	94,6	52	70	69	66	70
Chrome (Cr) total	métaux totaux	74	95,9	35	-	53	35	-
Nickel (Ni) total	métaux totaux	74	81,1	5	25	23	9	23
Mercuré (Hg) total	métaux totaux	74	54,1	4	4	7	4	-
Cadmium (Cd) total	métaux totaux	74	36,5	0	0	2	0	5
AMPA	pesticides	62	77,4	-	26	-	-	-
Glyphosate	pesticides	62	85,5	-	47	-	-	-
Diuron	pesticides	72	27,8	0	2	-	-	-
Phenol	Phenol	17	76,5	-	-	-	12	-

Le Tableau 4 reprend les polluants quantifiés dans plus de 20% des échantillons mais dont les concentrations ne dépassent pas les normes ou pour lesquels il n'y a pas de normes définies. Le nitrate, le sulfate, 2 HAP (fluorène et naphthalène) et le bisphénol A y sont repris ainsi que l'aluminium dissous et les crésols qui sont fréquemment quantifiés mais pour lesquels il n'y a pas de normes définies

Tableau 4 : Polluants analysés dans les eaux de ruissellement en RBC, fréquemment quantifiés (>20%) mais inférieurs aux normes ou pas de normes définies

substance	groupe méthode	Nb total d'analyses	% quantification	Nb > ESU	Nb >ESO (RBC)	Nb > sol (RBC)	Nb > ESO Vlaanderen	Nb > ESO Vlanderen seuil VI
Nitrate same as N	Eléments majeurs+ physico-chimie	74	97,3	0	0	-	0	-
Sulphate same as SO4	Eléments majeurs+ physico-chimie	74	94,6	0	0	-	0	0
Fluorène	HAP	74	56,8	0	-	0	-	-
Naftalène	HAP	74	74,3	0	-	0	-	-
Bisphenol A	Phenol	17	76,5	-	0	-	-	-
Aluminium (Al) dissous	métaux dissous	74	98,6	-	-	-	-	-
m-cresol	Phenol	17	70,6	-	-	-	-	-
p-Cresol	Phenol	17	64,7	-	-	-	-	-
o-Cresol	Phenol	17	58,8	-	-	-	-	-

Tableau 5 : Polluants analysés dans les eaux de ruissellement en RBC, peu quantifiés (< 20%) et ne dépassant généralement pas les normes ; les polluants soulignés en jaune sont ceux dont la limite de quantification est supérieure à la norme

substance	groupe méthode	Nb total d'analyses	% quantification	Nb > ESU	Nb >ESO (RBC)	Nb > sol (RBC)	Nb > ESO Vlaanderen	Nb > ESO Vlanderen seuil VI
1,3,5-trimethylbenzeen	Composes aromatiques volatils	74	4,1	-	-	0	-	-
tert-Butylbenzene	Composes aromatiques volatils	74	1,4	-	-	-	-	-
1,2,4-trimethylbenzene	Composes aromatiques volatils	74	12,2	-	-	0	-	-
m,p-Xylène	Composes aromatiques volatils	74	12,2	1	-	-	-	-
o-Xylène	Composes aromatiques volatils	74	12,2	1	-	-	-	-
Xylènes (somme)	Composes aromatiques volatils	74	12,2	1	-	1	-	-
Ethylbenzène	Composes aromatiques volatils	74	5,4	1	-	0	-	-
n-Propylbenzene	Composes aromatiques volatils	74	5,4	-	-	-	-	-
Benzène	Composes aromatiques volatils	74	4,1	0	-	0	-	-
BTEX (somme)	Composes aromatiques volatils	74	4,1	-	-	-	-	-
Cumène	Composes aromatiques volatils	74	2,7	-	-	-	-	-
1,1,2,2-Tetrachloroethane	Composes chlorés volatils	74	1,4	-	-	-	-	-
1,2,3-Trichlorobenzene	Composes chlorés volatils	74	1,4	0	-	-	-	-
1,2,4-Trichlorobenzene	Composes chlorés volatils	74	1,4	-	-	-	-	-
Dichlorométhane	Composes chlorés volatils	74	2,7	0	-	0	-	-
Trichlorométhane	hydrocarbures chlorés	74	1,4	0	-	-	-	-
Huile minérale C10-C12	huiles minérales	74	8,1	-	-	-	74	-
Nickel (Ni) dissous	métaux dissous	74	14,9	0	-	0	0	0
Cadmium (Cd) dissous	métaux dissous	74	6,8	0	0	0	0	0
Mercure (Hg) dissous	métaux dissous	74	4,1	7	7	0	0	-
Arsenic (As) total	métaux totaux	74	10,8	0	7	6	0	7
Fluroxypr	pesticides	64	1,6	-	16	-	-	-
MCPA	pesticides	64	1,6	0	16	-	-	-
BAM (2,6-dichlorobenzamide)	pesticides	72	6,9	-	0	-	-	-
Clopyralid	pesticides	15	6,7	-	0	-	-	-
Terbutylazine	pesticides	72	4,2	-	-	-	-	-
Mecoprop	pesticides	64	3,1	0	17	-	-	-
Carbendazim	pesticides	72	2,8	-	0	-	-	-
Chloortoluron	pesticides	72	2,8	-	-	-	-	-
Desethylterbutylazine	pesticides	72	2,8	-	2	-	-	-
Ethofumesate	pesticides	72	2,8	-	-	-	-	-
Metabromuron	pesticides	72	2,8	-	1	-	-	-
Metamitron	pesticides	72	2,8	-	0	-	-	-
Metolachlor	pesticides	72	2,8	-	2	-	-	-
Atrazine	pesticides	72	1,4	0	0	-	-	-
Carbetamide	pesticides	72	1,4	-	-	-	-	-
Simazine	pesticides	72	1,4	0	0	-	-	-
Terbutryn	pesticides	72	1,4	0	0	-	-	-
2,3,5,6-Tetrachlorophenol	phénols	17	5,9	-	-	-	-	-
4-Chloor 3,5-Dimethylphenol	phénols	17	5,9	-	-	-	-	-
Som 2,3-Dimethyl- + 3,5-Dimethylfenol	phénols	17	5,9	-	-	-	-	-
ETBE	Analyses diverses 3	74	1,4	-	-	-	-	-

Parmi les substances quantifiées dans moins de 20% des échantillons (Tableau 5), on retrouve principalement quelques composés aromatiques volatils, des composés organiques volatils chlorés, quelques métaux dissous (Ni, Cd, Hg) et beaucoup de pesticides. Il y a généralement peu de dépassement de norme pour les substances peu quantifiées à l'exception du xylène, de l'éthylbenzène, de l'arsenic total, du mercure dissous, du desethylterbutylazine, du metabromuron et du metolachlor, pour lesquels quelques dépassements de norme sont observés. Les composés soulignés en jaune dans le Tableau 5 ont des limites de quantifications (LQ) trop élevées, supérieures ou égales aux normes. Pour ces composés dont les huiles minérales (fraction C10-C12), le fluoxypyr, le MCPA et le mecoprop, les dépassements de norme sont donc principalement liés à leur LQ supérieure à la norme.

Dans les Tableaux 6 et 7 sont repris les polluants dont les concentrations sont inférieures aux limites de quantification. Le Tableau 6 reprend les substances dont les limites de quantification sont élevées et supérieures aux normes. Il n'est donc pas exclu que ces substances soient présentes dans les eaux de ruissellement à Bruxelles à des concentrations supérieures aux normes. Il s'agit principalement de pesticides mais aussi du 1-2 dichloropropane, de l'arsenic dissous, du chlorate et du nonylphénol.

Tableau 6 : Polluants analysés dans les eaux de ruissellement en RBC, inférieurs aux limites de quantification (LQ) mais dont les LQ sont supérieures aux normes

substance	groupe méthode	Nb total d'analyses	LQ	% quantification
1,2-Dichloropropane	Analyses diverses 3	74	0.2 µg/lL	0,0
Arsenic (As) dissous	métaux dissous	74	5 µg/l	0,0
Pentachloorfenol	pesticides	72	0.5 µg/l	0,0
Propanil	pesticides	72	0.5 µg/l	0,0
2,4-Dichloorfenoxyboterzuur (2,4-DB)	pesticides	64	1 µg/l	0,0
MCPB	pesticides	64	1 µg/l	0,0
Bromacil	pesticides	72	0.5 µg/l	0,0
Fenoprop	pesticides	64	1 µg/l	0,0
Bentazone	pesticides	64	0.5 µg/l	0,0
2,4,5-Trichloorfenoxyazijnzuur (2,4,5-T)	pesticides	64	0.5 µg/l	0,0
2,4-Dichloorfenoxyazijnzuur (2,4-D)	pesticides	64	0.5 µg/l	0,0
Dichlorprop	pesticides	64	0.5 µg/l	0,0
cis-Chloordaan	pesticides	72	0.5 µg/l	0,0
trans-Chloordaan	pesticides	72	0.5 µg/l	0,0
Aldrin	pesticides	64	0.5 µg/l	0,0
alfa-Endosulfan	pesticides	64	0.5 µg/l	0,0
cis-Heptachloorepoxide	pesticides	64	0.5 µg/l	0,0
Dieldrin	pesticides	64	0.5 µg/l	0,0
Endrin	pesticides	64	0.5 µg/l	0,0
Heptachloor	pesticides	64	0.5 µg/l	0,0
Isodrin	pesticides	64	0.5 µg/l	0,0
p,p-DDT	pesticides	64	0.5 µg/l	0,0
β-HCH	pesticides	64	0.5 µg/l	0,0
α-HCH	pesticides	64	0.5 µg/l	0,0
p,p-DDD	pesticides	64	0.5 µg/l	0,0
p,p-DDE	pesticides	64	0.5 µg/l	0,0
Telodrine	pesticides	64	0.5 µg/l	0,0
trans-Heptachloorepoxide	pesticides	64	0.5 µg/l	0,0
Lindaan	pesticides	64	0.5 µg/l	0,0
o,p-DDT	pesticides	64	0.5 µg/l	0,0
Chloraat	El. Maj.	74	0.5 mg/l	0,0
Nonylphenol (sum of isomers)	alkalyphénols	17	0.3 µg/l	0,0

Dans le Tableau 7, sont repris les polluants qui ne sont pas quantifiés dans les eaux de ruissellement à Bruxelles Capitale et dont la limite de quantification n'est a priori pas problématique. Ces substances semblent donc absentes des eaux de ruissellement à Bruxelles ou alors en concentrations très faibles. Il s'agit principalement de certains pesticides, de composés organiques volatils chlorés, d'hydrocarbures chlorés, d'alkylphénols et de chlorophénols.

Tableau 7 : Polluants analysés dans les eaux de ruissellement en RBC, inférieurs aux limites de quantification (LQ)

Substances	LQ
1,2-Dichloropropene	0.5 µg/l
1,3,5-Trichlorobenzene	0.01 µg/l
2,3,4,5-Tetrachlorophenol	0.1 µg/l
2,3,4,6-Tetrachlorophenol	0.1 µg/l
2,3,4-Trichlorophenol	0.1 µg/l
2,3,5-Trichlorophenol	0.1 µg/l
2,3,5-Trimethylphenol	0.1 µg/l
2,3,6-Trichlorophenol	0.1 µg/l
2,3-Dichlorophenol	0.1 µg/l
2,4,5-Trichlorophenol	0.1 µg/l
2,4,6-Trichlorophenol	0.1 µg/l
2,4-Dimethylphenol	0.1 µg/l
2,5-Dimethylphenol	0.1 µg/l
2,6-Dichlorophenol	0.1 µg/l
2,6-Dimethylphenol	0.1 µg/l
2-Chlorophenol	0.1 µg/l
2-Ethylphenol	0.1 µg/l
2-Isopropylphenol	0.1 µg/l
3,4,5-Trichlorophenol	0.1 µg/l
3,4-Dichlorophenol	0.1 µg/l
3,4-Dimethylphenol	0.1 µg/l
3,5-Dichlorophenol	0.1 µg/l
3-Chlorophenol	0.1 µg/l
3-Ethylphenol	0.1 µg/l
4-Chloro-3-methylphenol	0.1 µg/l
4-Chlorophenol	0.1 µg/l
Pentachlorophenol	0.1 µg/l
Som 2,4-Dichloor- + 2,5-Dichloorfenol	0.2 µg/l
1,1-Dichloorpropeen	0.5 µg/l
Alachlor	0.05 µg/l
Chloridazon	0.05 µg/l
Chloroprotham	0.05 µg/l
Cyanazine	0.05 µg/l
Dicamba	150 µg/l
Hexazinone	0.05 µg/l
Isoproturon	0.05 µg/l
Linuron	0.05 µg/l
Metazachlor	0.05 µg/l
Methabenzthiazuron	0.05 µg/l
Metoxuron	0.05 µg/l
Monolinuron	0.05 µg/l
- Sum Dichloropropane	0.6 µg/l
- Sum Trichlorobenzene	0.035 µg/l
1,1,1,2-Tetrachloroethane	0.5 µg/l
1,1-Dichloropropane	0.2 µg/l
1,2,3-Trichloropropane	0.5 µg/l
1,2-Dibromo-3-chloropropane	0.5 µg/l
1,2-Dibromoethane	0.5 µg/l
1,2-Dichlorobenzène	0.3 µg/l
1,3,5-Dichlorobenzène	0.01 µg/l
1,3-Dichlorobenzene	0.3 µg/l
1,3-Dichloropropane	0.2 µg/l

1,4-Dichlorobenzene	0.3 µg/l
2-Chlorotoluene	0.5 µg/l
4-Chlorotoluene	0.5 µg/l
Bromobenzene	0.5 µg/l
Bromochloromethane	0.5 µg/l
Butylbenzene	0.5 µg/l
cis-1,3-Dichloropropene	0.5 µg/l
Delta HCH	0.5 µg/l
Dibromomethane	0.5 µg/l
Hexachlorobutadiene	0.5 µg/l
Monochlorobenzene	0.3 µg/l
o,p-DDD	0.5 µg/l
o,p-DDE	0.5 µg/l
p-Isopropyltoluene	0.5 µg/l
Prometryn	0.05 µg/l
Propachlor	0.05 µg/l
Sebutylazine	0.05 µg/l
sec-Butylbenzene	0.5 µg/l
trans-1,3-Dichloropropene	0.5 µg/l
Styrène	0.2 µg/l
1,1,1-Trichlororéthane	0.1 µg/l
1,1,2-Trichlororéthane	0.1 µg/
1,1-Dichloroéthène	0.1 µg/
1,1-Dichlororéthane	0.2 µg/
1,2-Dichloroéthènes (somme)	0.2 µg/
1,2-Dichlororéthane	0.2 µg/
cis 1,2-Dichloroéthène	0.1 µg/
Tetrachloroéthène	0.1 µg/
Tetrachlorométhane	0.1 µg/
trans 1,2-Dichloroéthène	0.1 µg/
Trichloroéthène	0.2 µg/
Vinylchloride	0.2 µg/
Bromodichloromethane	0.5 µg/l
Dibromochloromethane	0.5 µg/l
MTBE	0.5 µg/l
Tribromomethane	0.2 µg/l
Desethylatrazine	0.05 µg/l
Desisopropylatrazine	0.05 µg/l
Propazine	0.05 µg/l

2.2.2. Valeurs atypiques

Les valeurs atypiques ou outliers sont des valeurs qui s'écartent fortement des autres valeurs. Cela peut être lié à une erreur de mesure mais cela peut aussi être lié à la variabilité inhérente au jeu de données. Dans cette étude, une valeur est considérée comme atypique quand la valeur est supérieure au $P75 + 1.5 \times (P75 - P25)$.

Plusieurs graphiques et images sont représentés ci-dessous pour essayer de comprendre à quoi sont liés les différents outliers dans les eaux de ruissellement en RBC. Le nombre d'outliers par famille de polluant est présenté à la Figure 5. Ils concernent principalement les HAP, les métaux, les éléments majeurs et paramètres physico-chimiques. Il s'agit également des familles qui sont le plus fréquemment quantifiées dans les eaux de ruissellement. Il y a également beaucoup d'outliers détectés pour les pesticides et les BETX. Seuls 3 pesticides (ou métabolites) sont fréquemment quantifiés : le glyphosate, l'AMPA et le diuron mais plusieurs autres pesticides sont occasionnellement quantifiés et les outliers sont liés à ces derniers pesticides. Pour les BETX, le toluène est fréquemment quantifié, par contre d'autres substances sont quantifiées de manière occasionnelle. Il en est de même pour les solvants chlorés, ils sont généralement inférieurs aux limites de quantification et les outliers sont liés à leur quantification occasionnelle.

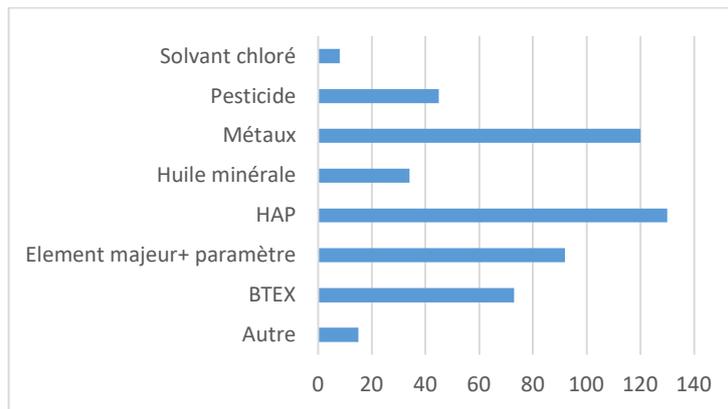


Figure 5 : Nombre d'outliers par famille de polluants

Dans le Tableau 8, le nombre d'outliers par site d'échantillonnage et le nombre d'outliers divisé par le nombre d'échantillonnage réalisé sur le site sont présentés. Le but de ce tableau est d'identifier si le type de surface (voiries, toitures, zone ferroviaire) et l'intensité du trafic ont une influence sur le nombre d'outliers. Il est possible de constater qu'il n'y a de grande différence entre les 3 premières catégories (autoroutes, routes urbain dense et route urbain moyen). Ces trois premières catégories ont un nombre d'outliers généralement moyen à élevé. On pourrait s'attendre à ce que le nombre d'outliers augmente si le trafic est important mais cela ne semble pas forcément être le cas sauf pour la quatrième catégorie (routes avec un faible trafic). Les routes avec un faible trafic présentent moins de valeurs atypiques que les autres types de voiries. C'est également le cas de sites ferroviaires (même si le nombre d'échantillons est limité), ils présentent peu d'outliers.

Les toitures présentent quant à elles un nombre d'outliers moyen à élevé. Les outliers des toitures concernent principalement les métaux dissous (Pb, Zn), des pesticides (autres que les 3 fréquemment quantifiés), des nutriments (N,P). Il semble que les outliers des toitures soient liées aux faits que les eaux de ruissellement des toitures ont une signature chimique différente des eaux de ruissellement de voiries.

Dans le Tableau 8, il y a un site qui ressort particulièrement, c'est le site X2. Il n'a été échantillonné qu'une seule fois, en conditions particulières où il neigeait. Les outliers de cet échantillon concernent les métaux, les HAP, les chlorures, la matière en suspension, la conductivité électrique et le toluène.

Tableau 8 : Nombre d'outliers par site d'échantillonnage

Groupes	Code Site	Densité du trafic	Fluidité du trafic (lundi 8:30)	Nbre outlier par station	Nbre d'échantillonnage par station	outliers/échantillonnage
Autoroutes (>20 000 véhicules par jour)	A2	Autoroute	moyen à ralenti	56	6	9,3
	A3	Autoroute	moyen	21	5	4,2
Routes urbain dense (10 000 - 20 000 véhicules par jour)	B2	Urbain Fort	ralenti	12	1	12,0
	B4	Urbain Fort	moyen	1	1	1,0
	B6	Urbain Fort	moyen	46	6	7,7
	B7	Urbain Fort	moyen	72	7	10,3
	B11	Urbain Fort	fluide	11	3	3,7
	X2	Urbain très Fort	fluide	30	1	30,0
	X3	Urbain Fort	fluide	13	1	13,0
Routes urbain moyen (3000-10 000 véhicules par jour)	C2	Urbain Moyen	moyen à fluide	22	7	3,1
	C6	Urbain Moyen	fluide	32	5	6,4
	C7	Urbain Moyen	fluide	49	6	8,2
	C9	Urbain Moyen	moyen	43	4	10,8
	C11	Urbain Moyen	moyen	17	1	17,0
	C12	Urbain Moyen	moyen à fluide	0	1	0,0
	C13	Urbain Moyen	ralenti	18	2	9,0
	X6	Urbain Moyen	fluide	7	1	7,0
Routes urbain faible (< 3000 véhicules par jour)	D3	Urbain Faible	fluide	6	4	1,5
	X1	Urbain très Faible	fluide	5	1	5,0
	X7	Urbain Faible	fluide	2	1	2,0
Toits	P2	Urbain moyen	Fluide à moyen	10	1	10,0
	P3	Urbain moyen	fluide	16	1	16,0
	P7	Urbain Fort	fluide	4	1	4,0
	P8	Urbain moyen	fluide à moyen	7	1	7,0
Trains	T1	Urbain Faible	fluide	4	2	2,0
	T2	Urbain Fort	moyen	4	1	4,0

Dans le Tableau 9, le nombre d'outliers par date d'échantillonnage est indiqué. La concentration en Cl maximale mesurée et la date d'échantillonnage sont également indiqués. Ce tableau permet de faire l'hypothèse que du sel a été épandu sur les voiries avant l'échantillonnage. Il y a 4 campagnes qui présentent des concentrations en Cl très faibles (< 25 mg/L). Ces 4 campagnes présentent un nombre d'outliers faible à l'exception de la campagne de 04-06-19 qui a concernée uniquement les toitures. Pour la plupart des autres campagnes les concentrations en Cl sont moyennes à élevées et le nombre d'outliers est également moyen à élevé. Il est donc possible que la présence d'outliers soit liée en partie à des conditions particulières : neige, gel, épandage de sel sur les routes. Il y a même deux campagnes où les concentrations en Cl dépasse 1000 mg/L.

A la Figure 6, sont exposées les relations entre le nombre d'outliers et les caractéristiques des événements pluvieux. Les coefficients de corrélation (R) et coefficient de détermination (R²) sont proches de 0. Même si certaines tendances semblent pouvoir être observées sur les graphiques, il n'y a pas de corrélation significative entre le nombre d'outliers et les différentes caractéristiques des événements pluvieux. Cela ne veut pas dire que le type d'événement pluvieux n'a pas d'impact sur le nombre d'outliers et de manière plus globale sur les concentrations mesurés dans les eaux de ruissellement. Il y a sans doute de trop nombreux facteurs influençant la présence d'outliers pour mettre en évidence une corrélation dans les graphiques (Figure 6) des relations linéaires entre les caractéristiques des événements pluvieux et le nombre d'outliers

Tableau 9 : Nombre d'outliers par date et la concentration maximale en Cl mesurée lors de cette date

date	nb d'outliers	nb sites	nb outliers/ nb site	Cl max
08-03-17	40	8	5,0	160
20-11-17	56	4	14,0	93
27-11-17	3	8	0,4	6,6
11-12-17	71	8	8,9	1900
15-01-18	91	8	11,4	370
31-01-18	78	10	7,8	160
27-03-18	46	6	7,7	540
28-03-18	46	5	9,2	210
09-01-19	11	1	11,0	190
06-02-19	12	1	12,0	1500
08-02-19	5	1	5,0	200
14-03-19	13	8	1,6	23
04-06-19	37	4	9,3	6,4
09-01-20	8	2	4,0	20

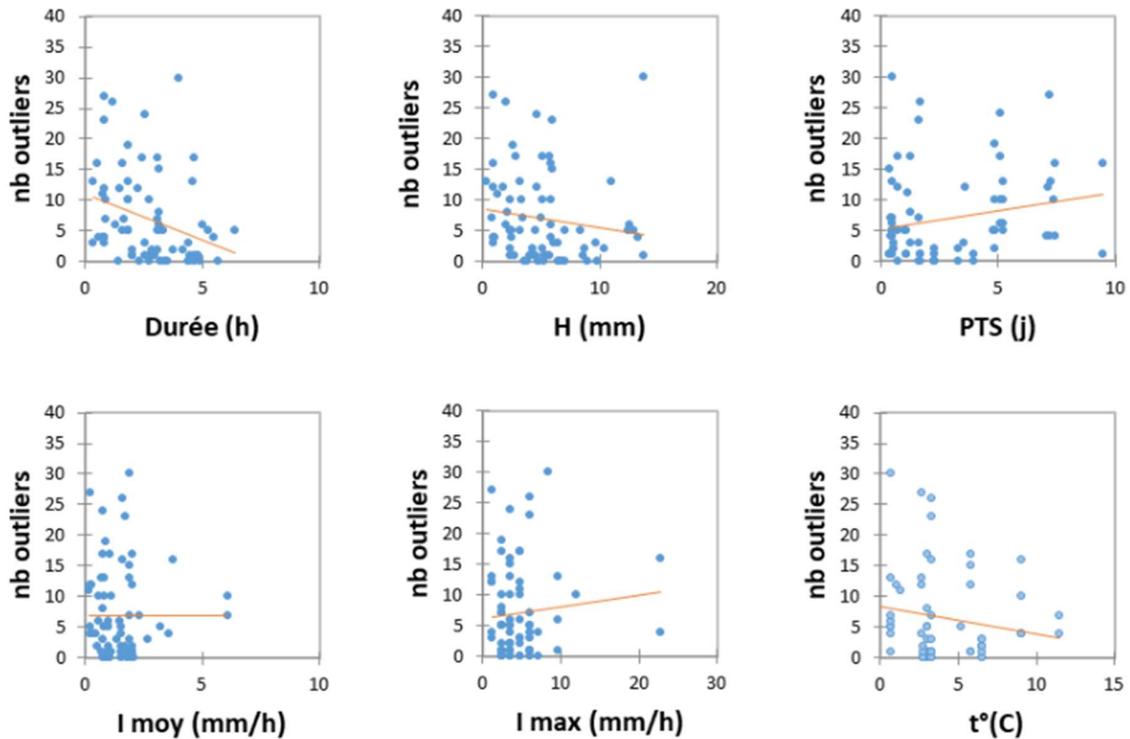


Figure 6 : Corrélation entre le nombre d'outliers et les caractéristiques de l'événement pluvieux

D'après les différentes observations ci-dessus, la présence d'outliers semble donc en partie correspondre à des échantillonnages peu répétés comme l'échantillonnage des toitures ou à des échantillonnage dans des conditions particulières comme l'échantillonnage des voiries en période hivernale (neige, sel,...). De

plus, contrairement aux concentrations mesurées dans les eaux souterraines, les concentrations retrouvées dans les eaux de ruissellement sont extrêmement variables (Chocat et al, 2007). Elles dépendent de nombreux facteurs : le type événement pluvieux (durée, intensité, la période de temps sec), le type de surface urbaine et les activités. Les concentrations sont fort différentes d'un site à l'autre mais le sont également d'un événement pluvieux à l'autre. Certaines études montrent même qu'il y a une forte variabilité au cours d'un même événement pluvieux. La concentration est généralement plus importante au début de l'événement et décroît au cours du temps mais il peut y avoir aussi des fluctuations liées à des pics d'intensité de la pluie (Chocat et al, 2007).

D'après les observations des outliers en RBC et ce qui est trouvé dans la littérature, il ne semble pas pertinent d'exclure les outliers de l'analyse du jeu de données. Il n'est pas prouvé qu'il n'y a pas d'erreurs d'analyse mais il est vraisemblable qu'une partie importante des outliers soient liés à la grande variabilité de concentrations de polluants observées dans les eaux de ruissellement.

2.2.3. Variations temporelles des concentrations mesurées dans les sites échantillonnés plusieurs fois

14 événements pluvieux ont été échantillonnés mais tous les sites n'ont pas été échantillonnés lors de chaque événement. Les sites les plus suivis ont seulement été échantillonnés 6 à 7 fois entre 2017 et 2020. Il n'y a donc pas de chroniques temporelles très détaillées. Les variations temporelles des principales substances de certains sites sont néanmoins représentées à la Figure 7 et à la Figure 8. Il s'agit des sites A2 et B6 qui font partie des sites les plus échantillonnés. Ces figures permettent de d'observer que les concentrations ne sont pas constantes au cours du temps.

Pour le site A2, le 06/02/19 il y a eu un pic de conductivité électrique, des concentrations en matières en suspension (TSS), en Cl, en Na et en certains métaux (dont le Cu et Zn total) et une légère augmentation en HAP. 2 jours plus tard, le 08/02/19 toutes les concentrations ont fortement baissé. Il est donc possible de constater qu'en l'espace de quelques jours les concentrations dans les eaux de ruissellement peuvent varier fortement. Le 28/03/18 pour le site A2, il y a un pic important en HAP et en TSS.

Le site B6, présentent deux pics de conductivité, Cl et Na pendant l'hiver 2017-2018. Lors de ces pics, des augmentations des concentrations en métaux totaux sont également observées. Pour le deuxième, il y a en plus une augmentation des concentrations en huiles minérales et en HAP.

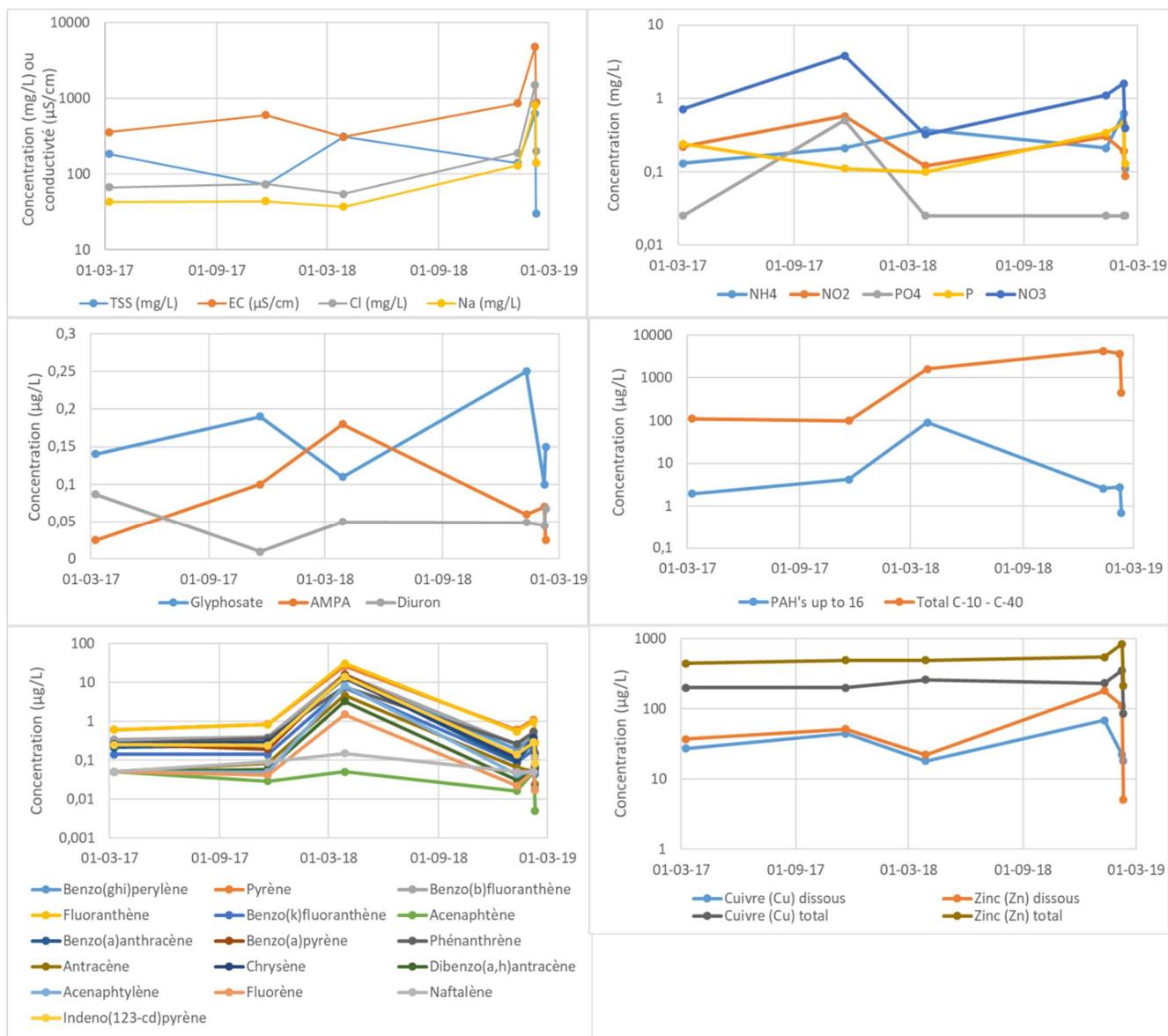


Figure 7 : Variations temporelles de la conductivité et des concentrations de certains chimiques pour le site A2

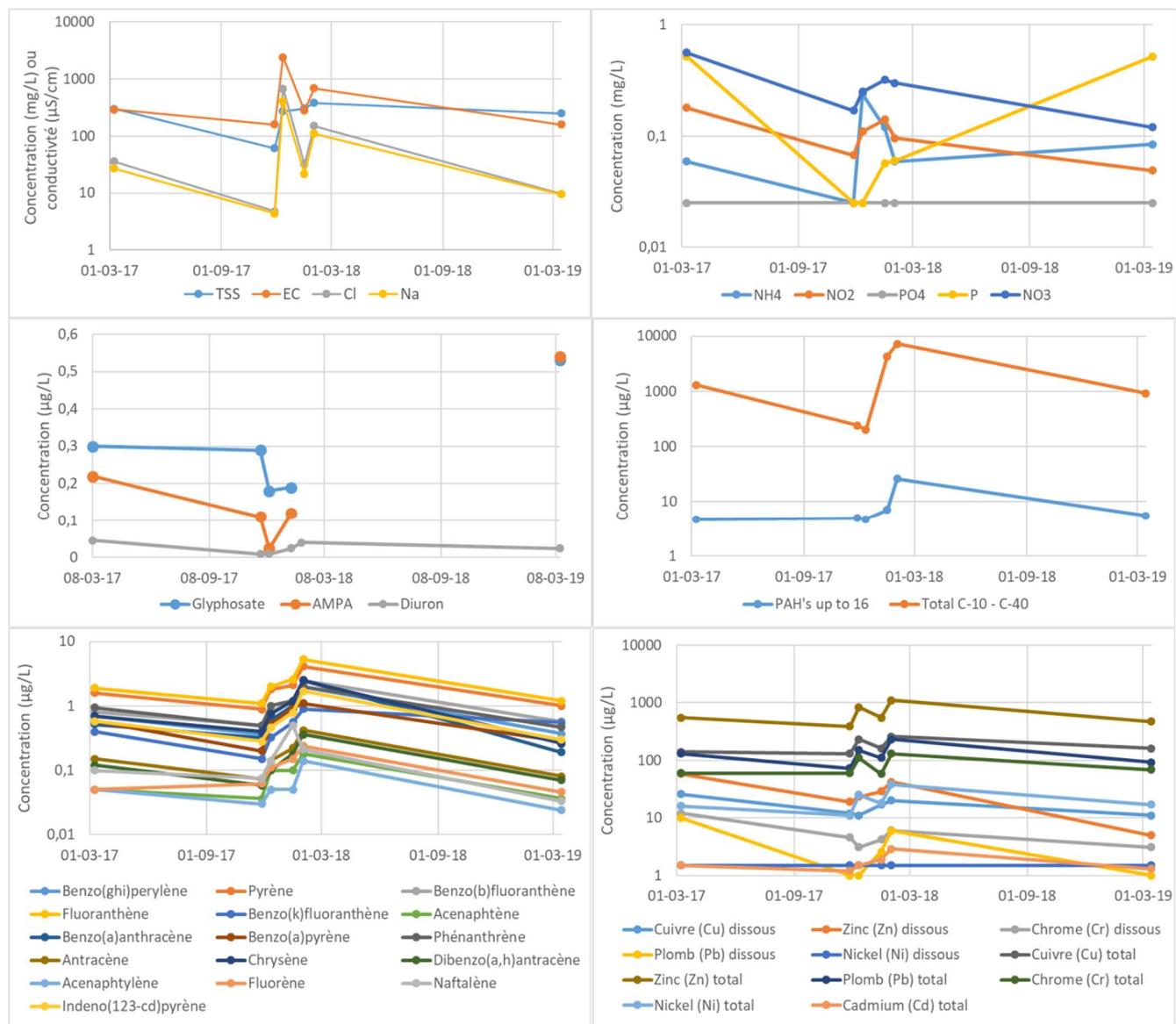


Figure 8: Variations temporelles de la conductivité et des concentrations de certains éléments chimiques pour le site B6

2.2.4. Statistiques descriptives et box-plots

2.2.4.1 Statistiques générales pour l'ensemble du jeu de données

Les principaux paramètres de statistiques descriptives sont repris dans le Tableau 10. Ils ont été calculés, pour chaque substance analysée, pour l'ensemble des échantillons d'eau de ruissellement prélevés en RBC. Les paramètres statistiques repris sont : le minimum, le maximum, la moyenne, la médiane (P50), le percentile 25 (P25), le percentile 75 (P75), le percentile 90 (P90). Le nombre d'échantillon où chaque paramètre est mesuré est également mentionné. Pour mieux visualiser ces statistiques, les données ont également été représentées sous forme de box-plots⁵ à la Figure 9 et à la Figure 10.

