



OPUR : Observatoire des Polluants Urbains en Île de France

Thème de recherche : 8

Action de recherche n°8.4.

**ÉTUDE DE CARACTERISATION DE L'EVOLUTION DE LA  
QUALITE DE L'EAU DE RUISSELLEMENT DE TOITURE AU  
COURS DES EVENEMENTS PLUVIEUX DANS LA  
PERSPECTIVE D'UNE UTILISATION OPTIMALE DE L'EAU  
DE PLUIE. UNE COMPARAISON FRANCE-CHINE**

*Rapport final de Yujie QIAO*

*Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est*

*Spécialité : Sciences et Technique de l'Environnement.*

*Soutenue le 10 Mars 2020.*

- *Thèse réalisée au Laboratoire : LEESU, sous la direction de Bruno Tassin et Bernard de Gouvello*







École Doctorale Science, Ingénierie et Environnement

THESE DE DOCTORAT

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est  
Spécialité : Sciences et Technique de l'Environnement

**Étude de caractérisation de l'évolution de la qualité de l'eau de  
ruissellement de toiture au cours des événements pluvieux dans la  
perspective d'une utilisation optimale de l'eau de pluie. Une comparaison  
France-Chine**

Par

**Yujie QIAO**

Soutenue le 10 Mars 2020 devant le jury composé de :

Bruno TASSIN	Directeur de thèse
Bernard de GOUVELLO	Co-directeur de thèse
Béatrice BECHET	Rapporteur
Sylvie BARRAUD	Rapporteur
Xueqiang LU	Examineur
Régis MOILLERON	Examineur
David RAMIER	Examineur
Jérémie STEININGER	Examineur

Thèse préparée au Laboratoire Eau Environnement et Système Urbains (LEESU)  
École des Ponts ParisTech



**Étude de caractérisation de l'évolution de la qualité de l'eau de  
ruissellement de toiture au cours des événements pluvieux dans la  
perspective d'une utilisation optimale de l'eau de pluie. Une comparaison  
France-Chine**

Par

**Yujie QIAO**



## Remerciement

Pour commencer, je remercie les organismes partenaires de ce travail : les recherches qui font l'objet de ce mémoire ont été menées au Laboratoire Eau Environnement et Système Urbains (LEESU) à l'École des ponts ParisTech, financée par la Tianjin Academy of Environmental Science (TAES) en Chine et complétée par OPUR (Un Observatoire des Polluants Urbain en Île-de-France) pour la partie expérimentale. Sans qui cette thèse n'aurait pu être menée à bien.

Un grand merci à mes 3 encadrants, pour leur aide tout au long de ces années :

Monsieur Bruno Tassin, mon directeur de thèse, un grand merci pour ses qualités scientifiques mais aussi pour sa gentillesse, son soutien et sa confiance. Il a également fourni son beau jardin comme un des sites d'étude dans nos recherches. Le dynamisme de lui et de sa famille mis au service de nos recherches ont fait de l'année où j'ai récupéré les échantillons une expérience très enrichissante.

Monsieur Bernard de Gouvello, mon co-directeur de thèse, qui m'a lancé dans cette aventure et qui m'a suivie de près au quotidien. Merci beaucoup pour son aide scientifique précieux, ses idées toujours intéressantes, et ses encouragements, ainsi que pour nos discussions toujours constructives. Un grand merci également pour ses grandes qualités personnelles : sa gentillesse, son amitié et notamment sa patience... Dès le premier jour de nos recherches, il a commencé à modifier mes fautes de grammaire page par page...

Monsieur Xueqiang Lu, mon encadrant en Chine, un grand merci pour son décision finale de financer nos recherches et son soutien tout au long. Merci pour ses idées, critiques, et encouragements. Pour la partie de mon travail en Chine, il a contacté et fourni le service de laboratoire de TAES, ce qui a mené ce travail à bien dans des conditions optimales et a rendu mon travail plus efficace.

Je remercie ensuite le directeur du LEESU, Monsieur Régis Moillon, pour m'avoir accueillie au sein de ce laboratoire et pour m'avoir permis d'y travailler dans les meilleures conditions possibles. Je remercie aussi Monsieur Ghassan Chebbo qui me finance la partie expérimentale en France par OPUR.

J'adresse mes plus sincères remerciements à Madame Béatrice Béchet, la chargée de recherche d'IFSTTAR à Nantes et Madame Sylvie Barraud, la professeure de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (INSA), pour avoir bien voulu juger ce travail, siéger au jury de ma thèse et en être les rapporteurs.

Je remercie vivement Monsieur David Ramier, le charge de recherche à Cerema Île-de-France et Jérémie Steininger, l'ingénieur de l'industriels français de l'eau de pluie (Ifep), pour avoir accepté de participer à mon jury de thèse.

Ce travail a présenté un volet expérimental important. Je suis donc très reconnaissante aux collègues et professeurs au LEESU et TAES pour ses aides tout au long de cette thèse :

Je tiens à adresser toute ma gratitude à Monsieur José-Frédéric Deroubaix, Monsieur Yunping Tang et ses familles. Ils m'ont fourni leur propre jardin pour moi d'installer les dispositifs d'échantillonnage et m'ont permis de faire les petits travaux sur leurs gouttières de la toiture. Eux et leur famille m'ont également chaleureusement accueilli et ont fourni un soutien pour mes multiples prélèvements pendant quelques mois.

Un grand merci à Monsieur Mohamed Saad, l'ingénieur de recherche du LEESU, pour son aide sur le terrain... Il a largement contribué au bon déroulement des échantillonnages et du dispositif. Merci également pour son aide précieuse au lab.

Je remercie Philippe Dubois, le technicien du LEESU, pour son gentillesse et l'aide apportée lors de la mise en place des systèmes d'échantillonnage.

Mille mercis aussi à Mademoiselle Ying Li, l'ingénieur de TAES, même si nous n'avons que très peu été amenées à travailler ensemble, elle m'a aidé à réaliser les analyses des échantillons d'eau à Tianjin.

Je remercie Monsieur Fabien Esculier pour avoir été un voisin de bureau si charmant et pour son soutien, son encouragement et ses compréhensions. Ses nombreuses idées sur la travaille et sur la vie m'inspirent beaucoup.

Je remercie Annick Piazza pour son soutien et son aide logistique et administrative. Elle est toujours chaleureuse et gentille. J'ai été émue par le soutien qu'elle m'a apporté pendant ma grossesse.

Je remercie tous les collègues du laboratoire pour leur soutien et le plaisir de collaborer, Neng Jia, Yi Hong, Claire Trinh, Claire Therial, Bruno Lemaire, Damien Tedoldi, Kelsey Flanagan, Natalie Chong, Marie-Christine Gromaire, Françoise Lucas ... Ils sont tous extrêmement sympathiques et il me semble difficile de les remercier individuellement...

非常感谢我所有的家人，尤其是我的母亲陈英、父亲乔壘、婆婆张凤珍、公公张永琛。我在法国自由自在的求学、工作、生活了近十年，一直以来无法陪伴在他们身边，他们替我承受了生活全部的琐碎和艰辛，给予了我世间最无私的爱。也因为有他们一直以来的信任、理解和支持，我才有勇气和底气完成自己的学业。读博生活于我是追梦，于他们却是日日夜夜的思念和牵挂，如今刚刚做母亲的我更加清楚的知道了为人父母的不易，而怎样成为像他们一样优秀的父母，是一个比博士研究更难且需要自己用一生来完成的新课题。

此外，我还想把我的最真挚的感谢送给我的爷爷乔怀林，每次我回到家乡时，爷爷总是细心的询问我的近况，坚信我一定会取得博士学位，很遗憾，他在我确定答辩日期的前夕病逝，但我一直相信，他一定在天上默默地看着我，保佑着我早日完成学业，平安回家。

Je remercie enfin mon amour, Siyu, pour son soutien inconditionnel, sa présence quotidienne et son amour tout simplement... En surtout, mes plus grands remerciements à ma fille, Xinle, qui est née pendant la thèse et qui n'avait que 10 mois. Sa présence est la plus grande motivation pour moi.

A vous tous, un grand merci !

## Résumé de la thèse

La récupération et utilisation de l'eau de pluie (RUEP) est une pratique qui se développe ou connaît un regain d'intérêt un peu partout dans le monde. Elle fait partie des solutions qui peuvent aider à répondre au problème de pénurie d'eau et plus généralement à dessiner un nouveau modèle de gestion durable de l'eau dans une perspective de changement climatique. Dans un système de RUEP qui collecte la pluie du toit et la stocke dans un réservoir, les polluants s'accumulent sur la surface du toit pendant une période sèche antécédente et sont lessivés au début de chaque pluie en même temps que d'éventuels produits de corrosion. Plusieurs études montrent que le premier volume de ruissellement pendant l'événement pluvial contient la plus grande partie des éléments polluants et que la qualité de l'eau stockée peut être améliorée en enlevant cette fraction. En plus, nombre de facteurs divers relatifs tant à la toiture (matériau, âge, orientation) qu'à l'environnement où elle est située (arbres et faune, caractéristiques pluviométriques, pollution urbaine...) influent sur les niveaux de pollution dans l'eau de ruissellement. Ces facteurs ont également un impact sur l'évolution de la qualité de l'eau en cours d'événement pluvieux.

Cette thèse poursuit un triple objectif : (i) caractériser la qualité de l'eau de pluie inter et intra-événementielle ; (ii) identifier les conditions dans lesquelles une amélioration de la qualité est observée ; et, (iii) analyser et modéliser les dynamiques d'évolution de la qualité des eaux de toiture en cours d'événement dans la perspective d'une utilisation optimale de l'eau de pluie.

A cet effet, un dispositif d'échantillonnage de collecte fractionnée par succession de neuf récipients a été construit et mis en place sur des toitures de deux maisons situées en Île-de-France (Vincennes et Romainville) et d'une maison située en Chine (Tianjin, à 200 km à l'Est de Beijing). Les événements pluvieux collectés dans des zones avec des climats significativement différents et des niveaux de pollution différents fournissent des données comparables au travers de 6 paramètres communs : pH, conductivité, MES, turbidité, COD et Flore totale à 36 °C. Des mesures supplémentaires des entérocoques, d'*Escherichia Coli*, de la flore totale à 22 °C sur Vincennes et sur Romainville et des indicateurs nutriments (N-NO<sub>2</sub>, N-NO<sub>3</sub>, N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, N<sub>tot</sub> et P<sub>tot</sub>), des coliformes fécaux et des coliformes totaux sur Tianjin ont été menées en complément afin d'avoir une compréhension globale de la qualité de l'eau de toiture. De mai 2015 à janvier 2017, 13 événements pluvieux collectés ont été suivis à Vincennes, 17 à Romainville et 9 à Tianjin. Une

analyse des paramètres physico-chimiques et microbiologiques a été menée par un traitement statistique des données expérimentales et des modèles adaptés à l'évolution de qualité ont été proposés.

L'interprétation des résultats expérimentaux concerne d'une part la représentation de la qualité moyenne de l'eau sur les trois sites et la sélection de paramètres-clés pour l'étude de l'évolution de la qualité, d'autre part la modélisation de l'évolution de qualité de l'eau de ruissellement de toiture au cours d'un événement pluvial et l'influence des facteurs déterminants. Nous concluons que la pollution de l'eau de pluie sur les toits à Tianjin est plus importante que celle de l'Île-de-France en comparant tous les paramètres communs. Par exemple, pour le 1<sup>er</sup> mm de pluie collectée, la valeur médiane de la turbidité observée Tianjin (33,0 NTU) est plus de 5 fois supérieure à celle de Vincennes et près de 9 fois à celle de Romainville. Et pour la flore totale à 36°C, la médiane de Tianjin (4,5 log ufc.ml<sup>-1</sup>) est de 1,2 log supérieure à celle de Vincennes et de 1,9 log supérieure à celle de Romainville. Ces résultats apparaissent cohérents avec le niveau de pollution locale (les valeurs moyennes de PM 2,5 et le PM 10 à Tianjin sont 5,5 fois plus élevées que celles de Paris). En comparant la qualité médiane des volumes correspondant au 1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> mm de pluie collectée, il apparaît que la méthode d'élimination du 1<sup>er</sup> mm de l'eau pour optimiser la qualité de l'eau peut réduire les matières particulaires et les produits dissous en même temps. Ce résultat n'est pas valide pour les polluants microbiologiques. De plus, en combinant les résultats d'une analyse en composantes principales et une réflexion sur la facilité de mise en œuvre des mesures, il est possible de réduire le nombre de paramètres de qualité de l'eau et de proposer un protocole expérimental de suivi opérationnel. Il repose sur 3 paramètres représentatifs pour l'étude de l'évolution de la qualité : la conductivité, la turbidité et la flore totale à 36°C.

En observant les profils d'évolution de la qualité sur la base des valeurs normalisées des trois paramètres représentatifs, deux types de profils d'évolution sont identifiés : l'évolution décroissante et l'évolution non monotone. L'évolution décroissante est conforme à l'hypothèse selon laquelle l'amélioration de la qualité en cours de pluie et est observée sur la majorité des profils de turbidité et de conductivité à Vincennes et à Tianjin. Des valeurs seuils au-delà desquelles l'évolution décroissante est toujours vérifiée ont été identifiées : intensité moyenne de l'événement pluvieux supérieure à 1mm/h et période sèche antécédente supérieure à 100 h. De plus, nous avons développé pour la turbidité et la conductivité, un modèle exponentiel de décroissance fonction de la hauteur de pluie précipitée cumulée qui représente ces évolutions décroissantes observées de manière satisfaisante, moyennant deux coefficients (coefficient de « charge initiale » et coefficient de décroissance), qui varient selon l'évènement et le site.

Comme perspective à ce travail, il est possible d'envisager l'élaboration d'une méthode opérationnelle – reposant sur la mesure en temps réel de la turbidité et de la conductivité – de déviation d'une fraction pertinente de l'eau de pluie de toiture visant maximiser la quantité d'eau stockée dans la cuve respectant des seuils de qualité.

**Mots-clés :** récupération et utilisation de l'eau de pluie, toiture, évolution de la qualité, comparaison France-Chine

# Abstract

Rainwater harvesting is a practice that is gaining renewed interest around the world. It is one of the solutions that can help to address the problem of water scarcity and more generally to design a new model for sustainable water management from a climate change perspective. In a Rainwater harvesting system that collects rain from the roof and stores it in a tank, pollutants accumulate on the roof surface during a previous dry period and are washed away at the beginning of each rainfall along with corrosion products. Several studies show that the first volume of runoff during the storm event contains most of the pollutants and that the quality of the stored water can be improved by removing this fraction. In addition, a number of various factors relating to both the roof (material, age, orientation) and the environment in which it is located (trees and wildlife, rainfall characteristics, urban pollution, etc.) influence pollution levels in runoff water. These factors also have an impact on the evolution of water quality during a rainy event.

This thesis has a threefold objective: (i) to characterize the quality of rainwater between and within events; (ii) to identify the conditions under which quality improvement is observed; and (iii) to analyze and model the dynamics of changes in roof water quality during events with a view to optimal use of rainwater.

To this end, a sampling system for the fractionated collection of nine containers was built and installed on the roofs of two houses located in Île-de-France (Vincennes and Romainville) and one house located in China (Tianjin, 200 km east of Beijing). Rainfall events collected in areas with significantly different climates and pollution levels provide comparable data through 6 common parameters: pH, conductivity, TSS, turbidity, COD and total flora at 36°C. Additional measurements of enterococci, Escherichia Coli, total flora at 22°C in Vincennes and Romainville and nutrient indicators (N-NO<sub>2</sub>, N-NO<sub>3</sub>, N-NH<sup>4+</sup>, N<sub>tot</sub> and P<sub>tot</sub>), fecal coliforms and total coliforms in Tianjin were conducted in order to have a global understanding of roof water quality. From May 2015 to January 2017, 13 rainfall events were collected in Vincennes, 17 in Romainville and 9 in Tianjin. An analysis of the physic-chemical and microbiological parameters was carried out by statistical processing of the experimental data and models adapted to the evolution of quality were proposed.

The interpretation of the experimental results concerns on the one hand the representation of the average water quality at the three sites and the selection of key parameters for the study of the evolution of quality, and on the other hand the modelling of the evolution of the quality of roof runoff water during a rain event and the influence of the determining factors. We conclude that rainwater pollution on rooftops in Tianjin is more significant than in the Île-de-France region by comparing all common parameters. For example, for the 1st mm of rainfall collected, the median value of turbidity observed in Tianjin (33.0 NTU) is more than 5 times higher than in Vincennes and nearly 9 times higher than in Romainville. And for the total flora at 36°C, the median of Tianjin

(4.5 log cfu.ml<sup>-1</sup>) is 1.2 log higher than in Vincennes and 1.9 log higher than in Romainville. These results appear to be consistent with the local air pollution level (the average PM 2.5 and PM 10 values in Tianjin are 5.5 times higher than those in Paris). By comparing the median quality of the volumes corresponding to the 1st and 2nd mm of rain collected, it appears that the method of removing the 1st mm of water to optimize water quality can reduce particulate matter and dissolved products at the same time. This result is not valid for microbiological pollutants. In addition, by combining the results of a main component analysis with a reflection on the ease of implementation of the measures, it is possible to reduce the number of water quality parameters and propose an experimental operational monitoring protocol based on three representative parameters for the study of quality evolution: conductivity, turbidity and total flora at 36°C.

By observing the quality evolution profiles on the basis of the normalized values of the three representative parameters, two types of profiles are identified: decreasing evolution and non-monotonic evolution. The decreasing trend is consistent with the assumption that quality improvement during rainfall and is observed on the majority of turbidity and conductivity profiles in Vincennes and Tianjin. Threshold values beyond which the decreasing trend is always verified have been identified: average intensity of the rain event greater than 1mm/h and previous dry period greater than 100 h. In addition, we have developed an exponential decay model for turbidity and conductivity as a function of cumulative precipitation rainfall that represents these satisfactorily observed decreasing trends, using two coefficients ("initial load" coefficient and decay coefficient), which vary according to the event and site.

As a perspective to this work, it is possible to consider the development of an operational method - based on real-time measurement of turbidity and conductivity - to divert a relevant fraction of roof rainwater to maximize the quantity of water stored in the tank that meets quality thresholds.

**Keywords:** rainwater harvesting system, roof, quality evolution, France-China comparison

# Sommaire

<b>RESUME DE LA THESE.....</b>	<b>10</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>13</b>
<b>SOMMAIRE.....</b>	<b>15</b>
<b>ABREVIATIONS ET LEXIQUE.....</b>	<b>21</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>23</b>
<b>PARTIE 1. RECUPERATION D’EAU DE PLUIE ET ENJEUX DE LA QUALITE DES EAUX DE TOITURES : UN ETAT DES LIEUX.....</b>	<b>29</b>
<b>CHAPITRE 1. LA RECUPERATION ET UTILISATION DE L’EAU DE PLUIE : CONTEXTE, ETAT DES CONNAISSANCES ET COMPARAISON FRANCE-CHINE.....</b>	<b>31</b>
1. <i>Contexte : le regain d’intérêt pour la récupération des eaux de pluie.....</i>	<i>31</i>
2. <i>Principe de la récupération et utilisation de l’eau de pluie.....</i>	<i>32</i>
2.1 Définition d’un système de RUEP.....	32
2.1.1 La surface de captage.....	33
2.1.2 Le système d’acheminement de l’eau.....	35
2.1.3 Le prétraitement.....	35
2.1.4 Le réservoir de stockage.....	35
2.1.5 La distribution et le traitement.....	35
2.2 Usages des eaux de ruissellement de toiture.....	36
3. <i>Qualité des eaux de ruissellement de toiture.....</i>	<i>37</i>
3.1 Les voies des contaminations des eaux de toiture.....	37
3.2 Variabilité de la qualité de l’eau de ruissellement de toiture.....	39
3.2.1 Contaminants physico-chimiques.....	43
3.2.2 Contaminants microbiologiques.....	45
3.3 Facteurs influençant la qualité des eaux de toiture.....	46
3.4 Traitements pour améliorer la qualité dans un système de RUEP.....	47
3.4.1 Méthode de prétraitement- prévention des contaminants entrant dans la cuve.....	48
3.4.2 Méthodes de traitement de l’eau stockée.....	49
4. <i>La RUEP en France et en Chine : comparaison à différentes échelles territoriales.....</i>	<i>50</i>

4.1 Contexte général : ressources en eau, climatologie et niveau de pollution.....	50
4.1.1 Contexte général des ressources en eau en France et en Chine .....	50
4.1.2 Climats et structures de précipitations à Tianjin et à Paris.....	54
4.1.3 Niveau de pollution à Tianjin et à Paris.....	55
4.2 État des lieux de la RUEP en France et Chine.....	56
4.2.1 Diffusion de la RUEP en France et en Chine .....	57
4.2.2 Réglementation et référentiels relatifs à la RUEP en France et en Chine .....	59
<i>Conclusion du chapitre 1 :</i> .....	62

## **CHAPITRE 2. L'ÉVOLUTION DE LA QUALITÉ DE L'EAU DE TOITURE AU COURS D'ÉVÉNEMENT PLUVIAL.. 63**

1. <i>État de l'art sur l'évolution de la qualité de l'eau de toiture au cours d'un événement de pluie</i> .....	64
1.1 Modélisation de l'évolution de la qualité de l'eau de ruissellement et définition du <i>first flush</i> à l'échelle urbaine.....	64
1.1.1 Évaluation quantitative basée sur la régression multilinéaire .....	64
1.1.2 Évaluation quantitative basée sur la masse .....	65
1.1.3 Évaluation quantitative basée sur la concentration moyennes d'événements (EMC Event Mean Concentration) .....	66
1.1.4 Évaluation quantitative basée sur la concentration.....	67
1.2 Évolution de la qualité en cours d'événement sur la toiture – processus de dépôt et de lessivage de matière.....	68
1.2.1 Phénomène de dépôt (accumulation de matières) .....	69
1.2.2 Processus de lessivage ( <i>wash-off</i> ) .....	70
1.3 Définition du <i>first flush</i> de toiture.....	71
1.4 Facteurs influençant l'évolution de la qualité.....	73
1.5 Approche opérationnelle du <i>first flush</i> : quantité du <i>first flush</i> et déviateurs de <i>first flush</i> .....	73
1.5.1 Efficacité de l'élimination et l'efficacité volumétrique .....	73
1.5.2 Cadre réglementaire et référentiels relatifs au <i>first flush</i> et revue de la littérature sur Le volume du <i>first flush</i> .....	74
1.5.3 Différents types de déviateur de <i>first flush</i> .....	80
2. <i>Problématique de la thèse : appréhender la dynamique d'évolution de l'eau de toiture en cours d'événement</i> .....	84

2.1 Problématique, objectifs et hypothèses.....	84
2.2 Démarche adoptée .....	85
<b>CONCLUSION DE LA PARTIE 1.....</b>	<b>87</b>
<b>PARTIE 2. DISPOSITIF D'ETUDE DE LA QUALITE DE L'EAU DE RUISSELLEMENT DE TOITURE DANS DES SITUATIONS CONTRASTEES.....</b>	<b>88</b>
<b>CHAPITRE 3. DEFINITION ET MISE EN PLACE DES SYSTEMES EXPERIMENTAUX.....</b>	<b>90</b>
1. <i>Présentation des systèmes expérimentaux.....</i>	90
1.1 Les systèmes expérimentaux.....	90
1.2 Conception et construction du dispositif d'échantillonnage de l'eau de pluie.....	92
1.3 Le système de collecte des données météorologiques .....	99
1.4 Les limites du système expérimental.....	99
2. <i>Choix des sites d'étude et de toitures .....</i>	100
2.1 Les critères de choix des sites d'installation du système expérimental.....	100
2.2 Présentation des caractéristiques des sites d'étude.....	102
2.2.1 Site 1- Vincennes .....	102
2.2.2 Site 2-Romainville .....	104
2.2.3 Site 3- Tianjin .....	106
2.3 Description du système .....	109
2.3.1 Site 1-Vincennes.....	109
2.3.2 Site 2-Romainville.....	110
2.3.3 Site 3-Tianjin .....	111
3. <i>Échantillonnage.....</i>	113
3.1 Définition de l'événement pluvieux collecté.....	113
3.2 Protocole d'échantillonnage.....	113
3.3 Description des événements pluvieux collectés dans cette étude .....	114
<b>CHAPITRE 4. PARAMETRES D'ETUDE DE LA QUALITE D'EAU DE TOITURE ET METHODE DE TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNEES.....</b>	<b>90</b>
1. <i>Choix des paramètres.....</i>	119
2. <i>Méthodes analytiques utilisées.....</i>	124