Les eaux de ruissellement à Bruxelles ont une conductivité électrique médiane de 315 $\mu\text{S}/\text{cm}$ mais la conductivité maximale est de 5800 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La matière en suspension (TSS) a une médiane de 193 mg/L mais peut atteindre 1374 mg/L. Le pH est généralement basique (médiane 7,9). Le Cl et le Na ont des concentrations médianes assez faibles, respectivement 39 et 31 mg/L mais peuvent atteindre des concentrations très importantes (respectivement 1900 mg/L et 980 mg/L) lors d'épisodes hivernaux où les routes sont salées. Les autres éléments majeurs ont généralement des concentrations faibles. La concentration médiane en Ca de 18 mg/L, celle du SO₄ de 7,1 mg/L et la concentration médiane en NO₃ est de 1,5 mg/L (0,33 mg/L de N) et est généralement inférieur à 7 mg/l (1,57 mg/L de N) (Figure 9).

Les pesticides sont présents en faibles concentrations sauf pour le glyphosate qui a une concentration médiane de 0,15 $\mu\text{g}/\text{L}$ ce qui est supérieure à la norme (0,1 $\mu\text{g}/\text{L}$).

A la Figure 10, il est possible de constater que les HAP présentent des outliers avec des concentrations très importantes. Les box-plots des HAP sont représentés avec et sans les concentrations maximales. Sur le graphique sans les valeurs extrêmes, il est possible de constater que les HAP légers sont généralement présents en concentration moins importantes que les HAP lourds. Ceux qui sont présents en plus grande concentration sont le pyrène et le fluoranthène. Pour les huiles minérales, en plus de la fraction totale (C10-C40), les différentes fractions sont représentées par des box plots. Celles présentes dans les concentrations les plus importantes sont les fractions intermédiaires de C20 à C36. Sur les graphiques des métaux, il est possible de constater que les concentrations en métaux totaux sont beaucoup plus importantes que celles des métaux dissous. Les métaux totaux en concentration les plus importantes sont le Fe (P50 de 12000 $\mu\text{g}/\text{L}$), l'Al (P50 de 5750 $\mu\text{g}/\text{L}$), le Zn (P50 de 440 $\mu\text{g}/\text{L}$), le Cu (P50 de 140 $\mu\text{g}/\text{L}$), le Pb (P50 de 68 $\mu\text{g}/\text{L}$), et le Cr (P50 de 48 $\mu\text{g}/\text{L}$).

Tableau 10: Statistiques descriptives des eaux de ruissellement en RBC

substance	unité	groupe	Nb Ech.	Min	P25	Moy	P50	P75	P90	Max
Toluène	$\mu\text{g}/\text{L}$	Composés aromatiques volatils	74	0,1	0,1	0,18	0,1	0,1	0,25	3,2
BZV-5 / DBO5	mg/l	El. Maj + param.	74	2	4,25	9,99	7	11,75	17,7	67
Ca	mg/l	El. Maj + param.	74	1,8	13	22,11	18	24,5	37,1	92
Cl	mg/l	El. Maj + param.	74	0,75	12	163,61	39	157,5	412	1900
CZV/ DCO	mg/l	El. Maj + param.	74	5	88,03	147,24	130	185	267	530
EC 25°	$\mu\text{S}/\text{cm}$	El. Maj + param.	74	28	170	681,91	315	685	1440	5800
Na	mg/l	El. Maj + param.	74	0,31	12,25	97,34	31	94,5	238	980
NH4	N mg/l	El. Maj + param.	74	0,025	0,08	0,34	0,19	0,37	0,80	3

⁵ Le boxplot se compose d'une boîte prolongée de part et d'autre par 2 moustaches. La boîte s'étend du 1er quartile (P25) au 3ème quartile (P75) et contient donc la moitié des données. Les moustaches prolongent la boîte jusqu'au P10 et au P90. Le minimum, le maximum et la moyenne peuvent également être représentés.

substance	unité	groupe	Nb Ech.	Min	P25	Moy	P50	P75	P90	Max
NO2	N mg/l	El. Maj + param.	74	0,005	0,05	0,16	0,092	0,18	0,40	1,5
NO3	N mg/l	El. Maj + param.	74	0,05	0,22	0,65	0,335	0,83	1,57	3,8
P	mg/l	El. Maj + param.	74	25	57,25	193,66	97,5	240	494	1400
pH	-	El. Maj + param.	74	6,2	7,6	7,97	7,9	8,3	8,6	9,6
PO4	P mg/l	El. Maj + param.	74	0,025	0,025	0,09	0,025	0,10	0,25	0,5
SO4	mg/l	El. Maj + param.	74	0,85	4,225	11,34	7,1	12	22,7	77
TSS	mg/l	El. Maj + param.	74	5,7	87,25	253,33	193,5	318,75	525,3	1374
Acenaphtène	µg/L	HAP	74	0,005	0,02	0,06	0,05	0,05	0,13	0,32
Acenaphtylène	µg/L	HAP	74	0,005	0,02	0,22	0,05	0,05	0,09	8,3
Antracène	µg/L	HAP	74	0,005	0,05	0,23	0,06	0,15	0,33	4,6
Benzo(a)anthracène	µg/L	HAP	74	0,005	0,13	0,80	0,32	0,59	1,1	14
Benzo(a)pyrène	µg/L	HAP	74	0,005	0,12	0,77	0,28	0,48	0,98	16
Benzo(b)fluoranthène	µg/L	HAP	74	0,005	0,26	0,98	0,47	0,78	1,34	16
Benzo(ghi)perylène	µg/L	HAP	74	0,005	0,19	0,80	0,37	0,58	1,055	14
Benzo(k)fluoranthène	µg/L	HAP	74	0,005	0,08	0,43	0,18	0,32	0,56	7,4
Chrysène	µg/L	HAP	74	0,005	0,17	0,85	0,39	0,70	1,27	13
Dibenzo(a,h)anthracène	µg/L	HAP	74	0,005	0,04	0,16	0,05	0,09	0,21	3,3
Fluoranthène	µg/L	HAP	74	0,005	0,51	1,97	0,92	1,58	3,31	31
Fluorène	µg/L	HAP	74	0,005	0,03	0,12	0,05	0,10	0,21	1,6
Indeno(123-cd)pyrène	µg/L	HAP	74	0,005	0,14	0,74	0,29	0,47	0,92	14
Naftalène	µg/L	HAP	74	0,005	0,05	0,21	0,08	0,13	0,5	5,1
PAH's up to 16	µg/l	HAP	74	0,058	1,91	7,54	3,1	4,7	8,35	140
Phénanthrène	µg/L	HAP	74	0,013	0,25	0,79	0,40	0,88	1,5	8,6
Pyrène	µg/L	HAP	74	0,005	0,45	1,68	0,84	1,55	3	26
Fraction C-12 - C-16	µg/l	Huiles minérales	57	6,5	6,5	63,82	6,5	44	75	2000
Fraction C-12 - C-22	µg/l	Huiles minérales	17	12	12	145,65	66	190	444	570
Fraction C-16 - C-20	µg/l	Huiles minérales	57	6,5	6,5	201,04	77	250	428	3000
Fraction C-20 - C-24	µg/l	Huiles minérales	57	6,5	19	308,20	170	430	884	2000
Fraction C-22 - C-30	µg/l	Huiles minérales	17	12	28	476,71	200	830	1260	2000
Fraction C-24 - C-28	µg/l	Huiles minérales	57	6,5	25	478,75	220	770	1340	1900
Fraction C-28 - C-32	µg/l	Huiles minérales	57	6,5	27	500,80	190	780	1560	2100
Fraction C-32 - C-36	µg/l	Huiles minérales	57	6,5	16	413,36	130	650	1400	1900
Fraction C-36 - C-40	µg/l	Huiles minérales	57	6,5	6,5	274,18	66	380	976	1500
Huile minérale C30-C40	µg/L	Huiles minérales	17	12	12	429,71	180	580	1320	1900
Total C-10 - C-40	µg/l	Huiles minérales	74	50	110	1973,38	815	2875	5580	10000
Al dissous	µg/L	métaux dissous	74	5	64,25	154,59	99	187,5	341	1000
Cr dissous	µg/L	métaux dissous	74	0,5	2,025	4,61	3,1	4,75	9,1	38
Cu dissous	µg/L	métaux dissous	74	4,3	11	19,85	14	22	41,4	100
Fe dissous	µg/L	métaux dissous	74	5	62	208,11	135	237,5	447	2100
Ni dissous	µg/l	métaux dissous	74	1,5	1,5	2,28	1,5	1,5	4,88	13
Pb dissous	µg/L	métaux dissous	74	1	1	5,90	1	2,75	5,85	98
Zn dissous	µg/L	métaux dissous	74	5	5	60,62	19	43,5	71,9	1000
Al total	µg/L	métaux totaux	74	51	3375	7543,80	5750	9475	16000	34000
Cd total	µg/L	métaux totaux	74	0,1	0,5	0,95	0,5	1,3	1,9	4,5
Cr total	µg/L	métaux totaux	74	0,5	27,25	64,24	48	76,25	124	370
Cu total	µg/L	métaux totaux	74	11	72,5	153,78	140	197,5	260	880
Fe total	µg/L	métaux totaux	74	37	6950	14388,20	12000	18000	31800	54000
Hg total	µg/L	métaux totaux	74	0,025	0,05	0,30	0,12	0,2275	0,494	5,8
Ni total	µg/l	métaux totaux	74	1,5	11	24,38	17	26	43,4	210
Pb total	µg/L	métaux totaux	74	5	43,5	95,36	68	100	170	720
Zn total	µg/L	métaux totaux	74	34	265	483,47	440	600	881	1300
AMPA	µg/l	pesticides	62	0,03	0,06	0,13	0,09	0,13	0,31	0,64
Diuron	µg/l	pesticides	72	0,01	0,01	0,02	0,01	0,03	0,04	0,17
Glyphosate	µg/l	pesticides	62	0,03	0,10	0,25	0,15	0,23	0,36	4,50
Bisphenol A	µg/l	Phenol	17	0,05	0,12	0,33	0,28	0,45	0,53	1,10
m-cresol	µg/l	Phenol	17	0,05	0,11	0,62	0,25	0,32	0,47	7,00
o-Cresol	µg/l	Phenol	17	0,05	0,05	0,52	0,14	0,64	1,18	3,10
p-Cresol	µg/l	Phenol	17	0,05	0,05	0,23	0,15	0,25	0,53	0,91
Phenol	µg/l	Phenol	17	0,10	0,43	3,27	1,20	3,00	4,98	27,00

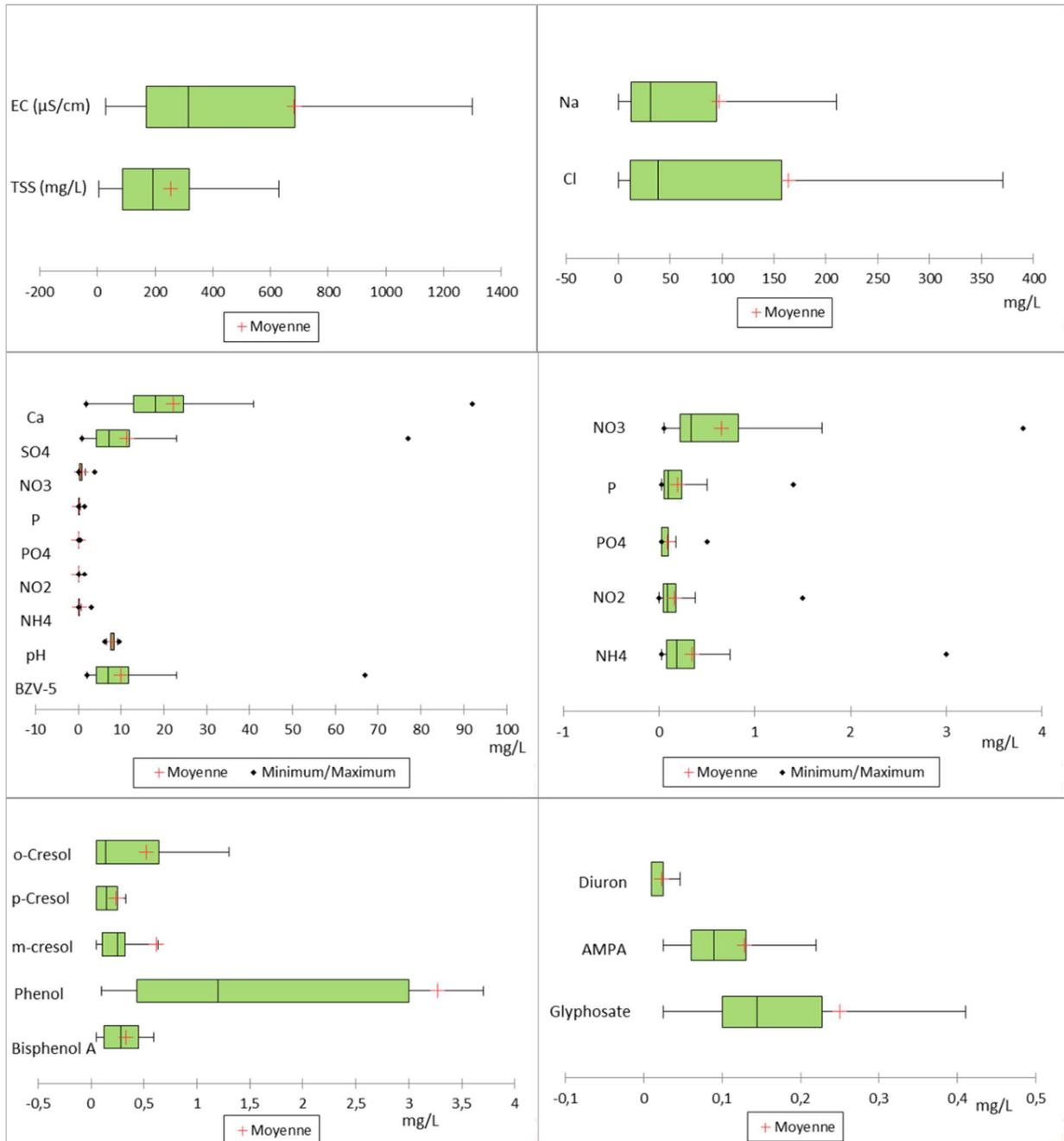


Figure 9: Box-plots de l'ensemble des échantillons pour les principaux paramètres physico-chimiques, les éléments majeurs et mineurs, les phénols et les pesticides

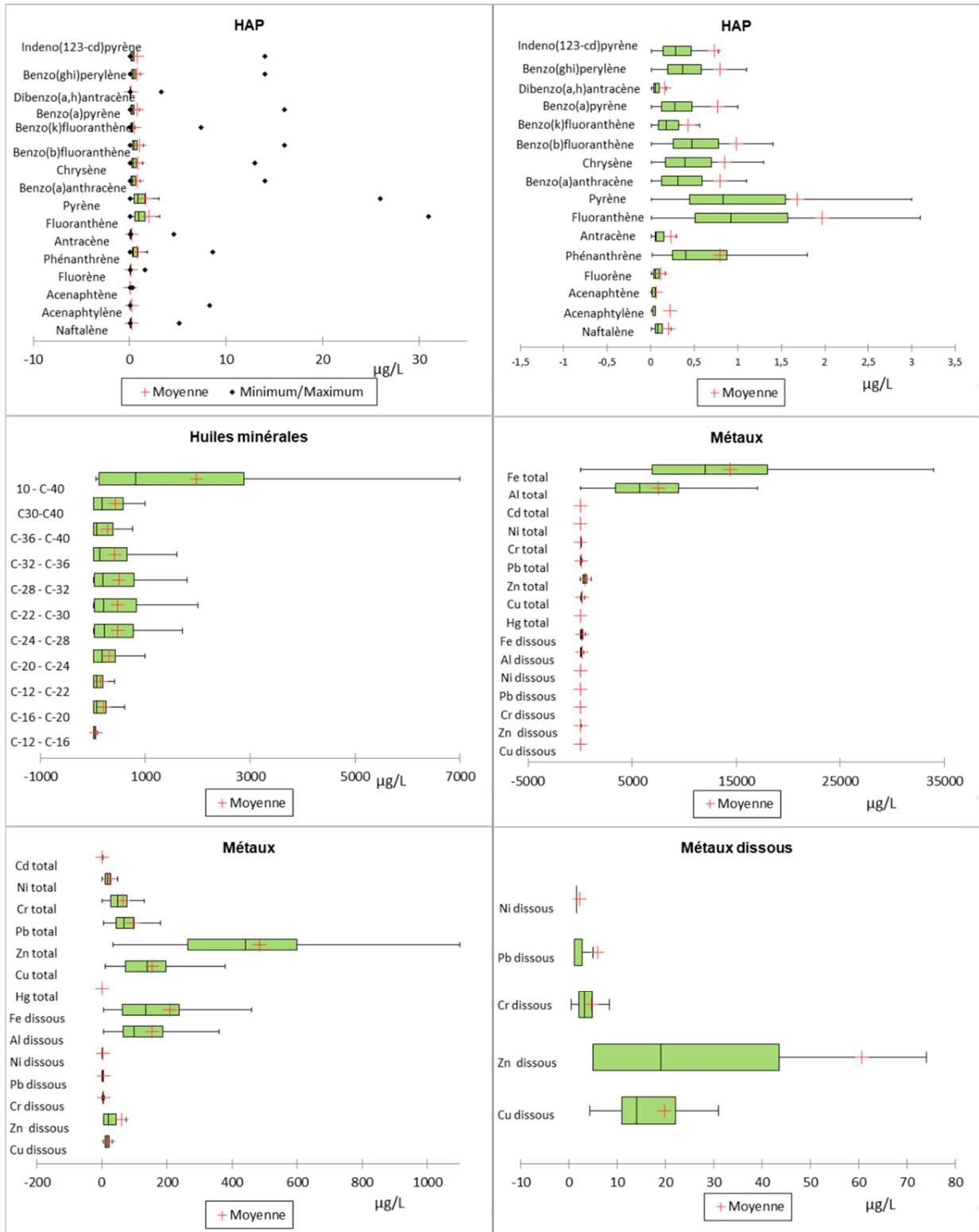


Figure 10 : Box-plots de l'ensemble des échantillons pour les HAP, les huiles minérales et les métaux

2.2.4.2. Mise en évidence des différences entre les eaux de ruissellement issues des voiries, toitures et sites ferroviaires en RBC

Pour visualiser les différences existant entre les eaux de ruissellement provenant des différentes catégories de site d'échantillonnage, les diagrammes de types box-plots ont également été utilisés (Figure 11, Figure 12, Figure 13, Figure 14 et Figure 15). Les sites échantillonnés ont été classés en 6 catégories en fonction du contexte (voiries, toitures et sites ferroviaires) et l'intensité du trafic pour les routes. Les 6 catégories sont celles décrites dans le Tableau 1 et reprises ci-dessous :

1. Autoroutes (>20 000 véhicules par jour),
2. Routes urbain dense (10 000 - 20 000 véhicules par jour),
3. Routes urbain moyen (3000-10 000 véhicules par jour),
4. Routes urbain faible (< 3000 véhicules par jour),
5. Toitures,
6. Sites ferroviaires.

Il faut toutefois noter que pour les catégories 5 et 6, le nombre d'échantillons est limité, respectivement 4 échantillons qui concernent un seul événement pluvieux et 3 échantillons pour 2 événements pluvieux. Le calcul des percentiles pour ces 2 catégories n'est donc pas statistiquement robuste mais ces catégories seront tout de même représentées sous forme de box-plots pour pouvoir être comparées aux autres catégories.

En observant les différents box-plots, il est possible de constater que les eaux de ruissellement des toitures se distinguent fortement des eaux de ruissellement des autres catégories :

- Il y a peu de matière en suspension (TSS),
- le pH est légèrement acide contrairement aux eaux de voiries qui sont plutôt basiques,
- les eaux de toitures sont moins minéralisées que celles des voiries, la conductivité électrique maximale est de 110 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et les concentrations en Cl, Ca et SO_4 sont moins importantes que pour les eaux issues voiries. Par contre, les concentrations en azote et en phosphore sont généralement plus importantes pour les toitures que les voiries, c'est le cas du NH_4 , du NO_3 , du PO_4 et du P total. Ce n'est par contre pas le cas du NO_2 . Il n'y a pas, ou très peu de toluène, de HAP et d'huiles minérales dans les eaux de ruissellement des toitures.
- En ce qui concerne les pesticides, l'AMPA n'est pas quantifié sur les toitures alors qu'il est quantifié dans tous les autres types de site. Par contre le diuron y a été mesuré en plus grande concentration. D'autres pesticides ont également été quantifiés plus régulièrement sur les toitures que sur les voiries. Il faut cependant rappeler que les toitures ont été échantillonnées uniquement en juin contrairement aux voiries qui ont plutôt été échantillonnées en hiver. Il n'est donc pas certain que la présence de plus nombreux pesticides soit liée aux toitures, elle est peut-être liée à des variations saisonnières. La présence de glyphosate n'a pas été avérée sur les toitures. Sur les 4 sites d'échantillonnage uniquement 2 ont été échantillonnés pour le glyphosate et pour les deux, la limite de quantification était plus élevée que la norme. Les analyses réalisées sur les eaux de ruissellement de toiture n'ont cependant pas porté sur les pesticides ou fongicides utilisés spécifiquement pour l'entretien des toitures
- La concentration en métaux totaux est généralement faible sur les toitures en comparaison des voiries à l'exception du Pb et du Zn. Pour les métaux dissous, les différences sont peu marquées

pour le Cu et le Cr, par contre le Zn et le Pb sont retrouvés en concentrations très importantes sur les toitures.

Pour les routes, les différences entre les catégories (en fonction de l'intensité du trafic) sont moins importantes que pour les toitures mais quelques-unes peuvent tout de même être notées

- Pour certains éléments (par exemple conductivité électrique, Cl, NO₂, Cu total et dissous), les concentrations augmentent avec l'intensité du trafic. Pour d'autres éléments, la concentration augmente avec l'intensité du trafic sauf sur les autoroutes où les concentrations sont plus faibles que sur les routes de type urbain dense. Il s'agit des HAP et de certains métaux totaux (Fe, Zn, Cr, Pb, Hg, Cd). Cette différence est peut-être liée à la fluidité du trafic où éventuellement à un revêtement différent entre l'autoroute et les autres types de voiries.
- Il y a également des substances pour lesquelles il y a uniquement une différence entre les routes à faible trafic et les autres catégories de routes. Les routes à faible trafic ont des concentrations en phosphore plus élevées (PO₄ et P total) que les autres routes et des concentrations moins importantes en SO₄, huiles minérales, glyphosate et Ni total.

Concernant les sites ferroviaires, ils présentent généralement des concentrations similaires à celle de la catégorie des routes à faible trafic à l'exception du SO₄, du Cr et du Ni qui sont en concentrations plus élevées. Il faut toutefois être prudent pour généraliser cette règle à l'ensemble des sites ferroviaires caractérisés par seulement 3 échantillons dont un seul qui présente des valeurs élevées en SO₄, Cr et Ni.

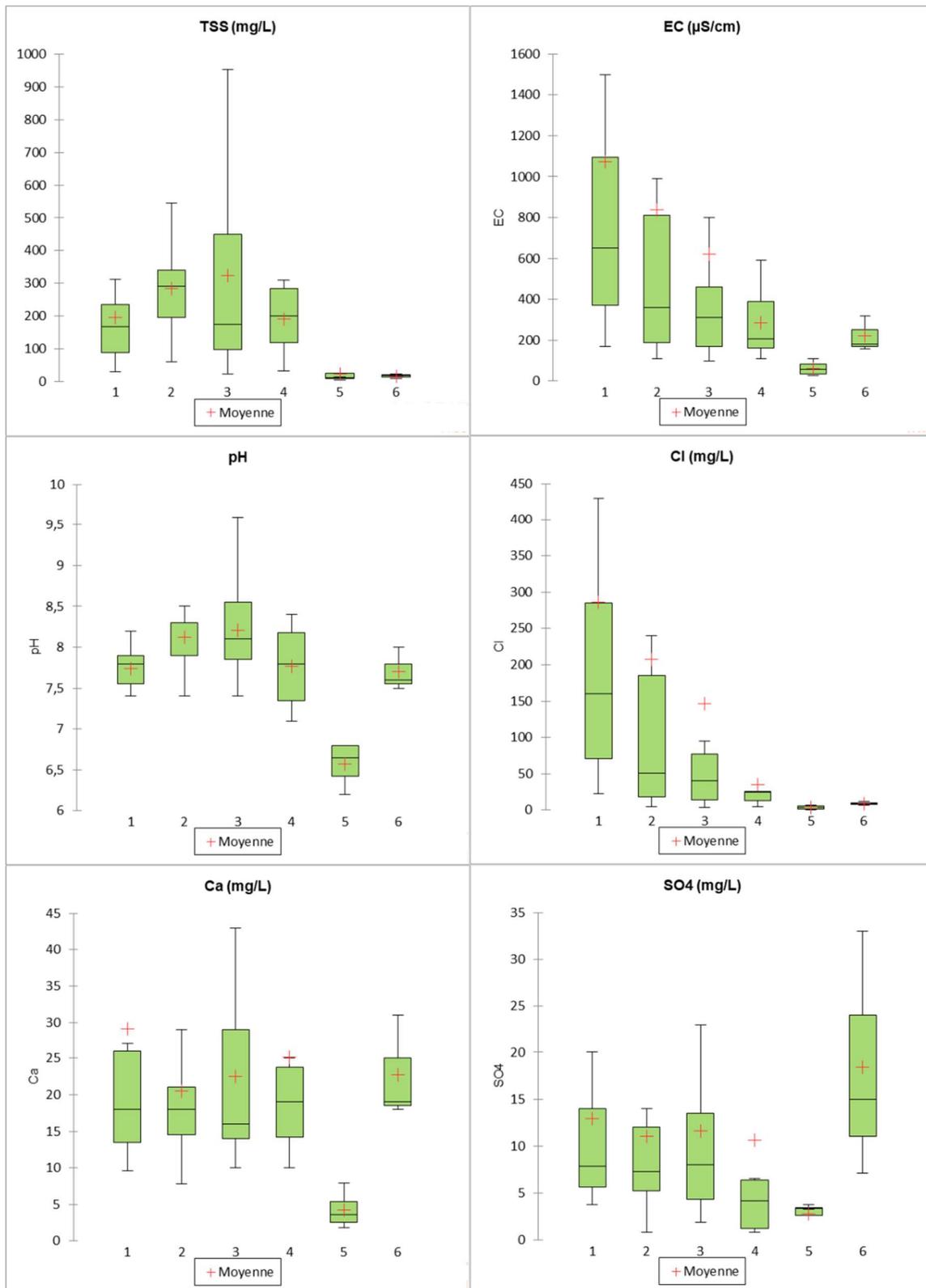


Figure 11: Box plots des principaux paramètres et éléments majeurs repartis en 6 catégories en fonction des sites d'échantillonnages 1.Autoroutes; 2. Routes urbain dense ;3. Routes urbain moyen ; 4.Routes urbain faible ; 5. Toits ; 6.Trains

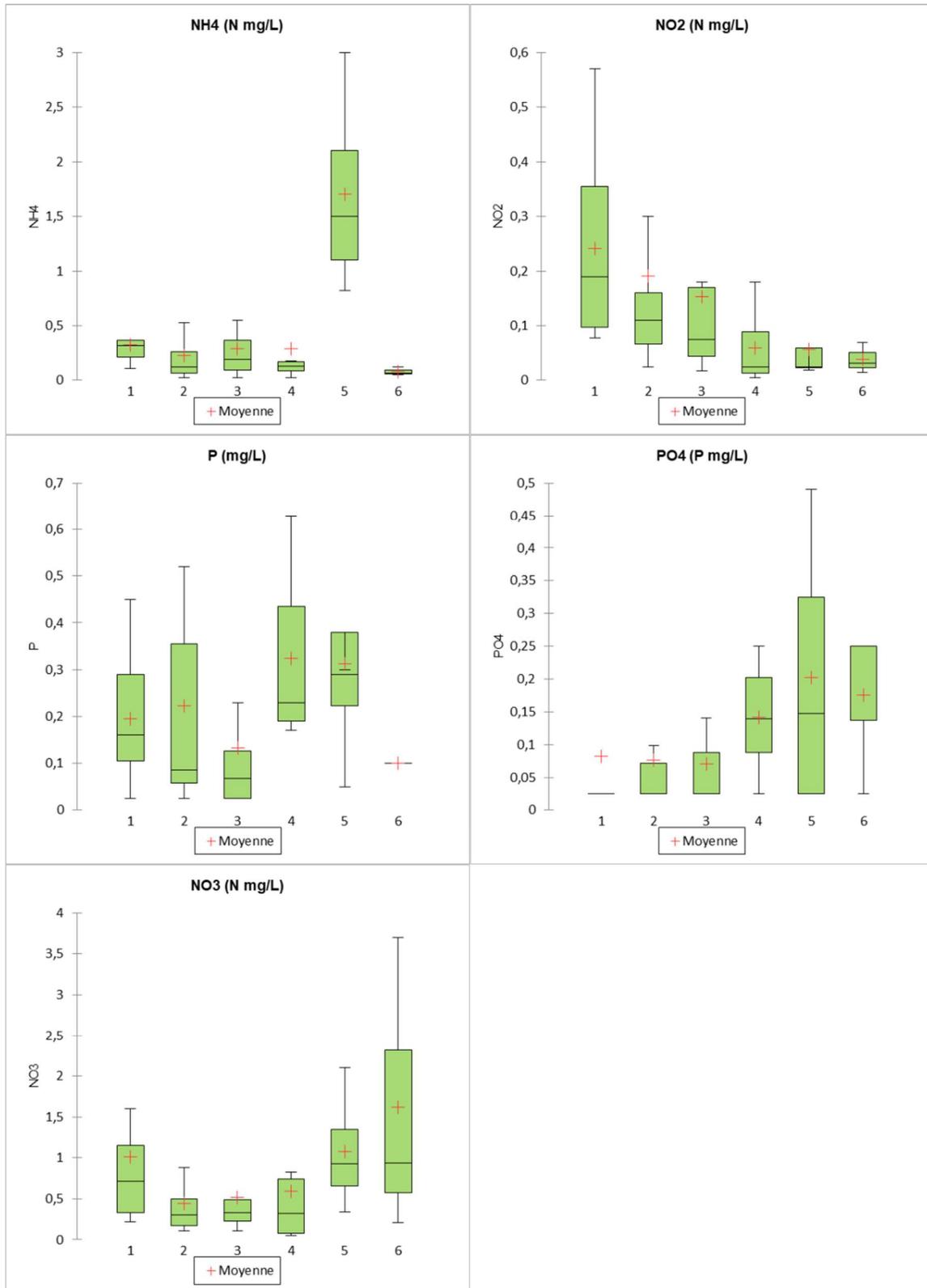


Figure 12 : Box plots de certains éléments majeurs et mineurs repartis en 6 catégories en fonction des sites d'échantillonnages 1.Autoroutes ;2. Routes urbain dense ;3. Routes urbain moyen ; 4.Routes urbain faible ; 5. Toits ; 6.Trains

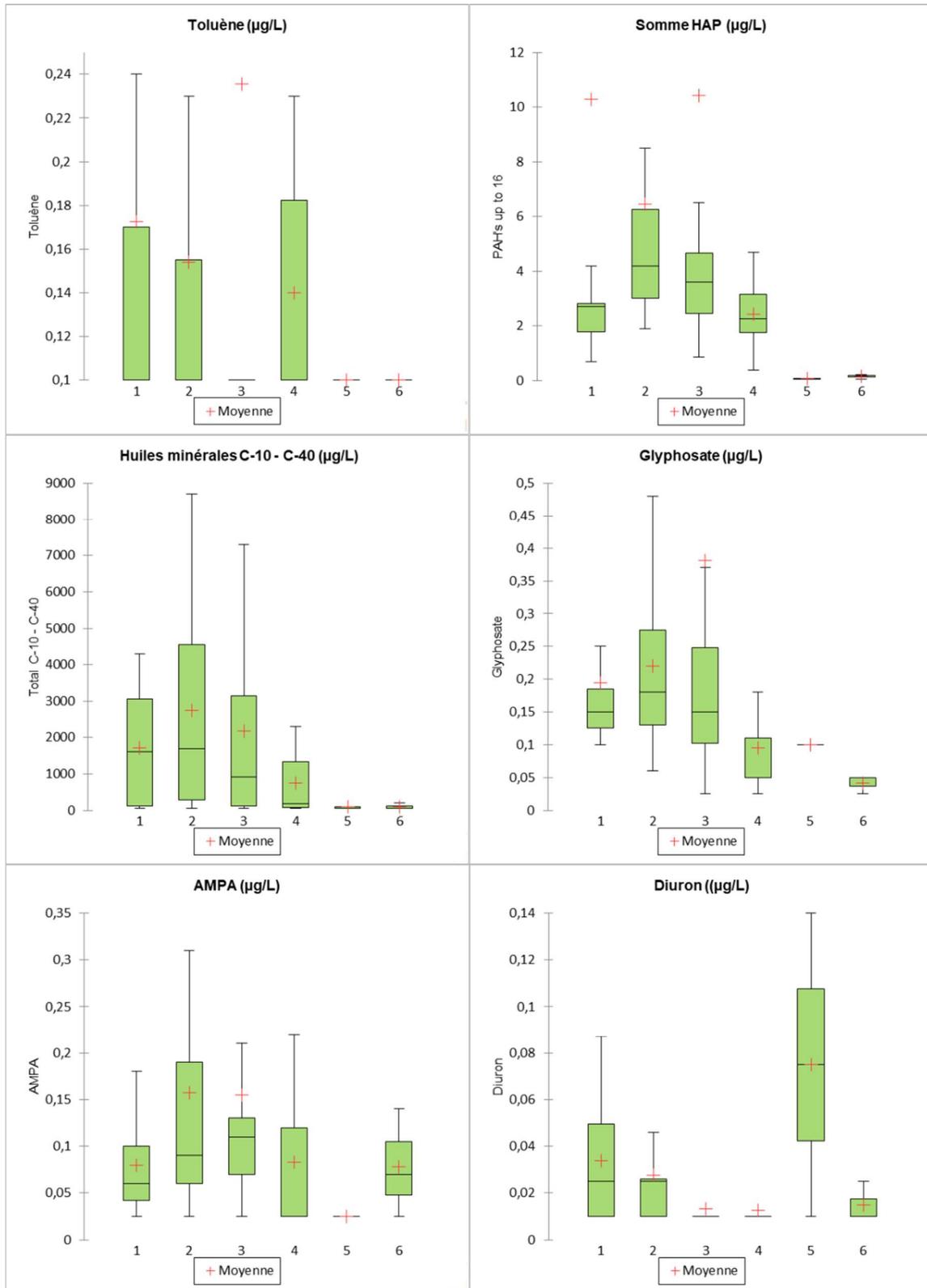


Figure 13: Box plots des HAP, du toluène, des huiles minérales et des pesticides repartis en 6 catégories en fonction des sites d'échantillonnages 1. Autoroutes ; 2. Routes urbain dense ; 3. Routes urbain moyen ; 4. Routes urbain faible ; 5. Toits ; 6. Trains

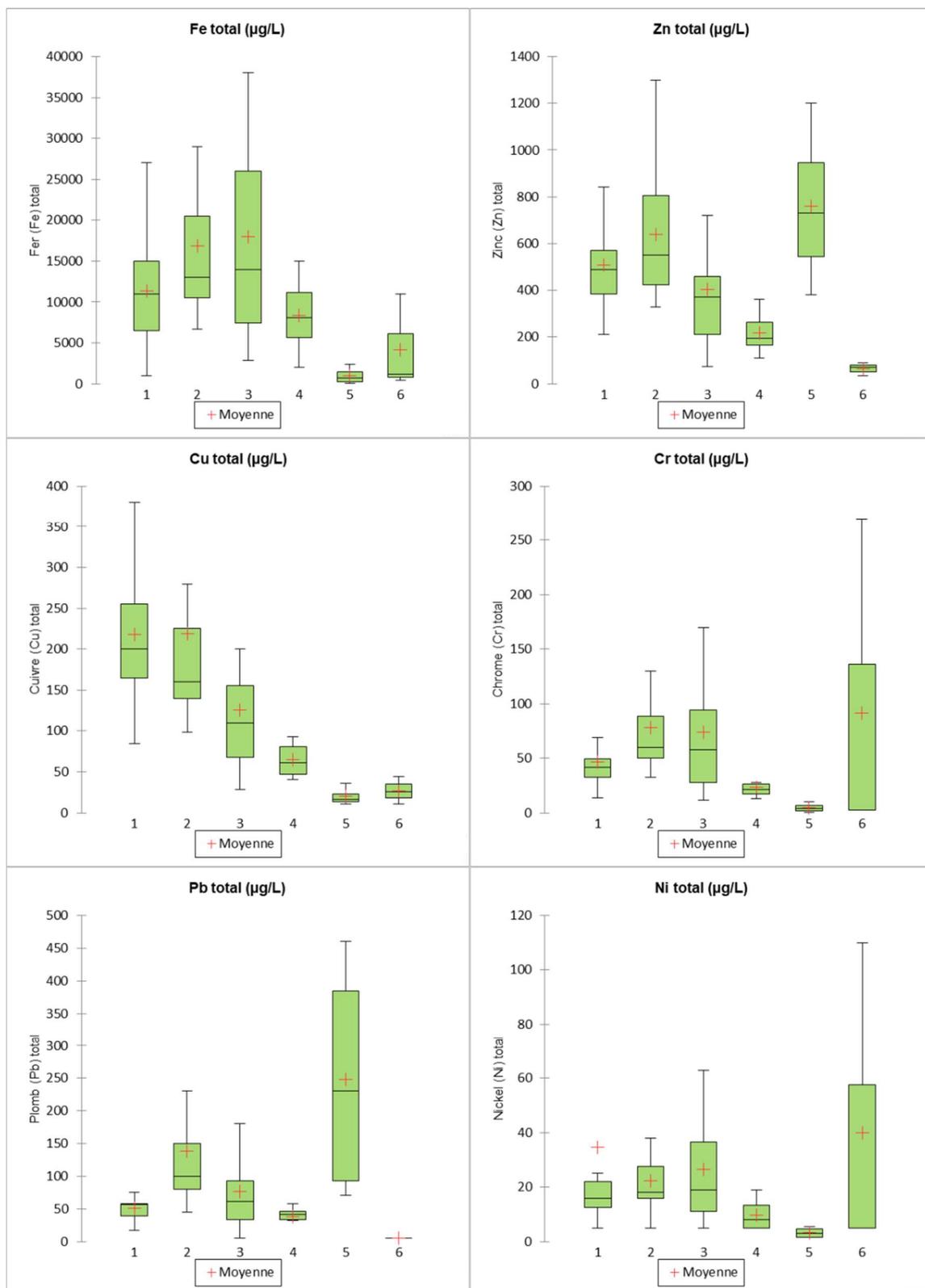


Figure 14 : Box plots de certains métaux totaux repartis en 6 catégories en fonction des sites d'échantillonnages 1.Autoroutes ;2. Routes urbain dense ;3. Routes urbain moyen ;4.Routes urbain faible ; 5. Toits ; 6.Trains

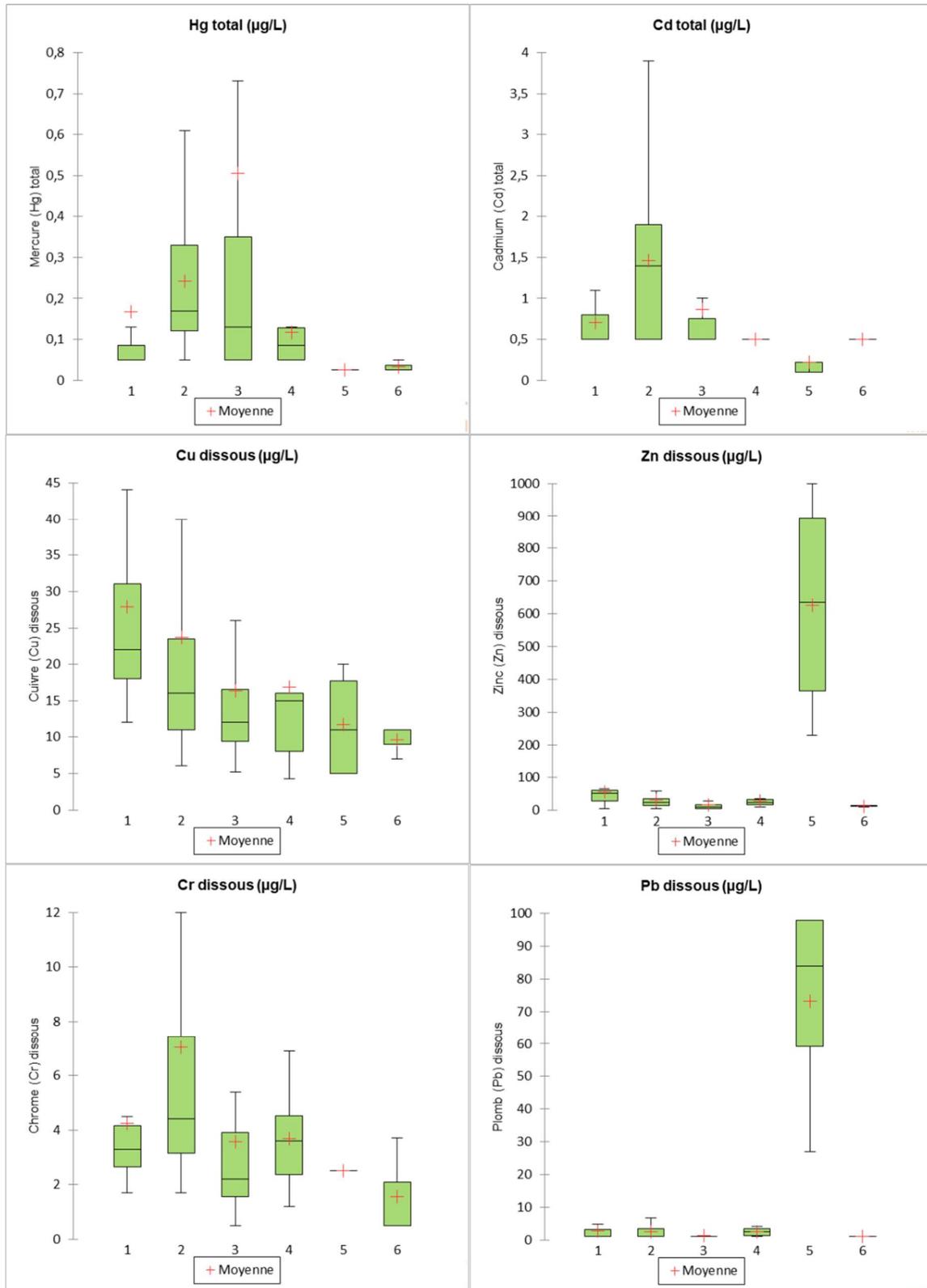


Figure 15: Box plots de certains métaux totaux et dissous repartis en 6 catégories en fonction site d'échantillonnages 1.Autoroutes ;2. Routes urbain dense ;3. Routes urbain moyen ;4.Routes urbain faible ; 5. Toits ; 6.Trains

2.2.5. Comparaison avec les données WEISS

Le système WEISS « Water Emission Inventory Support System » est un outil développé par le VITO et la VMM (Vlaamse Milieumaatschappij) qui permet de déterminer les sources de polluants des eaux de surface. L'outil quantifie les émissions brutes en polluants à la source, puis modélise les cheminements (ruissellement, égouttage, STEP...) vers les eaux de surface. L'outil produit pour chaque polluant une carte des émissions brutes et une carte des émissions nettes. Les émissions nettes sont la fraction des émissions qui va effectivement atteindre les eaux de surface (Bruxelles Environnement, 2017).

Le VITO a réalisé pour Bruxelles Environnement un inventaire des émissions de polluants vers les eaux de surface pour la RBC (VITO, 2014). Celui-ci concerne 86 polluants et quantifie 20 sources de polluants. Celles-ci sont décrites dans l'annexe 3.

Dans l'annexe 3, les données brutes calculées par l'outil WEISS sont comparées aux données mesurées dans les eaux de ruissellement en RBC pour certains polluants : Cu, Zn, acénaphthylène, pyrène et glyphosate. Ces polluants ont été choisis pour illustrer différentes familles de polluants qui sont retrouvés dans les eaux de ruissellement et qui ont des sources de pollution différentes d'après les résultats de l'outil WEISS.

Les comparaisons effectuées entre les données WEISS et les échantillons d'eau de ruissellement sont à prendre avec précautions. Les données issues de l'outil WEISS concernent une estimation des émissions brutes des polluants. Il s'agit d'une estimation annuelle pour l'ensemble de la RBC avec des mailles de 50m x 50m en g/m²/an. Concernant les données mesurées, il s'agit de concentrations en polluants dans les eaux de ruissellement analysées ponctuellement. Les deux données ne sont donc pas quantitativement comparables. De plus, les concentrations mesurées dans les eaux de ruissellement pour un même site peuvent être très variables et ne dépendent pas uniquement de l'occupation de sol mais aussi des caractéristiques de l'événement pluvieux, des conditions hivernales et d'éventuelles pollutions ponctuelles.

Même si les données de WEISS sont difficiles à comparer à ce qui est mesuré dans les eaux de ruissellement, elles ont par contre inspiré différentes variables explicatives de la composition chimique des eaux de ruissellement en RBC, la variable trafic, la variable zone industrielle, la variable surface des bâtiments, la densité de population par quartier, la variable tram. Pour chacune de ces variables explicatives, un indice traduisant l'intensité de la variable dans la zone d'échantillonnage a été calculé :

- L'indice de densité de trafic est attribué avec des valeurs de 1 à 6 selon le trafic journalier estimé par le modèle MUSTI (Bruxelles Mobilité, 2011) et un indice de la fluidité du trafic est estimé sur base des conditions de circulation estimées par google maps le lundi matin à 8h30 (Antoine, 2021).
- La densité de population par quartier est celle de 2020 (Stabel, 2020).
- Pour la variable tram, une valeur de 1 a été attribuée si des voies de tram sont présentes sur le site d'échantillonnage.
- Pour les variables industrie et surface des bâtiments, le bassin d'alimentation de la zone d'échantillonnage doit être connu ce qui n'est pas le cas. La zone d'alimentation a donc été attribuée arbitrairement comme un disque d'un rayon de 100 m autour du site d'échantillonnage. Pour l'indice de la superficie des bâtiments le shapefile « INSPIRE - Bâtiments – UrbIS » de 2013 a été utilisé. L'indice de superficie est égal au pourcentage de zone bâtie de la zone d'alimentation. Pour l'indice industrie, les bâtiments répertoriés dans l'outil WEISS ont été utilisés. L'indice est

égal au rapport entre le nombre d'industries répertoriées sur le nombre total de bâtiments dans la zone d'alimentation.

2.2.6. Corrélation entre les variables

Pour mettre en évidence les relations existantes entre les variables, des coefficients de corrélation de Kendall ont été déterminés pour chaque couple de variables. 80 variables sont prises en compte, les principaux paramètres et substances fréquemment quantifiées dans les eaux de ruissellement en RBC (Tableau 3 et Tableau 4), les caractéristiques de l'événement pluvieux (la hauteur, la durée l'intensité moyenne, l'intensité maximale, la période de temps sec avant l'évènement pluvieux, la température minimale du jour de l'échantillonnage) et les variables explicatives définies sur base de l'indice Weiss (un indice fonction de l'intensité du trafic et un indice fonction de la fluidité du trafic, la densité de population du quartier, un indice dépendant de la surface des bâtiments dans la zone d'échantillonnage et un indice fonction du nombre d'industries dans la zone d'échantillonnage).

Une matrice des coefficients de corrélation a été calculée pour l'ensemble des échantillons et une deuxième matrice a été calculée uniquement pour les échantillons concernant les voiries.

La taille de ces matrices étant très importante, pour une question de mise en page, elles se trouvent dans un fichier Excel en annexe.

La matrice des coefficients de corrélation pour l'ensemble des échantillons a permis de mettre en évidence les corrélations suivantes :

- Une forte corrélation positive entre la conductivité électrique, le Na et le Cl.
- Le Cl est également corrélé de manière positive avec le TSS, les HAP, les huiles minérales, le Cu dissous et total, le Zn total, le Ni total et l'Al total. Il est par contre corrélé négativement avec la température.
- Les HAP sont corrélés positivement entre eux.
- Les huiles minérales sont corrélées positivement entre elles.
- Les métaux totaux sont tous corrélés positivement entre eux.
- Des corrélation positives sont observées entre le TSS, les HAP, les métaux totaux, les huiles minérales, la conductivité électrique, Na et Cl.
- Des corrélations positives sont observées entre le NO₃, le NO₂, le Ca et les SO₄.
- Le pH est corrélé positivement avec les métaux totaux, les HAP le TSS et corrélé négativement avec NH₄, P total, NO₃ et les métaux dissous.
- L'indice industrie est corrélé positivement avec le fluoranthène et les HAP totaux.
- La densité de population par quartier est corrélée positivement avec le diuron.

La matrice des coefficients de corrélations a été également réalisée en ne considérant que les échantillons prélevés pour les voiries. Elle a permis de mettre en évidence d'autres corrélations :

- Le Cl, le Na, le NO₂, le Cu dissous et total, le Cr dissous, le Zn total, le Cu total et certaines huiles minérales sont corrélés positivement avec la densité du trafic.
- Les paramètres caractéristiques de l'événement pluvieux durée, hauteur intensité (max et moyenne) sont corrélés négativement avec le NO₃, le NO₂, les SO₄, le Ca, le Cu dissous, le Zn dissous et le Ni dissous.
- La durée de l'évènement pluvieux est corrélée négativement avec l'ensemble des huiles minérales

- La température est corrélée négativement avec la conductivité, Cl, le toluène, NH₄, NO₂, PO₄, NO₃, Ca, SO₄, le Zn dissous, certains fractions des huiles minérales, le naphthalène.
- L'indice industrie est corrélé positivement avec le pH, le Pb total, le Cd total et le bisphénol A et est corrélé négativement avec le-NH₄ et le phenol.
- La superficie des bâtiments est corrélée positivement avec le pH, le Pb total et corrélé négativement avec le phenol.

Ces matrices des coefficients de corrélations mettent en évidence le fait que plusieurs facteurs semblent avoir un impact sur la composition chimique des eaux de ruissellement :

- l'intensité du trafic,
- la période d'échantillonnage. Si l'échantillonnage a eu lieu en période hivernale, il peut y avoir un salage des routes, éventuellement de la neige ou du gel,
- les caractéristiques de l'évènement pluvieux et notamment si l'échantillonnage a été réalisé au début du ruissellement ou plus tard. Pour certains paramètres, la concentration est plus importante au début du ruissellement.

2.2.7. Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales est une méthode qui permet d'explorer des jeux de données multidimensionnels en mettant en évidence les liaisons entre variables et les ressemblances entre individus. Elle permet de résumer un grand jeu de données en un certain nombre de variables synthétiques (les composantes principales), réduisant ainsi le nombre de dimension et pouvant représenter le jeu de données de manière simple sur 2 ou 3 axes.

L'ACP se visualise sur deux types de graphes le cercle des corrélations (ou graphe des variables) et le graphe des individus.

Le cercle des corrélations permet de représenter l'importance de chaque variable pour chaque dimension (composante principale). La direction de chaque flèche indique l'axe expliqué par la variable et le sens indique si la corrélation est positive ou négative. La longueur de la flèche donne également une indication sur la qualité de représentation des variables. Les variables qui ont une valeur de 1 et sont proches du bord du cercle sont bien représentées dans l'ACP par contre les valeurs qui sont proches de l'origine sont moins bien représentées par les axes principaux.

Sur le graphique des individus, les échantillons sont projetés sur le plan des composantes principales. Ce graphique permet d'identifier si les échantillons sont semblables ou pas.

Dans le cadre de cette étude, l'ACP a été utilisée comme première analyse exploratoire du jeu de données. L'analyse sera ensuite affinée avec une autre méthode, les SOMS qui sera développée dans le chapitre suivant. L'ACP a été réalisée en deux étapes, d'abord avec l'ensemble du jeu de données et ensuite uniquement avec données concernant les voiries.

2.2.7.1. Analyse de l'ensemble du jeu de données (voiries, toitures, site ferroviaires)

Dans un premier temps, l'ensemble des données (concentrations des différentes substances chimiques, caractéristiques de l'évènement pluvieux et variables explicatives) est utilisé. Les variables sont d'abord mises sous forme de logarithme pour accorder moins de poids aux valeurs extrêmes et elles sont aussi centrées réduites pour pouvoir comparer des données avec des unités différentes.

Le graphe des variables de cette ACP est présenté à la Figure 16. Le graphe des individus est présenté à la Figure 17 et à la Figure 18. C'est le même graphique mais avec différents éléments mis en évidence, sur l'un il s'agit des groupes d'échantillonnage et sur l'autre des sites d'échantillonnage.

Les 2 premiers axes de l'ACP expriment environ 46 % de l'inertie totale du jeu de données. Ceci peut sembler assez faible mais tout de même bien supérieure à la valeur de référence qui est d'environ 10% (quantile à 95 % du pourcentage d'inertie des 2 premières dimensions de 10000 PCA obtenue avec des variables indépendantes). Ceci signifie que le plan de l'ACP résume bien l'information et qu'il n'y a pas que des variables indépendantes dans le jeu de données.

Sur le graphe des variables (Figure 16), les variables sont colorées en fonction de leur contribution aux deux premières dimensions. Les variables qui contribuent le plus sont en rouge tandis que celles qui contribuent le moins sont en bleu. Celles qui contribuent le moins sont généralement celles qui sont le moins bien représentées dans les 2 premières dimensions de l'ACP. Ce sont les variables proches de l'origine.

Les variables qui contribuent à la première dimension sont les HAP, la matière en suspension (TSS) et les métaux totaux. Les variables densité de population par quartier, superficie des bâtiments, température, intensité moyenne et intensité max sont corrélées négativement à cette première dimension mais elles ne sont pas très bien représentées dans cette ACP. Les variables qui contribuent à la deuxième dimension sont les métaux dissous, les nutriments (N,P), la matière organique, les éléments dissous. Les variables durée et hauteur sont corrélées négativement à cette deuxième dimension.

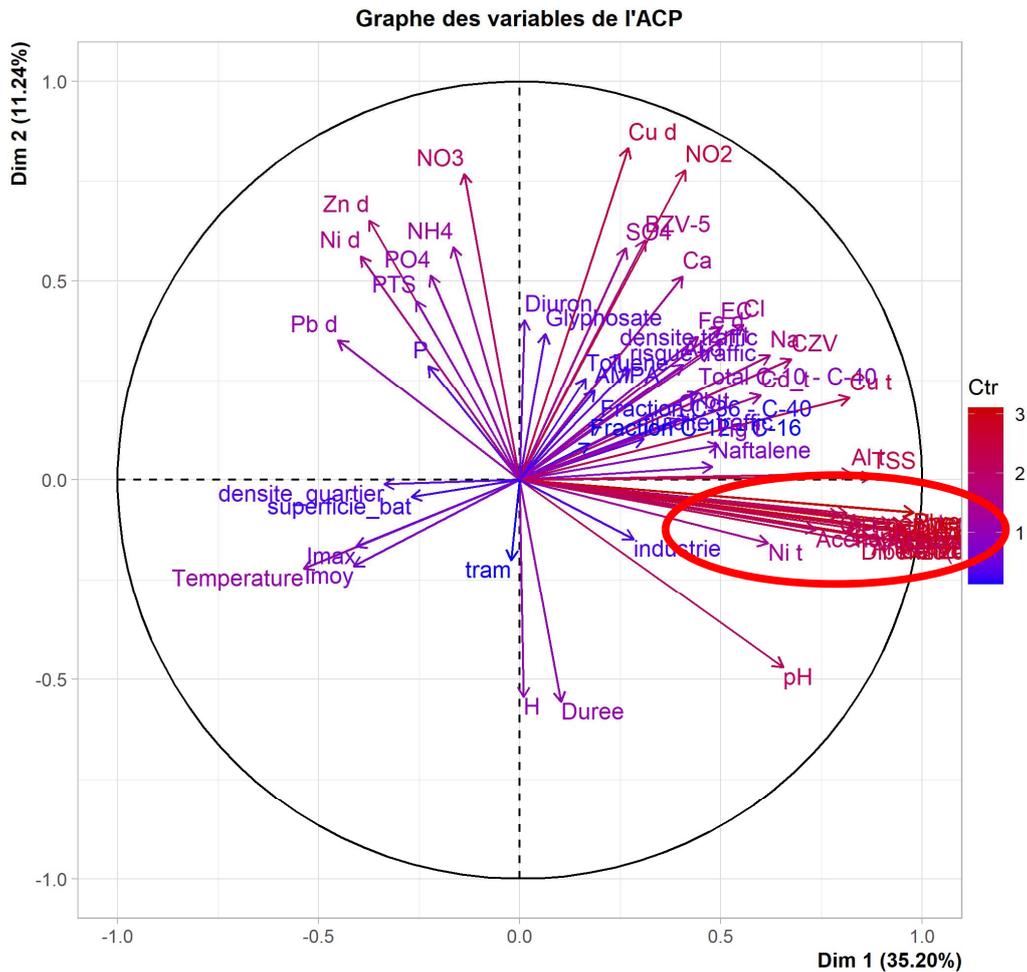


Figure 16 : Graphe des variables de l'ACP dans les deux premières dimensions pour l'ensemble de jeu de données des eaux de ruissellement en RBC-mise en évidence des variables selon leur contribution. Le nom et les coordonnées des variables représentées dans le graphe dans la zone entourée en rouge sont repris dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

Le graphe des individus (Figure 17) permet de mettre en évidence les différences entre les groupes. Les toitures et les sites ferroviaires se distinguent fortement des autres, ils sont à l'extrémité gauche du graphique où les concentrations en HAP, métaux totaux et matière en suspension très faibles. Pour les 4 groupes des voiries les différences sont moins marquées. Le groupe des routes urbain faible se démarque néanmoins des autres groupes de voiries. Ce groupe est également situé sur la partie gauche du graphique avec des concentrations faibles en HAP, métaux totaux mais il se démarque moins que les groupes toitures et sites ferroviaires. En ce qui concerne les trois autres groupes de voiries, autoroutes, routes urbain dense et routes urbain moyen, il n'y a pas de différence évidente sur les deux premières dimensions de l'ACP.

	F1	F2
Ni t	0,617	-0,158
Dibenzo(a,h)anthracene	0,848	-0,155
Benzo(a)pyrene	0,941	-0,154
Benzo(a)anthracene	0,949	-0,154
Antracene	0,874	-0,144
Chrysene	0,952	-0,131
Benzo(b)fluoranthene	0,958	-0,130
Benzo(k)fluoranthene	0,929	-0,127
Benzo(ghi)perylene	0,960	-0,125
Acenaphtylene	0,736	-0,124
Fe t	0,831	-0,121
Fluorene	0,847	-0,115
PAH16	0,952	-0,110
Indeno(123-cd)pyrene	0,923	-0,110
Fluoranthene	0,976	-0,106
Cr t	0,796	-0,088
Acenaphtene	0,813	-0,084
Phenanthrene	0,979	-0,081
Pyrene	0,979	-0,081

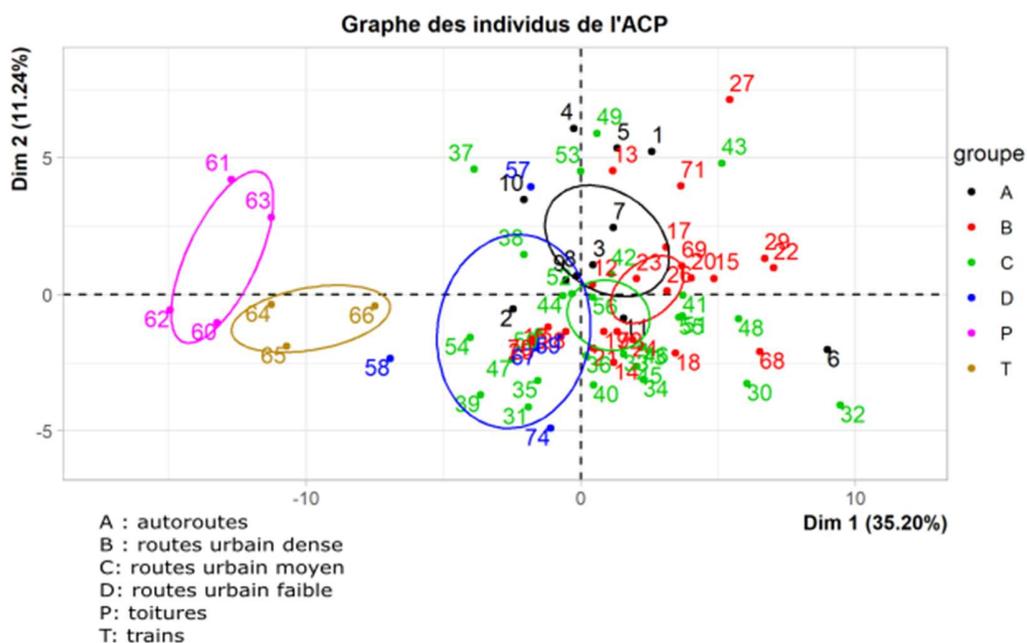


Figure 17: Graphe des individus de l'ACP dans les deux premières dimensions pour l'ensemble de jeu de données des eaux de ruissellement en RBC, mise en évidence des différentes catégories de sites d'échantillonnage

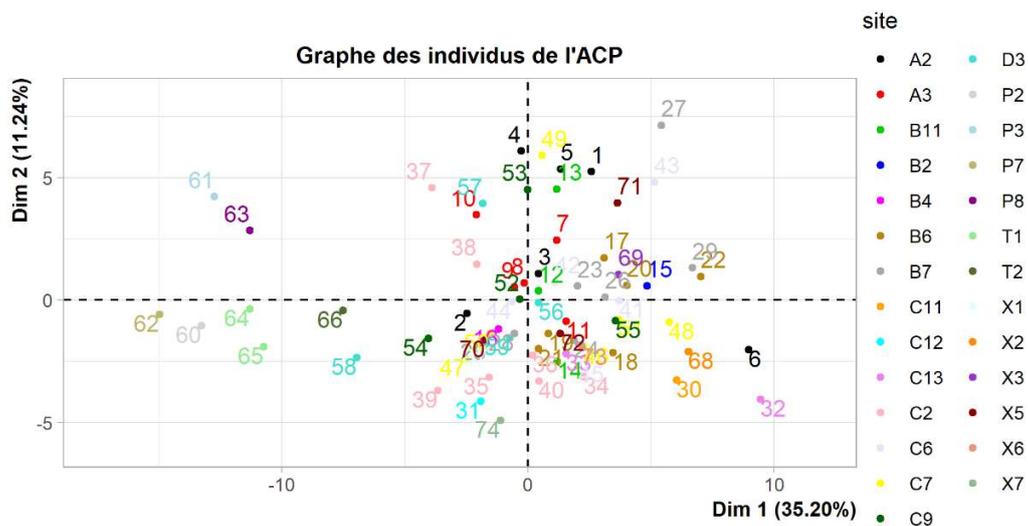


Figure 18 : Graphe des individus de l'ACP dans les deux premières dimensions pour l'ensemble de jeu de données des eaux de ruissellement en RBC, mise en évidence des sites d'échantillonnage

Sur la Figure 18, le graphe des individus est représenté en mettant en évidence les sites d'échantillonnage. Généralement les différents échantillonnages pour un même site ne se situent pas au même endroit sur le graphique. Ils ne sont donc pas semblables selon les deux premières dimensions de l'ACP. Cela avait déjà été remarqué dans le chapitre sur la variabilité temporelle, les concentrations mesurées peuvent varier fortement au cours du temps pour un même site. Il y a cependant quelques exceptions, Il arrive parfois qu'un même site lors de différents échantillonnages se retrouve au même endroit sur le graphique et sont donc semblables d'après les deux premières dimensions de l'ACP.

2.2.7.2. Analyse du jeu de données Voiries

Une deuxième ACP a été réalisée en utilisant uniquement les échantillons récoltés sur les voiries. L'objectif était de supprimer les données de toitures et de sites ferroviaires qui sont des données qui se démarquent des autres et influencent fortement l'ACP, pour ensuite de voir si d'autres corrélations ou d'autres groupes de données ressortaient de cette nouvelle ACP. Dans cette analyse, les variables pouvant influencer la composition chimique des eaux de ruissellement ont été mises comme variables supplémentaires. Elles peuvent être visualisées sur le graphique mais n'influencent pas les dimensions de l'ACP.

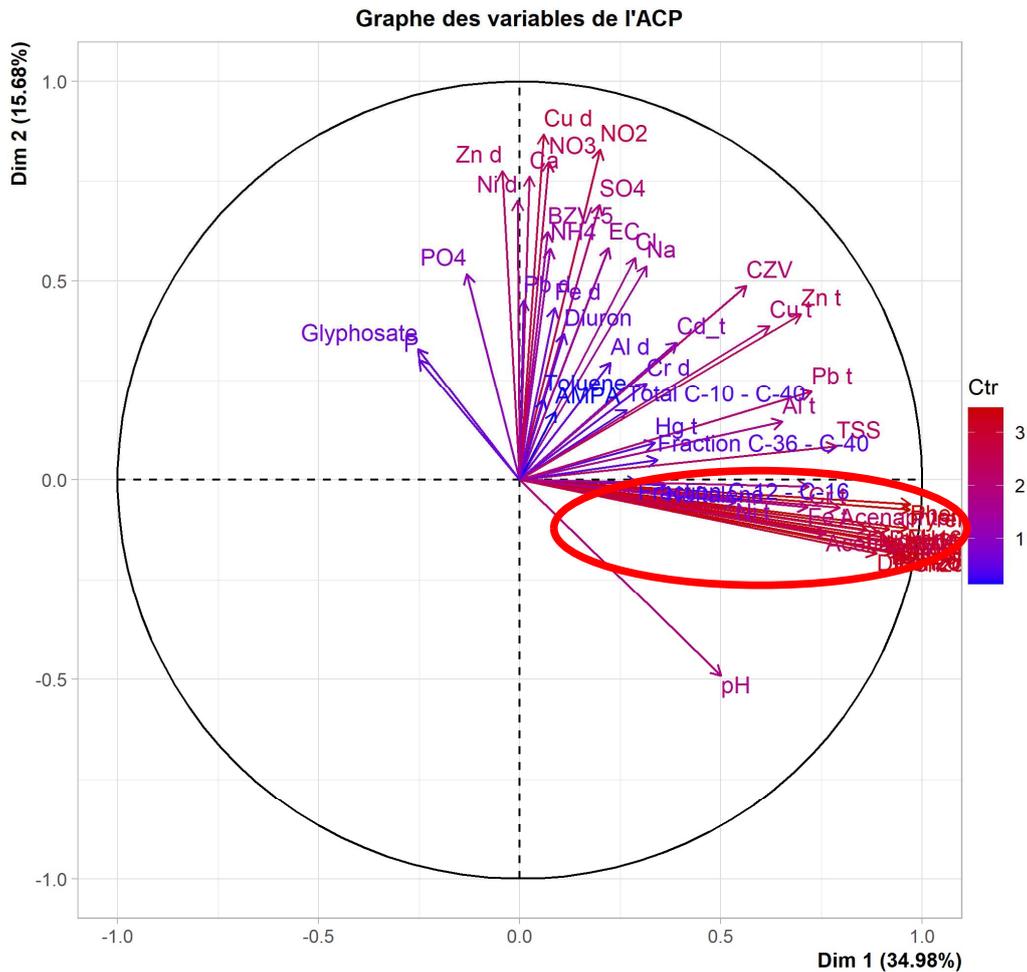


Figure 19 : Graphe des variables de l'ACP dans les deux premières dimensions pour les données concernant les voiries des eaux de ruissellement en RBC-mise en évidence des variables selon leur contribution. Le nom et les coordonnées des variables représentées dans le graphe dans la zone entourée en rouge sont repris dans le Tableau 11.

Le graphe des variables est présenté à la Figure 19. Il est relativement semblable à celui de la Figure 16 qui concerne l'ensemble des données. Le pourcentage d'inertie expliqué par les deux premières composantes est un peu plus élevé (51%) que pour l'ensemble des données (46%). La première composante est toujours liée aux HAP, au TSS et aux métaux totaux même si les métaux totaux sont un peu moins bien alignés sur le premier axe. Concernant le deuxième axe, il explique un peu plus d'inertie que pour la première ACP et les variables qui le composent sont les métaux dissous et les éléments majeurs et mineurs. Les variables sont plus alignées sur l'axe 2 que pour la première ACP.