2.1 Paramètres physico-chimiques.....	127
2.2 Paramètres microbiologiques .....	130
<b>3. Traitement statistique des données .....</b>	<b>132</b>
3.1 Boîtes à moustaches .....	133
3.2 Test U de Mann-Whitney.....	134
3.3 Analyses multi variées-ACP .....	135
3.3.1 Principe et méthode de l'ACP .....	135
3.3.2 Représentations graphiques des résultats de l'ACP .....	136
<b>CONCLUSION DE LA PARTIE 2.....</b>	<b>138</b>

## **PARTIE 3. CARACTERISATION ET MODELISATION DE L'EVOLUTION DE LA QUALITE DES EAUX DE TOITURE .....**

### **CHAPITRE 5. ÉTUDE DE LA QUALITE DES EAUX COLLECTEES RUISSELEES ET SELECTION DE PARAMETRES CARACTERISTIQUES .....**

<i>1. Approche comparative de la qualité moyenne des premiers millimètres d'eau de toiture.....</i>	<i>142</i>
1.1 Caractérisation de la qualité moyenne de l'eau de toiture.....	142
1.2 Comparaison par cumuls millimétriques de la qualité des eaux collectées.....	145
1.2.1 Qualité physico-chimique.....	149
1.2.2 Qualité microbiologique.....	160
<i>2. Détermination des paramètres-clés pour l'étude de l'évolution de la qualité.....</i>	<i>165</i>
2.1 Vérification et réduction de paramètre sur trois sites d'étude .....	167
2.1.1 ACP sur les données collectées à Tianjin .....	167
2.1.2 ACP sur les données collectées à Vincennes.....	178
2.1.3 ACP sur les données collectées à Romainville : .....	183
2.2 Hiérarchisation des paramètres d'étude au niveau opérationnel.....	188
<i>3. Étude des influences des facteurs déterminants sur la qualité moyenne .....</i>	<i>189</i>
3.1 Influence de la saisonnalité.....	189
3.1.1 Romainville .....	190
3.1.2 Vincennes .....	193
3.1.3 Tianjin .....	196
3.2 Influences de la durée de temps sec précédant (ADD).....	198

<i>Conclusion du chapitre 5</i> .....	204
---------------------------------------	-----

**CHAPITRE 6. ANALYSE DE L'EVOLUTION DE LA QUALITE DE L'EAU DE TOITURE EN COURS D'EVENEMENT**  
**.....206**

<i>1. Profils d'évolution de la qualité de l'eau de toiture</i> .....	207
1.1 Normalisation des valeurs mesurées.....	207
1.2 Classifications des profils d'évolution .....	208
<i>2. Facteurs déterminants pour l'évolution de la qualité de l'eau de ruissellement de toiture</i> .....	211
2.1 Intensité moyenne sur un événement pluvieux collecté ( $i_{moy.}$ ) et intensité moyenne de fraction ( $i_{moy.f.}$ )	212
2.1.1 Volume de pluie collectée par le dispositif d'échantillonnage ( $V_{coll.}$ ).....	215
2.1.2 Perte initiale ( $V_{p.i.}$ ) et coefficient de récupération du dispositif d'échantillonnage ( $Cr_{d.éch.}$ ) .....	217
2.1.3 Durée de collecte correspondante à $V_{coll.}$ ( $t_{coll.}$ ) et durée de collecte de fraction ( $t_{coll.f.}$ ).....	219
2.2 Résultats d'intensité moyenne de collecte pour les trois sites d'étude.....	220
2.2.1 Données utilisées.....	220
2.2.2 Perte initiale et coefficient de récupération du dispositif d'échantillonnage .....	220
2.2.3 Volume de pluie collectée par le dispositif d'échantillonnage ( $V_{coll.}$ ) et volume de pluie de fraction collectée ( $V_{coll.f.}$ ) .....	229
2.3 Interprétation- relation entre facteurs déterminants et l'évolution de la qualité. ....	230
2.3.1 Vincennes .....	230
2.3.2 Tianjin.....	234
2.3.3 Romainville .....	237
<i>3. Modélisation de l'évolution de la qualité dans le cas d'un profil décroissant</i> .....	240
3.1 Proposition d'un modèle adapté à l'évolution de qualité.....	241
3.2 Interprétation des résultats de l'évolution de la qualité de l'eau de ruissèlement de toiture à Vincennes et à Tianjin.....	242
3.2.1 Modèle 1 .....	242
3.2.2 Modèle 2 .....	251
3.3 Analyse des paramètres du modèle d'évolution.....	258
3.3.1 Comparaison des paramètres de modèle d'évolution entre sites d'étude .....	258
3.3.2 Influence de l'ADD sur $C_0$ .....	261
3.3.3 Influence de l'intensité de pluie ( $i_{moy.}$ et $i_{moy.f.}$ ) sur $k_2$ .....	262

<i>Conclusion du chapitre 6</i> .....	268
<b>CONCLUSION GENERALE : SYNTHESE DES RESULTATS ET PERSPECTIVES</b> .....	<b>270</b>
<b>REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE</b> .....	<b>281</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>284</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>288</b>
<b>ANNEXE :</b> .....	<b>291</b>

# Abréviations et lexique

## ABREVIATION

---

## LEEXIQUE

---

## **INTRODUCTION GENERALE**

La pénurie d'eau est l'un des problèmes graves auxquels le monde est confronté aujourd'hui. Cette pénurie se renforcera avec le développement démographique et le dérèglement climatique au XXI<sup>ème</sup> siècle. La récupération et l'utilisation de l'eau de pluie (RUEP) qui consiste en la collecte la pluie de la toiture et la stocke dans un réservoir fait partie des solutions qui peuvent aider à répondre à ce problème et plus généralement à dessiner un nouveau modèle de gestion durable de l'eau. Cette pratique est largement utilisée dans différents pays à travers le monde et répond à des logiques différentes selon la région concernée. Dans les régions arides et semi-arides comme les états du sud-ouest des États-Unis, l'Australie, Israël, la récupération de l'eau de pluie est favorisée par les pouvoirs publics et nécessaire face à des épisodes de sécheresse. Dans les pays et les régions dont les ressources en eau sont insuffisantes, dont la qualité des eaux de surface et souterraines est détériorée, dont les systèmes de réseau publics sont inadaptés, comme dans les régions du nord-ouest de la Chine, en Ouganda, au Sri Lanka, l'eau de pluie peut être la seule ressource en eau. Dans les pays développés et les régions qui ne craignent pas la pénurie d'eau en comparaison d'autres pays, comme la France, l'Allemagne, l'Angleterre, le recours à l'eau de ruissellement de toiture est encouragé en tant que ressource complémentaire, dans une logique de développement durable.

Selon le contexte, les usages et les exigences de qualité de l'eau de ruissellement sont différentes. Dans certaines régions, l'eau de pluie récupérée est utilisée pour tous les usages y compris pour la boisson après des traitements adéquats (chloration, filtration ou ébullition), alors que dans les régions où le système d'adduction en eau potable est bien développé comme dans les pays développés, l'eau de pluie collectée en aval de toitures n'est pas considérée comme potable dans les réglementations nationales (Allemagne, Angleterre, Australie, Brésil, France...). Beaucoup d'études scientifiques, de réglementations et de référentiels relatifs à la Récupération et Utilisation de l'Eau de Pluie (RUEP) montrent que, après les traitements, l'eau de toiture peut être utilisée à l'intérieur ou à l'extérieur du bâtiment comme les chasses d'eau, l'arrosage des jardins et le lavage du linge...

En ruisselant sur les toits, l'eau de pluie se charge en matière organique, matières particulaires, en métaux (fer, zinc...) ainsi qu'en bactéries protozoaires, algues, pollens, et moisissures.

Les usages possibles de l'eau seront amenés à varier en fonction de la qualité des eaux. Elle variera en fonction des caractéristiques des matériaux. Elle variera également en fonction du contexte climatique, météorologique et des spécificités des événements pluvieux ainsi que de la pollution atmosphérique.

Cette variabilité de la qualité des eaux de ruissellement en fonction du contexte renvoie à trois dimensions : une dimension spatiale, une dimension temporelle et une dimension architecturale. Concernant la variabilité spatiale, les caractéristiques climatiques et de pollution variant à la surface de la planète, le potentiel de la REUP et le niveau de pollution des eaux collectées varieront également selon les latitudes, mais aussi selon les longitudes.

Concernant la dimension temporelle, le caractère stochastique des événements pluvieux, qu'il s'agisse de la répartition de l'intensité au cours de l'évènement, de la hauteur précipitée, de la durée séparant deux épisodes devront influencer la variabilité de la qualité de l'eau de pluie à l'aval des toitures.

Concernant la dimension architecturale, les solutions de couvertures mises en œuvre sur sont très diverses, reflétant des pratiques constructives très diversifiées, y compris parfois au sein d'une même région. Or la solution de couverture choisie va influencer la qualité de l'eau de pluie qui y aura ruisselée, non seulement au travers du relargage de composés chimiques entrant dans la formulation du produit mis en œuvre mais aussi par sa propension plus ou moins marquée à capter et relarguer des contaminants issus de retombées atmosphériques.

L'expérience profane des populations soumises à des alternances de longues périodes de temps sec, et de saison de pluie rapporte la nécessité de ne pas stocker les premières pluies qui se produisent après la saison sèche. Ce premier flot, ce « *first flush* », doit être évacué, et c'est ce que préconise les guides locaux sur la pratique de la récupération d'eau de pluie. Mais qu'en est-il sous des climats, comme en Europe occidentale (Grande Bretagne, France, Belgique, Pays-Bas, Danemark, ...) où les épisodes pluvieux alternent rapidement avec les périodes de temps sec, elles même brèves ? Observe-t-on ce phénomène ?

La question mérite d'être posée, et la notion de *first flush* d'eau de toiture doit être précisée et approfondie. D'abord, il est nécessaire de déterminer si ce phénomène existe dans tous les événements de pluie. Si ce n'est pas le cas, il est nécessaire d'identifier les conditions dans lesquelles ce phénomène existe effectivement. En d'autres termes, il convient de regarder si la qualité de l'eau de pluie s'améliore en cours d'évènement de pluie, pour tous les évènements ou seulement pour certains en fonction de facteurs caractérisant l'environnement. Ainsi, une définition claire du *first flush* à l'échelle du toit reste à proposer.

Dans cette optique, des nouvelles études sur les variations de la qualité des eaux de ruissellement prenant en compte à la fois le niveau de contamination physico-chimique et le niveau de contamination microbiologique sont nécessaires.

Dans le cadre opérationnel où la protection de la santé humaine est prioritaire, il est important, pour un système de RUEP, de mettre en œuvre les mesures permettant la sécurité de l'usage de l'eau de pluie, sans attendre les résultats des travaux amonts évoqués antérieurement. En France, par exemple, l'arrêté du 21 août 2008 précise qu'un

dispositif de filtration inférieure ou égale à 1 millimètre doit être mis en place en amont de la cuve afin de limiter la formation de dépôts à l'intérieur. La plupart des guides étrangers recommandent la mise en place d'un déviateur de *first flush* en amont du stockage afin de garantir une bonne qualité d'eau (Canada, Australie, Hawaii, Berkeley, Australian, Netherlands).

Dans ce contexte, le LEESU (Laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains), situé en Île-de-France (France) et la TAES (Tianjin Academy of Environmental Sciences) de Tianjin (Chine) ont uni leurs efforts afin d'approfondir les connaissances de l'évolution de la qualité de l'eau de pluie en aval de toiture, en montant un projet de thèse en commun. Celle-ci repose sur une approche expérimentale ambitieuse consistant à opérer un suivi de longue durée dans ces deux contextes contrastés à partir d'un dispositif ad hoc reproduit sur chacun des sites afin de fournir des données scientifiques originales et comparables. Ce travail porte une ambition à la fois scientifique et opérationnelle : d'une part, il vise à produire des connaissances approfondies sur la variabilité de la qualité de l'eau de ruissellement en aval de toiture ; d'autre part, il s'agit, à partir des éléments rassemblés, de proposer un protocole de conception, d'utilisation et d'entretien d'un déviateur de *first flush*.

Dans cette optique, l'objectif central de la thèse est d'analyser les dynamiques d'évolution de la qualité des eaux de toit en cours d'événement. Ce travail comprend l'identification des facteurs déterminants de l'évolution de la qualité de l'eau de toiture, la détermination des conditions dans lesquelles une amélioration de cette qualité est observée et la modélisation de l'évolution de la qualité de l'eau de toiture.

Pour faciliter la compréhension du travail réalisé dans cette thèse, ce manuscrit a été organisé en 6 chapitres rassemblée en 3 parties.

La première partie de la thèse a un caractère introductif : elle présente la problématique étudiée ainsi que les éléments-clés pour la comprendre. Elle est organisée en deux chapitres (chapitres 1 et 2). Le chapitre 1 constitue une introduction générale aux dispositifs de récupération et utilisation de l'eau de pluie (RUEP). Il s'attache à synthétiser une sélection de connaissances bibliographiques sur le principe de la RUEP et la qualité des eaux de ruissellement de toiture et fournit des éléments relatifs aux contexte et climat contrastés entre France et Chine utiles pour étudier la problématique de la qualité des eaux de ruissellement de toitures.

Le chapitre 2 s'ouvre par une étude bibliographique spécifique à l'évolution de la qualité de l'eau de ruissellement de toiture en cours d'événement pluvial. A partir de cette analyse bibliographique, les questions scientifiques de la thèse sont formulées et des hypothèses relatives aux conditions d'évolution de la qualité de l'eau de toiture en cours d'évènement et au phénomène de *first flush* sont proposées. Ce second chapitre s'achève sur la nécessité

d'appréhender l'évolution de la qualité dans les conditions différentes à partir d'une approche expérimentale.

La deuxième partie (chapitres 3 et 4) décrit l'approche méthodologique choisie, présente les systèmes expérimentaux et décrit les types d'analyse menées. Le chapitre 3 présente le dispositif expérimental spécifiquement conçu pour ce travail et installé sur les trois sites d'étude relevant de deux contextes différents (Ile-de-France et Chine) afin d'acquérir les différentes données. Y sont également décrits les conditions expérimentales (sites d'étude et caractéristiques des toitures), les stratégies d'échantillonnage et les descriptions des événements pluvieux collectés. Le chapitre 4 décrit en détail et justifie les paramètres choisis pour l'étude de la qualité d'eau de toiture et les protocoles d'analyse retenus. Les méthodes de traitement statistiques des données pertinents sont aussi présentées dans ce chapitre.

La troisième partie (chapitres 5 et 6) s'attache à la présentation et à l'interprétation des résultats expérimentaux. Le chapitre 5 s'attache à l'étude de la qualité des eaux collectées ruisselées et sélection de paramètres caractéristiques. Elle porte d'abord sur une description statistique des résultats de la qualité moyenne de chacun des deux premiers mm de pluie par événement pluvieux collecté sur les sites d'étude, puis sur la réduction des paramètres et la détermination de paramètres-clés pour qualifier l'évolution de la qualité en cours d'évènement (réalisée par l'analyse en composantes principales) et enfin sur une étude de l'influence des facteurs déterminants de la qualité (saisonnalité et la durée de temps sec précédant la précipitation).

Le chapitre 6 s'attache à l'analyse de l'évolution de la qualité des eaux ruisselées en cours d'évènement à proprement parler. Les profils d'évolution de la qualité font l'objet d'une classification. L'influence des facteurs déterminants sur l'évolution est analysée en détail. Puis, des tentatives de modélisation de la décroissance de la teneur de deux paramètres-clés (turbidité et conductivité) sont effectuées afin de représenter les évènements présentant un profil monotone décroissant. Enfin, une analyse des coefficients des équations de modélisation de l'évolution est effectuée.

Pour sa part, la conclusion présente une synthèse des principaux enseignements et différentes perspectives à cette étude tant en termes scientifiques qu'opérationnels.



**PARTIE 1. Récupération d'eau de pluie et enjeux de la qualité des eaux de toitures : un état des lieux**

La première partie de la thèse s'attache aux études bibliographiques et indique avec précision des objectifs de la thèse. Cette partie est organisée en 2 chapitres. Le premier décrit le contexte et l'état des connaissances sur la récupération et l'utilisation de l'eau de pluie (RUEP). Il présente une introduction générale du système de RUEP ainsi que des éléments de comparaisons climatologique et contextuelle entre la France et la Chine, terrains investigués dans la thèse. Le deuxième chapitre concerne une étude bibliographique plus spécifique à l'évolution de la qualité de l'eau de toiture au cours d'événement pluvial. A la fin de ce second chapitre est formulée la problématique de la thèse et les démarches scientifiques adoptées sont précisées.

# **Chapitre 1. La récupération et utilisation de l'eau de pluie : contexte, état des connaissances et comparaison France-**

## **Chine**

Ce chapitre concerne l'étude bibliographique sur la récupération et utilisation de l'eau de pluie (RUEP). On y présente le contexte général (définition d'un système de RUEP et usages de l'eau de pluie récupérée), on y précise les informations liées à la qualité des eaux de ruissellement de toiture (voies et risques des contaminations, types de contaminants, variabilité de la qualité des eaux de toiture dans la littérature et facteurs influençant cette variabilité). Les conditions différentes pour étudier la qualité en termes de comparaison entre la France et la Chine y sont également décrites.

### **1. Contexte : le regain d'intérêt pour la récupération des eaux de pluie**

La croissance des zones urbaines exige une augmentation continue de la quantité d'eau fournie. Des conflits concernant l'utilisation des ressources en eau surexploitées ont éclaté dans de nombreuses régions du monde. A part les programmes de conservation de l'eau, l'intérêt pour les ressources alternatives d'eau s'est fortement accru ces dernières décennies. Parmi elles, l'eau de pluie présente une série d'avantages en ce qui concerne certains de ses paramètres physico-chimiques. Elle présente une faible dureté, peu de matières en suspension et une faible salinité. Bien que les poussières urbaines soient fortement polluées par les métaux, 75% des polluants métalliques lessivés par la pluie peuvent être retenus par les infrastructures dites « vertes », qui utilisent la végétation, les sols et les processus naturels pour absorber et stocker l'eau (Kabir et al., 2014). La RUEP constitue l'une des meilleures méthodes disponibles pour établir des cycles durables de l'eau dans les zones urbaines.

Cette pratique est largement utilisée dans différents pays à travers le monde et elle répond ainsi à des logiques différentes selon le pays concerné. Dans les régions à fort stress hydrique (régions arides et semi-arides) comme États du sud-ouest des États-Unis, l'Australie, Israël, l'utilisation de l'eau de pluie est encouragée. Un recours aux ressources alternatives est parfois nécessaire face à des épisodes de sécheresse. Des stratégies efficaces de la RUEP sont essentielles pour répondre à la demande croissante d'eau. Pour les zones qui ne craignent pas la pénurie d'eau comme la France, des aménageurs ont l'intérêt croissant pour l'implantation de réservoirs de récupération dans les nouvelles constructions et des administrations de santé encadrent l'utilisation de l'eau de pluie récupérée (de Gouvello et Deutsch, 2009). On outre, la promotion de cette technique alternative est en phase avec le concept de développement durable, visant à la réutilisation des ressources naturelles. Cette thèse qui s'effectue dans le cadre de la

coopération du LEESU (France) et de la TAES de Tianjin (Chine) renvoie à des logiques différentes selon le pays concerné :

- France (stress hydrique faible à moyen) : le développement de la pratique passe par un renouveau de la technique, lui assurant des conditions de confort et de sécurité lui permettant de garantir son acceptabilité par les usagers.
- Tianjin (stress hydrique élevé) : Des stratégies efficaces de RUEP sont essentielles pour répondre à la demande croissante d'eau de bonne qualité. Cette ressource alternative est parfois nécessaire face à des épisodes de sécheresse.

## 2. Principe de la récupération et utilisation de l'eau de pluie

### 2.1 Définition d'un système de RUEP

En général, le système de RUEP consiste en un système de collecte et de stockage de l'eau de pluie dans la perspective d'une utilisation ultérieure. Ce système est composé trois éléments de base : une surface de captage (toiture, la plupart du temps inaccessible : ce sera le cas considéré dans cette thèse), un système d'acheminement de l'eau qui la transporte jusqu'au réservoir de stockage (gouttière et descente), un dispositif de prétraitement et un réservoir de stockage pour stoker l'eau jusqu'à son utilisation (Figure 1-1).

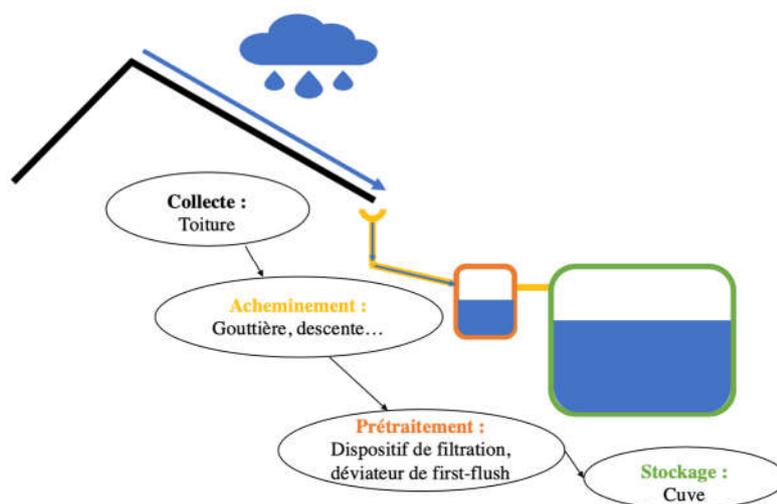


Figure 1-1. Différentes parties du système de RUEP

D'autres éléments peuvent être ajoutés à cette configuration de base : une pompe pour permettre d'acheminer l'eau de la cuve vers l'extérieur (pour l'arrosage des espaces verts par exemple) ou l'intérieur du bâtiment (alimentation des WC, lavage des véhicules,

lavage des sols, processus industriel) en vue de son utilisation ; un système de distribution par robinet, évitant de souiller l'eau en y plongeant des récipients; certains systèmes intègrent également une filtration en aval, voire une étape de désinfection (au chlore, à l'ozone ou aux Ultra-Violets).

Alors que le système est assez simple, il y a beaucoup d'options disponibles pour chaque composant. Le texte suivant est une description des éléments de base d'un système de RUEP.

### 2.1.1 La surface de captage

La surface de captage est généralement les toitures. Elle est la limitation initiale sur la performance d'un système de RUEP qui détermine la quantité et dans une certaine mesure la qualité de l'eau qui pénètre dans le réservoir de stockage (Martinson 2007). Les matériaux, l'inclinaison, l'orientation, l'âge de matériaux sont les éléments importants sur la toiture.

La récupération d'eau de pluie n'est pas à envisager sur toutes les toitures. Sur des tuiles, de l'ardoise naturelle, du zinc et du verre, cela ne pose pas de problème. On peut aussi tolérer le béton, la tôle en fer et le plastique (quand ils sont en bon état). En aucun cas, on installera de système de récupération d'eau de pluie sur un toit en cuivre ou en aluminium. Ces deux métaux sont solubles au contact de l'acidité de l'eau et peut rendre l'eau toxique et dangereuse pour la santé. Idem pour les matériaux synthétiques et le goudron qui ne sont pas à utiliser. Quant au bois, il n'est pas non plus indiqué, car il absorbe l'eau en partie (on a une perte de 5 %), il la colore et y favorise le développement de bactéries. Idem pour le toit végétal (Quotatis 2015).

Un toit imperméable donnera un fort ruissellement d'eau de bonne qualité qui peut être utilisée pour tous les usages différents. Les types de toit sont détaillés dans le Tableau 1-1 et ces pertes sont généralement rassemblées en un « coefficient de ruissellement ». Et les surfaces petites ont des coefficients de ruissellement assez constants.

Tableau 1-1. Caractérisation des différentes types de toit (Martinson 2007)

Type	Coefficient de ruissellement	Remarques
Tôle ondulée	>0,9	Qualité excellente de l'eau. La surface est lisse et les températures élevées contribuent à stériliser des bactéries.
Tuile (vitrage)	0,6-0,9	Bonne qualité de l'eau. Tuile non-vitré peut abriter la végétation. La contamination peut exister dans le rejoint.

Plaques d'amiante	0,8-0,9	Bonne qualité dans la plaque nouvelle. Pas de preuves d'effets cancérogènes par ingestion. Toits âgés abritent moules.
Organique (Chaume, cadjan)	0,2	Mauvaise qualité de l'eau (> 200 FC / 100ml). Forte coloration en raison de la matière organique dissoute.

Pour les matériaux des toitures à Paris, dans le quartier de l'Île-de France par exemple, on utilise principalement des toitures en zinc, en tuile, en ardoises et des toits terrasses (cf. Figure 1-2). Les proportions de différents matériaux de couverture ne vont probablement pas varier d'une manière significative dans les prochaines années, en raison des contraintes d'urbanisation et de règles architecturales concernant la protection des monuments historiques et de leur environnement (Gromaire *et al.*, 2002).