A la Figure 20, le graphe des variables est également représenté. Sur celui-ci les variables pouvant influencer la composition chimique des eaux de ruissellement ont été mises comme variables supplémentaires sur le graphique. Il est possible de constater que ces variables ne sont généralement pas très bien représentées dans ces dimensions de l'ACP. Néanmoins il semble que les caractéristiques de l'événement pluvieux (H, durée, intensité) et la température soient corrélées négativement aux éléments

dissous. La densité du trafic et la Période de Temps Sec (PTS) précèdent l'évènement pluvieux sont par contre corrélées positivement aux éléments dissous.

A la Figure 21 et à la Figure 22, les graphes des individus de cette deuxième ACP sont représentés. Sur le premier, à l'exception du groupe voirie urbain faible qui est situé à gauche du graphique, les 3 autres groupes ne se distinguent pas comme dans la première ACP. Comme pour la première ACP, les échantillons d'un même site ne sont pas forcément regroupés dans le graphique des individus.

Tableau 11. Paramètres et coordonnées des variables situées dans la zone entourée en rouge dans la Figure 19.

Paramètres	F1	F2
Benzo(a)anthracene	0,944	-0,186
Dibenzo(a,h)anthracene	0,887	-0,184
Benzo(a)pyrene	0,932	-0,180
Benzo(b)fluoranthene	0,925	-0,167
Chrysene	0,925	-0,158
Benzo(ghi)perylene	0,938	-0,158
Benzo(k)fluoranthene	0,923	-0,155
Antracene	0,912	-0,145
Acenaphtylene	0,761	-0,134
Indeno(123-cd)pyrene	0,891	-0,131
Fluorene	0,864	-0,124
PAH16	0,919	-0,124
Fluoranthene	0,964	-0,122
Pyrene	0,970	-0,075
Acenaphtene	0,795	-0,070
Fe t	0,716	-0,069
Phenanthrene	0,972	-0,061
Ni t	0,537	-0,057
Cr t	0,718	-0,017

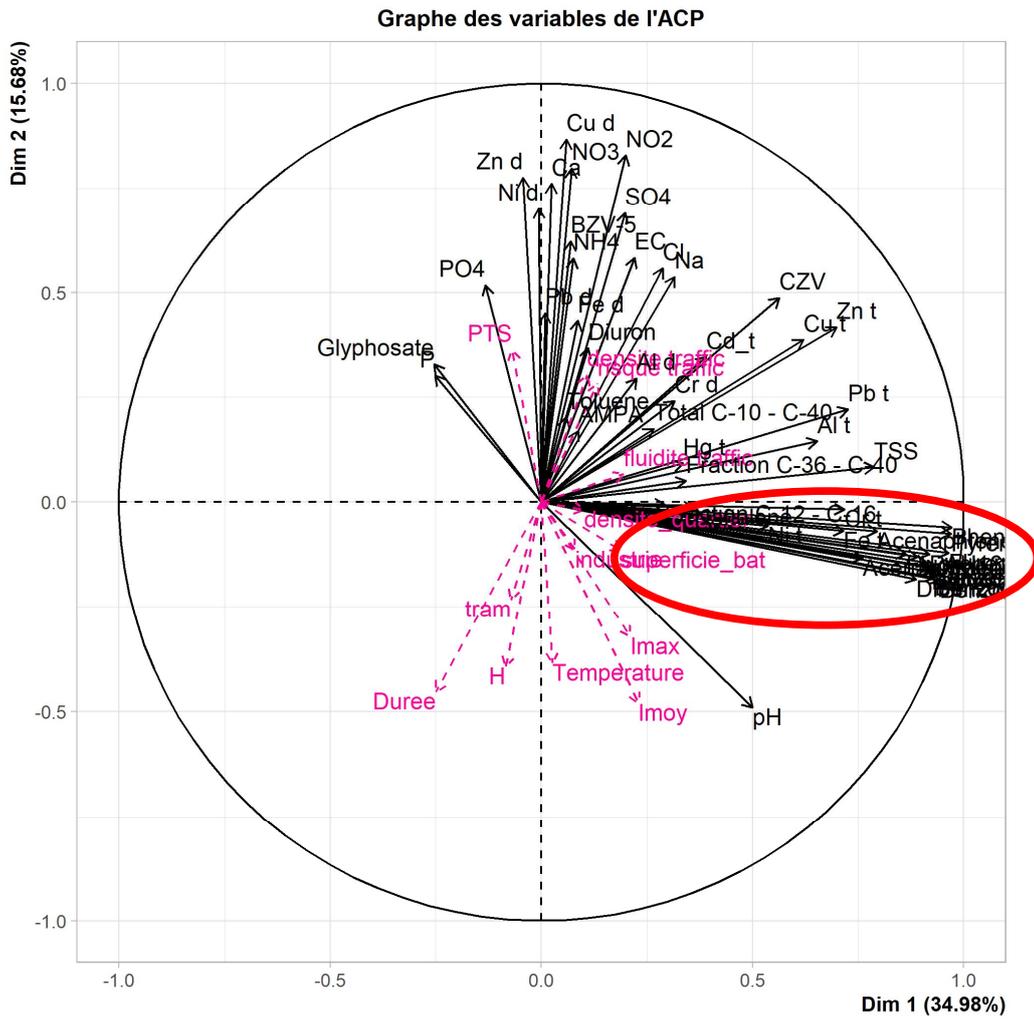


Figure 20 : Graphe des variables de l'ACP dans les deux premières dimensions pour les données concernant les voiries des eaux de ruissellement en RBC-ajout des variables qui peuvent expliquer la composition des eaux de ruissellement. Le nom et les coordonnées des variables représentées dans le graphe dans la zone entourée en rouge sont repris dans le Tableau 12.

Tableau 12. Paramètres et coordonnées des variables situées dans la zone entourée en rouge dans la Figure 20.

Paramètres	F1	F2
Benzo(a)anthracene	0,942	-0,157
Benzo(a)pyrene	0,930	-0,154
Dibenzo(a,h)anthracene	0,885	-0,147
Benzo(b)fluoranthene	0,921	-0,136
Antracene	0,914	-0,135
Chrysene	0,920	-0,128
Benzo(ghi)perylene	0,936	-0,128
Fe t	0,713	-0,126
Benzo(k)fluoranthene	0,920	-0,121
Ni t	0,536	-0,115
Fluorene	0,865	-0,105
Acenaphtylene	0,760	-0,105
Fluoranthene	0,962	-0,099
Indeno(123-cd)pyrene	0,889	-0,098
PAH16	0,917	-0,094
Cr t	0,718	-0,073
Acenaphtene	0,797	-0,064
Pyrene	0,968	-0,052
Phenanthrene	0,970	-0,049

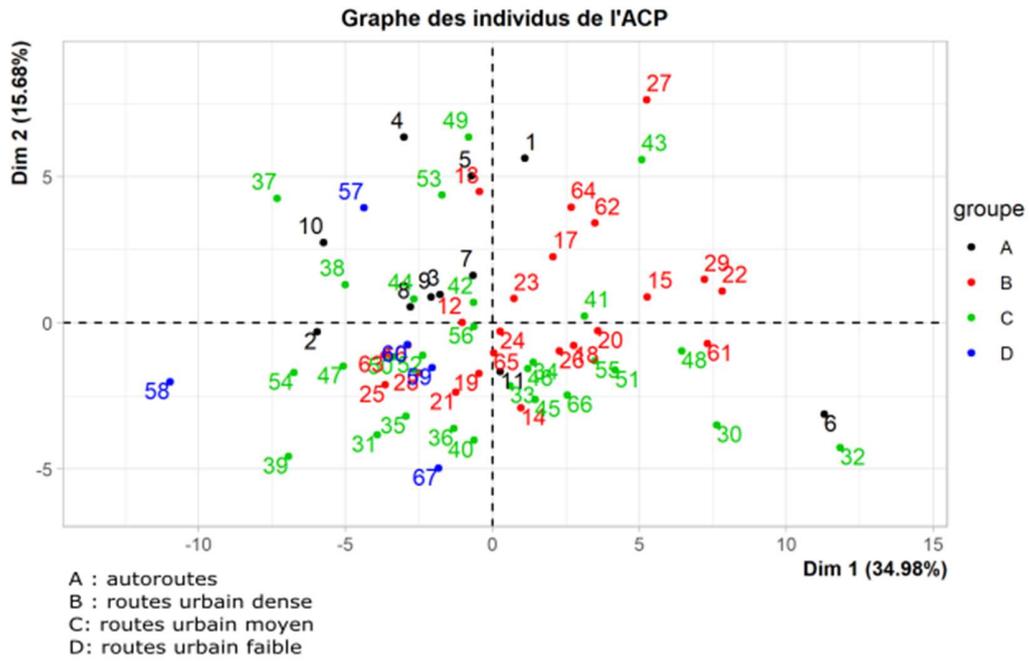


Figure 21 : Graphe des individus de l'ACP dans les deux premières dimensions pour les données des voiries des eaux de ruissellement en RBC, mise en évidence des différentes catégorie de site d'échantillonnage

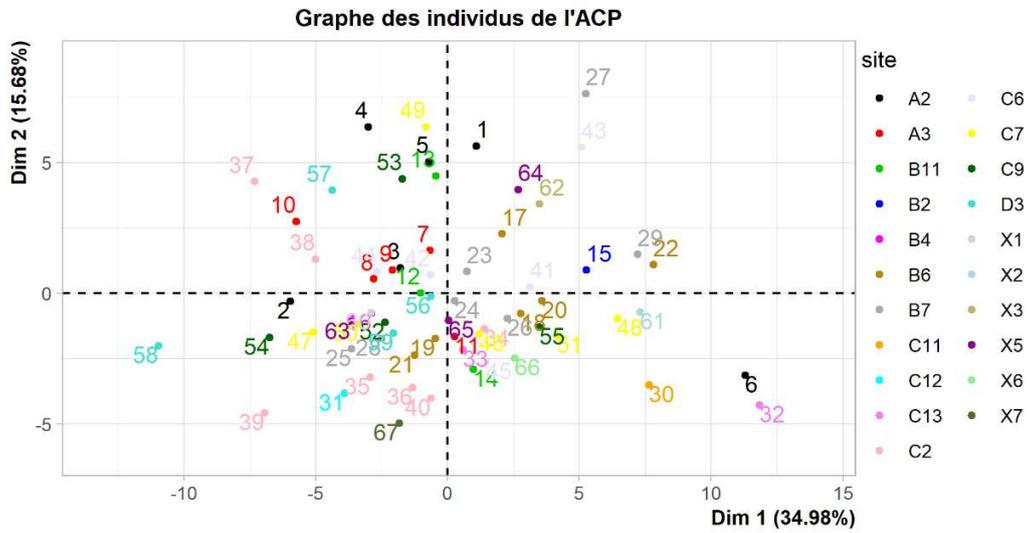


Figure 22 : Graphe des individus de l'ACP dans les deux premières dimensions pour les données des voiries des eaux de ruissellement en RBC, mise en évidence des sites d'échantillonnage

2.2.8. Matrices auto-organisantes ou Self-Organizing-Map (SOMs)

2.2.8.1. Description de la méthode

L'analyse statistique multivariée est de plus en plus utilisée pour étudier les processus géochimiques influençant la composition de l'eau. Ces méthodes permettent de mettre en évidence les relations entre un nombre élevé de paramètres dans un système hydrogéologique avec une dynamique complexe où plusieurs processus géochimiques peuvent s'influencer mutuellement.

La méthode appliquée dans cette étude, appelée 'matrices auto-organisantes' ou 'Self-Organizing-Map (SOMs)', est une méthode de statistiques multivariées non-linéaire et non-hiérarchique (Kohonen 2001). Cette technique utilise un algorithme de type réseau neuronal artificiel dont la conception est inspirée du fonctionnement du cerveau avec des neurones qui sont capables de tirer un apprentissage à partir des données et de faire des généralisations. La méthode des SOMs permet de visualiser des relations entre paramètres et d'identifier des groupes de compositions chimiques similaires dans le jeu de données (Peeters et al., 2007).

Le résultat de la méthode des SOMs est visualisé sous forme d'une matrice 2D avec un nombre ' $m \times n$ ' de nœuds. Chaque échantillon est associé au nœud ayant la composition chimique la plus proche. Les échantillons placés à proximité les uns des autres dans la matrice présentent généralement le même type de composition chimique. Les résultats peuvent être représentés sous deux formes : la matrice U et la matrice des composants (Vesanto et al., 2000).

La matrice des composants permet de visualiser les corrélations entre les paramètres. Les concentrations de chaque paramètre sont représentées dans la matrice 2D, il y a donc autant de matrices qu'il y a de paramètres. Pour chaque paramètre, les zones rouges de la matrice sont associées aux teneurs les plus élevées en ce paramètre et les zones bleues de la matrice sont associées aux teneurs les plus basses en ce paramètre. Si, pour 2 paramètres, les zones rouges sont situées dans la même partie de la matrice et les zones bleues sont également situées dans la même partie de la matrice les 2 paramètres sont corrélés.

La matrice U montre la distance euclidienne entre chaque nœud et ses voisins. Elle permet de visualiser si les échantillons voisins ont des compositions similaires (en bleu) ou très différentes (en rouge). Elle a été calculée via le logiciel Matlab en utilisant la Toolbox SOM (Alhoniemi et al., 2000-2005). La distance euclidienne est calculée en fonction de la valeur de tous les paramètres (sélectionnés) des échantillons. A partir de la matrice U, des groupes de compositions semblables peuvent être créés automatiquement en utilisant l'algorithme des SOMs (Ullsh et Hermann, 2005).

2.2.8.2. Sélection des paramètres

L'analyse multivariée par la méthode des SOMs a été réalisée en complément de l'ACP. L'ACP a permis de faire ressortir 2 composantes principales (1) les éléments dissous et (2) le TSS, les HAP et les métaux totaux. Les SOMs vont être utilisées pour explorer de manière plus fine les corrélations entre les variables. Les SOMs seront appliquées uniquement sur les eaux de voiries parce que l'ACP avait déjà permis de mettre en évidence des fortes différences entre les toitures, les sites ferroviaires et les eaux de voiries. Les SOMs ont été réalisées une première fois pour explorer plus finement les paramètres composant la deuxième variable de l'ACP. Les paramètres sélectionnés sont le NO₂, le NH₄, le PO₄, le Cu dissous, le Zn dissous, le Cr dissous, le Pb dissous et le Ni dissous. A ces paramètres ont été ajoutés le TSS, le pH et le Cl, ainsi que les caractéristiques des événements pluvieux et les caractéristiques des sites d'échantillonnage. L'objectif

de cette première ACP est d'essayer de comprendre l'origine des métaux dissous dans les eaux de ruissellement en voirie.

Une deuxième analyse par les SOMS a été réalisée pour explorer les paramètres du premier axe de l'ACP et en particulier les métaux totaux. Les paramètres sélectionnés sont les métaux totaux (Hg, Cu, Zn, Pb, Cr, Ni, Cd), un HAP (le pyrène). A ces variables ont été rajouté le pH, le Cl, le NO₂, le toluène et les huiles minérales ainsi que les caractéristiques des événements pluvieux, et les caractéristiques des sites d'échantillonnage. L'objectif de cette première ACP est d'essayer de comprendre l'origine des métaux totaux dans les eaux de ruissellement en voirie.

2.2.8.3. Origine des métaux dissous

Les résultats des SOMs, concernant l'origine des métaux dissous dans les eaux de ruissellement en voirie sont représentés à la Figure 23. La matrice des composants permet de montrer les relations entre les paramètres. Il est notamment possible de constater que le NH₄, le NO₂, le Cu dissous, le Zn dissous sont corrélés positivement et qu'ils sont corrélés négativement au pH. Par contre le Cr dissous, le Pb dissous et le Ni dissous ne semblent pas se répartir de la même manière que les autres métaux. A la Figure 23, il y a également les 4 groupes d'échantillons semblables qui ont été déduits de la matrice U par le logiciel des SOMs. Le Tableau 13 synthétise les principales caractéristiques de ces quatre groupes.

Tableau 13 : Caractéristiques de chacun des quatre groupes

- ++ Concentrations les plus élevées du jeu de données
- + Concentrations élevées dans le jeu de données
- O concentrations moyennes par rapport au jeu de données
- concentrations bas dans le jeu de données
- concentrations les plus bas du jeu de données
- X concentrations variés (des plus élevés aux plus bas)

Groupe	TSS	Cl	pH	NH ₄	NO ₂	PO ₄	Cu d	Zn d	Cr d	Pb d	Ni d	H	PTS	T°	trafic	Indust.	Bati.
1	O	+	-	++	++	++	++	++	O	O	++	--	++	--	O	X	X
2	O	+	-	O	+	-	+	++	+	X	--	X	-	X	++	X	X
3	++	-	+	--	O	X	-	X	+	+	--	-	--	O	-	X	X
4	X	X	+	-	-	X	--	--	--	--	--	X	X	X	-	X	X

Le groupe 1 présente une teneur en TSS moyenne, un pH faible, des concentrations importantes en Cl, NH₄, NO₂, PO₄, Cu dissous, Zn dissous, Ni dissous, des concentrations moyennes en Pb dissous et Cr dissous, des précipitations avec une hauteur faible, une période de temps sec relativement importante, une faible température et une densité de trafic moyenne. Le groupe 1 présentent des concentrations élevées qui semblent être liées à des précipitations avec une hauteur très peu importante et donc peut être des conditions de « first flux » ainsi qu'une période de temps sec relativement importante et donc éventuellement plus d'accumulation sur les voiries.

Le groupe 2 a des concentrations élevées en Cl, NO₂, Cu dissous, Zn dissous, Cr dissous, des concentrations faibles en PO₄ et Ni dissous, un pH faible, une période de temps sec peu importante, des teneurs et concentrations moyennes en TSS et NH₄, une concentration en Pb dissous variable, les hauteurs de pluie et la température sont variables. Les sites d'échantillonnage sont caractérisés par un trafic important. Le groupe 2 est caractérisé par des concentrations importantes en Cu, Zn, Cr, NO₂ et NH₄ qui semblent liées à un trafic élevé et/ou des concentrations en Cl importantes ce qui indique un salage des routes et potentiellement des conditions de gel ou de neige.

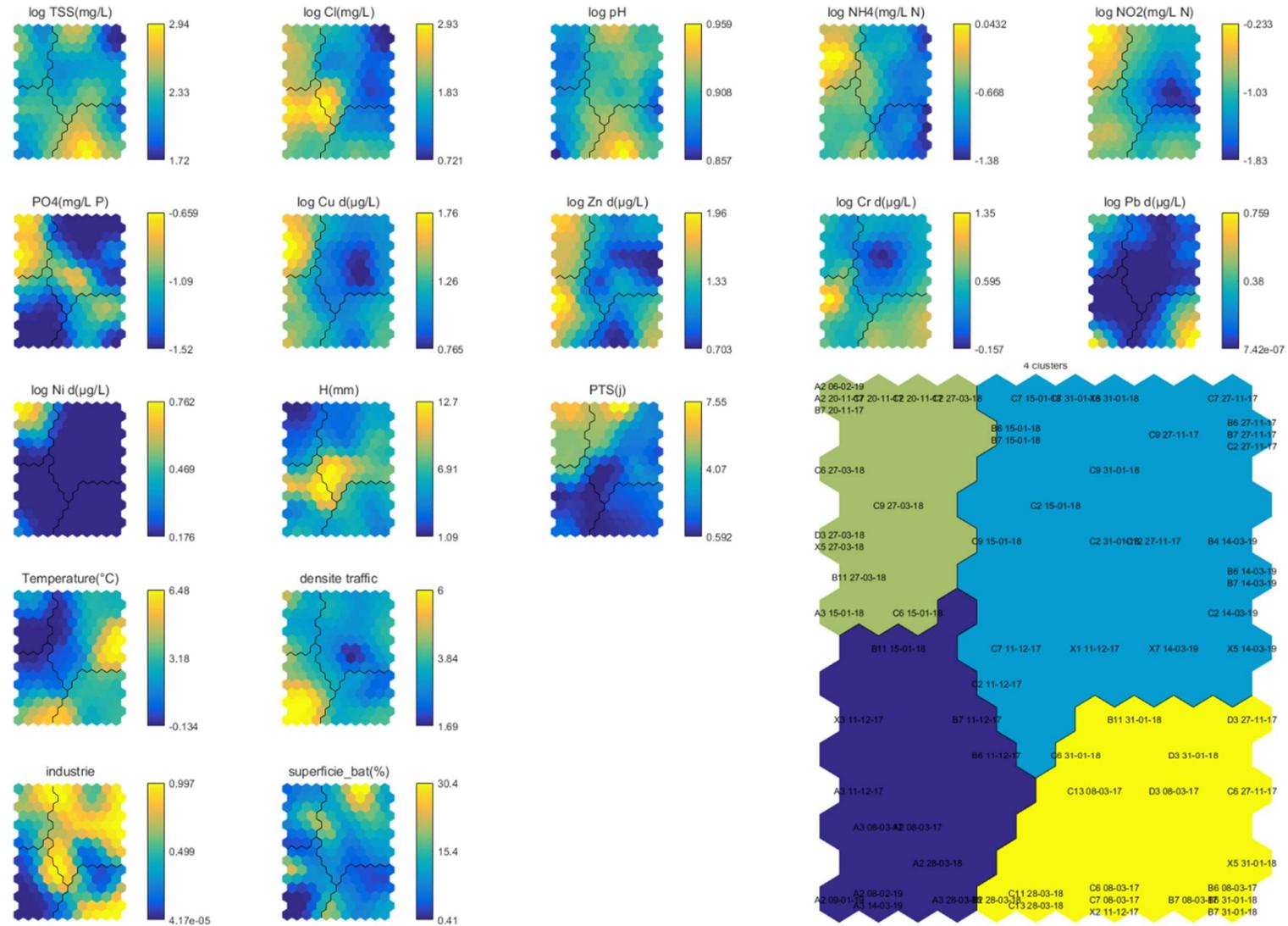


Figure 23: Résultats des SOMs pour l'origine des métaux dissous des voiries avec la matrice des composants et les groupes d'échantillons semblables définis par les SOMs

Le groupe 3 est caractérisé par une teneur en TSS importante et un pH élevé, des concentrations fortes en Cr dissous et Pb dissous, des concentrations faibles en Cl, NH4, Cu dissous, Ni dissous, une concentration moyenne en NO2 et des concentrations variables en PO4 et Zn dissous. Les échantillonnages ont été réalisés lors de pluies de faibles hauteurs avec une période de temps sec courte et des températures variables. Le trafic routier sur ces sites est moyen à faible. Ce groupe semble être lié à une teneur importante en matière en suspension (TSS) mais il n'y a pas de caractéristiques particulières des événements pluvieux de ces échantillons ni des sites d'échantillonnage qui semblent expliquer cela.

Le groupe 4 a des concentrations faibles en NH4, NO2, Cu dissous, Zn dissous, Cr dissous, Pb d, Ni dissous, une concentration généralement faible en Cl sauf pour quelques échantillons, des concentrations et teneurs variables en TSS et PO4, des pluies avec des caractéristiques variables et un trafic peu important. Le groupe 4 reprend les échantillons avec les concentrations en métaux dissous les plus faibles contrairement aux 3 autres groupes qui ont des concentrations élevées. Les échantillons de ce quatrième groupe concernent généralement des sites avec un trafic relativement faible et des concentrations généralement peu élevées en Cl à l'exception de quelques points.

2.2.8.4. Origine des métaux totaux

Les résultats des SOMs, concernant l'origine des métaux totaux dans les eaux de ruissellement en voirie est représenté à la Figure 24. La matrice des composants permet de montrer les relations entre les paramètres. Il est notamment possible de constater une forte corrélation positive entre le Cu total, le Zn total, le Pb total, le Cr total, le Ni total et le pyrène. Par contre le Hg t et Cd t ne semblent pas se répartir de la même manière que les autres métaux. A la Figure 24, il y a également les 4 groupes d'échantillons semblables qui sont déduits de la matrice U par le logiciel des SOMs. Le Tableau 14 synthétise les principales caractéristiques de ces quatre groupes.

Tableau 14: Caractéristiques de chacun des quatre groupes

- ++ Concentrations les plus élevées du jeu de données
- + Concentrations élevées dans le jeu de données
- O concentrations moyennes par rapport au jeu de données
- concentrations bas dans le jeu de données
- concentrations les plus bas du jeu de données
- X concentrations variés (des plus élevés aux plus bas)

Groupe	pH	Cl	NO2	Pyrène	Toluène	C10-C40	Hg t	Cu t	Zn t	Pb t	Cr t	Ni t	Cd t	Indust.	Bati	T°	H	PTS	trafic
1	X	X	X	X	--	X	-	+	+	+	O	O	-	X	-	+	++	-	+
2	-	O	X	--	X	X	X	-	-	-	-	-	--	X	-	-	X	X	-
3	+	O	X	+	X	++	+	+	++	++	+	+	+	+	+	-	--	-	O
4:	++	++	X	+	--	--	-	+	++	++	++	++	-	X	-	-	X	X	O

Le groupe 1 présente des concentrations importantes en Cu total, Zn total, Pb total, un pH variable, des concentrations moyennes en Cr total et Ni total, des concentrations faibles en toluène, Hg total, Cd total, des concentrations variables en Cl, NO2, pyrène, huiles minérales. Les sites d'échantillonnage sont caractérisés par une densité de trafic relativement élevée et une surface des bâtiments peu importante. Les échantillons ont été prélevés à des températures relativement élevées, une hauteur de pluie importante et une période de temps sec courte. Le groupe 1 est caractérisé par des concentrations en métaux importantes qui sont peut-être en partie liées à une densité de trafic importante à moyenne

Le groupe 2 a des concentrations faibles en pyrène, en métaux totaux (Cu, Zn, Pb, Cr, Ni, Cd), un pH faible, une concentration moyenne à faible en Cl, des concentrations variables en NO₂, toluène, huiles minérales, Hg total. Les sites d'échantillonnage sont caractérisés par un trafic et une surface bâtie relativement peu importante. Les échantillons ont été prélevés à des températures relativement faibles lors d'événements pluvieux de caractéristiques variables (H, PTS). Le groupe 2 est celui avec les concentrations en métaux totaux les plus faibles. Cela semble en partie lié à une densité de trafic moins importante. Ce groupe n'est néanmoins pas exempt de pollution, il a des concentrations qui peuvent être importantes en Hg total, huiles minérales et toluène

Le groupe 3 a des concentrations élevées en Cl, en pyrène, en huiles minérales, en métaux totaux (Hg, Cu, Zn, Pb, Cr, Ni, Cd), un pH élevé, des concentrations variables en NO₂. Les sites d'échantillonnage sont caractérisés par un indice industrie élevé, une surface bâtie importante, un trafic moyen. Les échantillons ont été prélevés lors de pluie de faible hauteur, avec une courte période de temps sec et une température relativement basse. Pour le groupe 3, la concentration en métaux est importante mais l'origine des métaux totaux semble variable, peut-être liée à des concentrations non négligeables en Cl ou peut-être à une surface bâtie et/ou une période de temps sec qui peuvent être importantes.

Le groupe 4 présente des concentrations élevées en pyrène, métaux totaux (Cu, Zn, Pb, Cr, Ni), un pH élevé, des concentrations faibles en toluène, huile minérale, Hg total, Cd total, des concentrations moyennes en Cl et des concentrations variables en NO₂. Les sites d'échantillonnage sont caractérisés par, une surface bâtie relativement faible et un trafic moyen. Les échantillons ont été prélevés à des températures relativement faibles lors d'événement pluvieux de caractéristiques variables (H, PTS). Le groupe 4 présente des concentrations en Cl importantes et la plupart des points de ce groupe ont été échantillonnés le 11/12/17 dans des eaux de ruissellement provenant de la fonte de la neige. La concentration importante en métaux est peut-être liée à ces conditions hivernales particulières.

Le groupe 2 est celui avec les concentrations en métaux totaux les plus faibles. Cela semble en partie lié à une densité de trafic moins importante. Ce groupe n'est néanmoins pas exempt de pollution, il a des concentrations qui peuvent être importantes en Hg total, huiles minérales et toluène. Les 3 autres groupes ont généralement des concentrations importantes en métaux totaux mais il y a des différences entre les 3. Le groupe 4 présente des concentrations en Cl importantes et la plupart des points de ce groupe ont été échantillonnés le 11/12/17 dans des eaux de ruissellement provenant de la fonte de la neige. La concentration importante en métaux est peut-être liée à ces conditions hivernales particulières. Pour les groupes 1 et 3, il y a également des différences. Les concentrations importantes en métaux du groupe 1 sont peut-être en partie liées à une densité de trafic importante à moyenne. Pour le groupe 3 l'origine des métaux totaux semble variable, peut-être liée à des concentrations non négligeables en Cl ou peut être à une surface bâtie et/ou une période de temps sec qui peuvent être importantes.

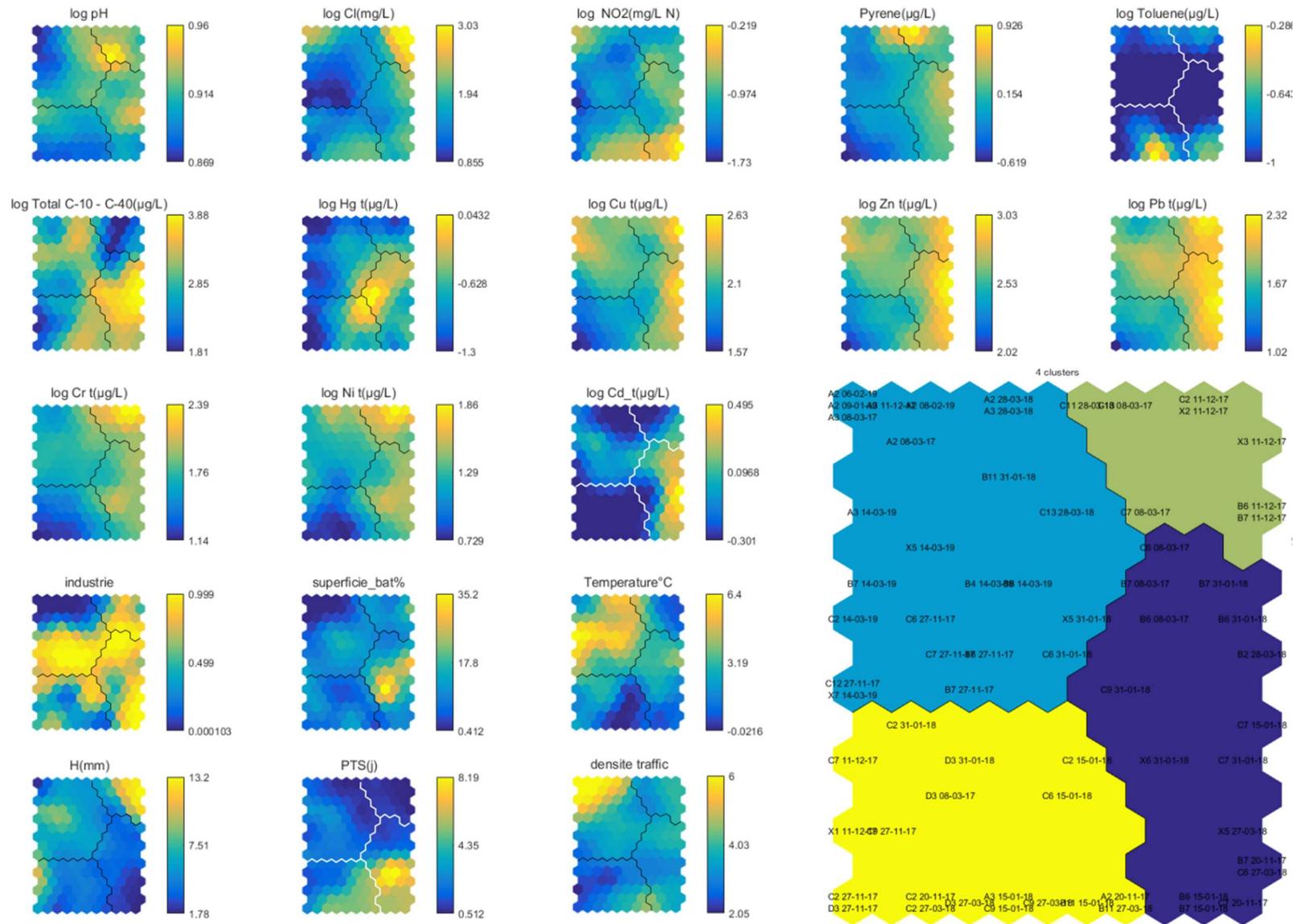


Figure 24 : Résultats des SOMs pour les métaux totaux des voiries avec la matrice des composants et les groupes d'échantillons semblables définis par les SOMs

2.3. Récapitulatif sur les données acquises sur les eaux de ruissellement en RBC

Entre 2017 et 2020, 14 événements pluvieux ont été échantillonnés par Bruxelles Environnement. 27 sites ont été échantillonnés et 74 échantillons ont été récoltés au total. Les eaux de ruissellement échantillonnées proviennent principalement d'autoroutes ou des voiries urbaines mais quelques échantillons ont été récoltés sur des voies ferroviaires ou après ruissellement sur des toitures.

233 substances ont été analysées dans les échantillons prélevés en RBC. Les paramètres qui ont été fréquemment quantifiés et qui dépassent les normes sont les HAP, les métaux, les éléments majeurs et les paramètres physico-chimiques, les huiles minérales, le toluène, le phénol et quelques pesticides (le glyphosate, l'AMPA et le diuron).

Néanmoins, étant donné les limites de quantification des méthodes analytiques élevées pour certains pesticides analysés dans les eaux échantillonnées, il n'est pas exclu de les trouver dans les eaux de ruissellement. La plupart des biocides utilisés pour l'entretien des toitures n'ont pas été analysés dans les eaux de toitures à l'exception du diuron, monolinuron et terbutryne.

Dans le jeu de données, beaucoup d'outliers ont été détectés, ceux-ci n'ont pas cependant pas été écartés du jeu de données lors de l'analyse des données. Ils semblent être en partie liés à des conditions d'échantillonnage particulières comme l'échantillonnage des toitures, l'échantillonnage des voiries en période hivernale (neige, sel...) et, de manière générale, à la grande variabilité de concentrations observées dans les eaux de ruissellement. L'analyse temporelle montre également que pour un même site, les concentrations peuvent fortement varier d'un échantillonnage à l'autre.

Différents outils d'analyses statistiques (les boxplots, les ACP et les SOMs) ont été utilisés pour étudier le jeu de données. Ils ont permis de montrer que le contexte (voiries, toitures, sites ferroviaires), la densité du trafic, les caractéristiques des événements pluvieux (hauteur, durée, intensité, période de temps sec), le salage des routes et/ou les conditions hivernales (gel/neige) influencent la composition chimique des eaux de ruissellement. Par contre les analyses multivariées n'ont pas mis en évidence une influence significative de la densité d'habitant par quartier, du nombre d'industries, de la superficie du bâtiment. Ceci ne signifie pas cependant pas que ces facteurs n'ont pas d'influence. En effet, une des inconnues au sujet des sites de prélèvement en RBC est le bassin qui les alimente. D'après Tedoldi 2020, plus la distance parcourue par les eaux de ruissellement est importante au plus la charge de polluants est susceptible d'être importante.