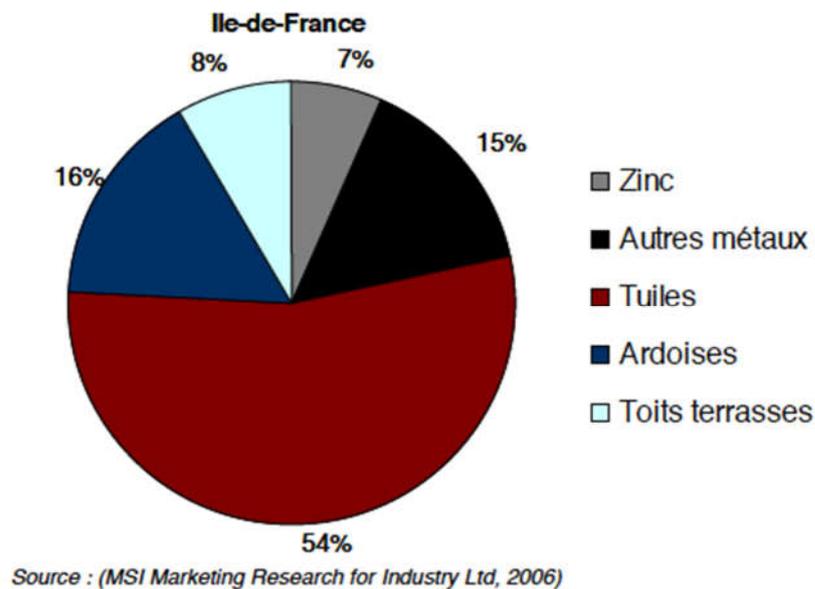


Figure 1-2. Utilisation des différentes familles de matériaux de couverture dans le quartier de l'Île-de France (Pauline Sainte, 2010)

Pour Tianjin, comme des autres villes du nord de la Chine, en raison des faibles précipitations, des fortes différences de température entre l'hiver et l'été et de la sécheresse dans certaines zones, les matériaux à faible conductivité thermique sont utilisés pour réduire la dissipation thermique du toit. De plus, les toits plats permettent généralement d'économiser des matériaux de construction (Li *et al.*, 2012). Les tuiles en terre cuite et en ciment sont le plus souvent utilisées comme matériaux de toiture, en particulier dans certaines villas ou endroits susceptibles de provoquer des incendies (Chen *et al.*, 2012).

### **2.1.2 Le système d'acheminement de l'eau**

L'eau provenant du toit doit être transmise au réservoir de stockage par un système d'acheminement de l'eau. Il consiste normalement en deux parties : les gouttières et les descentes pluviales. La qualité de ce système d'acheminement est également un facteur important pour le rendement du dispositif de récupération d'eau de pluie (Doyle 2008). Les gouttières définissent la limite supérieure de l'intensité des précipitations qui peuvent être transmis au réservoir de stockage. Le débit limite par la friction et le niveau de l'eau va augmenter avec le débit jusqu'à la hauteur limite. Cette hauteur est critique. Si elle est trop faible en utilisant une petite gouttière, la perte est importante. Les matériaux les plus utilisés sont, le zinc, l'acier, la fonte et le PVC (Quotatis 2015).

### **2.1.3 Le prétraitement**

Avant que l'eau pénètre dans le réservoir, il peut y avoir une étape de prétraitement. Cette étape n'est pas nécessaire, mais y recourir peut effectivement optimiser la qualité de l'eau stockée, faciliter la maintenance et augmenter la durée de vie du système de stockage. Les prétraitements le plus souvent rencontrés restent une filtration et un déviateur des premières eaux ruisselées (dit dispositif de *first flush*).

### **2.1.4 Le réservoir de stockage**

Les cas étudiés présentent une gamme de réservoirs étendue (différentes capacités de stockage, différentes techniques de construction...). Une certaine corrélation entre la taille des réservoirs et la pluviométrie a pu être constatée (Mechell, 2009). Les matériaux de construction utilisés sont aussi fonction des moyens financiers des bénéficiaires et/ou des porteurs de projets : ferrociment ou béton, bâche et torchis, utilisation de moules, armatures métalliques. Le prix des matériaux de construction est également variable selon les régions et ils sont plus ou moins accessibles (transport) (Arene, 2009).

### **2.1.5 La distribution et le traitement**

Les eaux qui stockent dans la cuve sont ensuite distribuées pour son usage à l'intérieur et/ou à l'extérieur, généralement par le système de pompage si nécessaire. Un filtre mécanique peut éventuellement être placé après la pompe qui retiendra toutes les petites particules de poussière. Il faut noter que c'est interdit d'installer une liaison fixe entre le système d'eau de pluie et le circuit alimenté en eau de distribution, ceci afin d'éviter que l'eau de pluie moins pure ne se mélange à l'eau de distribution. Pour le système de RUEP simple, la distribution de l'eau se fait manuellement par un robinet installé sur la cuve.

Pour les usages de l'eau et les exigences de la qualité différentes, les traitements dans la cuve sont variables. Les méthodes les plus courantes sont d'une désinfection ultra-violet (UV), d'une chloration, d'une élévation de température ou de la filtration sur charbon actif

ou sur sable. Nous pouvons également envisager de combiner avec des méthodes de prétraitement pour améliorer la qualité de l'eau, qui seront présentées en détail dans la section suivante (section 3.4.1).

## **2.2 Usages des eaux de ruissellement de toiture**

Les eaux de toitures collectées et stockées temporairement sont actuellement de plus en plus utilisées, aussi bien dans les pays développés que dans les pays en développement. Les motivations d'un tel emploi sont notamment liées à la raréfaction de la ressource hydrique d'origine naturelle (climat désertique ou subdésertique) ou anthropique (urbanisation, développement industriel) et à sa bonne gestion.

Selon le contexte, l(es) usage(s) de l'eau de ruissellement est(sont) différent(s). Des eaux de ruissellement de toiture sont utilisées pour tous les usages y compris pour la boisson dans les régions à fort stress hydrique ou certains pays en développement. L'eau de pluie peut être utilisée réglementairement, après un traitement adéquat (ultrafiltration, osmose inverse...), pour obtenir de l'eau potable dans certains pays, en Chine, au Brésil, en Ouganda, à Hawaii et Texas aux États-Unis... En Ouganda où le réseau hydrographique superficiel est relativement pauvre et les eaux souterraines présentent des teneurs élevées en métaux lourds, l'eau de pluie peut constituer la seule source d'approvisionnement en eau dans certains secteurs (Martinson, 2007). Au Sri Lanka où les ressources en eau sont abondantes alors que l'accès à l'eau pose des problèmes localisés, dans certaines régions, les usages des eaux de ruissellement de toiture incluent la boisson après différents types de traitements (chloration, filtration et/ou ébullition) (de Gouvello, 2012).

Pour les régions où le système d'adduction en eau potable est bien développé ou les pays développés, l'eau de pluie récupérée est utilisée comme une ressource complémentaire et n'est pas considérée comme potable dans les réglementations nationales (Allemagne, Angleterre, Australie, Brésil, France...). Dans ce cas, en plus des utilisations traditionnelles telles que le jardinage, l'aménagement paysager ou l'irrigation, les autres utilisations non potables sont aussi considérées. Il s'agit de : chasses d'eau pour les toilettes, lavage du linge, lavage des véhicules (s'il est autorisé), lavage des trottoirs et rues, nettoyage des patios, miroirs d'eau, systèmes d'air conditionné, réserves incendies, voire eau chaude sanitaire comme en Australie ou refroidissement des tours industrielles. En France, l'eau de pluie n'atteint pas les critères de potabilité, dépassant le plus souvent, sur au moins deux critères (acidité et concentration en ammonium), les valeurs limites de potabilité (Miquel, 2003). Selon l'arrêté ministériel du 21 août 2008, l'eau de pluie récupérée en aval de toitures inaccessibles (donc initialement sans contact direct avec l'homme) peut être utilisée en extérieur pour l'irrigation et l'entretien des espaces verts et en intérieur pour l'évacuation des excréta et le lavage des sols (De Gouvello, 2011). Deux types

d'installation de système de la RUEP en maison individuelle visant deux types d'usage sont recommandés : des installations simples, destinées à des usages extérieurs comme l'arrosage, et des installations plus élaborées, desservant l'intérieur de la maison pour tout ou partie de ces différents usages : alimentation des chasses d'eau de toilettes, lavage des sols, et, lave-linge <sup>1</sup>(de Gouvello, 2015).

Il faut noter que les usages de l'eau sont associés à des exigences de qualité spécifique. En fonction de l'usage visé, des critères visant à disposer d'une qualité adéquate sont parfois proposés au travers de guides. Quel que soit l'usage, le principe est que l'utilisation de l'eau de pluie ne doit pas présenter de risque inacceptable pour la santé publique.

### **3. Qualité des eaux de ruissellement de toiture**

Une introduction générale sur la variabilité de la qualité des eaux de ruissellement de toiture est nécessaire. Cette section concerne la présentation des voies des contaminations, des caractéristiques et des exemples de qualité de l'eau de ruissellement de toiture, des facteurs influençant la qualité des eaux de toiture et des traitements pour améliorer la qualité dans un système de RUEP.

#### **3.1 Les voies des contaminations des eaux de toiture**

Des contaminants chimiques et microbiologiques peuvent être présents en quantité variable dans les eaux de toiture et influencer ainsi directement la qualité de celles-ci. En considérant la qualité des toitures, il est essentiel d'observer les voies des contaminations et les différents types de contaminants.

Lorsque l'eau de pluie (ou l'eau météorite) tombe, elle se charge dans l'atmosphère des poussières qui s'y trouvent puis elle ruisselle sur les toitures.

---

<sup>1</sup> L'arrêté du 21 août 2008 stipule que l'usage « lavage du linge » est autorisé « à titre expérimental » et moyennant la mise en place d'un « traitement adapté ».

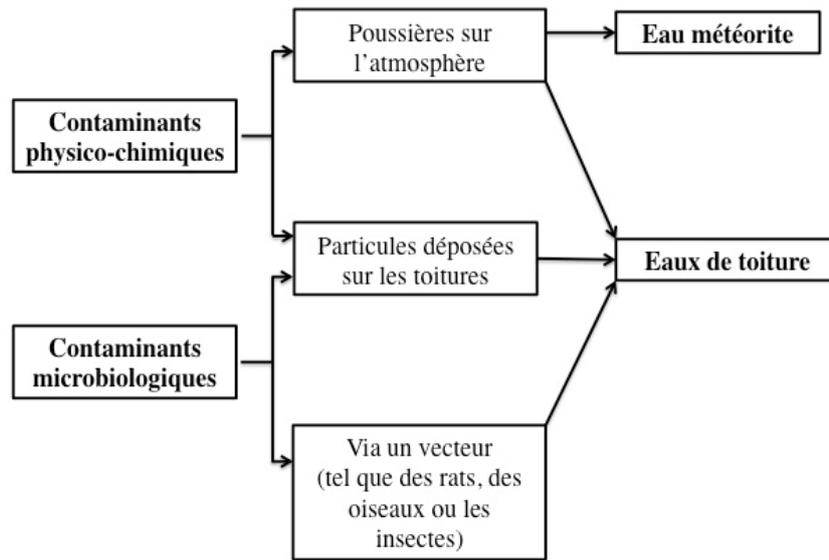


Figure 1-3. Voies de contaminations des eaux de toiture

Comme indiqué sur la Figure 1-3, il y a trois voies de contamination pour les eaux de toiture : la pluie se charge dans l'atmosphère de poussières, cette eau météorique lessive les toitures et entraîne avec elle les particules qui y sont déposées, et des animaux (rats, oiseaux ou insectes) s'activent directement sur la toiture.

L'eau météorique est généralement considérée comme non polluée, ou du moins non polluée de manière significative. Sa qualité peut néanmoins varier en fonction de la zone géographique considérée et de ses caractéristiques. Le lessivage de toiture est la voie de contamination la plus directe et la plus importante. Les particules, les micro-organismes, les métaux lourds et les substances organiques, accumulées sur les toits, peuvent grandement affecter la qualité de l'eau de pluie récupérée. 75 à 85 % de la pollution contenue dans l'eau pluviale sont imputables au ruissellement, 15 à 25 % étant déjà contenus dans la pluie météorique (Vialle, 2011).

Les matériaux lessivés sur la toiture peuvent provenir de plusieurs sources. La majorité de la contribution proviendra des matières qui s'accumulent sur la toiture ou sont emportés par le vent pendant l'évènement pluvial. Les matières accumulées peuvent être déposées par le vent, après avoir été remises en suspension par le passage des véhicules, ou être tombées des arbres ou déposées par un animal (ou une personne) ayant accédé à la toiture.

Si la toiture est en matériaux périssables, elle peut contribuer à la charge de la pollution. On constate ce fait surtout lorsque les matériaux de toiture sont en chaume. Lorsque les toits sont en goudron, amiante-ciment (là où c'est autorisé) et acier galvanisé (en particulier lorsqu'il rouille) des particules issues de ces matériaux peuvent également ajouter des matières dans l'eau entrante.

Des gouttières sales peuvent contenir d'autres débris. Si on laisse ceux-ci entrer dans le système de stockage, ces matières – souvent organiques – constitueront une source d'éléments nutritifs potentiellement abondante pour les bactéries et les insectes qui pourrait même entraîner une contamination microbiologique.

### **3.2 Variabilité de la qualité de l'eau de ruissellement de toiture**

Des contaminants physico-chimiques et microbiologiques sont ou peuvent être présents en quantité variable dans les eaux de toiture et influencer ainsi directement la qualité de celles-ci. Ils peuvent notamment être dissous ou contenus/adsorbés sur les particules ou poussières en suspension dans l'eau de toiture et responsables de sa turbidité.

Les caractéristiques et des exemples de valeurs rencontrées dans la littérature pour les eaux de ruissellement de toiture sont fournis dans le Tableau 1-2 pour les paramètres physico-chimiques et le Tableau 1-3 pour les contaminations microbiologiques. Ces deux tableaux peuvent fournir une référence pour la qualité de l'eau de ruissellement de toiture. Dans l'objectif de caractériser la qualité de l'eau de ruissellement de toiture, les indicateurs peuvent être regroupés par :

- Indicateurs de la pollution particulaire : turbidité, MES ;
- Indicateurs de la pollution dissoute : carbone organique total (COT), dureté, alcalinité ;
- Indicateurs de la composition de l'eau : pH, conductivité, température, couleur, oxygène dissous (OD)...
- Indicateurs influençant les activités des microorganismes : demande biochimique en oxygène de 5 jours (DBO<sub>5</sub>), OD, température, pH...
- Indicateur de la qualité microbiologique : coliformes totaux (ou fécaux), *E. coli*, présence de pathogènes ...

Tableau 1-2. Paramètres physico-chimiques dans les eaux de ruissellement de toiture

Référence	Coombes et al. 2000	Despins et al. 2009	Doyle, 2008	Dobrowsky et al. (2014)	Jordan et al., 2008	Lee et al., 2010	Lee <i>et al.</i> , 2012	Mendez et al. 2011	Sazakli et al.,2007	Schriewer et al., 2008	Spinks et al.,2006	Vialle, 2011	
Pays	Australie	Canada	Rwanda	Afrique du Sud	USA	Corée du Sud	Corée du Sud	États-Unis	Grèce	Allemagne	Australie	France,	
Turbidité (NTU)	-	0,9-2,6	2,29-8,93	-	2,0/5.5	-	-	-	-	-	0,5-5,0	0,5-6,1	
MES (mg. L <sup>-1</sup> )	17,1-178	-	-	-	-	3,4-52,1	10-500	12-105	-	-	-	-	
COT (mg. L <sup>-1</sup> )	-	1,8-8,5	-	-	2,8/15,6	-	3-55	-	-	1,0-51	-	0,5-5,1	
Nitrate (mg. L <sup>-1</sup> )	-	1,5-2,0	-	1,0-2,3	1,9-3,3	-	-	1-2,5	-	-	-	-	
Dureté (mgCaCO3.L <sup>-1</sup> )	-	-	-	-	22/40,6	-	-	-	24-74	-	-	0,01-0,58	
pH	5,9-6,1	7.3+/-1	6,4-7,7	4,5-6,5	7,1/7,4	6,7-7,8	5,8-8,5	6,2-6,9	7,6-8,8	5,8-8,4	5,2-10,2	5,6-10,4	
Conductivité (µS.cm <sup>-1</sup> )	-	-	-	-	-	50-340	-	-	56-220	10-242	-	13,5-235	
Couleur (mg Pt. L <sup>-1</sup> )	-	11,1-32,8	-	-	-	-	-	-	-	-	2-25	5-39	
Métaux (µg. L <sup>-1</sup> )	Zn	-	100-500	-	0,6-15,8	0-5300	120-280	131-428	45-375	10-77	300-3000	3-17000	-
	Fe	0-100	-	-	-	0-2200	-	154-302	100-900	6-40	-	50-780	-
	Cu	-	0-1000	-	0,7-3,7	0-540	70-120	34-59	5-200	2,5-13	-	5-580	-
	Cr	-	-	-	0,5-1,7	-	0-10	-	-	1,3-4,8	-	1-8	-
	Cd	-	0-5	-	0,06-0,6	-	0-4	-	-	0,1-0,19	0,5-0,8	0,2-6,7	-
	Mn	-	-	-	0,1-1,8	0-150	70-170	-	-	0,5-73	-	-	-

Pb	<10	0-10	-	0,1-0,4	0-340	10-40	10-12	1,5-8,5	2,0-6,9	5-31	1-6	-
As	-	0-1	-	0,3-0,8	0,24	0-6	-	-	-	-	1-7	-

Tableau 1-3. Microorganismes dans les eaux de ruissellement de toiture

	Albrechtsen , 2002	Coombe s et al., 2006	Despins et al., 2009	Dobrowsky et al., 2014	Jordan et al., 2008	Lee et al., 2010	Man-van der Vliet, 2014	May et Prado , 2006	Sazakli et al., 200 7	Spinks et al., 200 6	Simmon s et al., 2001	Vialle et al., 2011
	Pays-Bas	Australie	Canada	Afrique du Sud	USA	Coré e du Sud	Pays-Bas	Brésil	Grèce	Australie	Australie	France
Flore totale à 37°C(UFC/100mL)	1,3*10 <sup>3</sup> - 1,1*10 <sup>4</sup>	0-3000	-	-	7,8*10 <sup>7</sup> - 7,6*10 <sup>9</sup>	-	-	-	0-100	-	1- 1,3*10 <sup>5</sup>	10 <sup>2</sup> -10 <sup>6</sup>
Bactéries coliformes (UFC/100mL)	-	-	1-398	0-10 <sup>5</sup>	2,2*10 <sup>5</sup> - 5,6*10 <sup>7</sup>	0- 320	-	70±24	0-570	0-10 <sup>5</sup>	1- 1,9*10 <sup>4</sup>	-
Coliformes fécaux (UFC/100mL)	-	-	1-400	-	-	-	-	-	-	-	1-840	-
<i>E. coli.</i> (n/ml)	4-900	-	-	0-10 <sup>4</sup>	0-8,8	0-60	1-10 <sup>3</sup>	-	0-250	0-99	-	10- 5500
Entérocoques (n/ml)	-	-	-	0-890	317- 3,2*10 <sup>5</sup>	-	-	19±7	0-32	0-1000	1- 4,9*10 <sup>3</sup>	10-10 <sup>4</sup>
Pathogènes (n/100ml)	<i>Aeromonas spp</i>	1000-3000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Campylobacter jejuni</i>	-	-	-	-	-	0-10	-	0	-	-	-
	<i>Cryptosporidiu m spp</i>	0-5000	-	-	-	-	0-1	-	-	-	-	-

	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	1-3000	0-330	-	-	-	-	-	4±16	0	-	-	-
	<i>Legionella</i>	-	-	-	-	-	-	0-1000	-	-	-	-	-

### 3.2.1 Contaminants physico-chimiques

Comme l'eau de pluie est le résultat d'un processus de distillation naturel, sa qualité chimique s'approche de celle de l'eau distillée. Elle contient peu de minéraux dissous et presque pas de matières solides en suspension. Une fois que la pluie a ruisselé sur le toit, les contaminations sont ajoutées dans les eaux de toiture.

- **Acidité (ions  $H_3O^+$ )**

Le pH des eaux de toiture est généralement acide (pH compris entre 4.5 et 6.5) (Meera & Ahammed, 2006), ce qui est lié au fait que l'eau de pluie est intrinsèquement acide (en raison de la dissolution du  $CO_2$  atmosphérique). Le degré d'acidité de l'eau de toiture est donc directement conditionné par celui de l'eau de pluie, qui peut varier en fonction de la présence dans l'atmosphère de gaz de type oxydes de soufre ou d'azote liés à des émissions de polluants et qui vont réagir avec le dioxygène et l'eau dans l'atmosphère pour donner des espèces acides (phénomène des pluies acides). Le contact de l'eau de pluie avec le toit peut cependant augmenter légèrement le pH, conduisant ainsi à un pH légèrement moins acide pour l'eau de toiture (Meera & Ahammed, 2006) selon la nature du matériau mis en œuvre. Ainsi, des variations de pH de l'eau de toiture ont été constatées pour des toits en béton, fibrociment, tuile, zinc et bois ; en particulier, pour une même pluie, le pH de l'eau en aval d'une toiture en zinc est inférieur d'une unité pH par rapport à celui d'une eau issue d'une toiture en fibrociment (Förster, 1999). Cela serait lié à la dissolution d'éléments du toit en fibrociment ou, dans le cadre d'un toit en bois, à la production d'ions  $H_3O^+$  due à la décomposition du matériel organique pouvant être trouvé en plus grande quantité sur ce type de toit (Chang et al., 2005).

- **Cations et anions**

Des cations comme le  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{++}$ , et des anions comme  $Cl^-$ ,  $SO_4^{--}$ ,  $NO_3^-$  sont toujours présents dans les échantillons d'eau de toiture (Zobrist et al., 2000). Les concentrations les plus élevées sont constatées pour le  $Na^+$ ,  $Ca^{++}$ . Le passage de l'eau de pluie sur certains matériaux (tuiles en ciment notamment) peut favoriser le relargage de certains ions (calcium, potassium) (Förster, 1998). Les différences de concentrations d'ions dans les eaux de toitures constatées selon la nature du toit ont clairement indiqué que l'origine principale des ions est le matériau de toiture lui-même, le dépôt sec sur la toiture en provenance de l'atmosphère semblant jouer un rôle minoritaire (Meera & Ahammed, 2006).

- **Matières en suspension**

La pollution dans l'eau de pluie issue de la toiture est particulière. Les particules présentes sur la surface du toit sont mises en suspension par les précipitations. Dans les zones rurales des pays les moins avancés, les matières en suspension ne sont en général pas toxiques, mais elles peuvent contenir des microorganismes et des matières organiques qui présentent un risque sanitaire en plus d'un aspect visuel peu esthétique.

Dans les zones urbaines, les sédiments peuvent contenir des métaux lourds et des particules provenant des combustions qui sont particulièrement préoccupantes.

Le ruissellement de toiture peut être très chargé en particules, en particulier le ruissellement initial (Yaziz et al., 1989). Cependant, dans le stockage, les systèmes de prélèvement d'eau de pluie ont tendance à produire de l'eau conforme aux seuils préconisés par l'OMS (Simmons et al., 2001 ; Handia, 2005 ; Ariyananda, 2005). La principale raison de ce phénomène est que l'eau stockée décante, les matières en suspension se déposent en 24 heures pour former un sédiment au fond du stockage qui peut être enlevé périodiquement s'il devient problématique (Lücke, 1998 ; Spinks et al., 2005).

La filtration peut être efficace pour éliminer la majorité des matières en suspension qui comprennent la plupart des matières organiques telles que les feuilles sur la toiture. Elle est cependant moins efficace pour éliminer les matières minérales très fines.

- **Métaux lourds**

La présence de métaux lourds sous forme particulaire ou dissoute dans l'eau de toiture est importante à considérer en raison de la toxicité démontrée de ces composés. Il est notamment possible de trouver du zinc, du plomb, du cadmium et du cuivre dans les eaux de toiture (Lamprea et Ruban, 2011 ; Lye, 2009). Les concentrations de ces métaux peuvent être reliées au type de matériau du toit, notamment pour le zinc, le cadmium et le plomb (Robert-Sainte, 2009). Les toitures en zinc (contenant aussi du cadmium en quantité mineure), largement répandues à Paris car concernant 80% du parc de toitures (He, 2002) conduisent ainsi à des eaux de toiture chargées en ces métaux, ce qui semble lié à l'érosion et à la corrosion du matériau (Förster, 1996; Van Metre and Mahler, 2003) (Karlén et al., 2002). La corrosion des toitures par les eaux de pluie est intimement liée au pH de l'eau de pluie. Par exemple, plus le pH de l'eau de pluie est acide, plus l'eau de toiture est riche en zinc (Horváth, 2013). L'origine atmosphérique directe de ces métaux semble par contre mineure (Davis et al., 2001).