Les données récoltées en RBC comprennent d'autres limites. 4 échantillons seulement concernent les toitures et seulement 3 concernent les sites ferroviaires, ce sont des tailles d'échantillons très limitées. De plus, ils ne sont sans doute pas représentatifs de l'ensemble des toitures ou des sites ferroviaires à Bruxelles. Les échantillonnages ont eu lieu principalement entre novembre et mars. Certaines variations saisonnières ne sont donc peut-être pas prises en compte. Dans les prochains chapitres une recherche bibliographique est effectuée pour identifier les polluants fréquemment quantifiés dans les eaux de ruissellement dans différents contextes. La recherche bibliographique permettra de regarder si la liste des polluants analysés en RBC est exhaustive par rapport à ce qui est trouvé dans la littérature et permettra aussi de comparer les valeurs de la littérature avec celles mesurées en RBC.

3. Recherche bibliographique sur la qualité des eaux de ruissellement

Dans cette seconde partie du rapport, comme demandé dans le cahier des charges, une synthèse d'une recherche bibliographique sur la qualité des eaux de ruissellement en milieux urbains est présentée. Cette recherche bibliographique a pour objectif principal de compléter le jeu de données acquis en région de Bruxelles et décrit dans la première partie de ce rapport en identifiant les gammes de concentrations en différents polluants retrouvées dans les eaux de ruissellement en fonction de leur origine. Cette synthèse a également pour objectif de comparer les résultats des analyses faites à Bruxelles avec des données issues de la littérature.

De nombreux articles ou études ont porté sur la qualité des eaux de ruissellement conduisant à une abondante bibliographie sur le sujet. La présente recherche ne se veut donc pas exhaustive. Comme requise dans le cahier des charges, la recherche a porté sur des références identifiées dans le cahier des charges. Cette liste a cependant été complétée par des références récentes en ciblant la qualité des eaux de ruissellement en milieu urbain. Un tableau de synthèse reprenant les différents articles/études recensées ainsi que leurs principales caractéristiques est repris en Annexe 4

3.1. Description générale de la recherche bibliographique

De nombreuses études, décrites dans la littérature, ont été réalisées sur la problématique de la qualité des eaux de pluies ou de ruissellement dans le but d'identifier le risque d'éventuelle pollution des sols et eaux souterraines qu'elles peuvent engendrer (Dallman & Spongberg, 2012, Falatin et al, 2019, Fardel et al, Mikkelsen et al, 1994, Pitt et al, 1999 par exemple) mais également dans le but de valider leur aptitude à être utilisée pour différents usages (Angrill et al, 2016, Hofman-Caris et al, 2019, Vialle et al., 2012 par exemple).

La recherche bibliographique a porté sur des études réalisées dans des pays géographiquement proches dans lequel le climat, le contexte socio-économique peuvent être considérés comme semblables, à savoir l'Allemagne, les Pays-Bas, la France. Des données provenant de pays plus éloignés comme l'Italie, l'Espagne, le Danemark, les Etats-Unis ou la Chine ont également été consultées mais peu intégrées dans l'analyse vu la différence en termes de contexte climatique, socio-économique et/ou de taux de pollution.

Les études recensées lors de la recherche bibliographique concernent des eaux de pluie collectées directement avant ruissellement (Beysens et al, 2017, Boogaard et al, 2006, Hofman-Caris et al, 2019, Liefting et al, 2020) ou après ruissellement sur différents types de surfaces (toits, routes, zone de parking, cours de maison...). Dans beaucoup d'études, les eaux échantillonnées ont été collectées en sortie d'égout ou de bassin et ont donc ruisselé sur différents types de surface (Gasperi et al, 2014 ; Zgheib, 2011 par exemple). Il est donc impossible de faire le lien, dans ces études, entre concentrations observées et type de surface de ruissellement. Dans d'autres études, l'impact du type de surface, par exemple du type de toit (Liefting et al 2020 ; Vialle, 2012 ; par exemple) ou de l'intensité du trafic sur la qualité des eaux de ruissellement est étudié. En ce qui concerne l'impact de l'intensité du trafic sur la qualité des eaux de ruissellement, il est parfois difficile de comparer les études. Il est en effet rare que l'intensité du trafic soit caractérisée de manière précise, par exemple en nombre de véhicules par jour, les auteurs se contentent de parler de trafic faible, moyen ou modéré sans plus de précision ce qui rend difficile les comparaisons.

Les polluants étudiés dans les différentes études recensées varient d'une étude à l'autre en fonction des objectifs/moyens propres à chaque étude. Dans de nombreuses études, les polluants ciblés sont en nombre limités avec un focus sur quelques métaux, hydrocarbures et HAP. Certaines études sont cependant beaucoup plus spécifiques et se concentrent sur des polluants particuliers comme Van de Voorde en 2011 qui se focalise sur les biocides utilisés pour le traitement des toitures ou Falatin et al (2019) ou Gaspary et al (2014) qui intègrent dans leurs analyses des polluants plus émergents comme les alkylphénols, des pesticides...

Différents auteurs (par exemple Gnecco et al, 2004, Mendez et al, 2010) mentionnent l'impact du first flush, à savoir les premières précipitations suivant un épisode de temps sec, sur les concentrations en polluants retrouvées dans les eaux de ruissellement. Mendez et al (2010) montrent ainsi que les échantillons pendant le first flush sur des toits présentent des concentrations microbiologiques et en éléments chimiques plus importantes que des échantillons prélevés par la suite. La qualité de l'eau de pluie collectée s'est donc améliorée avec le rinçage des toits. Cependant, dans les documents consultés, les résultats présentés ne permettent généralement pas de faire la distinction entre échantillons prélevés pendant le first flush ou pendant des épisodes pluvieux ultérieurs. Cette importance du first-flush est cependant relativisée, notamment par Chocat et al (2007) qui précise que même si des pics de concentrations sont souvent observés en début de ruissellement, les volumes correspondant sont cependant faibles. Les charges de polluants apportées en début de pluie sont donc négligeables par rapport à celles fournies ultérieurement.

Il faut noter que selon les sources bibliographiques, les paramètres d'intérêt sont présentés de différentes manières. Les valeurs sont parfois présentées sous forme de graphiques et sont donc difficilement exploitables. Dans d'autres études, les valeurs des paramètres sont présentées sous la forme d'un intervalle et/ou sous la forme d'une valeur moyenne ou médiane en ne précisant pas toujours le nombre d'échantillons ou de sites échantillonnés. Enfin dans d'autres articles compilant des résultats d'autres études, seuls des valeurs caractéristiques sont données. Il est donc impossible de réaliser des statistiques entre ces jeux de données.

La comparaison des données entre les différentes études n'est pas toujours aisée. Par exemple, il n'est que très rarement également mentionné si les analyses sont réalisées sur échantillons bruts ou filtrés ce qui peut avoir un impact important notamment sur les concentrations mesurées pour les métaux. Il est également parfois difficile de savoir ce que regroupent certaines familles de polluants. Par exemple, dans certaines études, des concentrations en HAP ou hydrocarbures totaux sont mentionnées sans préciser le nombre et le type de HAP ou d'hydrocarbures considérés dans l'étude.

3.2. Concentrations en polluants observées dans différents types d'eau

3.2.1. Eaux de pluie atmosphérique sans ruissellement

Peu de données sont globalement disponibles sur la qualité des eaux de pluies collectées directement avant tout ruissellement et les données disponibles concernent généralement peu de paramètres. Hofman-Caris et al (2019) proposent une synthèse des données disponibles dans la littérature. Ces données proviennent cependant de contextes socio-économiques fort différents de ceux de la Région de Bruxelles-Capitale, à l'exception de données provenant de la ville de Paris mais reprise d'un article de Beysens et al (2017). Des données du réseau national de mesures au Pays Bas (RIVM, 2018 décrit dans Liefting et al, 2020) ou du réseau de surveillance de l'ISSeP en Région Wallonne (données de 2020 à 2021) ont pu être compilées et sont présentées au Tableau 15.

Tableau 15: Synthèse bibliographique des concentrations en divers éléments retrouvés dans les eaux de pluie (N1 : Nbre de sites échantillonnés, N2 : Nbre d'échantillons, Med : Médiane des concentrations, Moy : Moyenne des concentrations). RIVM et Boogaard ne précisent pas si les analyses, pour les métaux portent sur les métaux dissous ou totaux. Dans l'article de Beysens, les concentrations en métaux sont des concentrations totales.

Paramètres	Unité	RIVM 2018				Boogaard et al 2006		Beysens et al 2017					ISSeP (Données 2020-2021)		
		N1	N2	Moy	Med	N2	Moy	N2	Min	Max	Med	Moy	Min	Max	Moy
pH	/							77	5,1	10,6	6,5	6,1	4,01	7,82	6,13
EC 25°C	µS/cm							77	2,7	810	40	59,6			
Na+	mg/l							77	0,1	81,5	1,4	3,8	0,00	8,52	0,73
K+	mg/l							77	0,1	16	0,8	1	0,00	6,46	0,20
Ca2+	mg/l							77	0,2	43	2	4,2	0,00	10,52	0,47
Mg2+	mg/l							77	0,005	0,17	0,02	0,4	0,00	1,56	0,11
Cl-	mg/l							77	0	140	2,5	7	0,02	17,39	1,29
SO42-	mg/l							77	0,2	65	3	5,4	0,00	2,81	0,28
Fe2+	mg/l							77	0,005	0,18	0,01	0,03			
Cd	µg/L	4	616	0,02	<0,030	13	0,09	77	0,001	0,001	0,001	0,001			
Cu	µg/L	4	603	2,1	1,1	13	4,8	77	0,002	0,04	0,005	0,01			
Hg	µg/L	-	-	-	-	13	0,016								
Pb	µg/L	4	619	0,93	0,6	13	6,8	77	0,005	0,008	0,008	0,007			
Ni	µg/L	4	606	0,45	<0,40	13	0,4								
Zn	µg/L	4	617	8,2	4,8	13	20	77	0,005	0,49	0,04	0,06			
Mn2+	mg/l							77	0,003	0,03	0,005	0,01			
PO4-P	mg P/L	12	758	0,024	<0.012								0	0,06	0,00
NH4-N	mg N/L	12	757	0,88	0,74								0	3,52	0,43
NO3-N	mg N/L	12	771	0,41	0,36			77	0,02	8,58	0,45	1,02	0	0,28	0,02
NO2-N	mg/l							45	0,00	0,10	0,01	0,03			
Br-	mg/l							45	0,01	0,08	0,03	0,016			
F-	mg/l							45	0,01	0,33	0,04	0,02	0,00	1,18	0,03
Anthracène	µg/L					13	0,004								
Benzo(a)pyrène	µg/L					13	0,013								
Huiles minerales	µg/L					13	<100								

Les concentrations en éléments majeurs montrent que les eaux de pluie sont globalement peu minéralisées à l'exception de quelques échantillons. De faibles concentrations en phosphate, nitrate et ammonium sont également observées. Des traces de contaminants anthropiques comme les métaux ou les HAP peuvent être observées. Beysens et al (2017) constatent que les concentrations mesurées dans les eaux de pluie pour les paramètres analysés sont inférieures aux normes de potabilité de l'OMS ce qui permettrait d'envisager l'utilisation de cette eau.

3.2.2. Eaux de ruissellement provenant de toitures

Des données sur la qualité des eaux de ruissellement sur les toitures sont fournies dans la littérature par différents auteurs (Liefting et al, 2020 ; Gnecco et al 2004 ; Gromaire et al, 1999 ; Mikkelsen et al, 1994, par exemple). Le nombre de paramètres analysés est cependant limité et concerne quelques métaux et HAP. Dans la plupart des articles, la nature du toit sur lequel se fait le ruissellement n'est pas mentionnée. Les données, sans précision sur la nature du toit retrouvées dans la littérature sont présentées au Tableau 16. Ces données montrent que les métaux les plus retrouvés dans les eaux de ruissellements provenant de toits sont le plomb et le zinc. Les concentrations dans les deux HAP repris dans le tableau sont faibles voire inférieures aux limites de quantification. Les concentrations en huiles minérales peuvent atteindre plusieurs centaines de µg/l.

Dans le Tableau 16, les données de concentrations retrouvées dans la littérature sont comparées aux concentrations mesurées par Bruxelles Environnement dans les échantillons d'eau provenant du ruissellement sur des toitures. Cette comparaison permet de mettre en évidence que les ordres de grandeurs des concentrations mesurées sur les échantillons collectés par Bruxelles Environnement sont du même ordre de grandeur que celles retrouvées dans la littérature. Les conclusions tirées dans le paragraphe ci-dessus s'appliquent donc également aux échantillons prélevés par Bruxelles Environnement.

Quelques études permettent de comparer l'impact de la nature des toitures sur les émissions de polluants :

- Par exemple, Sainte (2010), dans sa thèse de doctorat, a hiérarchisé les toitures métalliques sur base des émissions de cadmium, nickel, plomb, cuivre et zinc retrouvées dans les eaux de ruissellement. Elle a ainsi mis en évidence que les matériaux les moins émissifs sont l'aluminium, l'acier inoxydable et l'acier galvanisé prépeint. Suivent ensuite les matériaux à base de zinc, avec dans l'ordre l'acier galvanisé, l'antra-zinc, le zinc naturel et le zinc ancien, puis les cuivres et les plombs. Elle met également en évidence l'importance de l'âge des toitures sur les taux d'émission des polluants métalliques. Dans la thèse de Sainte, les données de concentrations sont présentées sous forme de graphiques et sont donc difficilement exploitables.
- Liefting et al (2020) compare dans son étude des concentrations en polluants mesurées dans des eaux de ruissellement sur des toitures en bitume et comprenant des éléments en zinc. La comparaison ne porte cependant que sur peu d'éléments et semble parfois un peu étonnante. Les concentrations en zinc sont par exemple plus importantes sur les toits bitumineux que sur les toits comportant des éléments en zinc (Tableau 17).
- Vialle et al (2012) étudie la qualité des eaux sur une toiture en tuile en zone rurale dans le sud de la France. Il met en évidence la faible minéralisation des eaux et les faibles contenus en matières azotées et phosphatées. Il n'étudie pas, par contre, les polluants généralement considérés comme les métaux et les hydrocarbures (Tableau 18).

Tableau 16 : Synthèse bibliographique des concentrations en divers éléments retrouvés dans les eaux de ruissellement sur les toits et comparaison avec les concentrations mesurées dans les échantillons prélevés par Bruxelles Environnement (N1 : Nbre de sites échantillonnés, N2 : Nbre d'échantillons, Med : Médiane des concentrations, Moy : Moyenne des concentrations). Pour les métaux, les données de Bruxelles Environnement présentées dans le tableau sont celles des métaux totaux. Dans les autres articles, il n'es pas mentionné si les concentrations en métaux sont pour les métaux dissous ou totaux à l'exception de l'article de Gnecco qui précise que les concentrations sont celles des métaux sous forme dissoutes.

Paramètre	Unité	Liefting et al, 2020					Gnecco et al 2004				Gromaire et al, 1999			Mikkelsen et al, 1994	IBGE (2017-2020)			
		N1	N2	Moy	Med	p90	Min	Max	Moyenne	Deviation standard	Min	Max	Med	Concentrations caractéristiques	N2	Min	Max	Moy
MES	mg/L	5	16	196	86	495	0	42	19	18	3	304	29	5-50	4	5,7	62	23,18
Cd	µg/L	11	34	0,29	0,16	0,7					0,1	32	1,3		4	0,1	0,58	0,22
Cu	µg/L	12	36	34	22	90	0,6	18,3	10	10,6	3	247	37	10-100	4	11	36	20
Hg	µg/L	11	35	0,05	0,02	0,11									4	<0,025	<0,025	<0,025
Pb	µg/L	13	209	324	40	1200	2,4	7,3	5,1	5,3	16	2764	493	10-100	4	71	460	247,5
Ni	µg/L	11	35	3,4	1,9	11									4	1,5	5,6	3,2
Zn	µg/L	13	194	95	23	307	212,1	759	447	408	802	38061	3422	100-1000	4	380	1200	760
COD	mg/L						-	-	-	-	5	318	31		4	15,8	140	75,88
BOD5	mg/L										1	27	4		4	2	17	5,75
Anthracène	µg/L	11	37	0,01	0	0,01									4	<0,005	<0,005	<0,005
Benzo(a)pyrène	µg/L	11	37	0,02	0,01	0,04									4	<0,005	<0,005	<0,005
Huile Minérale	µg/L	11	31	233	<50	530					37	823	108		4	50	97,5	240

- Davis et al (2001) comparent dans leur étude, les concentrations en métaux retrouvés dans des échantillons prélevés sur des toits en zone résidentielle, commerciale ou sur des bâtiments institutionnels aux Etats-Unis (Tableau 19). Les concentrations en métaux sont plus grandes sur les bâtiments en zone commerciale et bâtiments institutionnels. David et al expliquent cela par le fait que les toits de ces derniers bâtiments sont généralement faits avec des éléments métalliques.

L'impact de l'utilisation de produits de nettoyage ou de traitement des toitures est également parfois étudié. Van de Voorde (2011) propose ainsi dans sa thèse un protocole analytique pour l'étude du benzalkonium, un fongicide utilisé pour le traitement des toitures. L'étude reste cependant expérimentale et ne fournit pas de résultats bruts sur les concentrations retrouvées dans les eaux de ruissellement.

Tableau 17 : Comparaison des concentrations en divers éléments retrouvés dans les eaux de ruissellement sur les toits par type de toits (N2 : Nbre d'échantillons, Med : Médiane des concentrations,). (Source : Liefting et al, 2020). Pour les métaux, il n'est pas précisé si les concentrations sont celles des métaux dissous ou totaux.

		Liefting et al, 2020					
		Toits bitumineux		Toitures avec gouttières en zinc		Autres toits	
Paramètre	unité	N2	med	N2	Med	N2	Med
Cu	µg/L	20	19	0	-	15	29
Pb	µg/L	20	210	92	70	96	17
Zn	µg/L	20	72	86	50	87	6,4
Anthracène	µg/L	20	<0,010	0	-	16	0,0014
Benzo(a)pyrène	µg/L	20	<0,010	0	-	16	0,01
Huile Minérale	µg/L	14	<50	0	-	17	<50

Tableau 18 : Comparaison des concentrations en divers éléments retrouvés dans les eaux de ruissellement sur les toits par type de toits (N2 : Nbre d'échantillons, Moy : Moyenne des concentrations, Med : Médiane des concentrations,). (Source : Vialle et al, 2012).

		Vialle et al , 2012				
Paramètre	Unité	N2	Min	Max	Moy	Med
pH	-	55	5,6	10,4	6,5	6,2
conductivité	µS/cm	55	13,5	235	56,2	38,2
Turbidité	NTU	53	0,5	6,1	2,4	2
Na+	mg/L	54	0,3	2,9	1,1	0,93
K+	mg/L	54	0,15	4,9	1,2	0,78
Ca2+	mg/L	54	1	19	4,4	2,9
Mg2+	mg/L	54	<0.10	0,71	0,27	0,24
Cl-	mg/L	54	0,55	4	1,9	1,7
SO42-	mg/L	54	0,5	6,6	1,9	1,8
PO43-	mg/L	54	<0.10	0,54	0,17	0,19
NO3-	mg/L	54	0,54	7,8	2,8	2,4
NH4+	mg/L	54	<0.10	1,7	0,58	0,32
Tot N	mg/L	12	<1	8	1,7	<1
Tot P	mg/L	11	<0.1	0,2	<0.1	<0.1
TOC	mg/L	55	0,5	5,1	2,3	2,2
COD	mgO2/L	11	<30	34	<30	<30
BOD5	mgO2/L	16	<3	17	<3	<3

Tableau 19 : Comparaison des concentrations en divers éléments retrouvés dans les eaux de ruissellement sur les toits par type de bâtiment (N2 : Nbre d'échantillons, Med : Médiane des concentrations, Moy : Moyenne des concentrations). (Source : Davis et al, 2001). Les concentrations sont celles des métaux totaux.

		Davis et al 2001								
		Toitures (zone résidentielle)			Toitures (zone commerciale)			Toitures (batiments institutionnels)		
Paramètre	unité	N2	Med	Moy	N2	Med	Moy	N2	Med	Moy
Cd	µg/L	13	0,1	0,12	13	0,7	1,3	12	0,4	0,6
Cu	µg/L	13	7	7,5	13	29	200	12	2100	5000
Pb	µg/L	13	2	1,5	13	12	62	12	64	64
Zn	µg/L	13	110	100	13	760	1100	12	460	1100

3.2.3. Eaux de ruissellement provenant de voiries urbaines

Des données sur la qualité des eaux de ruissellement sur voies urbaines sont disponibles dans la littérature. Les paramètres analysés sont cependant généralement limités et ne concernent que les matières en suspension, quelques métaux, l'azote et le phosphate, la DBO, la DCO et les HAP et ou les hydrocarbures. Dans certains articles, l'intensité du trafic n'est pas mentionnée. Liefiting et al (2020) proposent ainsi une synthèse des concentrations en différents polluants retrouvés dans les eaux de ruissellement sur des voiries sans distinction du type de voirie (Tableau 20). Ces données de Liefiting et al (2020) montrent que les concentrations en métaux les plus retrouvés dans les eaux de ruissellements sur les routes sont le plomb, le zinc et le cuivre. Les concentrations dans les deux HAP repris dans le tableau sont faibles. Les concentrations en huiles minérales peuvent atteindre plusieurs centaines de µg/l.

Dans le Tableau 20, les données de concentrations de Liefiting et al (2020) sont comparées aux concentrations mesurées par Bruxelles Environnement dans les échantillons d'eau provenant du ruissellement sur les routes, tout type de routes confondues. Cette comparaison permet de mettre en évidence que les concentrations mesurées sur les échantillons collectés par Bruxelles Environnement sont globalement plus grandes que celles présentées par Liefiting. Il est cependant compliqué d'en tirer des conclusions vu que l'intensité du trafic n'est pas connue pour les données de ce dernier.

Dans d'autres articles, l'intensité du trafic est mentionnée et permet de comparer la qualité des eaux de ruissellement des routes ayant la même intensité de trafic. Le mode de classification des routes reste cependant dans la plupart des cas subjectifs et non basé sur un nombre de véhicules empruntant réellement la voirie au contraire de ce qui a été fait pour les sites de prélèvements en Région de Bruxelles Capitale. Mikkelsen et al (1994) précisent que la comparaison des concentrations pour des sites de prélèvements sur le même type de route (des autoroutes par exemple) peut être difficile vu la différence d'intensité de trafic dans les différentes régions considérées.

Tableau 20 : Synthèse bibliographique des concentrations en divers éléments retrouvés dans les eaux de ruissellement sur routes sans distinction de l'intensité du trafic (Source : Liefing et al, 2020) et comparaison avec les concentrations mesurées dans les échantillons prélevés par Bruxelles Environnement (N1 : Nbre de sites échantillonnés, N2 : Nbre d'échantillons, Med : Médiane des concentrations, Moy : Moyenne des concentrations). Pour les métaux, les données de Bruxelles Environnement présentées dans le tableau sont celles des métaux totaux. Dans l'article de Liefing, ceci n'est pas précisé.

Paramètre	unité	Liefing et al, 2020				IBGE (2017-2020) - Toutes routes			
		N1	N2	Moy	Med	N2	Min	Max	Moy
MES	mg/L	70	114	56	20	67	23	1374	277,64
Cd	µg/L	78	124	0,49	0,1	67	0,5	4,5	1,01
Cu	µg/L	81	183	28	18	67	29	880	167,45
Hg	µg/L	3	34	0,055	0,07	67	0,05	5,8	0,32
Pb	µg/L	81	183	12	4,6	67	5	720	90,31
Ni	µg/L	80	174	3,8	3	67	5	210	24,94
Zn	µg/L	81	183	115	74	67	74	1300	485,73
P-total	mg/L	4	13	1,5	0,2	67	0,03	1,4	0,19
NO3-N	mg/L	6	49	1,4	0,67	67	0,05	3,8	0,58
N-Kjeldahl	mg/L	6	41	2,1	1,9				
DCO	mg/L	6	42	42	32	67	30,3	530	157,86
Anthracène	µg/L	5	67	0,0032	0,002	67	0,06	4,6	0,25
Benzo(a)pyrène	µg/L	5	71	0,012	0,006	67	0,02	16	0,85
Huile minérale	µg/L	72	113	349	130	67	50	10000	2169,25
E. coli	#/100 ml	0	0	-	-				

3.2.3.1. Eaux de ruissellement provenant de voiries autoroutières

Différents auteurs proposent des synthèses de suivi des concentrations en polluants retrouvés dans des eaux de ruissellements sur des autoroutes ou des routes à haute intensité de trafic qui peuvent suivant la classification de l'IBGE être assimilées à des autoroutes. Le nombre de paramètres suivis et de sites suivis varient en fonction des études. Les paramètres les plus suivis sont les matières en suspension et les métaux.

Dans le Tableau 21, on peut constater que les conductivités électriques des échantillons et les concentrations en sodium sont fort variables. Ceci est sans doute à mettre en relation avec les conditions climatiques et un éventuel salage des routes. Ces données montrent également que les concentrations en métaux les plus retrouvés dans les eaux de ruissellements sur les routes sont l'aluminium, le zinc et le cuivre. Les concentrations en HAP repris dans le tableau peuvent atteindre plusieurs dizaines de µg/l.

Dans le Tableau 21, les données de concentrations issues de la recherche bibliographique sont comparées aux concentrations mesurées par Bruxelles Environnement dans les échantillons d'eau provenant du ruissellement sur les autoroutes. Cette comparaison permet de mettre en évidence que les concentrations mesurées sur les échantillons collectés par Bruxelles Environnement sont globalement du même ordre de grandeur que celles mentionnées dans la littérature. Une exception est à noter pour les concentrations en aluminium mesurées par Bruxelles Environnement sont deux ordres de grandeur supérieures à celles mentionnées dans la littérature. La comparaison ne peut cependant être faite qu'avec les données d'un seul article. De plus, dans cet article, il n'est pas mentionné si les concentrations sont pour l'aluminium dissous ou total.

Tableau 21 : Synthèse bibliographique des concentrations en divers éléments retrouvés dans les eaux de ruissellement sur autoroutes et comparaison avec les concentrations mesurées dans les échantillons prélevés par Bruxelles Environnement (N2 : Nbre d'échantillons, Med : Médiane des concentrations, Moy : Moyenne des concentrations). Les données de Bruxelles Environnement présentées dans le tableau sont, pour les métaux celles des métaux totaux, pour les HAP, la somme des 16 HAP analysés. Pour les métaux, les concentrations sont celles des métaux dissous et totaux pour respectivement les articles de Camponelli et Helmreich. Dans les deux autres articles, cette information n'est pas mentionnée.

Paramètre	unité	Helmreich et al, 2010					Camponelli et al 2010			Mikkelsen et al, 1994	Chen et al, 2016		IBGE (2017-2020) - Autoroute			
		N2	Min	Max	Med	Moy	moy	min (de la moy des événements)	max (de la moy des événements)	Valeurs caractéristiques	min	max	N2	Min	Max	Moy
pH	–	63	6,2	8,3	7,5	7,5	7,3	7,1	8.0				11	6,6	8,8	7,74
EC	µS/cm	63	10,8	52000	–a	–a	4320	175	32212				11	170	4800	1074,55
MES	mg/L	61	18,3	3165	175	355	128	81	278	30-60	82	7610	11	30	630	195,55
Na+	mg/L	38	17,6	10400	–a	–a							11	16	810	163,73
Cd	µg/L	55	<0,5	4,8	<0,5	<0,5							11	0,5	1,4	0,71
Cu	µg/L	57	24	604	155	191	39	2,1	136	5-25	0,67	229	11	85	380	217,73
Ni	µg/L	55	4,2	403	35	55							11	5	210	34,73
Pb	µg/L	57	<5,0	405	43	56				50-125			11	17	93	51,36
Zn	µg/L	57	128	3470	592	847	204	29	815	125-400	13,7	631	11	210	850	507,27
Al	µg/L										112	536	11	2100	24000	7181,82
Tot N	mg/L									1-2	2,62	9,99				
Tot P	mg/L									0.2-0.5	0,35	2,28	11	0,03	0,45	0,19
DOC	mg/L	55	3,6	81	17	21				25-60	5	535	11	30,3	300	135,66
TOC	mg/L	54	10	355	46	71					8,64	164,2				
HAP	µg/L										36,6	114	11	0,7	90	10,29

3.2.3.2. *Eaux de ruissellement provenant de voiries urbaines à trafic dense*

Comme expliqué précédemment, les informations disponibles dans la littérature permettent difficilement de faire la distinction entre eaux de ruissellement collectées sur des autoroutes et des voiries urbaines avec un trafic dense. Chocat et al (2007) proposent une synthèse des données de concentrations en divers polluants pour des eaux provenant de réseaux séparatifs provenant d'autoroutes et routes à fort trafic (Tableau 22). Les paramètres repris dans la synthèse sont comme précédemment les matières en suspension, quelques métaux, les HAP, hydrocarbures mais également deux pesticides et un indicateur de qualité bactériologique.

Ces données montrent également que les concentrations en métaux les plus importantes dans les eaux de ruissellements sur les routes sont le plomb et le zinc. Les concentrations en HAP repris dans le tableau peuvent atteindre quelques $\mu\text{g/l}$. Les concentrations en hydrocarbures totaux peuvent être de plusieurs centaines de mg/l . Les concentrations en pesticides sont-elles fort variables.

Dans le Tableau 22, les données de concentrations issues de la recherche bibliographique sont comparées aux concentrations mesurées par Bruxelles Environnement dans les échantillons d'eau provenant du ruissellement sur les autoroutes et routes à trafic dense. Cette comparaison permet de mettre en évidence que les concentrations mesurées sur les échantillons collectés par Bruxelles Environnement sont globalement du même ordre de grandeur que celles mentionnées dans l'article de Chocat. Une exception est à noter pour les concentrations en plomb mentionnées par Chocat qui sont plus élevées que celles mesurées par Bruxelles Environnement. Les concentrations en hydrocarbures totaux mentionnées par Chocat sont également plus élevées que celles mesurées par Bruxelles Environnement. Il est cependant difficile de savoir ce que regroupe cette catégorie de polluants dans l'article de Chocat. Pour la comparaison, les concentrations en huiles minérales C10-C40 mesurées par Bruxelles Environnement ont été considérées.

Tableau 22 : Synthèse bibliographique des concentrations en divers éléments retrouvés dans les eaux de ruissellement sur autoroutes et routes à fort trafic (Source : Chocat et al, 2007) et comparaison avec les concentrations mesurées dans les échantillons prélevés par Bruxelles Environnement (N2 : Nbre d'échantillons, Med : Médiane des concentrations, Moy : Moyenne des concentrations). Pour les métaux, les données de Bruxelles Environnement et de Chocat présentées dans le tableau sont celles des métaux totaux. Dans son article, Chocat ne prend en compte que 6 HAP alors que Bruxelles Environnement en considère 16.

Paramètre	unité	Chocat et al, 2007			IBGE (2017-2020) - Autoroutes				IBGE (2017-2020) - Urbain dense			
		Min	Max	Moy	N2	Min	Max	Moy	N2	Min	Max	Moy
MES	mg/l	100	5700	261	11	30	630	195,55	23	61	738	284,52
Cd total	(µg/L)			0,76 -3,61	11	0,5	1,4	0,71	23	0,5	3,9	1,47
Cu total	(µg/L)			18,5	11	85	380	217,73	23	99	880	219,9
Pb total	(µg/L)	241	34000	960	11	17	93	51,36	23	45	720	138,52
Zn total	(µg/L)	170	3550	410	11	210	850	507,27	23	330	1300	640
N-NH4	mg/l	0,02	2,1		11	0,11	0,68	0,33	23	0,03	1	0,23
DCO	mg/l	128	171		11	30,3	300	135,66	23	88	430	203,84
DBO5	mg/l	12,2	32	24	11	2	11	5,82	23	2	39	11,52
HAP	(µg/L)	0,03	6	-	11	0,7	90	10,29	23	1,9	26	6,45
Hydrocarbures totaux	(µg/L)	2500	400000	28000	11	50	4300	1720	23	50	8700	2739,57
Glyphosate	(µg/L)	0	1750	0,72	11	0,03	0,68	0,19	19	0,06	0,53	0,22
Diuron	(µg/L)	0	2	0,05	11	0,01	0,09	0,03	23	0,01	0,17	0,03
Coliformes fécaux	(Escherichia Coli) MPN/100 mL	10	1000									

3.2.3.3. Eaux de ruissellement provenant de voiries urbaines à trafic moyen

Gromaire et al (1999) proposent une synthèse des données de concentrations en divers polluants pour des eaux provenant de routes de Paris où le trafic est considéré comme moyen (Tableau 23). Les paramètres repris dans la synthèse sont comme précédemment les matières en suspension, quelques métaux et les hydrocarbures.

Ces données de Gromaire montrent également que les concentrations en métaux les plus importantes dans les eaux de ruissellements sur les routes à trafic moyen sont le plomb et le zinc. Les concentrations en hydrocarbures totaux peuvent être de plusieurs centaines de µg/l.

Dans le Tableau 23, les données de concentrations issues de la recherche bibliographique sont comparées aux concentrations mesurées par Bruxelles Environnement dans les échantillons d'eau provenant du ruissellement sur les routes à trafic moyen. Cette comparaison permet de mettre en évidence que les concentrations mesurées sur les échantillons collectés par Bruxelles Environnement sont globalement du même ordre de grandeur que celles mentionnées dans l'article de Gromaire. Les concentrations en plomb mentionnées par Gromaire sont plus légèrement plus importantes que celles mesurées par Bruxelles Environnement. L'étude de Gromaire étant relativement ancienne, cette différence pourrait s'expliquer par la fin de l'utilisation des carburants contenant du plomb. Les concentrations en cuivre sont, par contre, plus élevées dans les analyses de Bruxelles Environnement par rapport à celles mentionnées par Gromaire.

Tableau 23 : Synthèse bibliographique des concentrations en divers éléments retrouvés dans les eaux de ruissellement sur routes à trafic moyen (Source : Gromaire et al, 1999) et comparaison avec les concentrations mesurées dans les échantillons prélevés par Bruxelles Environnement (N2 : Nbre d'échantillons, Med : Médiane des concentrations, Moy : Moyenne des concentrations). Les données de Bruxelles Environnement présentées dans le tableau sont, pour les métaux celles des métaux totaux, pour les HAP, la somme des 16 HAP analysés, pour les hydrocarbures, les huiles minérales C10-C40. Pour les métaux, Gromaire ne précise pas si les concentrations sont celles des métaux dissous ou totaux.

Paramètre	Unité	Gromaire et al, 1999			IBGE (2017-2020) - Urbain moyen			
		Min	Max	Med	N2	Min	Max	Moy
MES	mg/L	49	498	92,5	27	23	1374	324
Cd	µg/L	0,3	1,8	0,6	27	0,5	4,5	0,87
Cu	µg/L	27	191	61	27	29	400	125,85
Pb	µg/L	71	523	133	27	5	270	76,59
Zn	µg/L	246	3839	550	27	74	1200	405,33
COD	mg/L	48	964	131	27	33	530	134,59
BOD5	mg/L	15	141	36	27	2	67	11,67
Hydrocarbures	µg/L	115	4032	508	27	50	10000	2182

3.2.3.4. *Eaux de ruissellement provenant de voiries urbaines à trafic faible*

Gnecco et al (2004) et Mikkelsen et al (1994) proposent une synthèse des données de concentrations en divers polluants pour des eaux provenant de routes à faible trafic respectivement au Danemark et en Italie. Les paramètres repris dans la synthèse sont les matières en suspension, quelques métaux et le phosphore et l'azote total et la demande chimique en oxygène (Tableau 24).

Ces données montrent également que les concentrations en métaux les plus importantes dans les eaux de ruissellements sur les routes sont le plomb et le zinc. Les concentrations en phosphore et azote total sont faibles.

Dans le Tableau 24, les données de concentrations issues de la recherche bibliographique sont comparées aux concentrations mesurées par Bruxelles Environnement dans les échantillons d'eau provenant du ruissellement sur les routes à trafic moyen. Cette comparaison permet de mettre en évidence que les concentrations mesurées sur les échantillons collectés par Bruxelles Environnement sont globalement du même ordre de grandeur que celles mentionnées dans la synthèse bibliographique. Les concentrations en plomb mentionnées par Mikkelsen sont plus légèrement plus importantes que celles mesurées par Bruxelles Environnement et celles proposées par Gnecco. La même hypothèse que celle posée dans le paragraphe précédent pourrait expliquer cette différence. Les concentrations en cuivre sont, par contre, plus élevées dans les analyses de Bruxelles Environnement par rapport à celles mentionnées par Gnecco et Mikkelsen.

Tableau 24 : Synthèse bibliographique des concentrations en divers éléments retrouvés dans les eaux de ruissellement sur routes à trafic faible et comparaison avec les concentrations mesurées dans les échantillons prélevés par Bruxelles Environnement (N2 : Nbre d'échantillons, Moy : Moyenne des concentrations). Pour les métaux, les données de Bruxelles Environnement présentées dans le tableau sont celles des métaux totaux, celle de Gnecco sont celles des métaux dissous. Mikkelsen ne donne pas de précision à ce sujet.

Paramètre	Unités	Gnecco et al 2004			Mikkelsen et al, 1994	IBGE (2017-2020) - Urbain faible			
		Min	Max	Moy	Valeurs caractéristiques	N2	Min	Max	Moy
TSS	mg/L	15	377	140	30-100	6	32	310	191,33
Cd	µg/L				0.5-3	6	0,5	0,5	0,5
Cu	µg/L	0,1	53,3	19,4	5-40	6	41	93	64,5
Pb	µg/L	6,1	23,3	13,2	50-150	6	12	58	38,67
Zn	µg/L	27,7	123,4	81,1	300-500	6	110	360	216,67
Tot N	mg/L				2				
Tot P	mg/L				0,5	6	0,17	0,63	0,32
COD	mg/L	11	281	129	40-60	6	72,2	200	127,03

3.2.4. Eaux de ruissellement provenant d'autres types de surface

Comme mentionné précédemment, dans beaucoup d'article, il est difficile de définir le type de surface sur lequel le ruissellement s'effectue sur base des données mentionnées. Le ruissellement est en effet souvent récolté en sortie d'un sous-bassin ou d'un collecteur d'égout et constitue donc un mélange d'eau ayant ruisselé sur différents types de surface. Chocat et al (2007) présentent, par exemple dans leur étude des ordres de grandeur de concentrations en différents polluants dans des réseaux d'égouts unitaires collectant des eaux de ruissellement provenant de zones résidentielles et commerciales (Tableau 25). Aucune information n'est donnée sur le type de surface de ruissellement. Dans son article, Chocat compare ces concentrations avec celles retrouvées dans les eaux de ruissellement sur des autoroutes et routes à fort densité de trafic (voir Tableau 22). Les concentrations en hydrocarbures sont plus importantes dans les eaux de ruissellement provenant des voiries à haute intensité de trafic. Pour les métaux, la situation est plus nuancée. Certains métaux comme le cuivre et le cadmium sont plus retrouvés dans les eaux de ruissellement provenant des zones urbaines et commerciales.

Tableau 25 : Ordre de grandeur des concentrations en divers éléments retrouvés dans les eaux de ruissellement dans des zones résidentielles et commerciales (Moy : Moyenne des concentrations) (Source Chocat et al, 2007). MPN est le 'Most Probable Number' et représente la densité de population de micro-organismes viables dans un échantillon test.

Paramètre	unité	Chocat et al, 2007		
		Min	Max	Moy
MES	mg/l	1	4582	190
Cd total	(µg/L)			2,81 (zone com.) - 11,32
Cu total	(µg/L)			144,6 (zone rés.)
Pb total	(µg/L)	10	3100	210
Zn total	(µg/L)	10	3680	300
N-NH4	mg/l	0,2	4,6	1,45
N Total	mg/l	0,4	20	3,2
P Total	mg/l	0,02	14,3	0,34
DCO	mg/l	20	365	85
DBO5	mg/l	0,7	220	11
HAP	(µg/L)			0,01 - 3,2
Hydrocarbures totaux	(µg/L)	40	25900	1900
Glyphosate	(µg/L)	<0,1	4,72	< 1,52
Diuron	(µg/L)	<0,05	13	< 1
Coliformes fécaux	(Escherichia Coli) MPN/100 mL	40	500000	6 430

Quelques études dont celles de Gromaire et al (1999) et Angrill et al (2017) présentent des résultats plus spécifiques permettant de caractériser les concentrations en polluants dans des eaux de ruissellement sur des surfaces dont la nature est bien définie et autres que des toits et des routes.

Gromaire et al (1999) présentent des concentrations en différents polluants pour des eaux de ruissellement provenant de cours à Paris (Tableau 26). L'examen de ces données montrent que les concentrations en métaux peuvent être de plusieurs centaines de µg/l pour le zinc et le plomb et que les concentrations en hydrocarbures peuvent également être de plusieurs centaines de µg/l. Ils

comparent également ces concentrations avec celles retrouvées dans des eaux de ruissellement sur des toits (voir Tableau 16) et des routes avec une intensité moyenne de trafic (Tableau 23). Les concentrations en métaux sont plus importantes dans les eaux de ruissellement des toits que dans celles des cours. Les concentrations en hydrocarbures sont plus importantes dans les eaux de ruissellement provenant des voiries.

Angrill et al (2017) ont quant à eux, mesurés les concentrations en différents polluants dans des eaux de ruissellement collectées en différents endroits (zones pédestres de différents types, routes à faible intensité de trafic et parkings) situés sur le campus universitaire de Barcelone (Tableau 27 et Tableau 28). Angrill et al mettent en évidence que les concentrations en polluants restent relativement faibles par rapport aux concentrations observées dans d'autres études notamment pour les métaux. Les concentrations en hydrocarbures totaux peuvent atteindre plusieurs mg/l dans les zones de parking et sur les routes considérées dans l'étude. Ils mettent également en évidence l'importante contamination bactériologique et ce quel que soit le type de surface considérée. Ils mentionnent également dans leur étude l'importance du facteur lié à la rugosité de la surface. Plus la surface est rugueuse, plus les polluants restent piégés et seront mobilisés par le ruissellement.

Tableau 26 : Concentrations en divers éléments retrouvés dans les eaux de ruissellement dans des cours à Paris (Med : Médiane des concentrations) (Source Gromaire et al, 1999). Pour les métaux, Gromaire ne précise pas si les concentrations sont celles des métaux dissous ou totaux.

Paramètre	Unité	Gromaire et al, 1999		
		Min	Max	Med
MES	mg/L	22	490	74
Cd	µg/L	0,2	1,3	0,8
Cu	µg/L	13	50	23
Pb	µg/L	49	225	107
Zn	µg/L	57	1359	563
COD	mg/L	34	580	95
BOD5	mg/L	9	143	17

Tableau 27 : Concentrations en divers éléments retrouvés dans les eaux de ruissellement sur différents types de support (Moy : Moyenne des concentrations, Med : Médiane des concentrations, n.a. : Not available) (Source : Angrill et al, 2017). Pour les métaux, Angrill ne précise pas si les concentrations sont celles des métaux dissous ou totaux. UFC : unité formant colonie ou une unité formatrice de colonie.

Paramètre	Unité	Zone piétonne asphaltée				Zone piétonne - dalles en béton				Zone piétonne - béton			
		Min	Max	Moy	Med	Min	Max	Moy	Med	Min	Max	Moy	Med
pH		6.90	8.05	7.65	7.65	7.30	8.40	7.79	7.80	7.20	8.50	8.05	8.00
Conductivity	(µS/cm)	73.0	558	191	168	38.0	311	120	93.0	89.0	27150	2503	190
SST	(mg/L)	2.00	171	17.6	6.00	2.00	66.0	11.6	5.50	5.00	67.0	26.4	21.0
HCO ₃ ⁻	(mg/L)	49.0	222	80.8	70.0	36.0	136	64.7	51.0	50.0	149	65.3	59.0
Cl ⁻	(mg/L)	2.50	28.0	8.32	5.50	2.00	13.0	4.28	2.00	6.90	356	103	31.0
SO ₄ ²⁻	(mg/L)	5.70	101	21.3	11.6	5.00	40.0	10.2	5.00	5.00	70.9	17.5	8.05
Cd	(µg/L)	<2.00				<2.00				<2.00			
Cu	(µg/L)	<10.0	22.0	8.33	6.70	<10.0	41.2	11.9	4.50	<10.0	17.0	4.25	0.00
Hg	(µg/L)	<1.00				<1.00				<1.00			
Pb	(µg/L)	<25.0				<25.0				<25.0			
Ni	(µg/L)	<7.00				<7.00				<7.00			
Zn	(µg/L)	<7.00	43.0	10.9	8.00	<7.00	29.0	6.57	0.00	<7.00	24.0	14.0	16.0
Cr	(µg/L)	<4.00				<4.00	13.0	3.86	0.00	<4.00			
Fe	(µg/L)	<15.0	182	28.9	0.00	<15.0	122	44.7	41.0	120	440	284	287
As	(µg/L)	<5.00				<5.00	8.00	1.14	0.00	<5.00			
NH ₄ ⁺	(mg/L)	0.10	2.60	0.61	0.25	0.11	2.40	0.51	0.27	0.10	2.00	0.28	0.12
NO ₂ ⁻	(mg/L)	0.05	0.64	0.21	0.12	0.05	4.86	0.52	0.14	0.05	1.77	0.24	0.07
NO ₃ ⁻	(mg/L)	1.00	21.4	5.52	3.37	1.00	7.27	3.37	2.57	1.00	13.0	2.71	1.25
PO ₄ ³⁻	(mg/L)	0.31	1.23	0.52	0.31	0.31	1.50	0.43	0.31	0.31	1.07	0.37	0.31
TOC	(mg C/L)	5.80	10.5	8.53	8.45	1.00	11.8	6.20	5.60	2.80	12.7	5.83	3.90
COD	(mg O ₂ /L)	11.0	102	55.7	51.5	10.0	55.0	15.8	10.0	10.0	44.0	16.4	10.0
Hydrocarbures totaux	(mg/L)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Colonies at 22°C	(ufc/ml)	4,152	480	85,609	17,2	2,45	580	222,085	91,6	17,2	6,120,000	1,598,250	127,9
Colonies at 37°C	(ufc/100ml)	1,67	627	113,078	11,12	2,496	192,8	69,422	32	4,1	1,150,000	299,345	21,64
Total coliforms	(ufc/100ml)	280	134	23,234	2,5	130	51	8,876	900	280	616	163,795	19,45
Fecal coliforms	(ufc/100ml)	4.00	4,04	733	90.0	21.0	16,4	2,958	92.5	80.0	143	47,9	620
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	(ufc/100ml)	0.00	1,1	419	320	0.00	28	4,007	1.00	25.0	168	42,139	265
<i>Clostridium perfringens</i>	(ufc/100ml)	0.00	140.0	24.9	4.00	0.00	4.00	1.86	2.00	18.0	140	74.3	69.5
<i>Enterococcus</i>	(ufc/100ml)	1.00	15,5	2,875	189	159	27,7	4,52	514	460	41	10,693	655

Tableau 28: Concentrations en divers éléments retrouvés dans les eaux de ruissellement sur différents types de support (Moy : Moyenne des concentrations, Med : Médiane des concentrations) (Source : Angrill et al, 2017). Pour les métaux, Angrill ne précise pas si les concentrations sont celles des métaux dissous ou totaux

Paramètre	Unité	Route asphaltée (trafic faible)				Route en béton (trafic faible)				Parking asphalté				Parking en béton			
		Min	Max	Moy	Med	Min	Max	Moy	Med	Min	Max	Moy	Med	Min	Max	Moy	Med
pH		7.20	8.30	7.85	7.90	7.00	8.40	7.68	7.60	7.60	8.60	7.88	7.80	7.30	8.01	7.67	7.70
Conductivity	(µS/cm)	54.0	455	148	100	105	345	157	142	68.0	330	131	99.0	49.0	244	117	106
SST	(mg/L)	3.00	36.0	14.7	10.0	2.0	103	21.2	14.5	2.00	57.0	14.4	8.00	2.00	18.0	7.50	7.00
HCO ₃ ⁻	(mg/L)	40.0	109	56.8	50.0	54.0	113	72.1	71.0	34.0	108	58.0	50.0	43.0	91.0	60.1	54.5
Cl ⁻	(mg/L)	2.00	122	19.6	7.10	2.00	33.0	5.69	3.50	2.00	39.1	7.50	4.00	2.00	21.3	4.19	2.00
SO ₄ ²⁻	(mg/L)	5.00	27.9	7.08	5.00	5.90	36.0	12.2	9.00	5.00	23.7	9.28	7.00	5.00	21.0	9.83	7.85
Cd	(µg/L)	<2.00				<2.00				<2.00				<2.00			
Cu	(µg/L)	<10.0	28.0	7.00	0.00	<10.0	24.0	9.30	7.05	<10.0	14.0	5.17	3.45	<10.0	31.0	8.17	4.40
Hg	(µg/L)	<1.00				<1.00				<1.00				<1.00			
Pb	(µg/L)	<25.0				<25.0				<25.0				<25.0			
Ni	(µg/L)	<7.00				<7.00				<7.00				<7.00			
Zn	(µg/L)	<7.00	40.0	14.8	9.50	25.0	191	92.7	78.5	<7.00	12.0	2.00	0.00	21.0	88.0	57.7	61.5
Cr	(µg/L)	<4.00				<4.00				<4.00				<4.00			
Fe	(µg/L)	53.0	157	111	118	<15.0	155	49.8	27.0	<15.0	51.0	25.3	24.0	<15.0	97.0	44.8	53.5
As	(µg/L)	<5.00				<5.00				<5.00				<5.00			
NH ₄ ⁺	(mg/L)	0.10	0.44	0.18	0.17	0.12	1.10	0.36	0.22	0.10	10.0	0.97	0.16	0.12	1.90	0.59	0.23
NO ₂ ⁻	(mg/L)	0.05	0.19	0.10	0.08	0.10	4.27	0.51	0.20	0.05	6.60	0.75	0.10	0.05	0.74	0.21	0.16
NO ₃ ⁻	(mg/L)	0.57	2.52	1.26	1.00	1.69	41.8	6.34	3.52	1.00	36.7	6.65	2.76	1.00	8.43	2.80	2.49
PO ₄ ³⁻	(mg/L)	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.40	0.31	0.31	0.31	0.46	0.33	0.31	0.31	0.68	0.35	0.31
TOC	(mg C/L)	3.40	39.0	13.4	5.65	3.10	9.50	6.08	5.95	3.40	9.20	5.63	4.80	2.90	6.30	4.37	4.30
COD	(mg O ₂ /L)	10.0	144	29.5	16.0	10.0	47.0	20.8	16.0	10.0	59.0	22.5	18.0	10.0	45.0	16.1	13.0
Hydrocarbures totaux	(mg/L)	<2.00				<2.00	6.20	2.03	1.30	<2.00	9.80	3.95	2.50	<2.00	9.50	3.43	1.30
Colonies at 22°C	(ufc/mL)	7,6	2,420,000	626,15	38,5	6,528	52,2	26,575	23,45	3,26	507,2	102,153	25,43	21,4	488	105,167	27,65
Colonies at 37°C	(ufc/100mL)	3,8	528	240,45	215	1,8	50,2	18,296	14,56	2,28	35,1	14,167	9,66	6,28	37,9	22,68	23,39
Total coliforms	(ufc/100mL)	30.0	139	36,283	3,05	120	12	4,248	3,7	100	12	2,683	1,15	110	280	48,378	2,63
Fecal coliforms	(ufc/100mL)	10.0	58	14,705	405	5.00	4	1,049	95.0	60.0	6,7	1,589	100	15.0	3,4	1,485	1,5
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	(ufc/100mL)	46.0	78	20,332	1,64	0.00	2,98	934	13.0	30.0	6,6	1,27	80.0	0.00	7,3	1,252	0.00
<i>Clostridium perfringens</i>	(ufc/100mL)	6.00	56.0	26.0	21.0	0.00	50.0	18.7	10.5	0.00	45.0	15.0	7.50	0.00	32.0	11.8	9.00
<i>Enterococcus</i>	(ufc/100mL)	22.0	5,5	1,608	455	2.00	2,74	834	59.0	4.00	4,88	890	78.5	5.00	7,8	1,765	691

3.3. Conclusions de la synthèse bibliographique et perspectives

La recherche bibliographique a permis de mettre en évidence que de nombreuses études sont menées sur la problématique de la qualité des eaux de ruissellements. Dans plusieurs études, les échantillons d'eau sont prélevés en sortie de réseau d'égouttage séparatif ou après ruissellement sur des surfaces importantes mélangeant plusieurs types de surfaces. Ces échantillons sont donc des mélanges de plusieurs types d'eau ne permettant pas de caractériser les concentrations en divers paramètres par type de surface de ruissellement. Dans quelques études, l'échantillonnage est néanmoins réalisé de manière à permettre la caractérisation des concentrations en différents paramètres par type de surfaces de ruissellement. Ces études ont permis de caractériser les concentrations en divers polluants retrouvés par type de surface de ruissellement et de comparer les valeurs obtenues pour les toits et les différents types de voiries par Bruxelles Environnement avec des valeurs issues de la littérature. La comparaison des résultats des analyses réalisées par Bruxelles Environnement montre ainsi que les concentrations mesurées sont du même ordre de grandeur que celles mentionnées dans la littérature. La qualité des eaux de ruissellement sur les toits et voiries de Bruxelles est donc, pour les paramètres pour lesquels la comparaison a été possible, globalement comparable à celles observées dans d'autres régions ayant un contexte climatique, socio-économique semblables.

La recherche bibliographique a également permis de fournir des ordres de grandeur de concentrations pour différents paramètres dans des eaux de ruissellement sur des surfaces non étudiées par Bruxelles Environnement (différents types de toit, des cours, des zones piétonnes et des parkings). Dans une future campagne, il pourrait s'avérer intéressant d'échantillonner des eaux de ruissellement sur ce même type de surface à Bruxelles pour établir une comparaison.

La plupart des études consultées ne portent généralement que sur un nombre limité de polluants généralement les matières en suspension, quelques métaux, différentes formes de l'azote et des phosphates, la DBO et la DCO, des HAP ou hydrocarbures. En comparaison, l'étude de Bruxelles Environnement est donc particulièrement exhaustive en termes de paramètres analysés. Parmi les études consultées, les paramètres complémentaires qui ont été retrouvés et pourraient être intégrés dans une future campagne d'échantillonnage sont notamment les indicateurs de contamination microbiologiques (e-coli par exemple), l'azote organique, des polluants émergents tels que les composés perfluorés ou très spécifiques comme les produits de traitements de toitures par exemple

4. Bibliographie

Alhoniemi E., Himberg J., Parhankangas J. and Vesanto J. 2000-2005. SOM Toolbox

Angrill S., Petit Boix A, Morales-Pinzón T., Josa A., Rieradevall J., Gabarrell X., (2017), Urban rainwater runoff quantity and quality - A potential endogenous resource in cities. *Journal of Environmental Management*, 189, 14-21

Antoine M., 2021, *BELINI - runoff water quality measurement campaign in Brussels*, Bruxelles Environnement, 26p.

Beysens D., Mongruel V, Acker K., (2017) Urban dew and rain in Paris, France: Occurrence and physico-chemical characteristics. *Atmospheric Research*, Elsevier, 189, pp.152 - 161.

Boogaard F., Bruins G., Wentink R., (2006), *Wadi's: aanbevelingen voor ontwerp, aanleg en beheer - Gebaseerd op zes jaar onderzoek van de wadi's in Enschede gecombineerd met overige binnen- en buitenlandse ervaringen*, 136p

Bruxelles Environment. 2017. *Plan de Gestion de l'eau de la Région de Bruxelles-Capitale 2016-2021*. Bruxelles Environnement, Bruxelles, 497p.

Bruxelles Mobilité, 2011, *IRIS 2 Plan de Mobilité*. Région de Bruxelles-Capitale, Bruxelles, Bruxelles Mobilité.

Camponelli K.M., Lev S.M., Snodgrass J.W., Landa E. R., Casey R.E., (2010), Chemical fractionation of Cu and Zn in stormwater, roadway dust and stormwater pond sediments. *Environmental Pollution* 158, 6(2010), 2143-2149.

Chen R.-H., Li F.-P., Zhang H.-P., Jiang Y., Mao L.-C., Wu L.-L., Chen L., (2016) Comparative analysis of water quality and toxicity assessment methods for urban highway runoff, *Science of the Total Environment* 553, 519–523

Chocat, B., Bertrand-Krajewski, J.-L., Barraud, S. (2007) : *Eaux pluviales urbaines et rejets urbains par temps de pluie ; Techniques de l'ingénieur ; ref W6800 ; 19p*

Dallman S. & Spongberg M., (2012) Expanding Local Water Supplies: Assessing the Impacts of Stormwater Infiltration on Groundwater Quality, *The Professional Geographer*, 64:2, 232-249,

Davis A.P., Shokouhian M., Ni S. (2001) Loading estimates of lead, copper, cadmium, and zinc in urban runoff from specific sources. *Chemosphere* 44, 5 (2001), 997-1009.

Falantin C., Devillers D., Ouddane B., Hérin J.J., (2019), *Projet TAM : Techniques Alternatives et Micropolluants – Étude de l'impact de l'infiltration des eaux pluviales à la source sur la qualité des eaux infiltrées*.

Fardel A., Peyneau P-E., Lakel A., Bechet B., Joannis C., Rodriguez F., (2016), "Characterization of hydrodynamic and pollutant removal processes inside swales—a pilot study. Novatech.

Gasperi J., Sebastian C., Ruban, V., Delamain M., Percot S., Wiest L., Mirande C., Caupos E., Demare D., Diallo Kessoo Kessoo M., Saas M., Schwartz J.J., Dubois P., Fratta C., Wolff H., Moilleron R., Chebbo G., Cren C., Millet M., Barraud S., Gromaire M.C., (2014), *Micropollutants in urban stormwater: occurrence,*

concentrations, and atmospheric contributions for a wide range of contaminants in three French catchments. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 21, 5267-5281

Gnecco I., Berretta C., Lanza L.G., La Barbera P., (2005), Storm water pollution in the urban environment of Genoa, Italy. *Atmospheric Research* 77, 1-4 (2005), 60-73.

Gromaire M.C., Garnaud S., Gonzalez A., Chebbo G. (1999) Characterisation of urban runoff pollution in Paris. *Water Science and Technology* 39, 2 (1999), 1-8

Helmreich B, Hilliges R., Schriewer A., Horn H. (2010) Runoff pollutants of a highly trafficked urban road – Correlation analysis and seasonal influences *Chemosphere* 80, 991–997

Hofman-Caris R., Bertelkamp C., de Waal L., van den Brand T., Hofman J., van der Aa R., van der Hoek J.P., (2019) Rainwater Harvesting for Drinking Water Production: A Sustainable and Cost-Effective Solution in The Netherlands? *Water*, 11, 511

Kohonen T., 2001. *Self-Organizing Maps*. Springer Series in Information Sciences, 30.

Liefting H.J., Boogaard F.C., Langeveld J.G., (2020), Kwaliteit afstromend hemelwater in Nederland - Database kwaliteit afstromend hemelwater, RIONED en STOWA, 38p

Mendez C. B., Afshar B. R., Kinney K., Barrett M. E., Kirisits MJ., (2010) Effect of Roof Material on Water Quality for Rainwater Harvesting Systems, Texas Water Development Board, Report, 55p

Mikkelsen P.S., Weyer G., Berry C., Waldent Y., Colandini V., Poulsen S., Grotehusmann D., Rohfing. R., (1994), Pollution from Urban Stormwater Infiltration. *Water Science and Technology* 29, 1-2, 293-302

Peeters L., Baçao F., Lobo V., Dassargues A., 2007, *Exploratory data analysis and clustering of multivariate spatial hydrogeological data by means of GEO3DSOM, a variant of Kohonen's Self-Organizing Map*, *Hydrology Earth System Science*, 11, 1309–1320.

Pitt R., Clark S., Field R., (1999), Groundwater contamination potential from stormwater infiltration practices, urban *Water* 1,3 (1999), 217-236.

Sainte P., 2009. Contribution des matériaux de couverture à la contamination métallique des eaux de ruissellement. Ph.D. Dissertation. Université Paris-Est. France

Ultsh A., Herrmann L., 2005, The architecture of emergent self-organizing maps to reduce projection errors, ESSANN2005 13th Eur. Symp. Artif. Neural Networks, Bruges, Belgium 1–6.

van de Voorde A. (2012) Incidence des pratiques d'entretien des toitures sur la qualité des eaux de ruissellement : cas des traitements par produits biocides. *Sciences de la Terre*. Université Paris-Est, 277p

Vesanto J., Himberg J., Alhoniemi E., Pearhankangas J., 1999, *Self-organizing map in Matlab: the SOM Toolbox*, Proceedings of the Matlab DSP Conference, pp. 35-40, Espoo, Finland

Vialle C., Sablayrolles C., Lovera M., Jacob S., Huau M.-C., Jacob S., Montrejaud-Vignoles M., (2012) Water quality monitoring and hydraulic evaluation of a household roof runoff harvesting system in France. *Water Resources Management*, Springer Verlag, vol. 26, pp.2233-2241.

VITO, juin 2014. «Inventarisatie van de emissies naar water in het Brussels Hoofdstedelijk Gewest» Post 2: analyserapport en factsheets. Etude réalisée pour le compte de Bruxelles Environnement. 346 pp

Zgheib S., (2009), Flux et sources des polluants prioritaires dans les eaux urbaines en lien avec l'usage du territoire. Ph.D.Dissertation. Université Paris-Est, France.

Annexe 1

Tableau 29 : Descriptif des sites d'échantillonnage d'eau de ruissellement en Région de Bruxelles-Capitale (Bruxelles Environnement, 2018)

Code Site	Site	Densité du trafic	Densité du trafic ²	Fluidité du trafic (lundi 8:30)	Fluidité du trafic (lundi 8:30) ³	risque pollution	Revêtement voirie	type en coupe
A2	Viaduc Trois Fontaines	Autoroute	6	moyen à ralenti	4	12	Asphalte	V-I-V
A3	Viaduc du Neerpede (omnibus)	Autoroute	6	moyen	3	11	Asphalte	V
B2	Rue de Stalle (Colruyt : tram + pompe)	Urbain Fort	4	ralenti	5	9	Asphalte	T-S-V-tram-V-S-T
B4	Avenue du Port (Entrée T&T)	Urbain Fort	4	moyen	3	7	Pavés en porphyre	T-V-S-T
B6	Quai Monnoyer (Elia, Omnibus 40 Canal)	Urbain Fort	4	moyen	3	7	Asphalte	V-T
B7	Quai Monnoyer - Pont Van Praet (Omnibus 40 Canal)	Urbain Fort	4	moyen	3	7	Asphalte	T-S-V
B11	Descente pont Paepsem (4 descentes vers le Canal)	Urbain Fort	4	fluide	1	5	Asphalte	T-V-I-V-T
C2	Quai des Usines (Omnibus 60 Canal) (tram)	Urbain Moyen	3	moyen à fluide	2	3	Asphalte	T-S-V-tram-I-V
C6	Digue du Canal	Urbain Moyen	3	fluide	1	2	Asphalte	T-V-T
C7	Pont des armateurs	Urbain Moyen	3	fluide	1	2	Asphalte	T-V-T-S
C9	Quai de l'industrie entre pont Ropsy Chaudron et pont métro	Urbain Moyen	3	moyen	3	3	Asphalte	T-V-T
C11	Friterie Rue de l'étoile (tram)	Urbain Moyen	3	moyen	3	3		T-V-tram-V-T
C12	Quai Fernand Demets	Urbain Moyen	3	moyen à fluide	2	3		T-S-V-T
C13	Chaussée de la Hulpe (Hyppodrome)	Urbain Moyen	3	ralenti	5	4	Asphalte	T-V-T
D3	Quai de Bistebroeck	Urbain Faible	2	fluide	1	1	Asphalte	T-V
X1	Rue de la Pede (près des champs)	Urbain très Faible	1	fluide	1	1	Asphalte	V
X2	Boulevard Simonet (pompe)	Urbain très Fort	5	fluide	1	10	Asphalte	V-I-V
X3	carrefour Aubade/Mettewie	Urbain Fort	4	fluide	1	5	Asphalte	T-V-I-V-T
X5	Boulevard Paepsem	Urbain Fort	4	moyen à fluide	2	6	Asphalte	T-V-I-V-T
X6	Chaussée de Ninove (tram)	Urbain Moyen	3	fluide	1	2	Asphalte	T-S-V-tram-V-S-T
X7	rue de Neerpede	Urbain Faible	2	fluide	1	1	Asphalte	T-V-S-T
P2	toit	Urbain moyen	3	Fluide à moyen	2	3	toiture en tuile gouttière en zinc	
P3	toit	Urbain moyen	3	fluide	1	2	toiture en tuile gouttière en zinc	
P7	toit	Urbain Fort	4	fluide	1	5	tuiles et toiture verte	
P8	toit	Urbain moyen	3	fluide à moyen	2	3	tuiles + roofing plastique	
T1	train rue Colombophile	Urbain Faible	2	fluide	1	1		
T2	tram parking Stalle	Urbain Fort	4	moyen	3	7		

Annexe 2

Tableau 30 : Liste des polluants analysés dans les eaux de ruissellement en Région de Bruxelles-Capitale

groupe méthode	substance
Analyse supplémentaire apd 2019	Fraction C-12 - C-22
	Fraction C-22 - C-30
	Huile minérale C30-C40
	Clopyralid
	Som 2,3-Dimethyl- + 3,5-Dimethylfenol
	Som 2,4-Dichloor- + 2,5-Dichloorfenol
	1,2-Dichloropropene
	1,3,5-Trichlorobenzene
	Bisphenol A
	2,3,4,5-Tetrachlorophenol
	2,3,4,6-Tetrachlorophenol
	2,3,4-Trichlorophenol
	2,3,5,6-Tetrachlorophenol
	2,3,5-Trichlorophenol
	2,3,5-Trimethylphenol
	2,3,6-Trichlorophenol
	2,3-Dichlorophenol
	2,4,5-Trichlorophenol
	2,4,6-Trichlorophenol
	2,4-Dimethylphenol
	2,5-Dimethylphenol
	2,6-Dichlorophenol
	2,6-Dimethylphenol
	2-Chlorophenol
	2-Ethylphenol
	2-Isopropylphenol
	3,4,5-Trichlorophenol
	3,4-Dichlorophenol
	3,4-Dimethylphenol
	3,5-Dichlorophenol
	3-Chlorophenol
	3-Ethylphenol
	4-Chloro-3-methylphenol
	4-Chlorophenol
	Phenol
	m-cresol
	Nonylphenol (sum of isomers)
	Onopgeloste bestanddelen
	o-Cresol
	p-Cresol
	Pentachlorophenol
	4-Chloor 3,5-Dimethylphenol
	Méthode(s) pour les pesticides acides et neutres
2,4,5-Trichloorfenoxyazijnzuur (2,4,5-T)	
2,4-Dichloorfenoxyazijnzuur (2,4-D)	
2,4-Dichloorfenoxyboterzuur (2,4-DB)	
Alachlor	
Bentazone	
Carbendazim	
Carbetamide	
Chloortoluron	
Chloridazon	
Chloroprotham	
Cyanazine	
Desethylterbutylazine	
Dicamba	
Dichlorprop	

	Ethofumesate
	Fenoprop
	Fluroxypyr
	Hexazinone
	Isoproturon
	Linuron
	MCPA
	MCPB
	Mecoprop
	Metabromuron
	Metamitron
	Metazachlor
	Methabenzthiazuron
	Metolachlor
	Metoxuron
	Monolinuron
Méthode(s) pour les hydrocarbures chlorés	MTBE
	Trichlorométhane
	Bromodichloromethane
	Dibromochloromethane
	Tribromomethane
	Prometryn
	Propachlor
	Propanil
	Sebutylazine
	Terbutryn
	1,1,1,2-Tetrachloroethane
	1,1,2,2-Tetrachloroethane
	1,1-Dichloropropane
	1,2,3-Trichlorobenzene
	1,2,3-Trichloropropane
	1,2,4-Trichlorobenzene
	1,2,4-trimethylbenzene
	1,2-Dibromo-3-chloropropane
	1,2-Dichlorobenzène
	1,2-Dichloropropane
	1,3,5-Dichlorobenzène
	1,3,5-trimethylbenzène
	1,3-Dichlorobenzene
	1,3-Dichloropropane
	1,4-Dichlorobenzene
	o,p-DDD
	o,p-DDE
	o,p-DDT
	p,p-DDD
	p,p-DDE
	p,p-DDT
	Aldrin
	alfa-Endosulfan
	α-HCH
	cis-Heptachloorepoxide
	β-HCH
	Bromochloromethane
	Butylbenzene
	cis-1,3-Dichloropropene
	Delta HCH
	Dibromomethane
	- Sum Dichloropropane
	Dieldrin
	Endrin
	Lindaan
	Heptachlor
	Isodrin

	Monochlorobenzene
	2-Chlorotoluene
	PAH's up to 16
	4-Chlorotoluene
	n-Propylbenzene
	sec-Butylbenzene
	Telodrine
	tert-Butylbenzene
	trans-1,3-Dichloropropene
	trans-Heptachloorepoxide
	- Sum Trichlorobenzene
	1,2-Dibromoethane
	Bromobenzene
	ETBE
	p-Isopropyltoluene
	Hexachlorobutadiene
Composes aromatiques volatils	Benzène
	Toluène
	Ethylbenzène
	Cumène
	o-Xylène
	m,p-Xylène
	Xylènes (somme)
	Styrène
	BTEX (somme)
Composes chlorés volatils	Dichlorométhane
	Tetrachlorométhane
	Trichloroéthène
	Tetrachloroéthène
	1,1-Dichlororéthane
	1,2-Dichlororéthane
	1,1,1-Trichlororéthane
	1,1,2-Trichlororéthane
	cis 1,2-Dichloroéthène
	trans 1,2-Dichloroéthène
	1,2-Dichloroéthènes (somme)
	Vinylchloride
	1,1-Dichloroéthène
Méthode(s) pour l'ammonium	Ammonium same as N
Méthode(s) pour la physico-chimie	pH
	Température pH-meting
	Ec at 25°C after automatic temperature correction
	Température EC meting
	BZV-5
	CZV
	Total suspended solids
Méthode(s) pour le mercure dissous	Mercure (Hg) dissous
	Mercure (Hg) total
Méthode(s) pour les bilan ioniques	Calcium (Ca) dissous
	Sodium (Na)
	Chloraat
	Chloride same as Cl
	Nitrate same as N
	Nitrite same as N
	Sulphate same as SO4
Méthode(s) pour les HAP	Naftalène
	Naftalène
	Acenaphtylène
	Acenaphtène
	Fluorène
	Phénanthrène
	Antracène
	Fluoranthène

	Pyrène
	Benzo(a)anthracène
	Chrysène
	Benzo(b)fluoranthène
	Benzo(k)fluoranthène
	Benzo(a)pyrène
	Dibenzo(a,h)anthracène
	Benzo(ghi)perylène
	Indeno(123-cd)pyrène
Méthode(s) pour les huiles minérales	Huile minérale C10-C12
	Fraction C-12 - C-16
	Fraction C-16 - C-20
	Fraction C-20 - C-24
	Fraction C-24 - C-28
	Fraction C-28 - C-32
	Fraction C-32 - C-36
	Fraction C-36 - C-40
	Total C-10 - C-40
Méthode(s) pour les métaux dissous	Arsenic (As) dissous
	Cadmium (Cd) dissous
	Chrome (Cr) dissous
	Cuivre (Cu) dissous
	Nickel (Ni) dissous
	Plomb (Pb) dissous
	Zinc (Zn) dissous
	Aluminium (Al) dissous
	Fer (Fe) dissous
Méthode(s) pour les métaux totaux	Arsenic (As) total
	Cadmium (Cd) total
	Chrome (Cr) total
	Cuivre (Cu) total
	Nickel (Ni) total
	Plomb (Pb) total
	Zinc (Zn) total
	Aluminium (Al) total
	Fer (Fe) total
Méthode(s) pour les pesticides acides et neutres	Atrazine
	BAM (2,6-dichlorobenzamide)
	Bromacil
	Desethylatrazine
	Desisopropylatrazine
	Diuron
	AMPA
	Glyphosate
	Pentachloorfenol
	Propazine
	Simazine
	Terbutylazine
	cis-Chloordaan
	trans-Chloordaan
Méthode(s) pour les phosphates	Fosfor als P
	ortho-phosphate same as P

Annexe 3 : Données Weiss

A.3.1. Description de l’outil WEISS

Le système WEISS « Water Emission Inventory Support System » a été développé par le VITO et la VMM (Vlaamse Milieumaatschappij). C’est un outil qui permet de déterminer les sources de polluants des eaux de surface. L’outil quantifie les émissions brutes en polluants à la source, puis modélise les cheminements (ruissellement, égouttage, STEP...) vers les eaux de surface. L’outil produit pour chaque polluant une carte des émissions brutes et une carte des émissions nettes. Les émissions nettes sont la fraction des émissions qui va effectivement atteindre les eaux de surface (Bruxelles Environnement, 2017).