- **Composés organiques à l'état de traces et composés**

Divers polluants, tels que les phytosanitaires utilisés pour l'agriculture ou des HAP liés notamment au rejet de gaz d'échappement et aux émissions atmosphériques de certaines industries, sont retrouvés dans les eaux de toiture (Tsakovski et al., 2010 ; Vialle et al., 2013). Ces polluants peuvent provenir directement de l'eau de pluie *via* le lessivage de l'atmosphère (Murakami et al., 2004) ; alternativement, les dépôts de temps sec peuvent être la source de la contamination (Polkowska et al., 2002). La contamination par les HAP semble plus importante en milieu urbain (Förster, 1998), ce qui reflète une production plus importante *in situ* de HAP dans ce milieu, liée notamment à la densité de la circulation automobile et du tissu industriel. Les eaux de toiture peuvent aussi contenir des biocides, issus des produits utilisés pour laver les toits, tels que les ammoniums quaternaires (Van de Voorde et al., 2012).

### 3.2.2 Contaminants microbiologiques

La qualité microbiologique est caractérisée par une grande variabilité. L'étude des contaminants microbiologiques des eaux de toit s'effectue soit indirectement via des indicateurs de contamination fécale, soit directement via les détections de pathogène.

- **Contamination fécale**

Les indicateurs de contamination fécale sont des micro-organismes dont la présence dans une eau est le signe d'une contamination par des matières fécales. En France, quatre flores bactériennes qui sont très présentes dans les matières fécales sont habituellement recherchées au laboratoire : les coliformes, les coliformes thermo-tolérants, les *Escherichia coli* et les entérocoques. Ces bactéries sont généralement sans danger. Mais la présence d'une pollution fécale montre la possible présence de pathogènes.

- **Présence de pathogènes**

La présence de micro-organismes potentiellement pathogènes pour l'homme (bactéries, virus, protistes, levures et moisissures, etc.) est possible. Une revue de la littérature permet de citer les types de pathogènes trouvés dans les eaux de pluie récupérée : *Legionella spp* (*Legionella*), *Salmonella spp*, *Mycobacterium avium*, *Shigella spp*, *Clostridium perfringens*, *Campylobacter spp* (*jejuni*), *Aeromonas spp*, *Pseudomonas spp* (*aeruginosa*), *Cryptosporidium spp* et *Giardia spp*.

La recherche de contaminants microbiologiques dans les eaux de toiture a fait l'objet de nombreuses études. Les résultats obtenus sont souvent difficiles à interpréter en raison de la diversité des protocoles expérimentaux mis en oeuvre (Meera and Ahammed, 2006). Néanmoins, les données montrent globalement une contamination microbiologique avérée des eaux de toiture, atteignant des niveaux souvent non-compatibles avec les exigences d'une eau potable (Gikas and Tsihrantzis, 2012 ; Mendez et al., 2010, 2011 ; Yaziz et al., 1989). Les germes en cause sont le plus souvent fécaux (Lye, 2009), avec une origine fécale d'origine animale (notamment issue des déjections d'oiseaux) (Göbel et al., 2007). Outre les coliformes fécaux et totaux et les entérocoques fécaux, il est aussi retrouvé fréquemment dans les eaux de toiture des flores totales (considérées comme un indicateur de pollution de l'eau), au sein desquelles se trouvent différents types de bactéries pathogènes relevant des familles *Pseudomonas*, *Aeromonas*, *Salmonella*, *Vibrio* et *Legionella*, ainsi que des protozoaires pathogènes de type *Giardia* et *Cryptosporidium* (Meera and Ahammed, 2006).

Les deux voies de contamination microbiologique des eaux de toiture sont les dépôts atmosphériques d'organismes et l'activité directe d'insectes, d'oiseaux et des petits mammifères. Toutefois les toits étant souvent relativement en hauteur, ils ont tendance à produire une eau plus propre que les autres surfaces (Duncan, 1995). La toiture (surtout la toiture en acier) est un environnement extrêmement hostile pour les bactéries fécales qui préfèrent vivre dans un environnement chaud, humide et à faible teneur en oxygène. Le toit en métal en plein de soleil va tuer efficacement un grand nombre des microorganismes, y compris les pathogènes. Les niveaux des indicateurs

microbiologiques de toitures métalliques sont généralement inférieurs à ceux des autres types de toit (Yaziz et al, 1989 ; Vasudevan et al, 2001).

### 3.3 Facteurs influençant la qualité des eaux de toiture

Deux types de facteurs affectent la présence de contaminants chimiques et/ou microbiologiques dans les eaux de toiture et donc au final leur qualité (Förster, 1996) :

Les facteurs liés au site d'étude qui influence l'état initiale de la toiture :

- *La nature du toit : le type de matériau, la rugosité, la surface du revêtement, l'âge, la résistance aux intempéries, la végétalisation, etc.* Un même paramètre peut avoir des effets opposés quant à la qualité chimique ou microbiologique de l'eau. Ainsi, la nature métallique des toits est un critère pénalisant pour la concentration en métaux, mais protège du risque bactériologique en raison de leur température plus élevée (Mendez et al., 2011 ; Yaziz et al., 1989). *A contrario*, les eaux en aval de toitures végétalisées sont riches en carbone organique dissous (COD), particulièrement celles issues des toitures extensives, ainsi qu'en éléments nutritifs (azote, phosphore) mais faiblement concentrées en cuivre, zinc et plomb (Berndtsson et al., 2006) en raison d'un phénomène de rétention des polluants, effet qui s'efface avec l'âge de la toiture (Berndtsson et al., 2009).
- *Les caractéristiques architecturales du toit : la taille, l'inclinaison et l'exposition* (par rapport notamment aux vents dominants et à l'ensoleillement) (Chang et al., 2004). Ainsi, plus un toit est pentu, plus les eaux recueillies en aval sont concentrées en matière en suspension (Gikas and Tsihrintzis, 2012). De plus, l'état de l'exposition de la toiture influence l'évolution de la qualité en cours d'évènement (Förster, 1999).
- *L'emplacement du toit* en milieu urbain ou rural et notamment sa proximité de sources de pollution chimique (industries polluantes) ou microbiologiques (zone arborée) et l'abondance d'animaux (rongeurs, insectes, oiseaux). Par exemple, les toitures en zone rurale sont enrichies en phosphore et en azote, contaminations ayant pour source les déjections d'animaux (oiseaux et insectes) (Gikas and Tsihrintzis, 2012 ; Göbel et al., 2007). Les influences de l'âge et de l'emplacement d'une toiture sur la qualité des eaux collectées en aval ne sont pas toujours avérées, des eaux issues de toitures expérimentales éloignées de sources ponctuelles d'émission de pollution et de végétation pouvant présenter des paramètres de qualité similaires à celles issues de toitures de bâtiments répondant à des critères d'emplacement opposés (Mendez et al., 2011).
- *L'entretien et le nettoyage de la toiture.* Plus cet entretien et ce nettoyage sont fréquents et réguliers, meilleure est la qualité de l'eau en aval, sauf si cet entretien est effectué avec des produits chimiques potentiellement toxiques.

- *Les contaminants chimiques ou microbiologiques libérés par les gouttières*, qui peuvent ainsi contribuer à une mauvaise qualité de l'eau de toiture. Ainsi, par exemple, la présence d'une gouttière en zinc, type de gouttière le plus répandu, est une source de contamination affectant la concentration en zinc de l'eau récupérée (Förster, 1999). Les gouttières en acier galvanisé sont également une source importante de pollution en zinc dans les eaux récupérées en aval de toiture (Horváth, 2013).
- *La capacité ou non des contaminants microbiologiques à être stérilisés par le rayonnement solaire.*

Les facteurs propre à l'événement pluvieux qui concernent la caractéristique de pluie :

- *La nature des précipitations* : leur intensité et la présence associée de vent. L'intensité de la pluie est le facteur principal responsable du lessivage des toitures (Cristina and Sansalone, 2003).
- *Les autres caractéristiques en lien avec la météorologie* : la saison, le type de climat, la durée de temps sec précédant la précipitation (ADD : *Antecedent Dry Days* en anglais) ... Plusieurs autres études ont mis en évidence des niveaux de contamination microbiologique variable au cours de l'année (Simmons et al., 2001 ; Sazakli et al., 2007 ; Jordan et al., 2008 ; Despins et al., 2009). Généralement, l'été est caractérisé par une dégradation de la qualité physico-chimique et microbiologique par rapport à l'hiver (Jordan et al., 2008 ; Despins et al., 2009).
- *La concentration de contaminants chimiques dans la pluie* (pouvant être en lien avec la pollution atmosphérique). Les polluants susceptibles de se retrouver dans les eaux météorites des zones présentant une forte activité industrielle ou un fort trafic sont les composés organiques volatils et les HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques). Dans les zones présentant une activité agricole, les pesticides peuvent être significativement présents (Thomas and Greene, 1993).
- *Les propriétés chimiques et physiques des contaminants chimiques* : la pression de vapeur, la solubilité dans l'eau, la spéciation chimique (forme particulaire, dissoute), la constante de Henry, la demi-vie, etc.

### **3.4 Traitements pour améliorer la qualité dans un système de RUEP**

Il existe de nombreuses façons d'optimiser la qualité de l'eau de ruissellement de toiture. Des méthodes de prétraitement peuvent être utilisées pour éliminer les contaminants avant que l'eau ne coule dans la cuve de stockage. En aval du stockage, d'autres méthodes existent : désinfection, filtration fine... Pour différents usages et différentes exigences de qualité, ces méthodes peuvent être utilisées individuellement ou de manière combinée.

### 3.4.1 Méthode de prétraitement- prévention des contaminants entrant dans la cuve

Pour empêcher les contaminants de pénétrer dans la cuve de stockage, deux types de méthodes de prétraitement sont souvent utilisés : un déviateur de premier flux (ou *first flush*) et un dispositif de filtration.

- **Déviateur de premier flux (*first flush*)**

Le déviateur de *first flush* est utilisé pour rejeter un volume initial du ruissellement du toit. Grâce à ce rejet, la plupart des polluants associés à la surface du toit (dépôts humides et secs, matières organiques) n'entre pas dans la cuve de stockage. Plusieurs travaux indiquent que les concentrations de particules les plus élevées sont présentes dans la partie initiale des événements de ruissellement du toit ou dans le *first flush* (Lee et al., 2002 ; Spinks et al., 2003 ; Martinson 2007). Ce dispositif est un élément important dans la plupart des recommandations internationales pour la récupération de l'eau de pluie en aval de toiture, notamment en Australie, Canada et États-Unis (en particulier : guides des États de Géorgie, Hawaï, Oregon, Texas). Un seul déviateur de *first flush* bien entretenu permettrait d'améliorer essentiellement la qualité de l'eau de pluie (Meera et Ahammed 2006; van der Sterren et al. 2013). Une étude réalisée par Gardiner et al. (2004) sur l'efficacité de déviateurs de premier flux montre que l'abattement en termes des indicateurs microbiologiques varie de 9 à 62%. Cet effet de *first flush* est abordé plus en détail au chapitre 2.

- **Filtration en amont du stockage**

La norme DIN 1989 – 2 en Allemagne propose que pour les traitements de l'eau de pluie plus rigoureux, requis du fait de la nature des surfaces de collecte et/ou de l'usage prévu de l'eau de pluie, les procédés suivants sont cités : floculation, floculation-filtration, flottation, procédés biologiques, filtration plus poussée, désinfection, filtration sur membrane. En Angleterre, dans la base de données nationale Water Technology List (WTL), la mise en place d'un système de filtration en amont de la cuve est préconisée. Aux États-Unis, en Ontario, le « Green Plumbing and Mechanical Code Supplement » prescrit un filtre de 100 µm en cas d'usage notamment pour les WC et l'arrosage goutte à goutte. En France, la seule obligation fixée par l'arrêté du 21 août 2008 est l'existence d'un « dispositif de filtration inférieure ou égale à 1 millimètre mis en place en amont de la cuve ». Les principaux types de tamis en amont du stockage sont indiqués dans le Tableau 1-4.

Tableau 1-4. Principaux types de tamis en amont de stockage (ASTEE, 2015)

Type de tamis	Commentaires
Grille intégrée à la descente	Mise en œuvre rapide Pas d'emprise au sol Fréquence d'entretien élevée pour maintenir la capacité d'écoulement Risque de perte d'une partie du flux collecté Nécessaire sur chaque descente
Boite indépendante de type panier	Ne convient pas au stockage aérien extérieur Pas de perte du flux d'eau

	Entretien régulier
Boite indépendante « autonettoyante »	Perte d'une partie du flux collecté Fréquence d'entretien faible
Grille intégrée au regard d'accès au stockage	Installation compacte Option possible de cycle de lavage automatisé Prévoir d'assurer l'accès à la cuve

### 3.4.2 Méthodes de traitement de l'eau stockée

Plusieurs méthodes de traitement dans la cuve ou de prétraitement en amont de la cuve existent pour traiter l'eau de pluie stockée afin d'optimiser sa qualité

- **Désinfection combinée avec filtration**

L'utilisation d'ions d'argent antimicrobiens en combinaison avec un bassin de décantation et de filtration a été évaluée par Adler et al. (2011) : ce système de traitement a réussi à réduire les coliformes totaux entre 62,5 et 99,9%. Kim et al. (2005) ont conçu un système de filtration avec une membrane métallique immergée dans une cuve. La filtration combinée avec la désinfection UV a également été utilisée dans un système de traitement. (Jordan et al., 2008). Ce système est efficace pour réduire les coliformes totaux, les *E. coli* et les entérocoques mais il a eu un impact marginal sur la réduction de la flore totale.

- **Filtration de l'eau de pluie par du charbon actif granulaire**

La filtration avec charbon actif granulaire peut également être utilisée dans le traitement de l'eau de pluie. Grâce à la grande surface spécifique du charbon actif, ce traitement permet d'éliminer les microbes et les polluants chimiques. Un système de traitement au charbon actif en laboratoire a été développé par Areerachakul et al. (2009) au traitement de l'eau de pluie de toiture. La filtration sur charbon actif en grains (GAC) a été utilisée comme prétraitement à la microfiltration (MF) pour éliminer la matière organique dissoute (DOC).

- **Traitement thermique de l'eau de pluie**

Dans les pays développés, en particulier l'Australie, l'eau de pluie est utilisée pour fournir de l'eau chaude. Des travaux ont montré l'eau chaude stockée permet l'inactivation de micro-organismes (Despins et al., 2009).

- **Traitement de l'eau de pluie avec la radiation solaire**

Le traitement de l'eau par le rayonnement solaire est également utilisé, notamment en milieu rural des pays en développement. La simplicité et le coût de la technique font que cette méthode est largement utilisée (Amin et Han, 2009). Elle est reconnue par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) comme méthode de traitement de l'eau et de bonne conservation à domicile.

## **4. La RUEP en France et en Chine : comparaison à différentes échelles territoriales**

Afin de caractériser la qualité de l'eau, étudier les facteurs potentiels et généraliser les résultats, notre recherche se propose de mettre en place un dispositif expérimental sur des différents sites afin de refléter différentes conditions climatiques et environnementales. De précédentes études ont en effet mis en évidence que le contexte environnemental, climatique et pluviométrique influence sensiblement la qualité des eaux issues de toiture. Comme cette thèse s'inscrit dans cadre d'une coopération entre le LEESU (Laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains, France) et la TAES (*Tianjin Academy of Environmental Sciences*, Chine), elle permet une comparaison entre un cas où la pluviométrie est bien répartie toute l'année (l'île de France en France) et un cas, au contraire, où elle est saisonnière (Tianjin en Chine). Il importe donc de fournir ici des éléments de contexte généraux et de caractérisation relatifs aux deux sites concernés, à savoir l'Île-de-France et la région de Tianjin.

### **4.1 Contexte général : ressources en eau, climatologie et niveau de pollution**

Les conditions climatiques et les niveaux de pollution des deux régions sélectionnées sont très différents. Nous les présentons ci-dessous. Cette section concerne d'abord les présentations du contexte général de la ressource en eau et du système de gestion de l'eau, puis présente leurs climats, les structures de précipitation et les niveaux de pollution sur les deux régions.

#### **4.1.1 Contexte général des ressources en eau en France et en Chine**

- **France**

La France métropolitaine est située à l'extrémité occidentale de l'Europe avec une superficie de 550 000 km<sup>2</sup> et comptant plus de 66,89 millions (2018). Le territoire métropolitain de la France offre une grande variété d'ensembles topographiques et de paysages naturels et le climat de la France métropolitaine est un climat varié du fait de sa position à l'extrême ouest du continent où se mêlent les influences climatiques de l'Atlantique, de la Méditerranée et du continent eurasiatique.

Le cycle de l'eau en France métropolitaine fait intervenir : 503 milliards de m<sup>3</sup> d'eau apportés par la pluie et la neige ; l'évaporation de 314 milliards de m<sup>3</sup> d'évaporation (60%) ; l'arrivée de 11 milliards de m<sup>3</sup> en provenance des pays voisins. Les précipitations annuelles moyennes en métropole s'échelonnent de 500 à 2000 millimètres en fonction de la situation géographique : elles sont minimales dans les secteurs de plaine éloignés des côtes, et maximales dans les zones de montagne et sur le littoral (source : <https://www.eaufrance.fr/les-volumes-de-precipitations>). La majorité de l'eau utilisée en France est destinée au refroidissement des centrales thermiques de production

d'énergie. Les autres grands usages de l'eau en France sont les suivants : l'alimentation des canaux, l'alimentation en eau potable, l'industrie, l'irrigation.

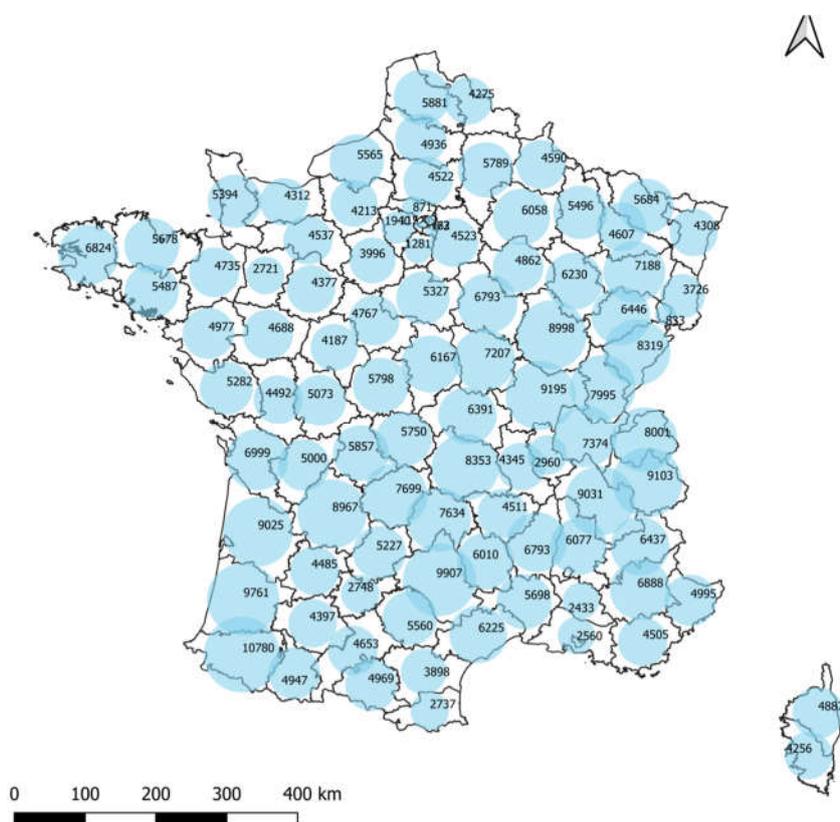


Figure 1-4. Carte des volumes des précipitations totales par département en France métropolitaine en 2016 (en millions de m<sup>3</sup>) (source : <http://www.cartograph.eaufrance.fr/donnees/1710522/2016>)

La gestion de l'eau est relativement complexe en France, et basée sur une organisation pilotée par 6 agences de l'eau à l'échelle du territoire national visant à une gestion intégrée de l'eau sur les grands bassins hydrographiques : utilisation rationnelle des ressources en eau, lutte contre la pollution et protection des milieux aquatiques.

- **Chine**

La Chine est un pays d'Asie de l'Est d'une superficie de 9 641 144 km<sup>2</sup> et comptant plus de 1,39 milliards d'habitants (2017). La densité moyenne de population de la Chine est de 142 hab./km<sup>2</sup>, variant de 10 hab./km<sup>2</sup> à l'ouest à 670 hab./km<sup>2</sup> à l'est (Wikipédia, 2017). La Chine comprend une immense variété de paysages, avec des plateaux (26%) et des montagnes (33%) à l'ouest, des plaines (12%) à l'est, des vallées (19%) et des collines (10%). Ainsi, elle comporte de nombreux climats : au nord, un climat sec avec de sévères hivers ; au centre, un climat plus tempéré ; au sud, un climat subtropical humide (Baidu Baïke, 2019).

Les ressources en eau de la Chine comprennent 2800 km<sup>3</sup>/an d'écoulement dans ses rivières (6<sup>ème</sup> rang mondial) et 828,8 km<sup>3</sup> d'eaux souterraines. Mais la ressource renouvelable, qui est inférieure à la somme des eaux de la surface et des eaux souterraines, est seulement de 2821,4 km<sup>3</sup>/an (2009). 80% de ces ressources se trouve dans le sud de la Chine. En 2008, le prélèvement total d'eau a été estimé à 311 km<sup>3</sup> (environ 20% de ressources renouvelables) et la demande se répartit entre les secteurs suivants: agriculture (62,4%), industrie (21,6%) et consommation domestique (13,6%), milieux aquatiques artificiels 2,4% ( Bulletin des ressources en eau de Chine,2016).

Les ressources en eau de la Chine sont touchées par des pénuries sévères et sujettes à des problèmes importants de pollution. Une population croissante et le développement économique rapide ainsi que l'application insuffisante de la réglementation ont accru demande en eau et pollution. Les ressources d'eau totale sont importantes (2800 km<sup>3</sup>), mais en raison de la grande population (1,39 milliard d'habitant en 2017), les ressources disponibles en eau par habitant et par an s'élèvent à 2014 m<sup>3</sup>, soit seulement 25% de la valeur moyenne mondiale, ce qui situe le pays au 114<sup>ème</sup> rang mondial De fait, la Chine est un pays durement frappé par la sécheresse. Les précipitations varient considérablement d'un endroit à l'autre, la tendance générale diminuant du sud-est au nord-ouest. Sur la côte sud-est, les précipitations annuelles sont supérieures à 1600 mm, alors qu'elles sont inférieures à 50 mm sur les grandes régions du nord-ouest (Figure 1-5). Les valeurs les plus faibles sont enregistrées à Toksun dans le bassin du Turpan, de 1980 à 2016, avec une moyenne de précipitations annuelles de 5,9 millimètres sur moins de 10 jours dans l'année. Le manque d'eau se fait particulièrement sentir dans le Nord, très aride, où vit près de la moitié de la population de la Chine et où la demande en eau excède de loin l'approvisionnement naturel ; la distribution des ressources en eau ne correspond pas à la répartition de la population et des terres cultivées (Xie, 2008).

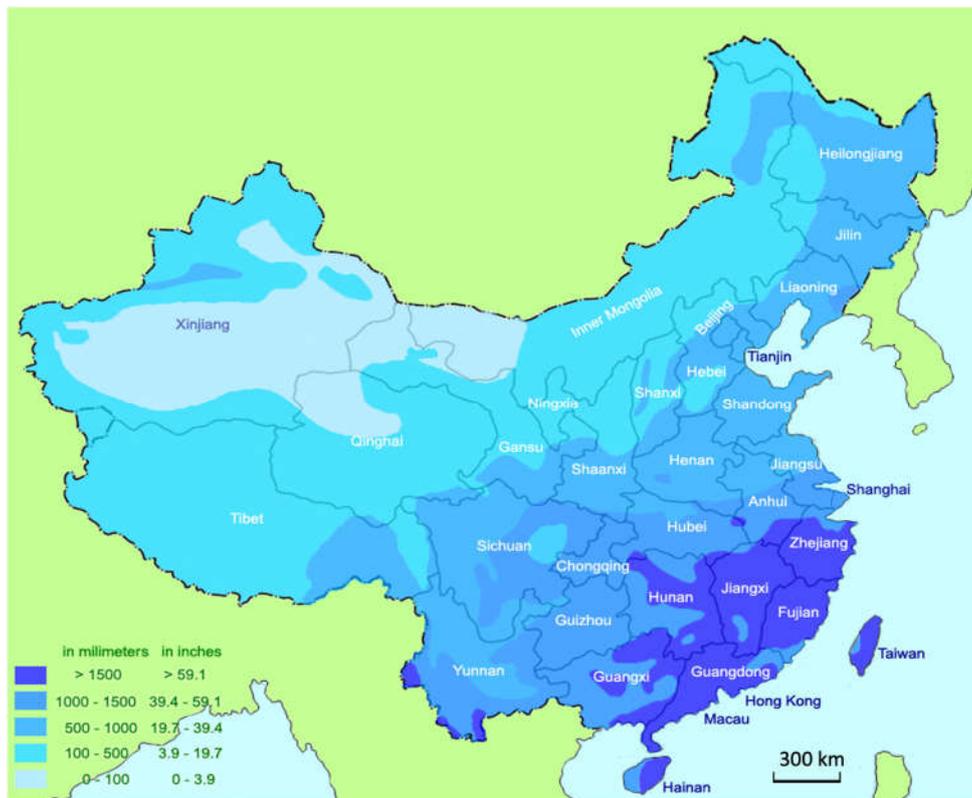


Figure 1-5. Précipitations moyennes en Chine (source : Wikipédia, 2019)

La détérioration de la qualité de l'eau est un problème majeur en Chine. Les émissions industrielles sont le plus grand contributeur de la pollution. L'insuffisance en matière de traitement des eaux usées, les déversements industriels, et l'utilisation intensive d'engrais et de pesticides agricoles constituent également d'importantes sources de pollution. Selon l'Administration de la Protection de l'environnement en Chine (SEPA) en 2006, 60% des rivières du pays souffrent de la pollution ne peuvent pas être utilisées en tant que source d'eau potable (Chen et Liu, 2007). Jusqu'en 2005, environ 110 villes sont confrontées à de grandes pénuries et la pénurie d'eau totale annuelle est de 6 milliards de mètres cubes (People.cn, 2014).

Le système de gestion de l'eau en Chine est complexe. Il combine la gestion centralisée, la gestion locale et la gestion par les secteurs spécifiques ensemble<sup>2</sup>. Le système contient cinq niveaux hiérarchiques (Comité central- bassin- niveau provincial – niveau préfectoral- niveau district). Pour la RUEP, il n'y a pas de secteur dédié, mais il y a des institutions impliquées dans la gestion des ressources en eau, y compris l'eau de pluie (Xie, 2008).

Au niveau national, l'on trouve :

<sup>2</sup> Du point de vue institutionnel, la constitution de la république populaire de Chine présente trois niveaux hiérarchiques pour l'administration du pays : provincial, district et cantonal. Le gouvernement dirige directement 22 provinces, 5 régions autonomes, 4 municipalités et 2 régions administratives spéciales, ces régions composent le niveau provincial (Baidu Baike, 2019).

- Le Ministère des Ressources de l'Eau, qui est la principale institution impliquée dans la gestion des ressources en eau ;
- Le Conseil d'État : la réglementation de mise en œuvre de la politique de l'eau, de la réglementation administrative et de la coordination ;
- Le congrès national du peuple : la législation, le droit et la supervision ;
- D'autres institutions concernées : le Ministère de la Protection de l'Environnement, le Ministère du logement et de la construction urbaine et rurale, le Ministère de l'Agriculture, le Ministère des Terres et des Ressources, l'Administration forestière d'État, le Ministère des Transports, Le Développement national et la Commission de Réforme, le Ministère des Finances ;

Au niveau infra-national, l'on a :

- Les Départements locaux de la gestion de ressource de l'eau : l'administration de l'eau au niveau provincial ;
- Les Commissions de gestion du Bassin du Fleuve : l'organisation subalterne du Ministère des Ressources de l'Eau pour chacun des sept bassins fleuve/lac.

La politique de la gestion de l'eau en Chine présente certaines faiblesses : l'état de sous-développement du système d'administration ; une focalisation excessive sur l'offre plutôt que sur la demande ; une dépendance excessive sur les mesures administratives plutôt que sur les instruments de marché ; et un financement insuffisant pour le contrôle de la pollution. En plus, il y a un déficit d'intégration des règlements, des codes et des politiques (FAO Aquastat, 2010).

#### **4.1.2 Climats et structures de précipitations à Tianjin et à Paris**

La Figure 1-6 ci-dessous montre les structures des précipitations à Tianjin et à Paris, y compris les précipitations mensuelles et le nombre de jours sans pluie de chaque mois. Pour Tianjin, il s'agit une année moyenne de 1954 à 2014, alors que pour Paris, il s'agit des données moyennes de 1971 à 2000.

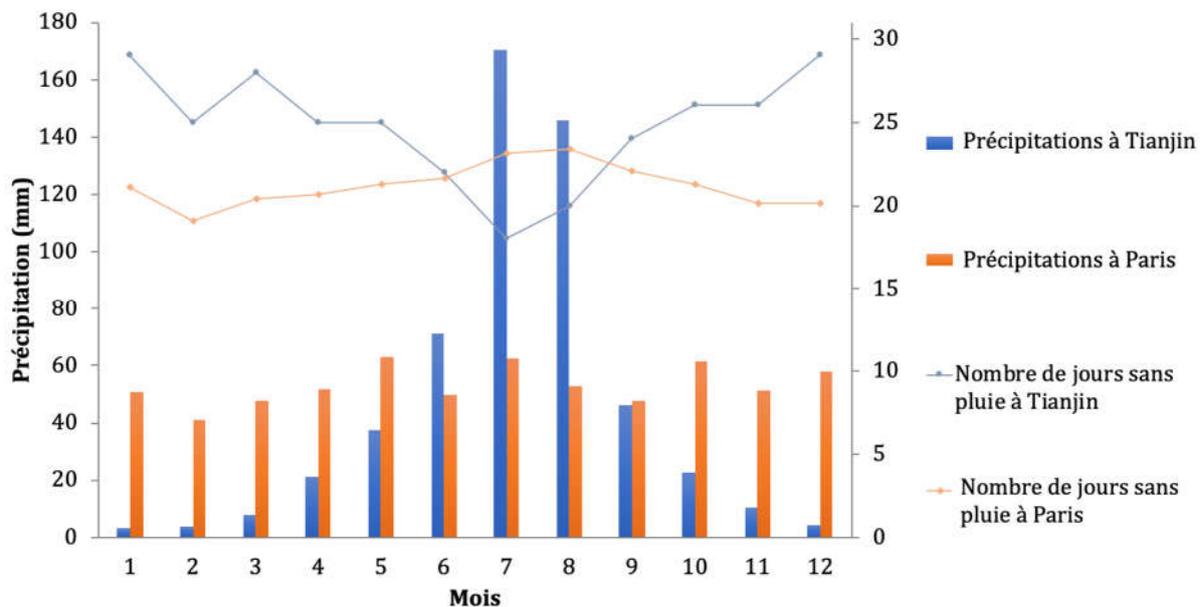


Figure 1-6. Structure de précipitation (source : Météo-France et <http://www.cma.gov.cn/en2014/>)

Paris a un climat de type océanique dégradé : l'influence se traduit par une température minimale moyenne de 15,1 °C de juin à août et de 3 °C de décembre à février et de 8,9 °C sur l'année, avec des pluies fréquentes en toutes saisons (111 jours) et un temps changeant mais avec des pluies plus faibles (619 millimètres par an) que sur les côtes, et quelques extrêmes de températures (influence continentale) au cœur de l'hiver ou de l'été.

Située dans la plaine du nord de la Chine (Grande plaine), la ville de Tianjin bénéficie d'un climat influencé par la mousson qui se trouve dans une zone de transition de trois climats selon la classification de Köppen : un climat subtropical humide, un climat continental humide et un climat semi-aride. Tianjin se caractérise par des étés chauds et humides, à cause de la mousson, et des hivers secs et froids à cause de l'anticyclone de Sibérie. Le printemps dans la ville est venteux mais sec. Les précipitations annuelles de Tianjin sont de 511 mm, dont près 60% survient dans les mois estivaux de juillet et août. Ceci, en plus d'une température moyenne de 13,2 °C, place Tianjin à la frontière du climat semi-aride. La moyenne mensuelle la plus froide se situe à 3 °C et la plus chaude à 22 °C.

#### 4.1.3 Niveau de pollution à Tianjin et à Paris

Pour Tianjin et Paris, la qualité de l'air dans ces deux villes est totalement différente. Un bilan des polluants principaux sur la période 2013~2016 est présenté dans le Tableau 1-5. Ici, le PM2.5 et le PM10 mentionnés dans ce tableau sont des indicateurs importants pour qualifier la pollution d'air. Dans le cadre de l'étude de la qualité de l'air, ces particules en suspension (abréviation PM qui provient de l'anglais « Particulate Matter ») sont classées en fonction de leur "diamètre aérodynamique", qui correspond au diamètre moyen d'une sphère qui posséderait des propriétés aérodynamiques équivalentes.

L'appellation « PM10 » désigne les particules dont le diamètre est inférieur à 10 µm. Le diamètre des particules fines PM2.5 est inférieur à 2.5µm.

Tableau 1-5. Qualité de l'air à Tianjin et à Paris (2013-2016) (source : Airparif et site [www.aqistudy.cn](http://www.aqistudy.cn))

		<b>Max</b> (moy journalière)	<b>Min</b> (moy journalière)	<b>Moyenne</b> <b>journalière</b>	<b>Valeurs</b> <b>limites*</b>	<b>Nombre de jours</b> <b>moyenne par an</b> <b>dépassant la valeur</b> <b>limite</b>
<b>PM2.5</b> <b>(µg/m<sup>3</sup>)</b>	Tianjin	303,0	13,0	79,8	75,0	75
	Paris	98,9	3,3	14,7	25,0	-
<b>PM10</b> <b>(µg/m<sup>3</sup>)</b>	Tianjin	405,0	23,0	123,4	150,0	44
	Paris	117,1	6,4	22,5	40,0	27
<b>NO<sub>2</sub></b> <b>(µg/m<sup>3</sup>)</b>	Tianjin	132,0	13,0	50,6	80,0	17
	Paris	121,8	12,0	38,5	40,0	3
<b>SO<sub>2</sub></b> <b>(µg/m<sup>3</sup>)</b>	Tianjin	202,0	5,0	34,7	150,0	3
	Paris	<1	<1	<1	50,0	0
<b>CO</b> <b>(mg/m<sup>3</sup>)</b>	Tianjin	3,0	1,0	1,7	4,0	0
	Paris	1,4	0,0	0,25	1,0	0
<b>O<sub>3</sub></b> <b>(µg/m<sup>3</sup>)</b>	Tianjin	288,0	4,0	91,8	160,0	154
	Paris	100,8	1,2	37,9	120,0	0

\*Les valeurs limites mentionnées dans la norme de la qualité de l'air en Chine (GB 3095—2012 du 2012) et en France (objectifs de qualité selon Décret n°2010-1250 du 21 octobre 2010)

On peut observer que les valeurs moyennes de PM 2, 5 et le PM 10 à Tianjin sont 5, 5 fois plus élevées que celles de Paris tandis que les valeurs moyennes de CO sont 6, 8 fois plus élevées. Donc les polluants qui se déposent sur les toits et sont susceptibles de se retrouver dans l'eau de pluie peuvent être plus élevés à Tianjin que dans la région parisienne. En plus, pour Tianjin avec une période de pluie concentrée de juin à août en raison des fortes précipitations intenses, la concentration de polluants dans l'eau de pluie collectée devrait être supérieure à celle collectée les autres mois. En revanche, en région parisienne, dont le climat est océanique, un site d'étude sera régulièrement exposé à des événements pluvieux, souvent d'intensité faible à modérée. Dès lors, le lavage des toitures de la région parisienne est régulier dans le temps au cours d'une année, occasionnant possiblement une contamination moyenne des eaux récoltées tout au long de l'année.

#### 4.2 État des lieux de la RUEP en France et Chine

Cette section concerne la diffusion de la RUEP et les réglementation et référentiels relatifs à la RUEP en France et en Chine, au niveaux national et local.

#### 4.2.1 Diffusion de la RUEP en France et en Chine

- **France**

En France la RUEP est une pratique ancienne, tombée en désuétude en ville avec la généralisation de l'alimentation en eau potable. Depuis quelques années, il y a un regain d'intérêt pour cette pratique en zone urbaine et périurbaine.

Les évolutions du secteur du bâtiment (en particulier le développement de la démarche HQE (Haute Qualité Environnementale) en liaison avec l'émergence de préoccupations environnementales dans ce secteur (de Gouvello et Deutsch 2009) ont joué un rôle important dans l'émergence de l'intérêt pour les ressources alternatives à l'eau potable en contexte urbain. Cet intérêt se manifeste entre autres au travers de projets recourant à l'utilisation de l'eau de pluie qui a fait l'objet d'un début de réglementation avec la parution le 21 août 2008 d'un arrêté « relatif à la récupération des eaux de pluie et à leur usage à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments intitulé ». Le domaine d'application de ce texte reste toutefois limité : seules les toitures inaccessibles sont retenues et l'eau de pluie destinée à produire de l'eau potable n'est pas concernée. Néanmoins, il introduit implicitement trois catégories supplémentaires de qualité de l'eau entre l'eau potable et les eaux pluviales (considérées comme eaux usées) : l'eau de pluie utilisable en plein air, l'eau de pluie utilisable à l'intérieur des bâtiments pour les chasses d'eau et le nettoyage des sols et l'eau de pluie utilisable pour la lessive. Ces catégories sont définies par des obligations croissantes de moyens à mettre en œuvre pour améliorer la qualité de l'eau, mais ne sont pas soumises à des critères de qualité définis par des paramètres, ce qui rend difficile leur objectivation en termes de qualité (de Gouvello et al. 2013).

La parution de ce texte a permis de renforcer une dynamique déjà préexistante de développement des projets de construction recourant à cette technique : en particulier dans des établissements d'enseignement, des immeubles d'habitation, des immeubles de bureaux, des bâtiments industriels et des bâtiments à vocation culturelle (De Gouvello 2011). Pour les maisons individuelles, selon une enquête réalisée par le Centre d'Information sur l'Eau au cours de l'année 2009, le taux d'équipement serait de 25% (C.I.Eau 2009): à cette échelle, on observe souvent la mise en place de systèmes sommaires, consistant en un simple bidon récupérant les eaux de pluie s'écoulant dans les gouttières.

De plus, ces dernières années, les premiers documents techniques destinés au grand public permettent de fixer un cadre de référence (ARENE Ile-de-France et CSTB, 2007 ; MEDDEM et MSS, 2009 ; AFNOR, 2012). Le premier Plan National d'Adaptation au Changement Climatique publié en 2011 promeut le développement des économies d'eau. En 2004, le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) a conduit le premier recensement national des pratiques de RUEP dans les bâtiments à usage collectif. Il a permis d'identifier 67 projets achevés et 36 projets en cours de réalisation. En 2011, les une enquête nationale pilotée par le Cerema a permis d'en repérer près de 370, réparties selon les catégories suivantes : Etablissements Recevant du Public (142), Opérations d'arrosage ou de nettoyage (91), Habitat (45) et « autres » (installations industrielles ou

agricoles, réserves incendies et jardins familiaux, 49) (Gerolin et al., 2013). Au travers des études sur la nature des porteurs des projets, sur les usages et les motivations de l'utilisation de l'eau de pluie, sur les incitations financières et sur des pistes d'évaluation des conditions de développement, les résultats de ces recherches montrent que, bien que le marché n'apparaisse pas mature et présente de forts contrastes géographiques, le nombre de projets d'aménagement et de construction incluant des dispositifs de RUEP s'accroît, notamment pour les équipements accueillant du public. Plus largement, les actions promouvant l'utilisation de l'eau de pluie se développent, à l'image des incitations financières, de manière cependant éparse (Gerolin et al., 2013).

- **Chine**

En Chine, la pratique de récupération et utilisation des eaux de pluie (RUEP) existe depuis longtemps. Elle a surtout été utilisée pour la production agricole et les besoins domestiques, principalement dans les zones rurales arides et semi-arides du nord-ouest. Pendant longtemps, les eaux pluviales dans les zones urbaines en Chine ont été rejetées directement dans les réseaux. L'utilisation des eaux pluviales urbaines a commencé tardivement après les années 1980 quand la recherche en ce domaine s'est formalisée. Elle s'est développée rapidement à partir des années 1990.

Certaines villes chinoises ont pris l'initiative de la collecte et de l'utilisation des eaux de pluie. Sur Beijing, la pénurie d'eau est relativement grave et des actions ont été entreprises en matière d'utilisation de l'eau de pluie. Au début des années 90, Beijing a commencé à mener des recherches sur la RUEP en aval de toiture pour alimenter les nappes d'eau souterraine après sédimentation. Aux Jeux olympiques de 2008, le concept des « *Jeux olympiques verts, des Jeux olympiques high-tech et des Jeux olympiques humanistes* » était né. Afin de réaliser cet objectif, la construction des sites olympiques de Beijing a envisagé différentes utilisations des eaux de pluie possible à différentes échelles y compris sur l'échelle de toiture.

A Tianjin, avec le développement économique très rapide de l'économie et l'accélération de l'urbanisation, la zone d'imperméabilisation a augmenté très sensiblement. D'un côté, les fortes précipitations ont provoqué des inondations aggravant le risque sur la qualité de l'eau en milieu urbain. De l'autre, Tianjin est une ville gravement touchée par la pénurie d'eau : ses ressources en eau par habitant sont inférieures à 111 m<sup>3</sup>/personne/an, ce qui ne représente que le seizième de la moyenne nationale. En particulier, une mauvaise gestion écologique de l'eau à long terme est une raison importante de la détérioration du milieu aquatique.

Depuis de nombreuses années, Tianjin attache une grande importance à l'utilisation de ressources non conventionnelles et met en avant les exigences en matière d'utilisation des ressources en eau de pluie et de contrôle du ruissellement des eaux pluviales dans les normes locales « Normes de conception des bâtiments écologiques de Tianjin ». L'utilisation de l'eau de pluie a été mise en œuvre dans des projets tels que le centre culturel de Tianjin.

La « *nouvelle ville écologique* » de Tianjin utilise toutes les routes, les places, les espaces verts, les toits et d'autres sites pour collecter l'eau de pluie, en tenant compte des pics d'accumulation. Des zones humides sont aménagées à la sortie de la station de pompage d'eau de pluie pour filtrer et réduire le contenu en polluants de l'eau de pluie qui, une fois purifiée, est intégrée au lac intérieur et à la rivière intérieure en tant que masse d'eau paysagère.

Le Parc national de l'industrie de l'animation sur Tianjin a construit un système de RUEP de pluie complet et entièrement recouvert. Toutes les eaux de pluie seront collectées dans le parc pour y être sédimentées et purifiées, ce qui permet non seulement de compléter l'eau des paysages mais aussi l'irrigation verte. Le taux de récupération prévu des eaux de pluie dans le parc est de 80%.

Il apparaît entre la France et la Chine que deux approches très différentes de la RUEP sont en œuvre. En France, peut-être en raison de précipitations souvent faibles et peu intenses, la RUEP est largement déconnectée de la gestion des eaux pluviales, même si des cuves doubles permettant d'une part de limiter les débits d'eau pluviale et d'autre part de permettre un stockage pour leur utilisation existent. Pour la Chine, au contraire, là aussi en liaison avec l'existence d'une saison sèche et d'une saison des pluies marquées, et de précipitations intenses, le couplage entre RUEP et gestion des eaux pluviales apparaît beaucoup plus interconnecté, comme le montre les exemples présentés précédemment. Quoi qu'il en soit, dans un cas comme dans l'autre, la question de l'évolution de la qualité de l'eau de pluie en fonction des usages auxquels elle est destinée nécessite d'être investiguée.

#### **4.2.2 Réglementation et référentiels relatifs à la RUEP en France et en Chine**

Dans cette partie, les réglementations et référentiels relatifs à la RUEP dans les deux pays sont présentés et on compare leurs avantages et leurs inconvénients.

- **France**

En France, tout propriétaire a le droit d'user et de disposer des eaux pluviales qui tombent sur son fonds. Il peut donc « *recueillir les eaux de pluie pour son propre usage, pour les vendre ou pour les concéder à son voisin* » (Code Civil art. 641). L'usage des eaux de pluie est donc autorisé. Il reste néanmoins réglementé, essentiellement d'un point de vue sanitaire. L'objectif de ce paragraphe est d'aborder la réglementation en fonction de la nature des surfaces collectées et de rappeler les usages autorisés, les obligations d'un point de vue de la conception, de la réalisation et de l'entretien de l'équipement, la procédure de déclaration et de contrôle des installations.

Les principaux textes réglementaires évoqués sont

- > la loi sur l'eau et les milieux aquatiques du 30 décembre 2006 ;
- > l'arrêté du 21 août 2008 relatif à la récupération des eaux de pluie et à leur usage à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments ;

> l'arrêté du 17 décembre 2008 relatif au contrôle des installations privées de distribution d'eau potable, des ouvrages de prélèvement, puits et forages et des ouvrages de récupération des eaux de pluie. Cette arrêté a fait l'objet d'une circulaire en date du 9 novembre 2009 précisant les modalités de mise en œuvre de ce contrôle.

En complément des textes réglementaires relatifs à la récupération des eaux pluviales évoqués ci-dessus, d'autres textes définissent un certain nombre de prescriptions vis-à-vis de la maîtrise du ruissellement et du rejet des eaux pluviales vers le réseau.

Pour toute opération n'entrant pas dans le cadre de la réglementation (toitures accessibles, par exemple), il convient de consulter l'agence régionale de santé (ARS).

L'arrêté du 21 août 2008 ne concerne pas le cas de l'eau de pluie traitée en vue de sa potabilisation (articles L.1321-1 et suivants et R.1321-1 et suivants du Code de la santé publique).

Les usages d'eau de pluie à l'aval de toitures inaccessibles autorisés par l'arrêté du 21 août 2008 sont :

- > les usages industriels et professionnels ;
- > les usages domestiques extérieurs aux bâtiments ;
- > certains usages à l'intérieur des bâtiments : évacuation des excréta ; lavage des sols ; lavage du linge à titre expérimental (sous réserve d'un traitement adapté).

L'arrêté interdit les usages domestiques à l'intérieur des bâtiments lorsque les eaux de pluie ont été collectées sur des toitures en amiante-ciment ou en plomb. Il est fortement déconseillé d'utiliser l'eau de pluie collectée sur une toiture en plomb pour l'arrosage des jardins potagers, compte tenu des risques d'accumulation du plomb dans les végétaux.

Puis, la loi Grenelle 2 du 12 juillet 2010 confirme ces dispositions et, par son article 164, étend la possibilité d'utiliser de l'eau de pluie pour des usages intérieurs aux établissements recevant du public, sauf établissements et cabinets médicaux, crèches et écoles. Par ailleurs, les usages professionnels et industriels de l'eau de pluie sont autorisés s'ils ne requièrent pas l'emploi d'eau destinée à la consommation humaine (Gerolin et al., 2013 ; Hellier, 2015).

La norme Afnor NF P 16-005 qui a pris effet au 14 octobre 2011 et le guide technique de l'Association scientifique et technique pour l'eau et l'environnement (ASTEE) en 2015 sont des documents de référence destinés aux professionnels et aux décideurs (de Gouvello, 2016).

## • Chine

En Chine, il y a nombreuses normes nationales (GB) et normes locales (DB) relatives à la récupération et à l'utilisation des eaux de pluie.

La norme GB / T50378-2014 « norme d'évaluation des constructions écologiques » a été officiellement mise en œuvre le 1er janvier 2015. Dans cette norme, l'utilisation de

ressources alternatives telles que l'eau de pluie, les eaux grises, les eaux usées traitées et même l'eau de mer sont un élément clé. En termes d'environnement écologique de l'eau, elle met l'accent sur le rôle de l'eau de pluie dans l'écologie et la conservation de l'eau, et introduit des concepts de développement à faible impact dans les bâtiments écologiques.

Dans les deux chapitres « Économie de la surface de la construction et de l'environnement extérieur » et « Économie de ressource en eau et son utilisation », des exigences relatives à la gestion et l'utilisation de l'eau de pluie à l'échelle du bâtiment ont été ajoutées. Il est nécessaire de développer et d'utiliser l'infrastructure verte pour les eaux pluviales sur l'espace au sol du site grâce à une planification et à un aménagement rationnel, de guider raisonnablement les eaux pluviales depuis le toit, les sols pavés et les routes dans les installations écologiques et d'assurer une bonne connexion entre le déversement des eaux pluviales. Et de protéger efficacement la qualité et la quantité d'eau de pluie entrant dans les masses d'eau naturelles et les masses d'eau paysagères.