Le VITO a réalisé pour Bruxelles Environnement un inventaire des émissions de polluants vers les eaux de surface pour la RBC (VITO,2014). Celui-ci concerne 86 polluants notamment l’azote, le phosphore, les métaux, les pesticides, les BETX, les huiles minérales. 20 sources de polluants ont été quantifiées. Elles sont listées dans le Tableau 31. Les polluants quantifiés pour chaque source sont également indiqués. Les différentes sources sont spatialisées et les émissions brutes sont quantifiées par mailles de 50mx50m pour l’ensemble de la RBC (Bruxelles Environnement, 2017).

Les émissions diffuses peuvent rarement être mesurées directement et sont généralement estimées sur base de variables explicatives comme le nombre d’habitants, le nombre de kilomètres de voies ferrées, le type de bâtiments, la présence de zone de culture,...) (Bruxelles Environnement, 2017).

Toutes les émissions brutes ne vont a priori pas atteindre les eaux de surface via les eaux de ruissellement. Il semble que certaines sources ne concernent pas les eaux de ruissellement comme les eaux usées, les émissions qui concernent les bateaux et sédiments contaminés.

Tableau 31: Sources de polluants vers les eaux de surface et mise en évidence de celles ayant un impact sur les eaux de ruissellement (d’après VITO, 2014)

Données NL	Données FR	Impact Sur les eaux de ruissellement	Polluants
Afvalwater van Huishoudens	Eaux usées des ménages	non	
Afvalwater van bedrijven - Industrie	Eaux usées des entreprises - Industrie	non	
Afvalwater van bedrijven – Handel & Diensten	Eaux usées des entreprises - Commerce et services	non	
Gebouwen – Corrosie van metaal	Bâtiments - Corrosion du métal	oui	Métaux (Cu, Pb, Zn)
Gebouwen – Corrosie van roestvrij staal	Bâtiments - Corrosion de l’acier inoxydable	oui	Métaux (Ni, Cr)
Wegverkeer - Bandenslijtage	Circulation routière - Usure des pneus	oui	Métaux et HAP
Wegverkeer - Remslijtage	Circulation routière - Usure des freins	oui	Métaux (Cd, Cu, Ni, Pb, Sb, Zn)
Wegverkeer – Lekkage van Motorolie	Circulation routière - Fuite d’huile moteur	oui	Métaux, HAP, huiles minérales
Wegverkeer – Wegdekslijtage	Circulation routière - Usure du revêtement routier	oui	Métaux et HAP
Spoorverkeer – Bovenleiding en Sleepstukken	Trafic ferroviaire - Caténaire et pièces de contact	oui	Métaux (Cu, Pb)

Spoorverkeer – Verlies van Smeerolie	Trafic ferroviaire - Perte d'huile de graissage	oui	HAP, huiles minérales
Spoorverkeer – Schroefasvet & Bilgewater	Graisse et eau de cale des bateaux	non	
Scheepvaart – Coating	Revêtement utilisés sur les bateaux	non	
Scheepvaart – Anodes	Corrosion des anodes sacrificielles des navires	non	
Scheepvaart – Huishoudelijk afvalwater	Eaux usées ménagères bateaux de navigation	non	
Bestrijdingsmiddelen - Landbouw	Pesticides - Agriculture	oui	Bentazon, chlorpyrifos, diflufenican, flufenacet, fluoxypyr, glyphosate, isoproturon et MCPA
Bestrijdingsmiddelen – niet landbouwkundig gebruik	Pesticides - usage non agricole	oui	2,4-D, Clopyralid, Diflufenican, Flufenacet, Glyphosate, MCPA et Triclopyr
Landbouw bodemverbeteringsmiddelen	Amendements pour sols utilisés en agriculture	oui	N, P, métaux
Atmosferische depositie	Dépôt atmosphérique	oui	Métaux, N, HAP, BTEX
Verontreinigde waterbodems	Sédiments contaminés	non	

A.3.2. Comparaison des données WEISS et les données récoltées sur les eaux de ruissellement à Bruxelles

Les données brutes calculées par l'outil WEISS vont être comparées aux données mesurées dans les eaux de ruissellement en RBC. La comparaison ne pourra pas être réalisée de manière totalement quantitative parce que les émissions brutes sont calculées par WEISS pour des mailles de 50mx50m en g/m²/an tandis que pour les polluants mesurés dans les eaux de ruissellement il s'agit de concentration (µg/L).

La comparaison sera réalisée pour certains polluants : Cu, Zn, acénaphthylène, pyrène et glyphosate. Les 10 principales sources d'émissions vers les eaux de surfaces seront d'abord listées puis des cartes des émissions brutes estimées par WEISS et des concentrations mesurées dans les eaux de ruissellement seront présentées.

A.3.2.1. Cuivre

Les principales sources de Cu total pour les eaux de surface sont, d'après WEISS, les eaux usées des ménages et les infrastructures ferroviaires (caténares des trams, trains, métros) (Tableau 32). Les eaux usées des ménages ne concernent a priori pas les eaux de ruissellement, il est donc attendu que la principale source de Cu dans les eaux de ruissellement vienne des caténares.

A la Figure 25, est représentée la carte des concentrations maximales mesurées en Cu total dans les eaux de ruissellement en RBC et émissions brutes calculées par l'outil WEISS pour les caténares. Il est possible de constater que la majorité des sites d'échantillonnage ne sont pas situés à proximité immédiate de lignes de trams ou de trains et que les concentrations maximales en Cu totale ne sont pas forcément retrouvées à proximité des lignes. Par contre les box-plots, la matrice de corrélation et les analyses multivariées ont plutôt mis en évidence une influence du trafic routier sur la concentration en Cu total dans les eaux de

ruissellement. Le trafic routier qui ne ressort pas dans les principales sources de Cu de l’outil WEISS pour les eaux de surface en RBC.

Tableau 32: 10 principales sources de Cu pour les eaux de surface calculée par l’outil WEISS

Substance	Zone	Source	Emission	
Cu	Total	huishoudelijk afvalwater - overige	1.084.219,7931	
Cu	Total	Slijtage bovenleidingen trams	1.047.659,1580	
Cu	Total	Slijtage bovenleidingen treinen	420.353,1712	
Cu	Total	Slijtage bovenleidingen metro	215.300,3802	
Cu	Total	Slijtage koolsleepstukken trams	195.458,8599	
Cu	Total	laboratoria - puntbron	64.380,0629	
Cu	Total	Slijtage koolsleepstukken treinen	60.744,6815	
Cu	Total	handel - bijschatting	55.237,3368	
Cu	Total	eet- en drinkgelegenheden - bijschatting	49.047,6749	
Cu	Total	verschaffen van accommodatie - bijschatting	47.430,8447	
Cu	Total	Remainder	534.838,7655	

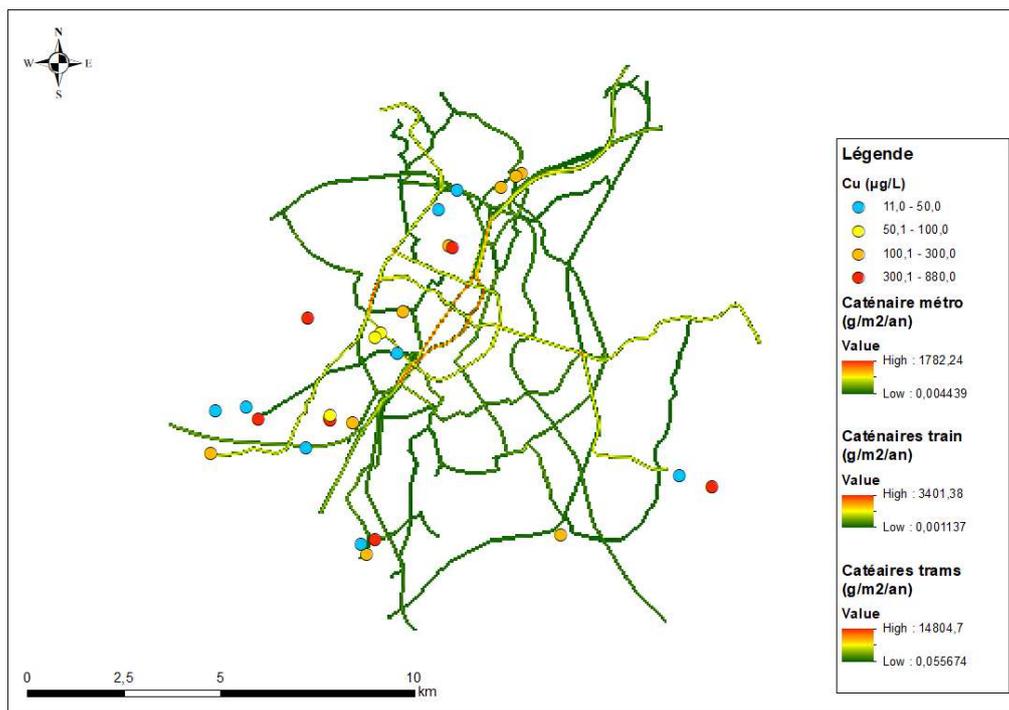


Figure 25: Carte des concentrations maximales mesurées en Cu total dans les eaux de ruissellement en RBC et émissions brutes calculées par l’outil WEISS pour les caténaires

A.3.2.2. Zinc

Les principales sources de Zn total dans les eaux de surface calculée par l’outil WEISS sont présentées dans le Tableau 33. Il s’agit principalement de l’érosion du revêtement des bâtiments (appartement, industriel,

maison mitoyenne et commerce), usure des pneus (routes régionales et communales), les eaux usées, et la corrosion des gouttières des maisons mitoyennes. A part les eaux usées, toutes les autres sources sont susceptibles de concerner les eaux de ruissellement.

A la Figure 26, Figure 27 et Figure 28, des cartes des concentrations maximales mesurées en Zn total dans les eaux de ruissellement en RBC sont présentées. Les émissions brutes calculées par l'outil WEISS sont également représentées, pour l'érosion des bâtiments type appartement (Figure 26), pour l'érosion des bâtiment industriel (Figure 27), pour l'usure des pneus sur les routes régionales (Figure 28) . Sur base de ces cartes, il est difficile d'identifier de quel type de bâtiment provient zinc. Tout n'est sans doute pas lié aux bâtiment à appartements. Certains sites d'échantillonnage sont plutôt localisés dans des zones industrielles. D'après les données mesurées dans les eaux de ruissellement en RBC, les concentrations en Zn les plus importantes sont mesurées dans les eaux provenant des toitures. Certaines possédant des gouttière et zinc et d'autres non. D'après les données mesurées en RBC, les bâtiments représentent donc probablement un apport important en Zn.

Certains sites d'échantillonnage ne sont pourtant pas situés à proximité de bâtiments, c'est notamment le cas des autoroutes. Les box-plots et la matrice de corrélation ont d'ailleurs mis en évidence une corrélation entre le trafic routier et la concentration en Zn total.

Les données mesurées dans les eaux de ruissellement en RBC semblent bien correspondre aux estimations de l'outil Weiss, les principales sources en Zn dans les eaux de ruissellement semblent être la corrosion des bâtiments et l'usure des pneus.

Tableau 33 : 10 principales sources de Zn pour les eaux de surface calculée par l'outil WEISS

Substance	Zone	Source	Emission	
Zn	Total	corrosie schil appartementsgebouwen	3.049.138,3355	
Zn	Total	corrosie schil industriële gebouwen	1.945.386,7756	
Zn	Total	corrossie schil gesloten bebouwing	808.919,7873	
Zn	Total	corrosie schil handelshuizen	556.090,8830	
Zn	Total	bandenslijtage gewestweg personenwagen	487.736,0141	
Zn	Total	laboratoria - puntbron	398.544,9824	
Zn	Total	huishoudelijk afvalwater - overige	366.912,8820	
Zn	Total	corrosie leidingen gesloten bebouwing	279.662,0225	
Zn	Total	bandenslijtage gemeenteweg personenwagen	258.551,1322	
Zn	Total	wasserijen - puntbron	236.535,9456	
Zn	Total	Remainder	1.314.895,5471	

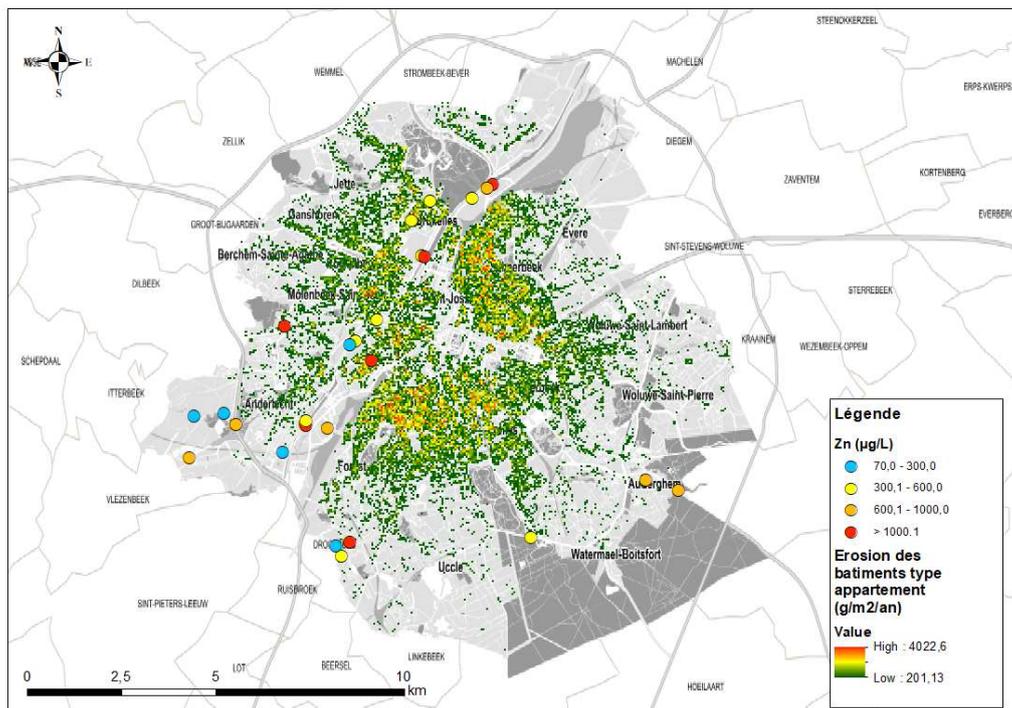


Figure 26 : Carte des concentrations maximales mesurées en Zn total dans les eaux de ruissellement en RBC et émissions brutes calculées par l'outil WEISS pour l'érosion des bâtiments type appartement

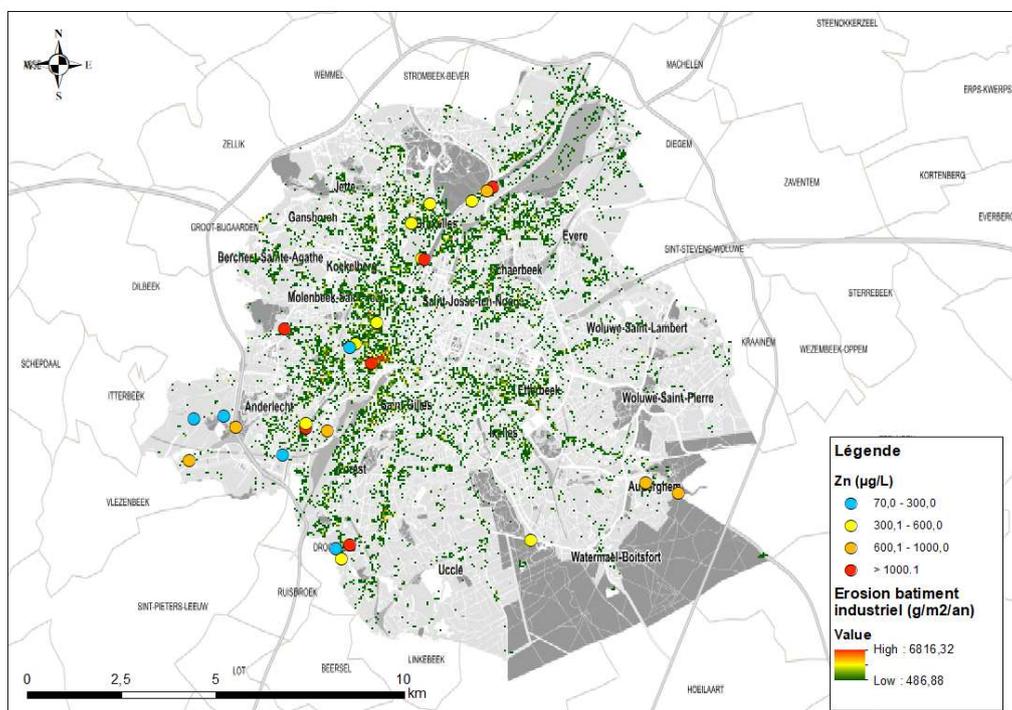


Figure 27 : Carte des concentrations maximales mesurées en Zn total dans les eaux de ruissellement en RBC et émissions brutes calculées par l'outil WEISS pour l'érosion des bâtiments industriels

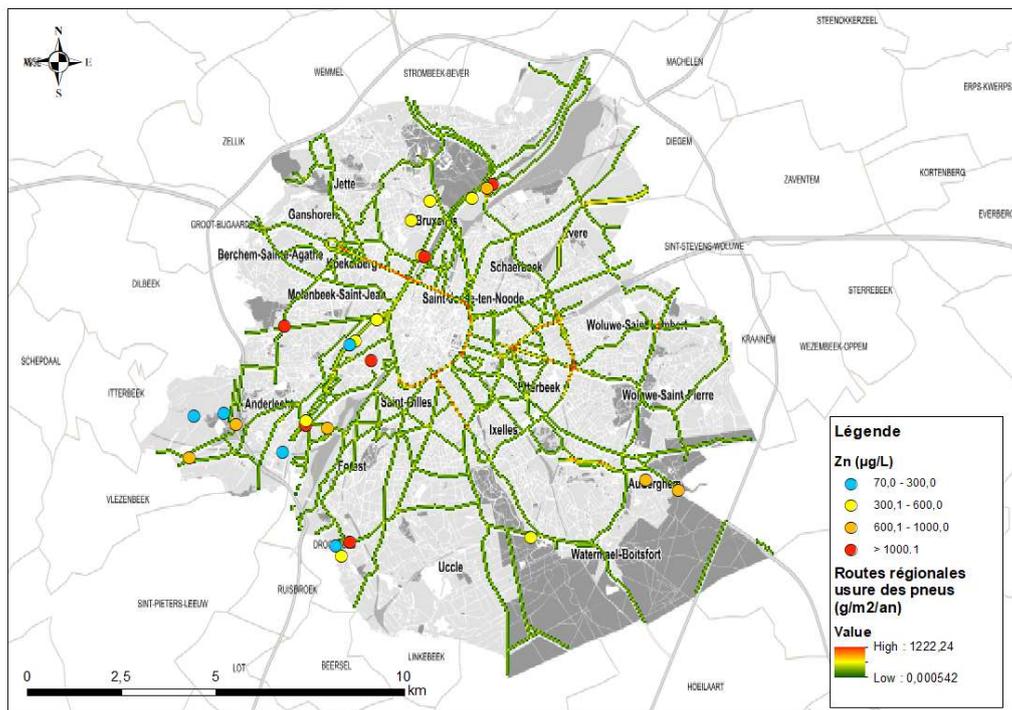


Figure 28: Carte des concentrations maximales mesurées en Zn total dans les eaux de ruissellement en RBC et émissions brutes calculées par l'outil WEISS pour l'usage des pneus sur les routes régionales

A.3.2.3. Acénaphthylène

Dans le Tableau 34, sont présentées les 10 sources principales d'acénaphthylène pour les eaux de surface calculée par l'outil WEISS. Les deux sources les plus importantes sont : le graissage des aiguillages et les eaux usées des ménages. Viennent ensuite des sources liées au trafic routier : l'usure du revêtement de la route et l'usure des pneus.

A la Figure 29 et à la Figure 30, des cartes des concentrations maximales mesurées en acénaphthylène dans les eaux de ruissellement en RBC sont présentées. Les émissions brutes calculées par l'outil WEISS sont également représentées, pour l'usure du revêtement routier sur les routes régionales (Figure 29) et pour le graissage des aiguillages du chemin de fer (Figure 30).

L'acénaphthylène n'est pas toujours quantifié dans les eaux de ruissellement en RBC, il est quantifié dans moins de 50% des sites et il n'est pas quantifié dans les sites d'échantillonnage ferroviaires. Sur la Figure 31, il est possible de constater qu'aucun site d'échantillonnage n'est situé à proximité de zones d'aiguillages. Il est donc probable que l'acénaphthylène présent dans les eaux de ruissellement qui ont été échantillonnées provienne plutôt du trafic routier (usure des pneus ou du revêtement).

Tableau 34 : 10 principales sources d'acénaphthylène pour les eaux de surface calculée par l'outil WEISS

Acenaftyl	Total	Smeerolie treinen wissels	2.257,2662	
Acenaftyl	Total	huishoudelijk afvalwater - overige	2.166,9155	
Acenaftyl	Total	wegdekslijtage gewestweg personenwagen	398,1835	
Acenaftyl	Total	bandenslijtage gewestweg personenwagen	230,3776	
Acenaftyl	Total	wegdekslijtage gemeenteweg personenwagen	202,7076	
Acenaftyl	Total	bandenslijtage gemeenteweg personenwagen	117,2808	
Acenaftyl	Total	handel - bijschatting	114,0478	
Acenaftyl	Total	eet- en drinkgelegenheden - bijschatting	101,7268	
Acenaftyl	Total	verschaffen van accommodatie - bijschatting	96,2612	
Acenaftyl	Total	andere diensten - puntbron	94,2613	
Acenaftyl	Total	Remainder	896,7088	

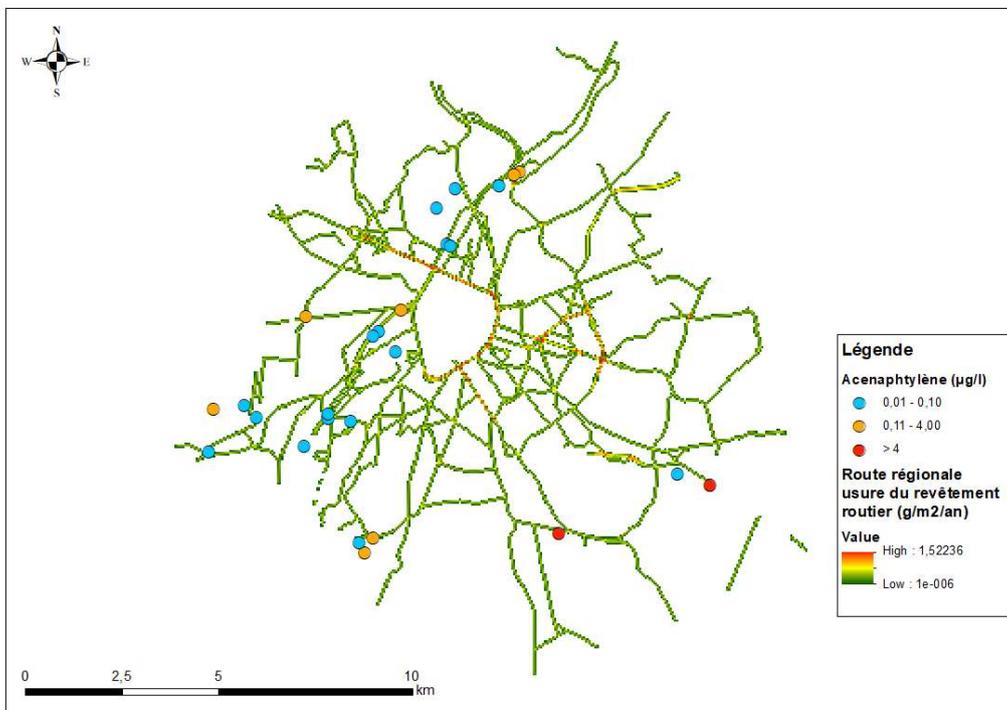


Figure 29 : Carte des concentrations maximales mesurées en acénaphthylène dans les eaux de ruissellement en RBC et émissions brutes calculées par l'outil WEISS l'usure du revêtement routier sur les routes régionales

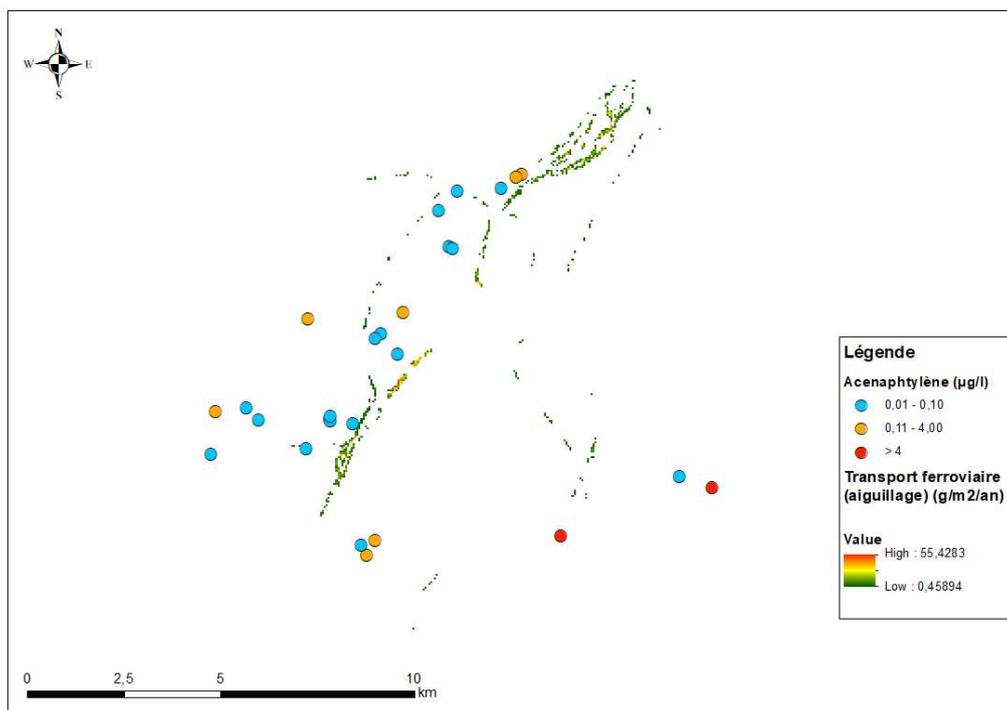


Figure 30 : Carte des concentrations maximales mesurées en acénaphtylène dans les eaux de ruissellement en RBC et émissions brutes calculées par l'outil WEISS pour le transport ferroviaire aiguillage

A.3.2.4. Pyrène

Les principales sources de pyrène pour les eaux de surface sont d'après l'outil WEISS le dépôt atmosphérique, les eaux usées des ménages, l'usure des pneus, l'usure du revêtement routier, le graissage des aiguillage et la perte d'huile des voitures sur les routes (Tableau 35).

A la Figure 31 et la Figure 32, des cartes des concentrations maximales mesurées en pyrène dans les eaux de ruissellement en RBC sont présentées. Les émissions brutes calculées par l'outil WEISS sont également représentées, pour le dépôt atmosphérique (Figure 31) et pour l'usure des pneus sur les routes régionales (Figure 32).

Pour évaluer l'apport des dépôts atmosphériques, les données de stations de mesures de qualité de l'air de 6 stations ont été utilisées. Le calcul des émissions pour une année a été fait en multipliant les concentrations mesurées par le taux de dépôt de chaque substance (VITO, 2014). Il a ensuite été interpolé (interpolation linéaire TIN) pour l'ensemble de la région.

Pour la plupart des sites d'échantillonnage d'eau de ruissellement, le pyrène est quantifié et il dépasse les normes ESU (0,04 µg/L). La répartition des concentrations mesurées en pyrène est plutôt hétérogène et il n'est pas vraiment possible de faire ressortir des zones avec des concentrations semblables. En regardant les émissions estimées par l'outil WEISS, il est possible de constater que l'interpolation réalisée est probablement assez imprécise. De plus, les émissions sont calculées à l'année, alors qu'elles sont très fluctuantes au quotidien. Il est donc difficile de comparer des concentrations mesurées ponctuellement à une estimation des émissions annuelles.

En regardant les données des eaux de ruissellement en RBC, le pyrène n'est pas retrouvé sur les toitures, ni sur les sites ferroviaires, par contre il semble que le trafic routier ait une influence sur les concentrations en pyrène.

Tableau 35 : 10 principales sources de pyrène pour les eaux de surface calculée par l'outil WEISS

Substance	Zone	Source	Emission	
Pyr	Total	atmosferische depositie land	3.388,9644	
Pyr	Total	huishoudelijk afvalwater - overige	2.860,7282	
Pyr	Total	bandenslijtage gewestweg personenwagen	1.047,5840	
Pyr	Total	bandenslijtage gemeenteweg personenwagen	534,7178	
Pyr	Total	wegdekslijtage gewestweg personenwagen	407,3937	
Pyr	Total	Smeerolie treinen wissels	340,6709	
Pyr	Total	bandenslijtage gewestweg lichte vrachtwagen	296,6505	
Pyr	Total	lekkage motorolie gewestweg personenwagen	257,5310	
Pyr	Total	bandenslijtage gewestweg vrachtwagen	209,6124	
Pyr	Total	wegdekslijtage gemeenteweg personenwagen	207,9460	
Pyr	Total	Remainder	1.897,4935	

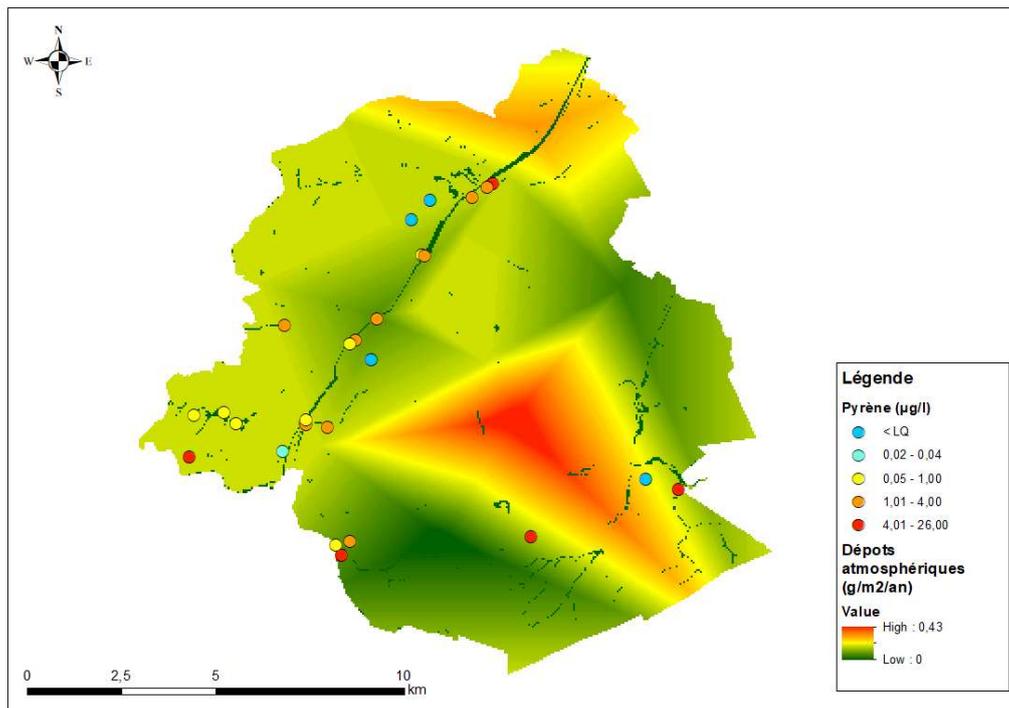


Figure 31 : Carte des concentrations maximales mesurées en pyrène dans les eaux de ruissellement en RBC et émissions brutes calculées par l'outil WEISS pour les dépôts atmosphériques

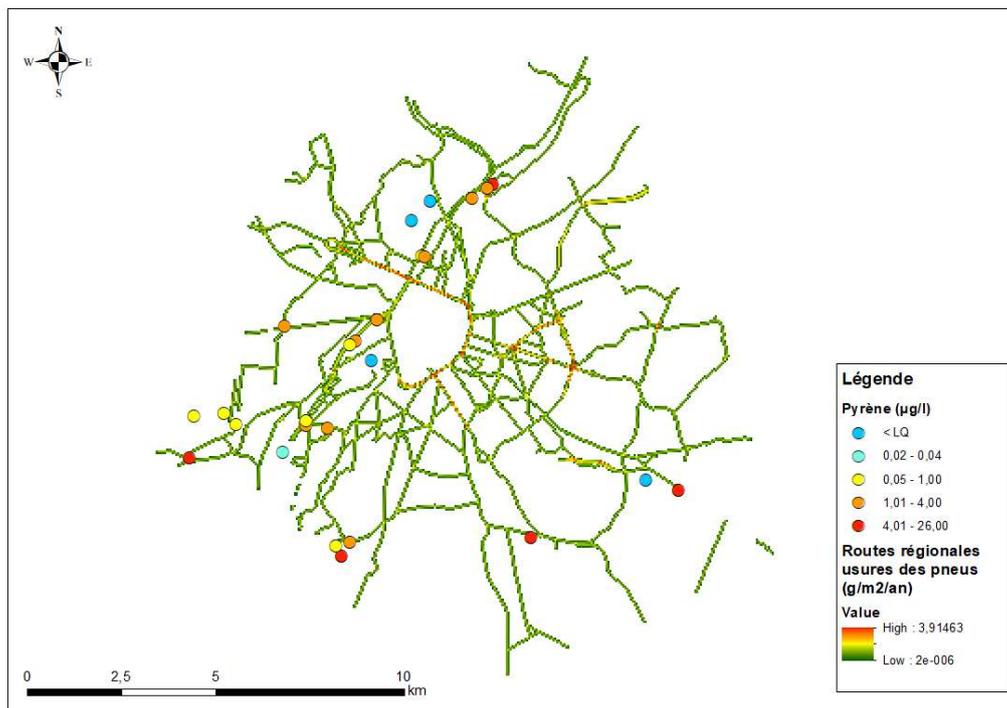


Figure 32: Carte des concentrations maximales mesurées en pyrène dans les eaux de ruissellement en RBC et émissions brutes calculées par l'outil WEISS l'usure des pneus sur les routes régionales

A.3.2.5. Glyphosate

La principale source de glyphosate pour les eaux de surface est, d'après WEISS, l'utilisation par les particuliers. Il y a également l'utilisation sur les sites ferroviaires et l'utilisation par les communes et de manière très restreinte l'utilisation de pesticides dans les zones agricoles (Tableau 36).