La norme nationale "Spécifications techniques pour l'ingénierie de la construction et de l'utilisation des eaux pluviales par les collectivités" (GB50400-2006) s'applique à la planification, à la conception, à la construction, à l'acceptation, à la gestion et à la maintenance des bâtiments civils, des bâtiments industriels et des projets résidentiels d'utilisation de l'eau de pluie. Elle ne s'applique pas aux projets d'utilisation de l'eau de pluie où l'eau de pluie est utilisée comme source d'eau potable. Cette norme comprend des exigences et des méthodes spécifiques pour la collecte des eaux de pluie, l'infiltration des eaux de pluie, le stockage et l'utilisation des eaux de pluie, le traitement de la qualité de l'eau, ainsi que le stockage et le rejet. L'infiltration d'eau de pluie peut être opérée à l'aide d'une ceinture de verdure, d'une chaussée perméable, d'une infiltration, d'un fossé peu profond. Il concerne l'infiltration combinée de la tranchée peu profonde, le fossé de la conduite d'infiltration, le puits d'infiltration, le bassin d'infiltration, le système d'évacuation de la conduite de perméation, etc... Chaque dispositif choisi doit satisfaire les exigences pertinentes. Dans l'installation de stockage d'eau de pluie, le réservoir de stockage doit être adapté pour être installé dans le sous-sol extérieur et en tenant compte de la qualité de l'eau de pluie collectée. Le système de récupération et de recyclage des eaux de pluie doit donner la priorité aux eaux de pluie des toits.

## **Conclusion du chapitre 1 :**

Ce chapitre a consisté en une introduction générale à la récupération et l'utilisation de l'eau de pluie (RUEP), et à la présentation des conditions différentes concernant les conditions environnementales, climatiques et contextuelle entre la France et la Chine. Il a présenté le contexte et l'état des connaissances sur la récupération et utilisation de l'eau de pluie.

L'accent a été mis sur la variabilité de la qualité de l'eau de pluie collectée dans le système de RUEP et l'impact de cette variabilité sur l'utilisation des eaux de pluie. La qualité au cours de l'événement pluvial n'est pas constante, la recherche sur cet aspect peut jouer un rôle important dans l'optimisation de la qualité de l'eau. C'est pourquoi, le chapitre 2 est consacré à une étude bibliographique plus spécifique portant sur l'évolution de la qualité en cours d'événement pluvial est nécessaire.

## Chapitre 2. L'évolution de la qualité de l'eau de toiture au cours d'événement pluvial

Le chapitre précédent a dressé une étude bibliographique générale sur la RUEP et fourni des éléments quant à l'état de l'art de cette pratique en France et en Chine. Après ces éléments contextuels, ce chapitre 2 a pour objet d'effectuer un point bibliographique plus spécifique sur l'aspect de l'évolution de la qualité de l'eau en cours d'évènement. Celui-ci sera utilisé pour préciser la démarche scientifique de la thèse, dont l'objectif central est d'analyser les dynamiques d'évolution de la qualité des eaux de toit en cours d'évènement.

La première section de ce chapitre vise à dresser un panorama des travaux existants sur l'évolution de la qualité de l'eau de toiture au cours d'un évènement de pluie.

En seconde section de ce chapitre les objectifs propres de notre travail, nous proposerons des hypothèses et détaillerons la démarche scientifique envisagée.

Certains travaux évoquent qu'à l'échelle d'une toiture, les concentrations de contaminant sont plus élevées au début de l'évènement pluvieux et diminuent vers une valeur constante en cours d'évènement. Ce phénomène est appelé *first flush* à échelle de toiture (Zobrist et al., 2000 ; He, 2002 ; Abbott et al., 2007 ; Schriewer et al., 2008 ; Lee et al., 2012).

Cet effet est largement discuté et étudié depuis longtemps à l'échelle du ruissellement urbain : plusieurs études mettent en évidence l'existence de cet effet (Sartor et Boyd, 1972 ; Gupta and Saul, 1996 ; Sansalone and Cristina, 2004) ; plusieurs études discutent les facteurs influençant (Heaney et al., (1999) ; Vaze et Chiew (2002)) ; ou définissent cet effet quantitativement et proposent différents types de modélisation et (Saget et al. 1996; Bertrand-Krajewski et al. 1997) et le remettent en cause dans certaines configurations.

Cependant, à l'échelle d'une toiture seule, bien qu'il y ait beaucoup de développements sur la réutilisation de l'eau de ruissellement de toiture, cette question doit encore être travaillée : ce phénomène existe-t-il pour tous les évènements ? En quoi est-il différent de ce qui est observé à l'échelle du ruissellement urbain ? Au regard de la définition apportée à l'échelle urbaine, comment définir spécifiquement cet effet aux toitures ?

Notre état de l'art analysera en détail sur cet effet : d'abord nous présenterons la définition et la modélisation de l'évolution de la qualité à l'échelle du ruissellement urbain afin qu'il fournisse une référence pour nos recherches sur les toitures ; ensuite, nous présenterons deux processus sur l'évolution de la qualité de l'eau en aval de toiture (le dépôt de polluants et le lessivage de matière sur la toiture au cours de l'évènement pluvial) et la différence avec l'échelle du ruissellement urbain ; puis, nous proposerons une définition pour l'échelle de la toiture. Enfin nous présenterons le cadre réglementaire dans différentes régions géographiques des référentiels relatifs au *first flush* dans la RUEP et différents types de déviateur de *first flush*.

# 1. État de l'art sur l'évolution de la qualité de l'eau de toiture au cours d'un événement de pluie

Cette première partie concerne l'état de l'art sur l'évolution de la qualité de l'eau de toiture. Cette étude bibliographique concerne les définitions du *first flush* à l'échelle du ruissellement urbain, les processus de dépôt et d'accumulation sur le toit, la définition du *first flush* de toiture, les facteurs influençant et l'approche opérationnelle du *first flush*.

## 1.1 Modélisation de l'évolution de la qualité de l'eau de ruissellement et définition du *first flush* à l'échelle urbaine

Analysant la qualité des eaux de ruissellement urbain, Sartor et Boyd (1974) ont, dès le début des années 70, décrit une décroissance exponentielle des polluants au cours de la pluie. Gupta et Saul (1996), Deletic (1998) insistent sur le fait que les concentrations de polluants dans ces eaux urbaines sont très élevées dans les premiers volumes écoulés, et diminuent ensuite vers une valeur constante. Ce phénomène est appelé *first flush*. Le terme de *first flush* indique une proportion remarquablement élevée du flux massique d'un constituant pendant le premier flot généré par un événement pluvieux. Cette définition peut s'appliquer à toutes les eaux de ruissellement, une grande partie des théories sur le *first flush* ayant été expérimentée grâce à la collecte d'eaux de ruissellement issues de chaussées, d'eaux pluviales sur un bassin versant urbain (zones industrielles, zones d'habitats denses) ou rural (impact faible de l'aménagement humain sur la zone d'étude). Le concept de *first flush* a été aussi utilisé pour les eaux issues du ruissellement des toitures (Doyle, 2008), avec l'idée que si l'on détourne la première partie d'une pluie, l'eau stockée sera beaucoup plus propre et la nécessité d'un traitement ultérieur peut être réduite ou même éliminée.

Nous résumons ensuite différents types de définition du *first flush* et de modélisation de ce phénomène à l'échelle de ruissellement urbain.

### 1.1.1 Évaluation quantitative basée sur la régression multilinéaire

La méthode se base sur une régression multilinéaire intégrant trois variables (période de temps sec, durée et intensité de la pluie) et des coefficients dépendant du site de collecte afin de proposer une formule prédisant la charge polluante (Gupta and Saul, 1996). Le modèle de décroissance exponentielle des contaminants a également été utilisé (Sartor and Boyd, 1972). Il est basé sur l'équation suivante :

$$L = L_0 e^{-k_w i t} \quad \text{Équation 1}$$

Où, L est la charge contaminée restante à la fin de l'évènement de pluie,  $L_0$  est la charge avant la pluie,  $k_w$  est le coefficient de *wash-off*, i est l'intensité de pluie (mm / h) et t peut également être considéré comme « temps depuis que la pluie a commencé ». Le produit de i et t est simplement la hauteur de pluie cumulée dont l'équation 2 peut être reformulée en termes de hauteur de précipitation accumulée (h).

$$L = L_0 e^{-k_w h} \quad \text{Équation 2}$$

Dans l'étude de Sartor et Boyd, la valeur de  $k_w$  dépend de l'emplacement, du polluant, de la texture des rues, mais ni de l'intensité de la pluie et ni de la taille des particules. Dans la modélisation des eaux de ruissellement urbain, il est habituellement fixé (Alley, 1981).

Heaney et al., (1999) et Vaze et Chiew (2002) indiquent que les précipitations érodent préférentiellement les particules les plus fines. Comme on peut le voir dans l'équation 1, Sartor et Boyd prennent en compte l'intensité de la pluie, en supposant que des pluies plus intenses éliminent proportionnellement plus de particules. Pour une hauteur de pluie fixée, une pluie intense éliminera plus de particules (probablement des particules plus grosses ou plus collantes, qui nécessiteront plus d'énergie pour être mises en mouvement), et l'émission de particules sera plus faible pour une pluie d'intensité faible. Les quantités de polluants enlevés sont alors différentes pour une même hauteur de pluie en fonction des intensités. Par ailleurs, les pluies de très faible intensité ne peuvent pas entraîner les particules mais peuvent humidifier les argiles et les fixer sur le toit. Selon l'étude de Novotny et Chesters (1981), pour un bassin versant large et plat, l'intensité de la pluie doit atteindre à 18mm/h pour éliminer toutes les particules.

### 1.1.2 Évaluation quantitative basée sur la masse

Un autre type de modélisation peut caractériser l'impact du *first flush* par la relation entre la masse cumulée des polluants entraînés et le volume cumulé de l'eau écoulé.

Cette évaluation du *first flush* repose notamment sur l'évolution de deux variables adimensionnées, la fraction massique cumulative  $M(t)$  et la fraction volumique d'écoulement cumulative  $V(t)$  (Cristina and Sansalone, 2003 ; Sansalone and Cristina, 2004 ; Sharifi et al., 2011) :

$$M(t) = \frac{\int_0^t Q(t)C(t)dt}{\int_0^T Q(t)C(t)dt} = \frac{m(t)}{m(T)} \quad \text{Équation 3}$$

$$V(t) = \frac{\int_0^t Q(t)dt}{\int_0^T Q(t)dt} = \frac{v(t)}{v(T)} \quad \text{Équation 4}$$

Où :  $Q(t)$  = débit au temps  $t$ ,  $C(t)$  = concentration au temps  $t$ ,  $m(t)$  = masse de polluant accumulée pendant le temps  $t$ ,  $v(t)$  = volume généré pendant  $t$  et  $T$  = durée de l'évènement pluvieux.

Une approche par discrétisation de ces intégrales selon le pas de temps  $\Delta t_i$  associé aux mesures d'une concentration  $C_i$  du polluant considéré, d'un débit d'eau de pluie  $Q_i$  et d'un volume d'eau  $V_i$  généré par l'évènement pluvieux pendant  $\Delta t_i$  dans laquelle  $N$  est le nombre total de mesures conduit à la formule suivante (Bertrand-Krajewski et al., 1998) :

$$M(t) \cong \frac{\sum_{i=1}^N C_i Q_i \Delta t_i}{\sum_{i=1}^N C_i Q_i \Delta t_i} \quad \text{Équation 5}$$

$$V(t) \cong \frac{\sum_{i=1}^N Q_i \Delta t_i}{\sum_{i=1}^N Q_i \Delta t_i} = \frac{\sum_{i=1}^N V_i}{\sum_{i=1}^N V_i} \quad \text{Équation 6}$$

L'évolution de cette fraction de charge polluante en fonction de celle du volume d'eau ruisselé peut ensuite être représentée graphiquement via l'élaboration d'un pollutogramme (courbe  $M(V)$ ) d'équation :

$$M(t) = f(V(t)) \leftrightarrow \frac{\sum_{i=1}^N C_i Q_i \Delta t_i}{\sum_{i=1}^N C_i Q_i \Delta t_i} = f\left(\frac{\sum_{i=1}^N V_i}{\sum_{i=1}^N V_i}\right) \quad \text{Équation 7}$$

Plusieurs définitions du *first flush*, obtenues à l'aide de cette représentation graphique et d'un choix arbitraire, sont retrouvées dans la littérature :

- $M(t) > V(t)$  Équation 8 (Cristina and Sansalone, 2003; Lee et al., 2002 ; Sansalone and Buchberger, 1997)
- $M(t) \geq 0,50$  et  $V(t) \leq 0,25$ . Équation 9 (Lee et al., 2002)
- $M(t) \geq 0,80$  et  $V(t) \leq 0,30$  Équation 10 (Bertrand-Krajewski et al., 1998 ; Lee et al., 2002 ; Saget et al., 1996)

La courbe  $M(V)$  peut ensuite être représentée sur un pollutogramme particulier découpé en 6 zones (Figure 2-1) délimitées par 5 courbes caractéristiques quantifiant l'intensité du *first flush* dont l'équation paramétrique générale, est (Bertrand-Krajewski et al., 1998 ; Saget et al., 1996) :

$$M(t) = V(t)^a \quad \text{Équation 11}$$

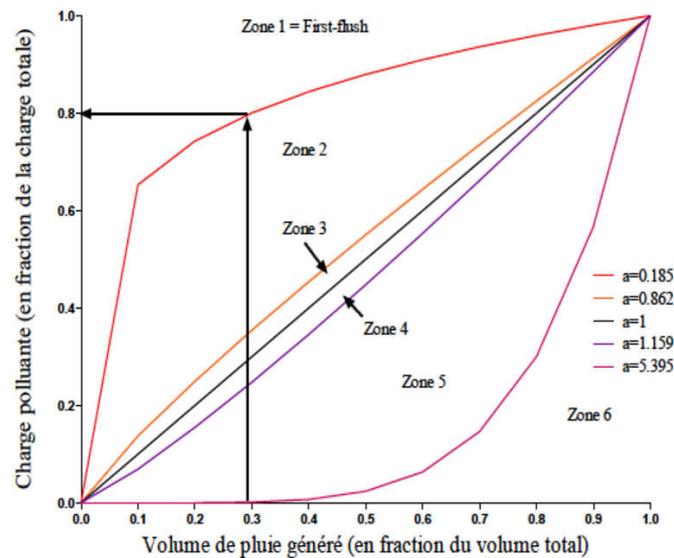


Figure 2-1. Exemples de pollutogramme (d'après Saget et al., 1996)

Où  $a$  est l'exposant du *first flush* décrivant directement la forme des courbes  $M(V)$  (Sharifi et al., 2011). Le firstflush n'est observé pendant un événement que si la courbe de cet événement est dans la zone 1.

### 1.1.3 Évaluation quantitative basée sur la concentration moyennes d'événements (EMC Event Mean Concentration)

Les EMC peuvent être définies comme la masse totale de polluants ( $M$ ) émise pendant un événement divisé par le volume total ( $V$ ) collecté lors de l'évènement pluvieux.

Cette approche similaire à la précédente mais reposant sur la concentration moyenne d'un évènement (EMC) est plusieurs fois décrite dans la littérature (Athanasiadis et al.,

2010 ; Flint and Davis, 2007 ; Sansalone and Buchberger, 1997 ; Sansalone and Cristina, 2004 ; Sharifi et al., 2011). L'EMC représente la concentration massique moyenne de l'évènement et est calculée grâce à la formule suivante :

$$EMC = \frac{m(t)}{v(t)} = \frac{\int_0^T c(t)Q(t)dt}{\int_0^T Q(t)dt} \quad \text{Équation 12}$$

De plus, afin de comparer l'EMC à une concentration cumulée sur une période de temps restreinte par rapport à celle de la totalité de l'évènement pluvieux, la concentration moyenne partielle de l'évènement (PEMC) est introduite (Sansalone and Buchberger, 1997 ; Sansalone and Cristina, 2004) :

$$PEMC(t) = \frac{m(t)}{v(t)} = \frac{\int_0^t c(t)Q(t)dt}{\int_0^t Q(t)dt} \quad \text{Équation 13}$$

La condition de présence d'un phénomène de *first flush* devient alors :

$$PEMC(t) > EMC(t) \quad \text{Équation 14}$$

Ce qui revient à dire que l'on se situe au-dessus de la première bissectrice de la Figure 2-1. Les deux variables de cette dernière relation sont reliées à celles de l'équation 10 via les égalités suivantes :

$$m(t) = M(t) * M \quad \text{Équation 15}$$

et

$$v(t) = V(t) * V \quad \text{Équation 16}$$

Où M = masse de contaminants totale générée par l'évènement, V = volume de pluie total généré par l'évènement, M(t) = la fraction massique cumulative et V(t) = la fraction volumique d'écoulement cumulative.

Néanmoins, les approches citées ci-dessus souffrent de deux défauts : le caractère arbitraire du critère de *first flush* (l'existence du *first flush* dépend du critère choisi) et la difficulté d'estimer la masse et le volume (retranscription affaiblie de l'impact du temps de pluie sur la dilution des contaminants). De plus, ce type d'approche ne semble pas approprié au dimensionnement de systèmes du point de vue opérationnel, qui recommande de savoir non pas quel pourcentage de l'évènement doit être pris en compte mais quel volume doit être évacué, dans la mesure où on ne connaît pas à l'avance la durée et le volume total d'un évènement donné.

#### 1.1.4 Évaluation quantitative basée sur la concentration

Cette modélisation est basée sur le calcul des concentrations moyennes de polluants pour au fur et à mesure du ruissellement (désigné parfois par tranches d'écoulement) au cours de chaque évènement pluvieux.

Cette évaluation est basée sur l'évolution des concentrations de contaminants survenant au début de l'évènement pluvieux. Cette concentration évolue classiquement selon 3 phases : (i) pic initial de concentration élevée de contaminant, (ii) rapide déclin et (iii) concentration faible et constante pendant tout le reste de l'évènement pluvieux. Le *first*

*flush* correspond alors au pic initial de concentration élevée de contaminants (Sansalone and Cristina, 2004). Cette méthode utilisant les concentrations a notamment été appliquée à l'analyse du *first flush* du cuivre et du zinc dans les eaux de toiture (He et al., 2001) et à l'analyse des HAP (Förster, 1996). Ces évaluations quantitatives du *first flush* basées sur les pics de concentration sont cependant critiquées car le pic de concentration du contaminant peut ne pas correspondre au pic de débit, donc au flux maximal de polluant, ce qui peut fausser l'évaluation du *first flush* (Bertrand-Krajewski et al., 1998).

Il n'y a aucun seuil ou valeur relative de concentration, l'évaluation du *first flush* est alors très subjective. Les études statistiques ou comparatives sont difficiles ou impossibles et cette approche ne peut pas être utilisée pour concevoir a priori un système d'élimination du *first flush*. Pour la même raison, il ne suffit pas d'observer des pics des concentrations plutôt que les pics des débits pour obtenir le *first flush*.

## 1.2 Évolution de la qualité en cours d'événement sur la toiture – processus de dépôt et de lessivage de matière

La variabilité de l'évolution de la qualité de l'eau de ruissellement de toiture au cours des événements pluviaux est mise en évidence par nombre d'études (Förster et al., 1999 ; Lee et al., 2004 ; Martinson et al., 2008 et Michelle 2010).

L'évolution de la qualité de l'eau en aval de toiture renvoie à deux phénomènes : le dépôt (accumulation) de matières entre les pluies et le lessivage ou *wash-off* (évacuation de tout ou partie des matières déposées) au cours de la pluie elle-même.

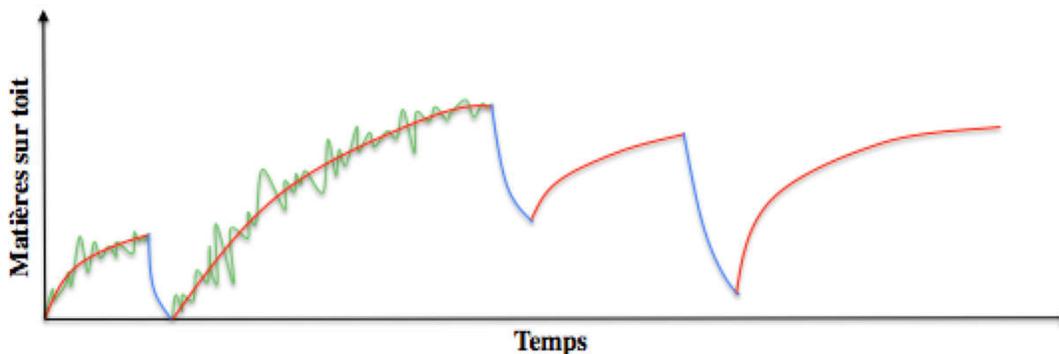


Figure 2-2. Dépôt et lessivage de matières sur la toiture (d'après Martinson et al., 2008)

Martinson propose un schéma (Figure 2-2) pour représenter de manière conceptuelle le principe de ces processus en jeu :

- La ligne rouge représente le processus de dépôt. Ce processus survient sur une période sèche et montre une augmentation de la matière sur la toiture ;
- Le phénomène d'accumulation sera affecté par différents facteurs de comportement aléatoire (représenté par la ligne verte) : vent, trafic et les autres facteurs pouvant aggraver le dépôt et/ou contribuer au retrait de matières déposées ;
- La ligne bleue représente le processus de lessivage (*wash-off*) qui se produit pendant l'événement de pluie et réduit la quantité de matières sur la toiture, sans forcément tout emporter.

C'est le processus de lessivage qui contribue à la variabilité de l'évolution de la qualité de l'eau de ruissellement en cours d'évènement. Lorsque la pluie se termine, le processus d'accumulation recommence à partir des matières restant sur la toiture. Les deux processus sont sans interruption.

Les deux sous-sections suivantes détaillent les dynamiques en œuvre dans ces deux processus, les modèles possibles et les facteurs impactant ces dynamiques.

De plus, il faut noter que la physique du dépôt et de l'enlèvement de la matière sur le bassin versant est semblable à celle des toitures, mais il existe plusieurs différences importantes :

- les toitures sont plus étroitement couplées à leurs exutoires (faibles liés au temps de concentration) seront très réduits ;
- les matériaux des toitures sont variés et sont plus lisses que les surfaces urbaines et naturelles ;
- la pente des toits est généralement supérieure à celle des bassins versant urbains.

### 1.2.1 Phénomène de dépôt (accumulation de matières)

Pendant une période sèche, les matières se déposent sur la toiture et sont supposées montrer une augmentation. La vitesse d'accumulation des contaminants pendant la période de temps sec est un sujet à débat. Il est généralement admis qu'il existe un équilibre dynamique entre les processus de dépôt et d'élimination par le vent. Le dépôt de débris / poussières est considéré comme un phénomène linéaire car la probabilité du dépôt de la matière est identique d'une à l'échelle du temps sec entre deux épisodes pluvieux. Si le temps sec se poursuit sur des durées longues par rapports aux saisons, l'accumulation peut suivre une dynamique plus complexe. Le processus d'élimination, cependant, n'est pas linéaire car il dépend du niveau de matière déjà accumulé et de la solidité de son attachement. L'élimination et sa non-linéarité résultante du processus rend sa modélisation compliquée. Le dépôt et l'élimination des matières étant influencées par des facteurs comme le vent et le trafic dans les rues (Duncan, 1995)

Plusieurs tentatives ont été faites pour caractériser la contamination sur les routes et celles-ci mais avec une pertinence relative pour les systèmes de récupération de l'eau de toit : les contaminations des routes étant à la fois bien plus fortes et avec certains contaminants que l'on va rarement trouver en toitures.

À travers des études de processus d'accumulation apportées à l'échelle urbaine, une réflexion sur l'échelle de toiture sera portée. Dans l'échelle de ruissellement urbain, nombre d'études prouvent que le processus d'accumulation ne dépend que de la période sèche entre les deux pluies (ou appelé la durée de temps sec précédant l'évènement) (Shahhen 1975 ; Alley et Smith, 1981, Grottker 1987 ; Baffaut et Delleur, 1990, Chen et Adams, 2007). L'équation d'accumulation la plus souvent appliquée est (Sartor and Boyd, 1972) :

$$L = L_{max}(1 - e^{-k_a t}) \quad \text{Équation 17}$$

- L est la charge contaminée ;

- $L_{\max}$  est la charge maximale de contaminants pouvant être maintenue par la surface, ou plus précisément la charge d'équilibre où les processus de dépôt et d'élimination s'équilibrent ;
- $k_a$  est la constante d'accumulation,
- $t$  est le temps s'écoulant durant la période sèche entre les deux pluies.

L'équation 17 montre une accumulation asymptotique tendant vers une accumulation maximale. Ainsi plus la durée de temps sec sera longue, plus le potentiel de contamination de l'eau de pluie pendant l'événement pluvieux suivant sera important. Ainsi, dans nos recherches, il est nécessaire de discuter de la relation entre la qualité de l'eau et la durée de temps sec précédant. Sur les rues, le temps pour atteindre une charge maximale a été estimé à une semaine (Pitt et al. 1999). Sur les toits, compte tenu de leur exposition aux aléas climatiques et en particulier au vent d'une part et du caractère lisse des matériaux de couverture, on peut raisonnablement considérer que l'équilibre entre dépôts atmosphériques et remise en suspension peut être atteint rapidement, et que le temps d'atteinte de la charge maximale est beaucoup plus court que sur les surfaces urbaines au sol. Toutefois cela ne concerne pas les contaminations microbiologiques liées à l'utilisation du toit par différents animaux (oiseaux, petits mammifères...), qui devraient être croissantes de manière continue et éventuellement se stabiliser, mais *via* des processus d'origine autres que liés à la météorologie locale.

### 1.2.2 Processus de lessivage (*wash-off*)

Depuis le début de la pluie, les matières sur le toit ont commencé à être emportés. Ce processus est généralement appelé processus de lessivage (*wash-off*).

Comme le processus d'accumulation, nous nous référons aux résultats obtenus à l'échelle de ruissellement urbain. De nombreux travaux montrent que le processus de *wash-off* dépend de l'intensité de pluie et de sa durée (Sartor et Boyd, 1972 ; Gupta and Saul, 1996 ; Sansalone and Cristina, 2004). Plusieurs formules ont été développées. Par exemple l'équation 1 ( $L = L_0 e^{-k_w i t}$ ) et l'équation 2 ( $L = L_0 e^{-k_w h}$ ) dans la section 1.1.1 décrivent les changements de la qualité des eaux de ruissellement dans la rue en fonction de l'intensité et du temps de pluie. L'équation repose sur l'hypothèse que la quantité de matière lessivée dépend de deux paramètres : la quantité de matière présente sur la surface et l'intensité de la pluie. Ces formules fournissent une modélisation schématique d'évolution de la qualité et indiquent une réduction exponentielle au cours de la pluie. Dans les cas de toiture, les différences entre les captages sur les toits et les routes font que les valeurs de  $k_w$  pour les toits sont susceptibles d'être sensiblement différentes de celles des routes.

Pour la RUEP, la qualité du ruissellement est la question principale plutôt que la capacité d'élimination de la pollution du support (la toiture), et la quantité de contaminants enlevés de la surface est liée à la quantité de polluants initiale. L'équation 1 peut être reformulée en termes de changements de qualité des eaux de ruissellement plutôt que des changements dans la contamination résiduelle.

En plus, l'intensité de précipitations semble être le facteur déterminant (Duncan, 1995), parce que les grosses particules ont besoin d'énergie cinétique pour être délogées par l'action de récurage des gouttes de pluie. Yaziz (1989) a trouvé un lien entre l'élimination

des contaminants et l'intensité de pluie bien que la corrélation reste incertaine. Comme mentionné dans la section 1.1.1, pour un bassin versant large et plat, l'intensité de la pluie doit attendre à 18mm/h. Mais, la plupart des toitures nécessitent moins d'énergie pour déloger les particules en raison de leur surface lisse. Donc, on peut attendre qu'une intensité de pluie inférieure à 18mm/h suffira à éliminer la pollution accumulée sur la toiture. La relation entre l'intensité et les quantités des polluants sera discutée plus en détail dans le chapitre 5.

### **1.3 Définition du *first flush* de toiture**

Il convient de noter que cet effet de *first flush* sur la toiture reste controversé. D'un côté, certains travaux ont montré qu'un déviateur de *first flush* peut améliorer la qualité de l'eau stockée car il est capable d'éliminer à la fois les polluants particuliers et les polluants dissous (Martinson et Thomas 2009 ; Abbott et al. 2007 ; Lee et al. 2002 ; Schriewer et al. 2008 ; Zobrist et al. 2000), D'un autre côté, il y a des études qui montrent que, au niveau microbiologique, ce phénomène n'existe pas (David, 2009 ; Gikas et Tsihrintzis, 2012). Bien que le système de *first flush* soit considéré comme un élément important dans la plupart des recommandations internationales pour la récupération de l'eau de pluie en aval de toiture (Australie, Canada, Georgia, Hawaï, Oregon, Texas ...), la première réglementation française (l'arrêté du 21 août 2008) ne la mentionne pas (Nguyen et al., 2011).

Au final, au regard de la définition apportée à l'échelle urbaine, il nécessite une clarification spécifique de la notion de *first flush* aux toitures. Deuxièmement, plusieurs facteurs ont une influence sur la qualité des eaux de toiture et le poids relatif de ces facteurs doit être approfondi. En troisième lieu, la sélection de paramètres à suivre est un point-clé pour analyser la qualité de l'eau et évaluer la réalité du phénomène. De nouvelles études sur les variations de la qualité des eaux de ruissellement prenant en compte à la fois le niveau de contamination physico-chimique et le niveau de contamination microbiologique sont en effet nécessaires.

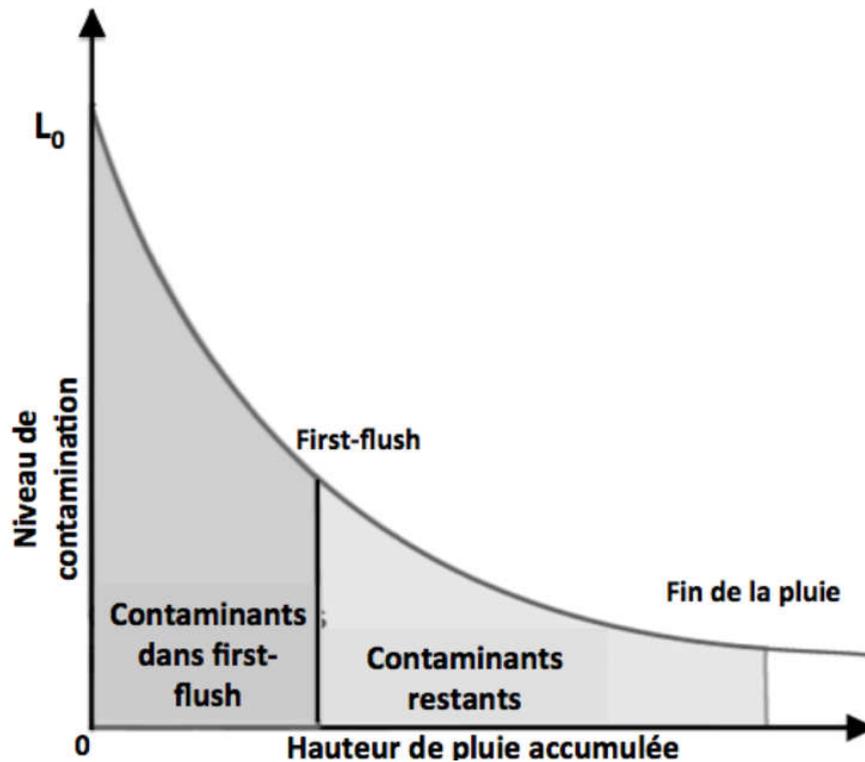


Figure 2-3. Description schématique d'un processus du ruissellement lors d'un événement de pluie (d'après Martinson, 2009)

La Figure 2-3 montre le comportement typique attendu avec le niveau de contamination commençant à  $L_0$  et tombant avec les précipitations accumulées jusqu'à la fin de l'évènement de la pluie. Parce que les contaminants s'accumulent dans le réservoir, l'intégration des niveaux de contaminations par rapport aux précipitations globales donne la quantité totale de contaminant accumulée dans le stockage. Cette Figure 2-3 montre aussi l'effet du ruissellement initial. La zone sous la courbe indique que les contaminants dans la première partie de l'eau de pluie contiennent la majorité de la contamination totale mais sa hauteur de pluie est inférieure à la moitié de la pluie totale. L'efficacité du *first flush* dépend de la rapidité des lavages des contaminations et de l'équilibre établi entre l'élimination des contaminants et l'écoulement de l'eau stockage.

La notion de *first flush* présente des limites et pourrait être contaminant-dépendant : ainsi il a été montré que la déviation du volume de *first flush* ne permet pas d'abatre drastiquement la concentration de contaminants fécaux (Gikas and Tsihrintzis, 2012). De même, des différences de *first flush* ont été notées entre fraction dissoute et fraction particulaire de contaminants (Lee et al., 2012). En outre, les études portant à la fois sur la quantité et la qualité du *first flush* en aval de toiture sont peu nombreuses, *a fortiori* dans les zones en climat tempéré (distribution des pluies assez homogène au cours de l'année), où les conditions météorologiques semblent moins propices à l'observation de *first flush* marqués. Une comparaison des résultats d'analyse de la qualité de l'eau en aval de toitures à la morphologie similaire et équipées du même dispositif de collecte du *first flush*, mais situées dans des zones géographiques au climat très différent, apparait donc intéressante.

## 1.4 Facteurs influençant l'évolution de la qualité

La variabilité de l'évolution de la qualité de l'eau ruisselée de toit est due à l'un ou à la combinaison de plusieurs des processus suivants (Förster, 1996 ; Zinder et al., 1998) :

- Mobilisation par l'eau de pluie des matières, particules et substances qui se sont déposées sur le toit avant l'épisode pluvieux ;
- Mobilisation par l'eau de pluie des matières, particules et substances issues de la dégradation et de la corrosion du toit avant l'épisode pluvieux ;
- Charge initiale maximale de l'eau de pluie en contaminants d'origine atmosphérique, qui va ensuite diminuer avec le temps en raison du piégeage initial des particules, aérosols et gaz par les gouttelettes (lessivage de l'atmosphère par la pluie).

Donc, il s'agit des processus qui peuvent causer le dépôt et lessivage de matière (nature de précipitation), le toit lui-même (nature et caractéristique architecturales) et ceux qui peuvent affecter le toit et qui peuvent causer des changements dans l'environnement atmosphérique.

Il est donc nécessaire de considérer ces facteurs pour chaque situation (par exemple, deux toits de même nature et de même architecture peuvent générer des émissions différentes en fonction de leur emplacement et orientation). La durée de temps sec précédent l'évènement pluvieux est l'un des facteurs majeurs conditionnant potentiellement le *first flush* le plus étudié dans la littérature (Lee et al., 2004). Une quantité importante de recherches portant sur les toitures mettent également en avant l'intensité des précipitations : à titre d'exemple, le Conseil du développement de l'eau du Texas (*Texas Water Development Board*) note qu'une intensité des précipitations d'au moins 2,5 mm / heure est nécessaire pour bien lessiver les contaminants de la surface du toit (TWDB, 2005).

## 1.5 Approche opérationnelle du *first flush* : quantité du *first flush* et déviateurs de *first flush*

### 1.5.1 Efficacité de l'élimination et l'efficacité volumétrique

Comme mentionné dans la section précédente, si l'on détourne la première partie d'une pluie, le reste de l'eau stockée sera beaucoup plus propre et la nécessité d'un traitement ultérieur peut être réduite ou même éliminée. Mais il faut savoir ce qu'est cette "première partie". Quand le volume de *first flush* augmente, le taux de récupération d'eau utilisable diminue, l'efficacité de l'élimination augmente, mais l'eau stockée et utilisable diminue. L'équilibre entre ces facteurs est essentiel pour la conception rationnelle des dispositifs de *first flush*.

- **L'efficacité de l'élimination :**

L'efficacité d'élimination d'un système de *first flush* est une mesure de l'efficacité avec laquelle les contaminants sont éliminés du flux d'eau entrant. Il peut être défini comme le ratio entre le contaminant enlevé par le système du *first flush* ( $L_i$ ) et la charge totale de contaminant ( $L_r$ ). Il est en fonction de la diversion du *first flush*.

$$\eta_r = \frac{L_l}{L_r}$$

L'efficacité d'élimination est appliquée à l'ensemble de la série temporelle pour donner les performances globales d'un système particulier.

- **L'efficacité volumétrique :**

L'efficacité volumétrique  $\eta_v$  est une mesure de la « perte d'eau » par le système de *first flush*. Elle peut être calculée en divisant la somme des eaux de ruissellement après le *first flush* ( $V_{r, ff}$ ) par la somme des eaux de ruissellement sans dérivation ( $V_r$ ), que la surface du toit est la même pour les deux, le  $\eta_v$  peut être calculé en utilisant la pluviométrie et la diversion du *first flush*.

$$\eta_v = \frac{V_{r, ff}}{V_r}$$

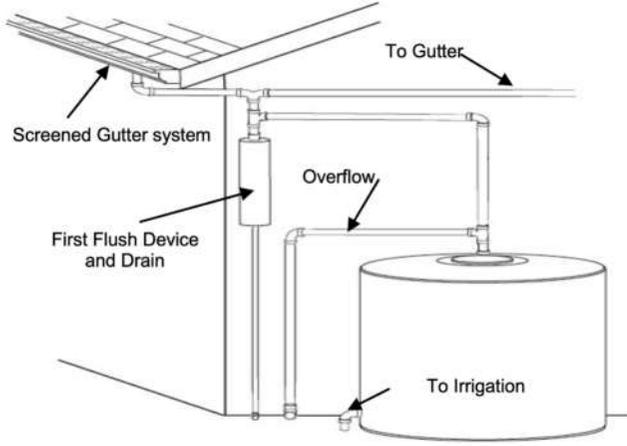
Les relations entre  $L_l$ ,  $L_r$  et  $V_r$  permettent de rationaliser le volume de *first flush* ( $V_{ff}$ ) pour à la fois éliminer les pollutions afin d'atteindre une qualité acceptable et de maintenir l'efficacité de récupération de la ressource d'eau.

### 1.5.2 Cadre réglementaire et référentiels relatifs au *first flush* et revue de la littérature sur Le volume du *first flush*

Bien que la première réglementation française relative à l'utilisation de l'eau de pluie (arrêté du 21 Août 2008) ne fait pas mention du *first flush*, celui-ci est considéré comme un élément important dans la plupart des recommandations internationales pour la récupération de l'eau de pluie en aval de toiture. A la différence d'un système de filtration, le déviateur de « *first flush* » est capable d'éliminer à la fois les polluant particuliers et les polluants dissous (Martinson, B. et T. Thomas 2009). Le Tableau 2-1 fournit certaines recommandations et leurs références relatives existant dans différents pays. La grande majorité des recommandations indiquent la quantité approximative d'eau à dévier. Des méthodes pour dimensionner le déviateur du *first flush* sont parfois proposées (Canada, 2012 ; Delft, Netherlands, 2007 ; Hawaii, American, 2010...).

Tableau 2-1. Cadre réglementaire et référentiel relatif au *first flush* dans différents pays

Pays, document et année	Usage des eaux récupérées	Préconisations et commentaires relatifs au <i>first flush</i>
<p>Canada, <i>Guidelines for Residential Rainwater Harvesting Systems Handbook</i>. 2012</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– toilettes et urinoirs</li> <li>– systèmes d'irrigation souterraine (directement connectés qui distribuent de l'eau sous la surface du sol)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Une figure de fonctionnement de déviateur du <i>first flush</i> est montrée ;</li> <li>– Les pertes initiales sont plus importantes pour le déviateur du <i>first flush</i> que la filtration, tandis que les pertes continues sont plus faibles ;</li> <li>– Le dimensionnement du déviateur du <i>first flush</i> est basé sur la quantité de l'eau de pluie (0,5-1,5mm) en utilisant deux formules :               <math display="block">\text{Volume de déviateur (V)} = \text{Hauteur de pluie dévisée (mm)} \times \text{Surface (m}^2\text{)}</math> <math display="block">\text{Hauteur de } ff \text{ déviateur} = \frac{4 \times \text{volume de deviateur (L)} \times 1000}{3,14 \times \text{diamètre de tuyau (mm)}^2}</math> </li> </ul>
<p>Australia, <i>Guidance on Use of Rainwater Tanks</i>. 2011</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– arrosage du jardin</li> <li>– chasses d'eau</li> <li>– lavage du linge</li> <li>– réapprovisionnement piscines intérieures ou spas</li> <li>– lavage de voitures</li> <li>– alimentation du système d'eau chaude</li> <li>– maisons protectrices du feu de brousse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Pour un toit moyen (150-200 m<sup>2</sup>), il est proposé que les 20-25 L de l'eau de pluie soient détournés.</li> <li>– Le déviateur du <i>first flush</i> doit être vidé avant chaque pluie.</li> </ul>

<p>Hawaii, Etats-Unis, <i>Rainwater catchment systems for Hawaii.</i> 2010</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- eau potable</li> <li>- bain</li> <li>- lavage</li> <li>- toilettes</li> <li>- lavage du linge</li> <li>- arrosage du jardin</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La combinaison d'un dégrillage et du déviateur du <i>first flush</i> est recommandée.</li> <li>- Dans les zones sèches, l'eau dans le déviateur du <i>first flush</i> peut être stockée séparément pour les cas d'urgence.</li> <li>- Près d'une zone agricole, le déviateur du <i>first flush</i> est fortement recommandé.</li> </ul>
<p>Berkeley, Etats-Unis, <i>Guide to conserving water through rainwater harvesting and gray water reuse for outdoor use.</i> 2010</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- eau non-potable</li> <li>- arrosage du jardin</li> <li>- chasses d'eau</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- On peut installer un déviateur du <i>first flush</i> qui détourne le premier millimètre l'eau de pluie dans les jardins comestibles.</li> <li>- Il présente une figure d'exemple de système de récupération de l'eau de pluie :</li> </ul>  <p>The diagram illustrates a rainwater harvesting system. It shows a roof with a 'Screened Gutter system' leading to a vertical pipe. This pipe is connected to a 'First Flush Device and Drain' which has an 'Overflow' pipe leading to the gutter. Below the first flush device, the main pipe continues down to a storage tank labeled 'To Irrigation'.</p>
<p>Georgia, Etats-Unis, <i>Georgia rainwater harvesting guidelines</i> 2009</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- toilettes</li> <li>- systèmes d'irrigation</li> <li>- bavoires de tuyaux</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les options varient sur le volume de l'eau de pluie s'écoulant vers le déviateur du <i>first flush</i>. Les facteurs à considérer sont : le nombre de jours secs, le type de débris, et la surface de toit</li> </ul>

<p>Australian, <i>Rainwater Tank Design and Installation Handbook</i>. 2008</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- eau potable</li> <li>- lavage du linge</li> <li>- chasse d'eau</li> <li>- utilisation en extérieur</li> <li>- piscine / l'étang / le spa</li> <li>- irrigation de jardin</li> <li>- eau chaude</li> <li>- eau pour contre le feu</li> <li>tour de refroidissement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- En cas de pollution par l'industrie et les véhicules, il faut assurer d'installer un déviateur du <i>first flush</i>.</li> <li>- Pour améliorer la qualité de l'eau stockée, 20l de l'eau par 100m<sup>2</sup> de toiture doit être déviés. Dans les zones de polluants lourds, il faut analyser individuellement et vérifier auprès des autorités locales de la santé.</li> <li>- Le déviateur du <i>first flush</i> doit être installé avec un système de dérivation et de drainage automatique.</li> <li>- Évaluer le bon fonctionnement du déviateur du <i>first flush</i> tous les 6 mois.</li> </ul>
---	---	---

<p>Delft, Netherlands, <i>Roofwater Harvesting: A Handbook for Practitioners.</i> 2007</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- seule source d'eau</li> <li>- principale source d'eau (70% de la consommation annuelle d'eau)</li> <li>- source saison humide</li> <li>- source de l'eau potable</li> <li>- source d'eau d'urgence</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'usage eau potable requiert que l'eau soit filtrée ou déviée par un déviateur du <i>first flush</i>.</li> <li>- Une méthode pour évaluer décider la meilleure quantité d'eau à détourner, calculée par une mesure de la turbidité est proposée :</li> </ul> <table border="1" data-bbox="1223 435 2049 938"> <thead> <tr> <th>Volumes recommandés (mm)</th> <th colspan="4">Turbidité ciblée après le dispositif (NTU)</th> </tr> <tr> <th>Turbidité initiale (NTU)</th> <th>50</th> <th>20</th> <th>10</th> <th>5</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>50</td> <td>0</td> <td>1,5</td> <td>2,5</td> <td>3,5</td> </tr> <tr> <td>100</td> <td>1</td> <td>2,5</td> <td>3,5</td> <td>4,5</td> </tr> <tr> <td>200</td> <td>2</td> <td>3,5</td> <td>4,5</td> <td>5,5</td> </tr> <tr> <td>500</td> <td>3,5</td> <td>4,5</td> <td>5,5</td> <td>6,5</td> </tr> <tr> <td>1000</td> <td>4,5</td> <td>5,5</td> <td>6,5</td> <td>7,5</td> </tr> <tr> <td>2000</td> <td>5,5</td> <td>6,5</td> <td>7,5</td> <td>8,5</td> </tr> </tbody> </table> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Le système du first flush doit être auto-vidange, dont il réinitialise automatiquement. Cependant, il doit aussi débayer des boues accumulées au moins de toutes les trois précipitations.</li> </ul>	Volumes recommandés (mm)	Turbidité ciblée après le dispositif (NTU)				Turbidité initiale (NTU)	50	20	10	5	50	0	1,5	2,5	3,5	100	1	2,5	3,5	4,5	200	2	3,5	4,5	5,5	500	3,5	4,5	5,5	6,5	1000	4,5	5,5	6,5	7,5	2000	5,5	6,5	7,5	8,5
Volumes recommandés (mm)	Turbidité ciblée après le dispositif (NTU)																																									
Turbidité initiale (NTU)	50	20	10	5																																						
50	0	1,5	2,5	3,5																																						
100	1	2,5	3,5	4,5																																						
200	2	3,5	4,5	5,5																																						
500	3,5	4,5	5,5	6,5																																						
1000	4,5	5,5	6,5	7,5																																						
2000	5,5	6,5	7,5	8,5																																						

<p>Texas, Etats-Unis, <i>The Texas manual on rainwater harvesting.</i> 2005</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- eau potable</li> <li>- systèmes d'irrigation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Il est recommandé de dévier 10 gallons pour chaque 1 000 pieds carrés de surface de collecte (37,9L pour 92,9 m<sup>2</sup>) ;</li> <li>- Le volumes de <i>first flush</i> varient en fonction du nombre de jours secs, de la quantité et du type de débris et de la saison</li> <li>- Si la toiture dispose de plusieurs descentes, un déviateur du <i>first flush</i> doit être installé sur chaque descente.</li> </ul>
---	--	---

Le Tableau 2-2 présente les valeurs de *first flush* retrouvées dans des études publiées dans la littérature sur les toitures. Ces valeurs sont variables selon les études et leur obtention est souvent peu explicitée : ils ne reprennent pas les modèles d'évaluations quantitatives basées sur la masse ou la concentration.

Tableau 2-2. Volumes de *first flush* proposé dans différentes publications

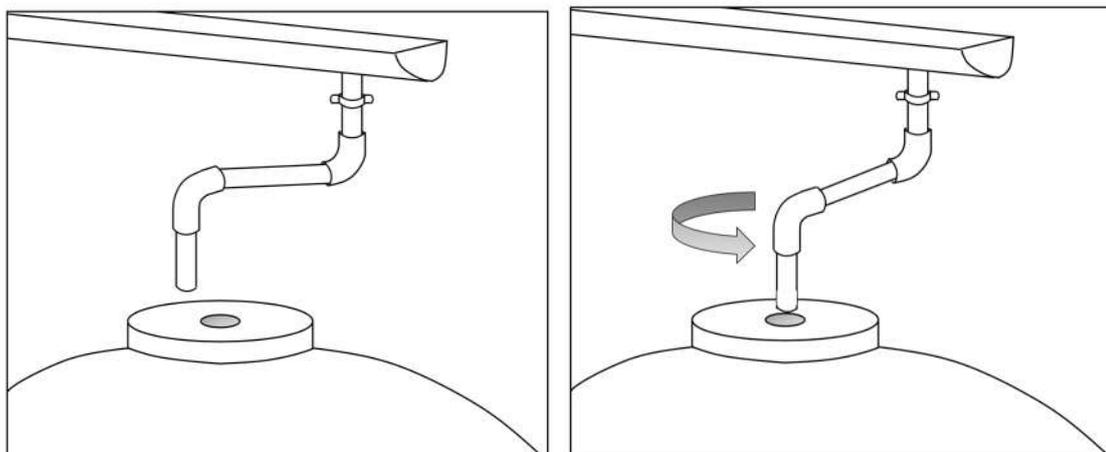
Étude	Volume proposé pour le <i>first flush</i>	Justification
Forster, 1999	1 à 2 L/m <sup>2</sup> toiture	Mesure des concentrations de contaminants
Yaziz et al., 1989	0,33 L/m <sup>2</sup> toiture	Mesure des concentrations de contaminants
Texas Manuel on Rainwater harvesting, 2005	0,41 à 0,82 L/m <sup>2</sup> toiture	Non spécifiée
Martinson et Thomas, 2005	1 L/m <sup>2</sup> toiture	Diminution de 50 % de la concentration en polluants
Doyle, 2008	1 L/m <sup>2</sup> toiture	Mesure des concentrations de contaminants
Lee et al., 2012	0,2 L/m <sup>2</sup> toiture	Non spécifiée
EnHealth Cunciel, 2004	20-25 L/toiture moyenne	Non spécifiée

### 1.5.3 Différents types de déviateur de *first flush*

Il existe trois méthodes de séparation du *first flush* ; manuel, volume fixe et débit d'écoulement.