A la Figure 33, à la Figure 34, à la Figure 35 et à la Figure 36, des cartes des concentrations maximales mesurées en glyphosate dans les eaux de ruissellement en RBC sont présentées. Les émissions brutes calculées par l'outil WEISS sont également représentées pour les utilisation des particuliers (Figure 33), les utilisations sur les sites ferroviaires (Figure 34), l'utilisation par les communes (Figure 35) et l'utilisation pour l'agriculture (Figure 36).

Sur ces figures, il est possible de constater que les zones agricoles sont très limitées et que les concentrations en glyphosate ne sont pas forcément plus importantes à proximité des zones agricoles. La plupart des sites d'échantillonnage ne sont pas non plus à proximité de sites ferroviaires. Il y a aussi certains sites qui ne sont pas dans les zones identifiées par l'outil WEISS comme des zones d'émissions des particuliers, ces sites concernent majoritairement des zones industrielles. Les émissions sur ces sites peuvent être liées à une utilisation faite par des industries, des entreprises ou alors à une utilisation communale sur les voiries. Les émissions faites par les particuliers ne semblent donc pas être la seule source de glyphosate sur les sites échantillonnés.

Tableau 36 : 10 principales sources de glyphosate pour les eaux de surface calculée par l'outil WEISS

Substance	Zone	Source	Emission	
Gly	Total	bestrijdingsmiddelen particulier gebruik	60.386,8203	
Gly	Total	bestrijdingsmiddelen treinsporen	13.785,7016	
Gly	Total	bestrijdingsmiddelen gemeenten	3.992,7913	
Gly	Total	bestrijdingsmiddelen graanteelt	10,9489	
Gly	Total	bestrijdingsmiddelen weides en grasland	8,4782	
Gly	Total	bestrijdingsmiddelen aardappelteelt	2,2982	
Gly	Total	bestrijdingsmiddelen maisteelt	1,6823	
Gly	Total	bestrijdingsmiddelen bietenteelt	0,2664	

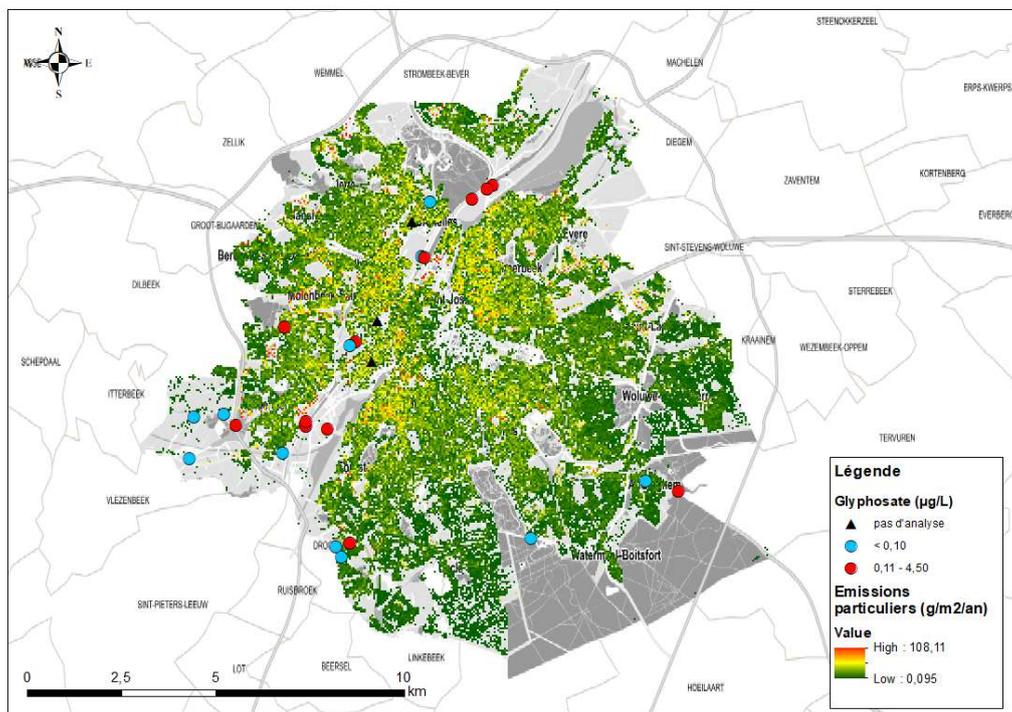


Figure 33 : Carte des concentrations maximales mesurées en glyphosate dans les eaux de ruissellement en RBC et émissions brutes calculées par l'outil WEISS pour les particuliers

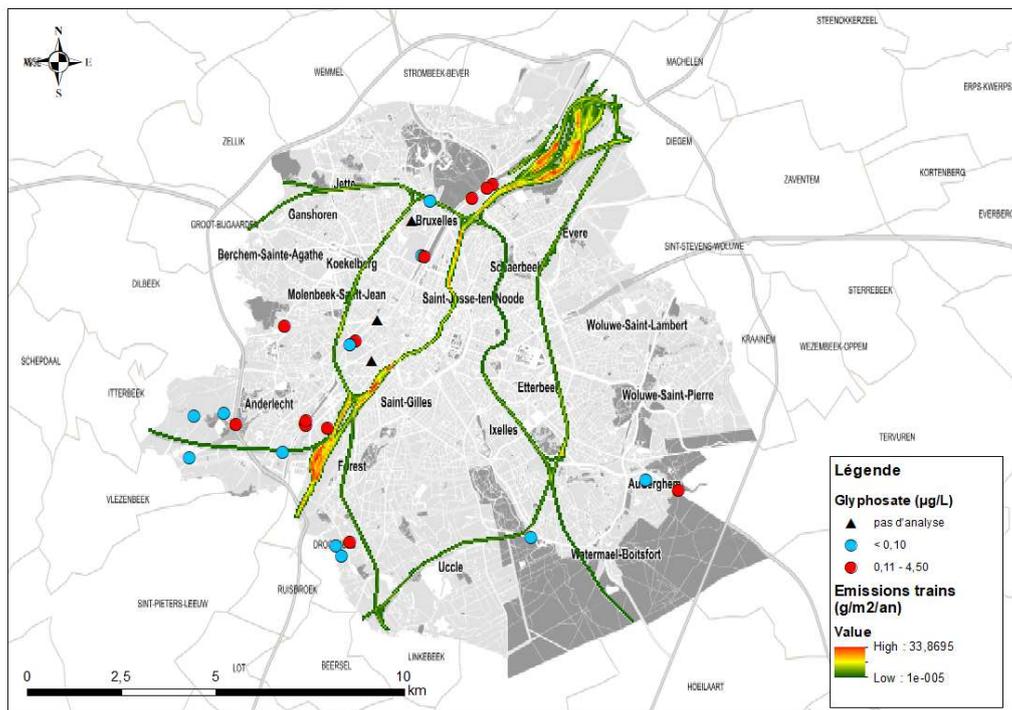


Figure 34: Carte des concentrations maximales mesurées en glyphosate dans les eaux de ruissellement en RBC et émissions brutes calculées par l'outil WEISS pour sites ferroviaires

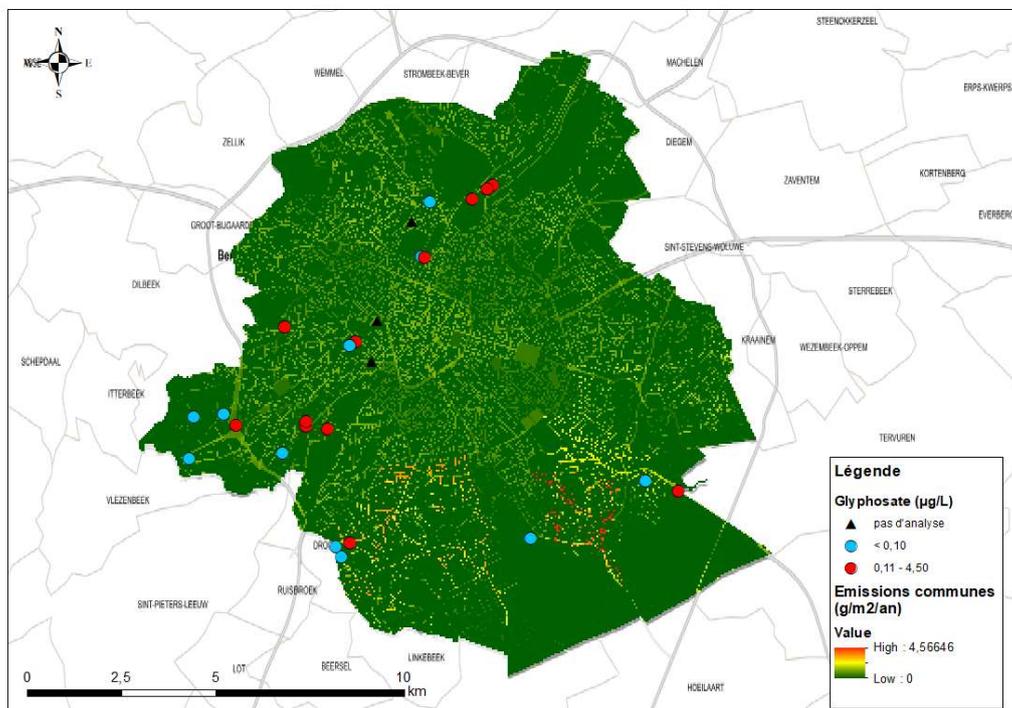


Figure 35 : Carte des concentrations maximales mesurées en glyphosate dans les eaux de ruissellement en RBC et émissions brutes calculées par l'outil WEISS pour les communes

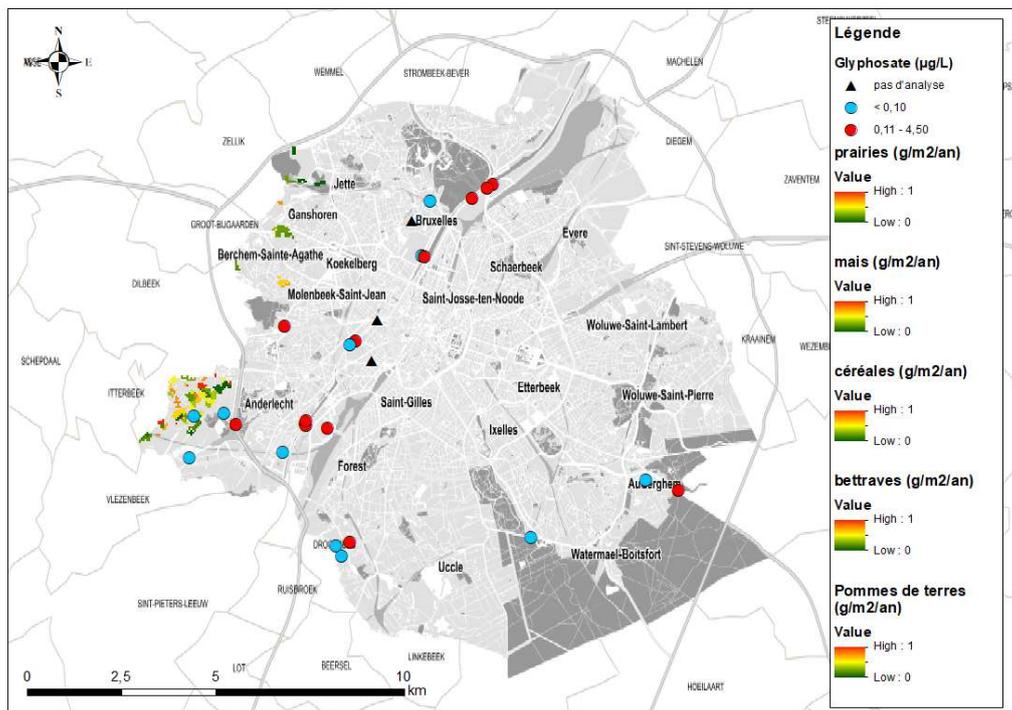


Figure 36: Carte des concentrations maximales mesurées en glyphosate dans les eaux de ruissellement en RBC et émissions brutes calculées par l'outil WEISS pour les zones agricoles

A.3.3. Conclusion

Les exemples ci-dessus ont mis en évidence que pour certaines substances comme le Zn, les principales sources estimées par WEISS semblent correspondre à ce qui est mesuré dans les eaux de ruissellement. Par contre, pour d'autres substances comme le Cu ce n'est pas le cas.

Les comparaisons effectuées ci-dessus sont à prendre avec des pincettes. Les données issues de l'outil WEISS concernent une estimation des émissions brutes des polluants. Il s'agit d'une estimation annuelle pour l'ensemble de la RBC avec des mailles de 50mx50m en g/m2/an. Concernant les données mesurées il s'agit de concentrations en polluants dans les eaux de ruissellement analysées ponctuellement. De plus, les concentrations mesurées dans les eaux de ruissellement pour un même site peuvent être très variables et ne dépendent pas uniquement de l'occupation de sol mais aussi des caractéristiques de l'événement pluvieux, des conditions hivernales et d'éventuelles pollution ponctuelle. Pour l'exemple du Cu, même si les principales sources estimées par WEISS ne semblent pas correspondre à ce qui est mesuré dans les eaux de ruissellement cela n'invalide pas pour autant les données de WEISS parce que les données ne sont quantitativement pas comparables.

Même si les données de WEISS sont difficiles à comparer à ce qui est mesuré dans les eaux de ruissellement, elles ont par contre inspirées différentes variables explicatives de la minéralisation des eaux de ruissellement en RBC : la variable trafic, la variable zone industrielle, la variable surface des bâtiments, la densité de population par quartier.

Annexe 4 : Ressources consultées dans le cadre de la recherche bibliographique

Auteurs	Nb d'év/ période/ nb site	Contexte	Paramètres analysés
Angrill et al, 2016	25 évènements pluvieux de juin 2011 à avril 2013 (22 mois) sur 1 site à Barcelone (échantillons collectés sur 7 types de surface différentes)	<p>Barcelone (Espagne)</p> <p>Etude qui évalue la quantité et la qualité des eaux de ruissellements sur un campus universitaire sur 7 types de surfaces différentes (zone piétonne, route, parking) et de matériaux différents (asphalte, béton et pavé en béton préfabriqué).</p> <p>Cette étude montre que les concentrations en polluants dépendent de la rugosité des matériaux considérés (par exemple, concentrations sur béton plus faibles car moins de piègeages) et de leur état de dégradation. Pas de grandes différences entre les zones pédestres et de routes sauf pour le zinc... Attention que l'on est dans une zone supposée à faible trafic. Les pathogènes sont retrouvés dans toutes les surfaces</p>	<ul style="list-style-type: none"> • pH, CE, • MES, • EM (Cl, HCO₃, SO₄), • P, N (NO₂, NO₃, NH₄), • COD, TOC, • Métaux (Cr, Ni, Cu, Hg, Cd, Pb, As, Fe, Zn), • Pseudomonas aeruginosa, Clostridium perfringens, Enterococcus. <p>Résultats fournis sous forme de boxplots ou valeurs chiffrées dans le supplementary material associé.</p>
Aryal et al, 2010	Document state of art mentionnant plusieurs études.	<p>Lieu d'investigation dépend de l'article cité.</p> <p>Plutôt un state of art parlant des différents polluants rencontrés tout en mentionnant les résultats de différentes études. Les paramètres cités varient en fonction de l'étude</p> <p>L'origine potentielle des polluants est étudiée</p> <p>Les polluants étudiés sont les particules en suspension, les métaux lourds, les hydrocarbures et PAHs, les nutriments. Ils mentionnent également les différences entre les concentrations totales et particulières.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Nutriments, • Métaux, • HAP. <p>Pas de résultats bruts</p>

		Tableau intéressant avec la source d'émission pour chacun des métaux lourds et des PAHs ainsi que structure chimique des 16 PAH.	
Beysens et al, 2017	1 site, 34 év de rosée et 77 év de pluie, 1 an de suivi (2011-2012)	Centre de Paris, Mesure des concentrations en éléments majeurs et quelques mineurs d'eau de pluie et d'eau de rosée	<ul style="list-style-type: none"> • pH, CE, • EM, • Br, F, • N (NO₂, NO₃), • Métaux (Fe, Cu, Cd, Mn, Pb, Zn).
Boogaard et al 2006	13-17 échantillons, mesure entre 1999 et 2005	Pays-Bas, lotissement Ruwenbos, commune de Enschede Echantillons d'eau de pluie avant le ruissellement puis après ruissèlement (toiture et voirie) Concentrations en métaux plus importantes après ruissellement, pas clair pour HAP	<ul style="list-style-type: none"> • Métaux (Cd, Cu, Hg, Pb, Ni, Zn), • HAP (anthracène, benzo(a)pyrene), huiles minérales.
Brown et al, 2005	7 évènements pluvieux sur 2 ans (1998 à 2000) sur 1 bassin versant + 1 évènement pluvieux le 28 mars 2001 sur 1 autre bassin versant	Nouvelle Zélande, Dunedin 2 bassins versants étudiés : <ul style="list-style-type: none"> - Portobello (486 ha), 100% urbain (55% mixed residential, 30% commercial, 15% industriel). 13 échantillons en baseflow et 58 échantillons en stormflow - Leith (4 555 ha), 83% rural et 17% urbain. 6 échantillons en baseflow et 6 échantillons en stormflow. Comparaison des concentrations en métaux et HAP dans deux bassins versants (un rural et un urbain) par rapport aux concentrations dans différents débris de route (poussière, sédiments, etc...) pour identifier sources de contamination. Concentrations systématiquement supérieures dans la zone urbaine	<ul style="list-style-type: none"> • Métaux (Pb, Zn, Cu), • HAP (Somme de 16).
Camponelli et al 2010	1 site/ 12 év (plusieurs échantillons au cours de	Etats Unis Echantillons provenant d'un bassin d'orage récoltant de l'eau d'une route avec un trafic journalier de plus de 45 000 voitures.	<ul style="list-style-type: none"> • pH, CE, • MES, • Métaux (Cu, Zn).

	l'évènement) pluvieux, 1 an de suivi 2005-2006		
Chen et al, 2016	17 évènements pluvieux d'avril à Août 2011	Shanghai, China Le but de cette étude est de mesurer la qualité d'eaux de ruissellement d'une autoroute à Shanghai en Chine et d'appliquer différents tests de biotoxicité.	<ul style="list-style-type: none"> • MES, • Ptotal, Ntotal, • COD, TOC, • Métaux (Zn, Cu, Al). Valeurs As, Se, Pb, Ni, Fe, Mn, Cr faibles et pas mentionnées ; • HAP.
Chocat et al, 2007	Synthèse de données	Données européennes et nord-américaines Concentrations en différents paramètres dans les rejets urbains par temps de pluie (distinction des origines résidentielle+ commerciale et autoroutes) Comparaison avec des données de réseau pluvial unitaire mélangeant eaux de ruissellement et eaux usées.	<ul style="list-style-type: none"> • pH, CE • MES • DBO, DCO • P, N (total, NH4) • Métaux (Pb, Zn, Cu, Cd) • Hydrocarbures totaux, HAP • Glyphosates, diuron
Dallman & Spongberg, 2012	6 sites étudiés sur une période de 6 ans	Los Angeles et alentours Cette étude traite d'une campagne de monitoring sur 6 ans d'eau de ruissellement, d'eau après infiltration dans la zone vadose et dans les eaux souterraines. Le but de cette étude est d'évaluer l'impact potentiel de l'infiltration d'eau de ruissellement sur les eaux souterraines. Les résultats de cette étude indiquent qu'aucune dégradation des eaux souterraines n'est démontrée suite à l'infiltration intentionnelle d'eau de ruissellement. Les constituants étudiés sont les métaux, les nutriments (azote et phosphore), bactéries, métaux lourds, HAPs, perchlorate, ...	Pas de concentrations brutes mentionnées dans le papier
Davis et al 2001	Synthèse de données	38 échantillons d'eau de ruissellement de toitures ont été récoltés dans des zones différentes (commerciales,	<ul style="list-style-type: none"> • Métaux (Pb, Zn, Cu, Cd)

		résidentielle, institutionnelle) aux USA université de Maryland + 54 échantillons récoltés d'eau de lessivage de frein de voiture et 13 échantillons d'huile de moteur	
Falantin et al, 2019 (projet TAM)	Période d'un an à partir de janvier 2019. Etude d'échantillons sur 9 ouvrages différents (5 noues et 4 chaussées à structure réservoir)	France, départements du Nord et du Pas-De-Calais Le but est de suivre la qualité des eaux infiltrées sous 9 ouvrages de récolte d'eaux de ruissellement après infiltration et reprenant des très petites surfaces de ruissellement. 36 micropolluants à suivre : 8 ETM, 16 HAP, hydrocarbures totaux, 3 alkylphenolss et dérivé, 1 phtalate, 5 pesticides et caféine. Résultats non disponibles.	<ul style="list-style-type: none"> • 8 métaux • 16 HAP, hydrocarbures totaux, • 3 alkylphénols et dérivés, 1 phtalate • 5 pesticides et caféine. <p>Résultats non disponibles.</p>
Fardel et al, 2016	1 site étudié d'été 2016 à l'été 2018	France, Nantes Evaluation de l'efficacité de noues créées pour l'étude sur la capacité de ces dernières à réduire la charge de polluants des eaux de ruissellement après infiltration. Deux noues ont été créées.	<ul style="list-style-type: none"> • pH • MES • composés phosphorés, composés azotés • DO • métaux en trace (Zn, Pb, Cu, Cd, Fe, Ni), arsenic, • PAHs and pesticides. <p>Résultats bruts non disponibles.</p>
Flanagan et al., 2018	19 évènements pluvieux sur 3 sites étudiés de février 2016 juillet 2017	Zones industrielles de Compans dans la zone de Paris (France) 14, 15 et 18 échantillons ont été collectés respectivement pour RR, BFS et VFS (road runoff, biofiltration swale, vegetative strip). Les substances étudiées sont les matières en suspension, le carbone organique, les nutriments (ammonium, nitrite, nitrate, phosphore, phosphate), les métaux en trace, les éléments majeurs, les hydrocarbures totaux, les HAPs, le bisphenol A et alkylphenols et les phtalates.	<ul style="list-style-type: none"> • EM, • P (PO4), N (NH4, NO2, NO3) • COT • Métaux • hydrocarbures totaux, • HAPs, le bisphenol A et alkylphenols et les phtalates. <p>Pas de résultats bruts, données sous forme de graphique</p>

		<p>En résumé : Les processus de transport et de rétention affectant les micropolluants particulaires et en phase dissoute ont été évalués pour deux biofiltres d'eaux pluviales traitant les eaux de ruissellement routières sur la base des résultats d'une campagne de surveillance in situ couvrant 19 événements sur 1,5 an, combinés à des caractérisations supplémentaires des particules, du média filtrant et des matériaux de construction du biofiltre.</p> <p>La réduction des polluants dissous est moindre que les polluants en phase particulaire.</p> <p>Donnent des valeurs de Koc dans l'appendix dans les informations supplémentaires.</p> <p>Pas vraiment des valeurs de concentration mais plutôt des rapports entre concentration entre l'input et l'output des biofiltres. Voir appendix.</p>	
Gaspary et al, 2014	Etude de 3 bassins versants en France Plusieurs événements pluvieux entre 2011 et 2013	<p>Suivi de la qualité globale de la qualité des eaux de ruissellement sur 3 bassins versants en France avec des land-uses variés.</p> <p>Pas de données par types de surface de ruissellement</p> <p>Etude de la répartition entre phases dissoutes et particulaires</p>	<ul style="list-style-type: none"> • MES • COD, TOC, POC • 14 Métaux • 16 HAP • 30 pesticides • 9 PDBE • 7 alkylphénols
Gnecco et al, 2004	12 événements pluvieux en 2002 et 2003	<p>Gênes, Italie</p> <p>L'étude vise à investiguer l'occurrence et l'importance du « first flush » provenant des routes ET des toits dans un système d'égouts séparés au sein d'un bassin versant caractérisé par des sources urbaines de polluants.</p> <p>Zone résidentielle avec trafic faible</p>	<ul style="list-style-type: none"> • MES, • COD, • Métaux (Pb, Zn, Cu).

Gromaire et al, 1999	16 évènements pluvieux entre juillet 1996 et juin 1997 sur 1 site (échantillons collectés sur 4 toits, 6 rues et 3 cours	Bassin versant « Le Marais », Paris Central L'étude évalue la contamination des eaux de ruissellement de 4 toits, 6 rues et 3 cours. Pour les substances en suspension et les substances consommant de l'oxygène, on en trouve principalement dans la rue et dans les cours. Pour ce qui des hydrocarbures, on en retrouve principalement dans les rues de part le trafic associé. Enfin, en ce qui concerne les métaux lourds, on en retrouve davantage dans les toitures étant donné la dégradation des gouttières. Les routes sont considérées comme avec un trafic moyen	<ul style="list-style-type: none"> • MES, • COD, BOD, • Métaux (Pb, Zn, Cu, Cd), • Hydrocarbures.
Helmreich et al, 2010	63 ev. pluvieux sur 2 ans sur 1 site d'échantillonnage	Allemagne Route à fort trafic à Munich (57 000 véhicules/j => Autoroutes) Zone d'alimentation 400m2 (sur la route). Alentours du site : logements, immeubles de bureaux et un parc.	<ul style="list-style-type: none"> • pH, CE, • EM (Na), • Matière organique (DOC, TOC), • Métaux (Cd, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn).
Hofman-Caris et al., 2019	Données de pluie collectées entre 2006 et 2016 à 6 stations météo différentes.	Aux Pays-Bas Cette étude a fait un review de la littérature sur la qualité d'eau de pluie récupérée dans différents pays et comparé les résultats avec ce qu'ils ont analysé aux Pays-Bas. De plus, ils ont utilisé les données de leurs stations météo (au Pays-Bas) pour évaluer la quantité d'eau qu'ils peuvent effectivement récupérer dans leurs systèmes de collecte d'eau de pluie. Leur but principal étant d'évaluer les coûts d'un système décentralisé de collecte d'eau de pluie pour la distribution d'eau potable afin de voir si un tel système est viable économiquement par rapport à un système classique centralisé. Données sur la qualité de l'eau de pluie directement collectée ou après ruissellement sur des toits	<ul style="list-style-type: none"> • EM, • Nutriments, • Métaux.

		Données de qualité d'eau disponible dans le supplementary material associé au paper + review de données d'autres pays dans le même supplementary material.	
Liefting et al, 2020 (STOWA/RIONED)	Environ 1.742 échantillons sur 191 sites, mesures entre 2007 et 2020	Pays-Bas De nombreux sites répartis au Pays-Bas Pour chaque site il est précisé si l'eau de ruissellement provient de toit et ou de route et si c'est dans une zone résidentielle,	<ul style="list-style-type: none"> • MES, • P, N (Kejdhal, NO3), • Métaux (Cd, Cu, Hg, Pb, Ni, Zn), • HAP (anthracène, benzo(a)pyrene), huiles minérales, • E-coli.
Lye, 2009	Dépend des études mentionnées.	Article faisant état de l'art de la littérature scientifique sur l'effet de la collecte d'eaux de toiture sur les eaux de pluie et les eaux de ruissellement, sur la qualité des eaux de manière générale, sur les risques de santé avec cette source d'eau, etc... Les risques relatifs aux biocides, pesticides, herbicides, HAPs et organohalogènes ne sont pas abordés dans cet article. Les effets de l'aluminium, du manganèse, cuivre, zinc, plomb sont quant à eux abordés.	Pas de données brutes de concentrations
Mikkelsen et al, 1994	Non mentionné. Plutôt un document state of art.	Danemark Ce papier réalise un état de l'art à l'époque des aspects qualité des eaux de ruissellement avant infiltration. Ils donnent néanmoins des valeurs caractéristiques provenant d'autres études du Danemark. Distinction entre origines du ruissellement (Urbain, autoroutes, toits). Sur base du texte, les routes peuvent être considérées comme à faible trafic	<ul style="list-style-type: none"> • MES, • Ptotal, NTotal, • COD, • Métaux (Pb, Zn, Cu, Cd).
NCTCG (2001) Repris dans these Datry, 2003)	Synthèse de données	valeurs moyennes mesurées dans les eaux pluviales issues de divers bassins versants du Texas (North Central Texas	<ul style="list-style-type: none"> • MES, • P, N (total , Kjeldahl), • Métaux (Pb, Zn, Cu, Cd).

		Council of Governments, 1999, 2000 & 2001), distinction zone habitat, zone commerciale, zone industrielle	
Pitt et al, 1999	Non mentionné. Plutôt un document state of art.	Etats-Unis principalement La conclusion donne un bon résumé concernant la mobilité et le potentiel de contamination des eaux souterraines par les contaminants retrouvés dans les eaux de ruissellement. Parmi les familles de composés mentionnés : - Pesticides - Nutriments (azote, ammonium, nitrate ...) - PAHs, chlorinated solvents - Pathogènes - Métaux lourds (Nickel et zinc, chrome et plomb). - Sels (chlorures) En fonction de la mobilité et de l'abondance de ces contaminants dans les eaux de ruissellement, privilégier ou non l'utilisation d'un bassin de filtration ou une injection directe.	Pas de valeurs de concentrations dans les eaux de ruissellement
RIVM, 2018 (dans Liefing et al, 2020)	4-12 localités, + de 600 échantillons, mesure entre 2012 et 2018	Pays-Bas Réseau national de surveillance de l'eau de pluie (LMRe), points de mesures (4 ou 12 en fonction des paramètres) situés dans des zones rurales	<ul style="list-style-type: none"> • P, N (NH₄, NO₃), • Métaux (Cd, Cu, Hg, Pb, Ni, Zn), • HAP (anthracène, benzo(a)pyrene), huiles minérales.
Rossi 1998	Synthèse de données	Suisses valeurs moyennes mesurées sur divers bassins urbains suisses. distinction zone habitat, zone commerciale, zone industrielle Type de surface de ruissellement pas spécifié	<ul style="list-style-type: none"> • MES, • P, • DBO, COD, • Métaux (Pb, Zn, Cu, Cd), • Hydrocarbures totaux.
Sainte, 2010	France	These de doctorat Essais sur différents types de toitures métalliques en vue de caractériser les émissions de polluants de ces toitures.	Métaux (Cd, Cu, Pb, Ni, Zn) Résultats fournis sous forme de graphiques ou de flux de polluants
Sanchez et al., 2015	Plus un document « State of Art ».	Ce travail résume et analyse la littérature scientifique qui traite les problèmes de contaminations des eaux de pluie sur 3 étapes : contamination atmosphérique, contamination par lessivage de polluants à la surface et	

		<p>contamination lors du transport et stockage de l'eau de pluie.</p> <p>Les mêmes polluants classiques que ceux mentionnés dans les études précédentes sont repris dans cet article. De plus, il mentionne brièvement quelques contaminants d'intérêts émergeant tels que les composés perfluorés. Les données brutes reprises sont des données d'échantillons après ruissellement sur des toits</p>	
Van De Voorde, 2011	5 ev. pluvieux sur 1 mois sur 1 site d'échantillonnage (4 types de toitures)	<p>France,</p> <p>Description des traitements appliqués en traitement de toitures</p> <p>Mise au point d'un protocole analytique pour un fongicide particulier le benzalkonium</p> <p>Banc d'essais sur plusieurs types de toiture, épandage d'anti-mousse et mesures des concentrations en antimousse lessivé lors des événement pluvieux, en milieu urbain dense</p>	<p>Principalement benzalkonium</p> <p>Pas de données brutes</p>
Vialle et al., 2012	Un site étudié pendant une année complète (Mars 2009 à Février 2010). Nombre d'évènements pluvieux non mentionnés.	<p>France (village dans le Sud-Ouest)</p> <p>Cette étude évalue la qualité d'eau de pluie collectée pour les chasses d'eau des toilettes pendant un an dans une maison dans un village rural au sud de la France.</p> <p>Données disponibles concernant des échantillons prélevés dans un réservoir après ruissellement sur un toit</p>	<ul style="list-style-type: none"> • pH, CE, • EM, • P, N (total, Nitrate, NH4), • COD, TOC, DBO.
Wang et al, 2012	20 évènements pluvieux entre août 2009 et septembre 2011 à 6 sites différents (6 différents land uses)	<p>Chongqing, Chine (Sud-Ouest)</p> <p>Cette étude enquête sur la distribution de la concentration en polluants dans des eaux de ruissellements à Chongqing, pour 6 différents land uses de août 2009 à septembre 2011. Les land uses étudiés sont les routes avec beaucoup de trafic, les routes en milieu résidentiel, les zones</p>	<ul style="list-style-type: none"> • MES, • Ptotal, N (total, ammonium, nitrate), • COD, • Métaux (Zn, Cu, Pb, Cd, Fe).

		<p>commerciales, les toits en béton, les toits en tuile et un campus universitaire.</p> <p>Des données des autres études mentionnés sont disponibles dans des tableaux mentionnés dans l'article pour des comparaisons.</p>	
Zgheib, 2011	5 Sites suivi en France entre 2007 et 2009	<p>Suivi de la qualité globale de la qualité des eaux de ruissellement sur 5 zones en France avec des degrés d'urbanisation différents.</p> <p>Pas de données par type de surface de ruissellement et données issues principalement de sorties d'égouts séparatifs</p> <p>Etude de la répartition entre phases dissoutes et particulaires</p>	<p>88 paramètres dont</p> <ul style="list-style-type: none"> • MES • Métaux • HAP • PCB • Alkylphénols • DEHP • Pesticides <p>Données principalement fournies sous formes de graphiques et donc peu exploitables</p>