- **Déviateur manuel**

La méthode manuelle (représentée dans la Figure 2-4) est la plus simple et est largement recommandée (Lee et Visscher, 1992 ; Gould et Nissen-Petersen, 1999), mais pour utiliser cet appareil, l'utilisateur doit rester chez lui et opérer le déviateur lorsqu'il pleut. Les inconvénients liés à cette manipulation réduisent grandement sa praticabilité.



Élimination du *first flush* (a) Récupération des eaux (b)

Figure 2-4. Déviateur de *first flush* manuel (d'après Lee et Vissher, 1992)

- **Déviateur à volume fixe**

La méthode à volume fixe (Figure 2-5), qui repose sur l'eau remplissant simplement une chambre d'une taille définie (souvent une longueur de tuyau de descente) jusqu'à ce qu'elle déborde est la méthode «automatique» habituellement recommandée (Herring et *al.*, 2009). La méthode peut être utilisée avec ou sans une balle flottante. Cette balle aide à réduire le risque de mélange entre la première partie des eaux sales déviées par le dispositif et les eaux propres stockées. Cependant, Michaelides [1987] a constaté que ce mélange est très limité. Si le déviateur de *first flush* est placé dans une partie horizontale de la descente de gouttière, le mélange est considérablement réduit.

Ce type de déviateur peut se vider automatiquement ou manuellement au bout d'un certain temps. Le système de vidange manuel est rarement recommandé car il nécessite l'intervention de l'utilisateur. Si l'utilisateur n'a pas procédé à cette vidange, le déviateur ne fonctionne pas pour la prochaine pluie.

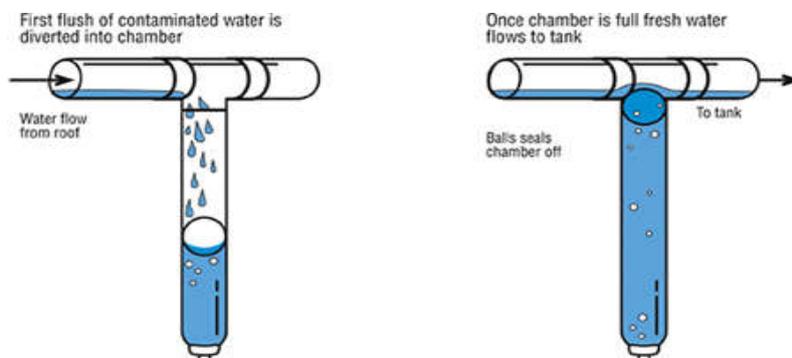
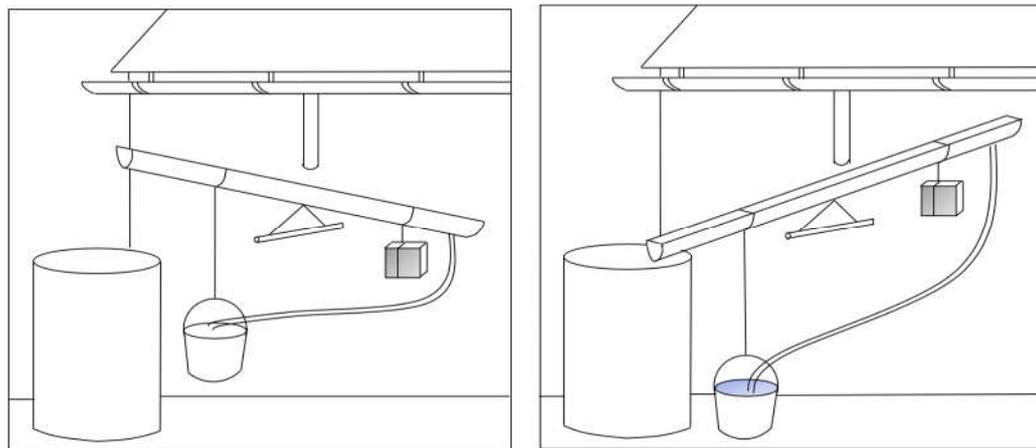


Figure 2-5. Déviateur de *first flush* à volume fixe (Doug, 2006)

Un système à masse fixe (au travers d'un volume d'eau fixe) a également été promu en Afrique, mais pas accepté par les utilisateurs. Il s'agit d'un dispositif qui utilise un système de bascule pour diriger l'eau (Figure 2-6) mais l'effet n'est pas parfait (Gould & Nissen-Petersen, 1999).



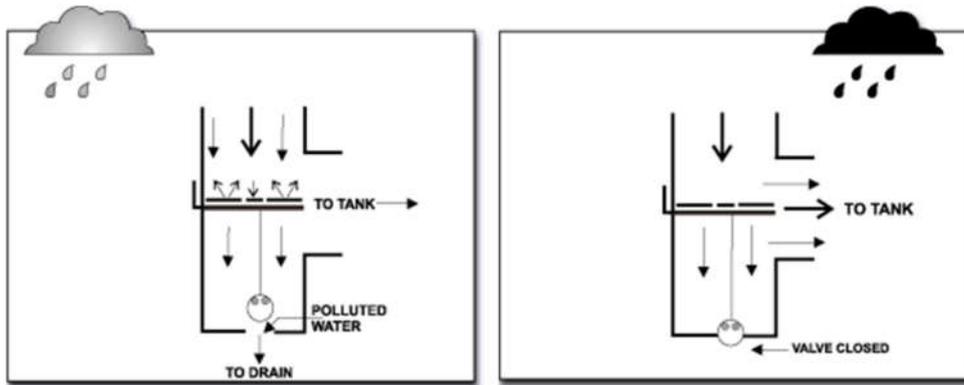
(a) eau de *first flush* > poids

(b) eau de *first flush* < poids

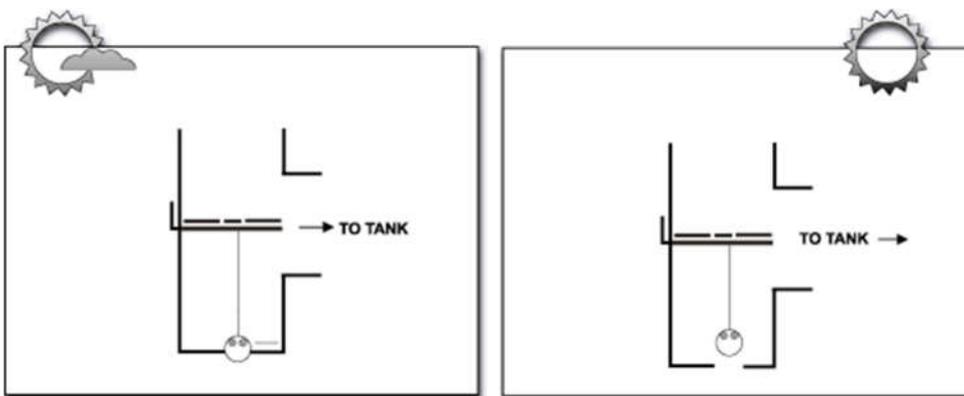
Figure 2-6. Déviateur de *first flush* en utilisant une bascule (d'après Lee and Visscher, 1992)

- **Déviateur de « débit »**

La méthode du débit d'écoulement est un concept nouveau qui consiste à utiliser les variations de débit au cours d'un évènement pluvial (Figure 2-7). Les concepteurs en matière gestion des eaux pluviales urbaines ont eu recours à un modèle de débit de premier flot pendant un certain temps afin de réduire l'emprise au sol des installations, mais récemment plusieurs entreprises en Australie (Church, 2001) et aux États-Unis (Doug, 2006) ont commercialisé des systèmes dans lesquels le débit est utilisé pour les eaux de ruissellement du toit.



(a) Processus de déviation pendant la pluie (intensité de pluie faible et forte)



(b) Processus d'autonettoyant pendant la période sèche (Nuageux et ensoleillé)

Figure 2-7. Déviateur du *first flush* du débit d'écoulement (Doug, 2006)

Ces systèmes équilibrent la vitesse de prise d'eau dans un ballon creux en suspension par rapport à son étanchéité. Au cours d'une précipitation faible, le débit de l'eau de pluie entrant dans la cuve du déviateur de *first flush* est inférieur au débit de fuite dans l'ouverture de fond. L'eau de pluie n'entre pas à l'intérieur du ballon et le ballon est en suspension. Toute l'eau entre alors éliminée. Pendant les fortes précipitations, le débit d'eau de pluie pénétrant dans la cuve de déviateur est supérieur au débit de fuite de l'eau dans l'ouverture de fond. L'eau de pluie s'écoule lentement à l'intérieur du ballon et augmente son poids. Le ballon descend et bloque l'ouverture de fond quand le volume situé au-dessus est plein d'eau. Dès que le volume du déviateur de *first flush* est rempli, la pluie commence à couler dans les réservoirs de stockage. Une fois la pluie terminée, parce qu'il n'y a pas d'eau entrant dans le déviateur, l'eau dans le ballon s'écoule lentement et le ballon monte. Les eaux dans le déviateur s'écoulent dans le drain. Pendant la période ensoleillée, le vidange de l'eau est accéléré et le ballon revient à son état initial et est suspendu dans le déviateur. Le système a l'avantage d'être en grande partie autonettoyant et élimine la nécessité d'un stockage de la première eau de rinçage (et son drainage ultérieur).

## **2. Problématique de la thèse : appréhender la dynamique d'évolution de l'eau de toiture en cours d'événement**

A partir de l'étude bibliographique portant spécifiquement sur l'évolution de la qualité de l'eau de ruissellement de toiture au cours de l'événement pluvial dans la section précédente, il devient possible de préciser la problématique de la thèse. Il s'agit d'abord de formuler la question de recherche à traiter, ainsi que les objectifs et les hypothèses qui y sont associés, puis de présenter la démarche envisagée.

### **2.1 Problématique, objectifs et hypothèses**

Il a été indiqué qu'un grand nombre de facteurs peuvent influencer l'évolution de la qualité de ruissellement de toiture. En fonction de la nature de la toiture, de l'environnement du bâtiment, des caractéristiques de l'évènement pluvial considéré, en conditions réelles, la qualité de l'eau de ruissellement de toiture de chaque événement pluvieux est variable. Cette variabilité se traduit d'une part entre différents événements, et d'autre part au sein même de chaque événement, par une évolution de la qualité de l'eau au cours de celui-ci. Pour ce deuxième cas, bien que l'effet de *first flush* est observé par nombreuses études, en raison de la complexité de la situation réelle, plusieurs questions doivent encore être discutées, d'une part sur les conditions d'existence d'un phénomène de *first flush*, d'autre part sur ce qui conditionne l'amélioration de la qualité de l'eau au cours d'un événement donné.

Concernant l'occurrence ou non d'un effet de *first flush*, les questions sont les suivantes :

- Observe-t-on un phénomène de *first flush* pour tous les événements pluvieux ?
- Cet effet se constate-t-il pour tous les types de contaminants (matières particulaires, produits dissous, micropolluants organiques, contamination microbiologique) ?
- Dans quelles conditions une amélioration de qualité peut être observée et quels facteurs sont les facteurs clés qui déterminent l'existence de cet effet (état initial de la toiture, caractéristiques de pluie...) ?

Pour les événements dont l'amélioration de qualité est constatée, il se pose également encore des questions :

- Comment la qualité a évolué (l'optimisation de la qualité de l'eau est rapide ou lente, et comment définir la vitesse du changement) ?
- Quelle est la relation entre l'évolution et les facteurs déterminants ? (comment la quantité de polluants attachée au toit et comment l'intensité des précipitations

affectera l'évolution de qualité ? Existe-t-il des différences dans l'impact de ces facteurs sur différents types de polluants ?)

- Est-il possible de modéliser l'évolution de la qualité pour fournir des solutions de conception, d'utilisation et de maintenance d'un déviateur de *first flush* ?

Donc, dans notre étude, l'objectif central est **d'analyser les dynamiques d'évolution de la qualité des eaux de toit en cours d'événement**. Cet objectif principal se décompose en trois objectifs.

Le premier consistera à *analyser l'évolution de la qualité de l'eau de toiture au cours des événements pluviaux*, c'est-à-dire à déterminer si l'évolution de divers polluants varie régulièrement dans différentes situations et si l'évolution de la qualité de l'eau présente un phénomène de *first flush* comme mentionné dans la littérature.

En second lieu, en raison de la variabilité des facteurs affectant l'évolution de la qualité de l'eau, il s'agira d'*identifier les facteurs déterminants de l'évolution de la qualité de l'eau de toiture et les conditions dans lesquelles une amélioration de cette qualité est observée*.

Enfin, pour différents types de polluants dans différentes situations où une évolution de la qualité de l'eau de toiture est constatée, nous tenterons de modéliser l'évolution en déterminant le modèle adapté explicable (au travers les facteurs déterminants).

Ces trois objectifs sont liés et explorent progressivement l'évolution de la qualité.

Ces objectifs nous conduisent à formuler des hypothèses, que nous chercherons à confirmer ou infirmer au travers de notre travail. Les trois objectifs précités conduisent à proposer trois hypothèses :

- 1ère hypothèse : L'amélioration de la qualité des eaux de toiture en cours d'évènement est susceptible d'être observée, mais n'est pas systématique.
- 2ème hypothèse : Cette amélioration est effective sous certaines conditions relatives à l'état initial de la toiture et aux caractéristiques de la pluie.
- 3ème hypothèse : Cette amélioration – lorsqu'avérée – peut être expliquée à partir de la modélisation des processus de dépôt et lessivage.

## 2.2 Démarche adoptée

La Figure 2-8 explique en détail la démarche scientifique pour cette étude. Afin d'atteindre les objectifs, les tâches suivantes doivent être effectuées :

- Classification des évolutions en observant les profils d'évolution de qualité des événements pluvieux ;
- Analyse les facteurs déterminants ;

- Proposition des modèles adaptés et analyse des coefficients.

De plus, avant de qualifier l'évolution de qualité, il est nécessaire de définir précédemment des paramètres pertinents pour décrire les qualités des eaux collectées ruisselées. Une étude de sélection des paramètres doit donc être réalisée.

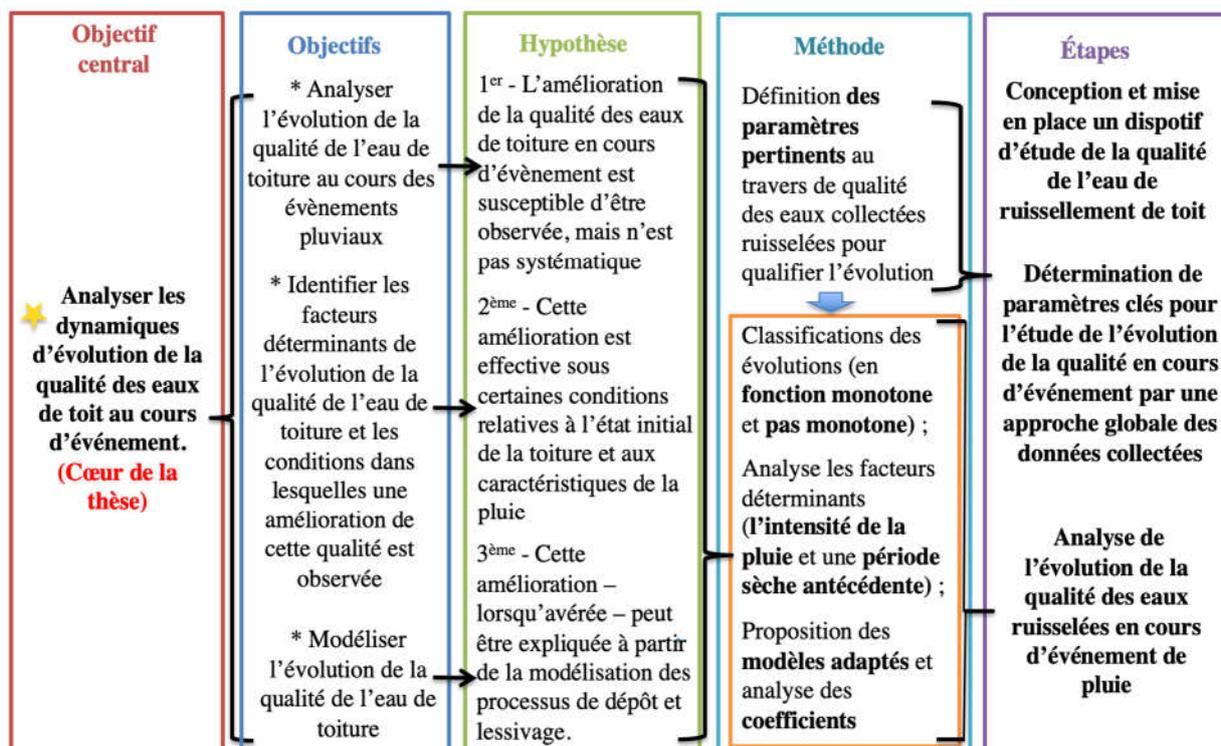


Figure 2-8. Démarche scientifique de la thèse

Ainsi, cette étude est principalement divisée en deux approches : la première concerne la détermination de paramètres-clés pour l'étude de l'évolution de la qualité en cours d'événement par une approche globale des données collectée et la seconde concerne les analyses de l'évolution de la qualité des eaux ruisselées en cours de pluie. La première consiste à trouver la « clé » pour ouvrir la « porte » de la seconde. Nous pouvons également ajouter des éléments de discussion sur la variabilité de la qualité de l'eau et les facteurs influençant la qualité de l'eau afin de compléter nos conclusions. Ces deux approches correspondent aux deux chapitres de la partie 3 de la thèse (chapitres 5 et 6). Au préalable, il convient de définir les méthodologies d'acquisition des données, à savoir : la conception et la construction des dispositifs expérimentaux, puis la sélection et l'analyse de paramètres expérimentaux à utiliser. Cela est l'objet des deux chapitres de la partie 2.

## Conclusion de la partie 1

Cette partie concernant l'état de lieux sur la récupération d'eau de pluie et les enjeux de la qualité des eaux de toiture. Elle est organisée en deux chapitres : le premier est relatif au contexte et à l'état des connaissances sur la récupération et l'utilisation de l'eau de pluie, il présente l'introduction générale du système de RUEP. Cette introduction s'attache à synthétiser une sélection des connaissances bibliographiques concernant le contexte d'étude, le principe de la récupération des eaux de pluie, la qualité des eaux de ruissellement de toiture et des introductions des conditions différentes concernant les comparaisons climatologique et contextuelle entre la France et la Chine pour étudier la qualité ; le deuxième est de l'étude de l'évolution de la qualité de l'eau de toiture au cours d'un événement qui est consacré à une étude bibliographique plus spécifique au sein de l'évolution de la qualité en cours d'un événement pluvial. Il s'intéresse surtout aux hypothèses expliquant ces évolutions et au phénomène de *first flush*. En plus il porte sur la formulation des questions scientifiques de la thèse. Ce chapitre met en évidence la nécessité de connaître l'évolution de la qualité dans les conditions différentes.

A travers l'étude de ces deux chapitres, on peut voir qu'il y a des variabilités au niveau de la qualité de l'eau ruisselée de toiture et aussi au niveau de l'évolution de la qualité au cours de l'événement pluvieux. Dans les parties de résultats et discussion (chapitre 5 et chapitre 6 dans la partie 3), nous nous concentrerons sur l'évolution de la qualité de l'eau. Un travail pour acquérir les données qui permet de caractériser cette évolution de la qualité doit être réalisé dans la partie suivante (Partie 2). Cette partie décrit les systèmes expérimentaux et est organisée en deux chapitres (Chapitre 3 et 4) : la définition et la mise en place des systèmes expérimentaux dans le chapitre 3 et les paramètres d'étude de la qualité d'eau de toiture et sont protocoles dans le chapitre 4.

**PARTIE 2. Dispositif d'étude de la qualité de l'eau**  
**de ruissellement de toiture dans des situations**  
**contrastées**

Comme cela a été mentionné dans le chapitre 2, beaucoup de facteurs différents affectent la présence de contaminants dans les eaux de toiture. En raison de la diversité de ces facteurs, les niveaux de pollution de ces eaux de toiture sont variables au fil des changements de conditions. En vertu de l'hypothèse présentée dans le chapitre 2, dans certains cas (surtout pour les surfaces de toit fortement contaminées), les contaminations sont plus élevées en début d'événement pluvial. L'observation de cet effet de « *first flush* » n'est pas systématique. Des recherches plus approfondies sont nécessaires.

L'objectif de ce travail est de se doter de données permettant de caractériser l'évolution de la qualité de l'eau de pluie issue de toiture en termes des polluants, à partir de mesures sur des sites différents. Sur la base des données ainsi acquises, on cherchera à mettre en évidence les facteurs déterminants de la contamination des eaux de ruissellement de toiture en cours d'événement.

Pour y arriver, **un système expérimental** qui permet de bien suivre **les paramètres** choisis a été construit et mis en place sur **des sites différents**. Trois considérations sont entrées en ligne de compte pour définir les expérimentations menées.

*La conception et la construction d'un système expérimental.* Le choix du type de dispositif devant offrir la possibilité de proposer un volume de « *first flush* » à dévier suite à l'analyse qualitative et quantitative de l'eau collectée, un dispositif d'échantillonnage fractionné a été construit.

*Le choix des sites d'étude.* La variabilité de la qualité semblant dépendre très fortement du site dépendant d'une part et des « conditions météorologiques d'autre part, on a choisi 3 sites localisés dans 2 pays qui correspondent à différents types de climat, différents environnements et différents niveaux de pollution.

*Le choix des paramètres.* Pour opérer la caractérisation de la qualité, il convient d'identifier puis de mesurer des paramètres physico-chimiques et microbiologiques pertinents pour cette étude. Au-delà de ces paramètres d'autres grandeurs seront également utiles pour expliquer l'évolution possible de la qualité de l'eau de pluie issue de toiture, comme la hauteur de pluie, la durée de temps sec entre deux événements pluviaux, l'intensité de pluie.

Cette partie est organisée en deux chapitres. Le premier décrit la définition et la mise en place des systèmes expérimentaux. Le deuxième présente les paramètres d'étude de la qualité d'eau de toiture et les méthodes analytiques convoquées dans ce travail.

## **Chapitre 3. Définition et mise en place des systèmes expérimentaux**

Ce chapitre est organisé en 3 sections. La première décrit les systèmes expérimentaux mis en œuvre afin d'acquérir les différentes données. La seconde s'attache à la présentation des conditions expérimentales (sites d'étude et caractéristiques des toitures). La dernière évoque les stratégies d'échantillonnage.

### **1. Présentation des systèmes expérimentaux**

Les dispositifs expérimentaux qui étudient l'évolution de qualité de l'eau de pluie sont composés de deux systèmes : le premier assure une collecte fractionnée de l'eau de toiture (au minimum deux fractions) pour réaliser un suivi analytique des contaminants chimiques et microbiologiques dans ces différentes fractions ; et, le second consiste en la collecte de données météorologiques pour étudier les paramètres environnementaux qui vont influencer la qualité.

La collecte en plusieurs fractions successives permet une analyse qualitative de petits volumes d'eau assurant une observation précise de la dynamique des contaminants au cours de l'événement pluvieux (en suivant son évolution par fraction) et donc permet de déterminer quelles fractions contiennent la plus grande partie des contaminants. Lorsque, dans certaines conditions, l'évolution de la qualité des eaux de toiture met en évidence un effet de « *first flush* », ce type de collecte permet aussi de déterminer de manière discrète (en nombre de bouteilles successives) le volume de ce *first flush*, c'est-à-dire le volume de la fraction initiale où se retrouve la plus grande partie des contaminants.

#### **1.1 Les systèmes expérimentaux**

Une sélection de systèmes expérimentaux utilisés dans différentes études issues de la littérature est présentée dans le Tableau 3-1. On peut observer que le système expérimental nécessaire pour notre étude fera appel à différents parties (dispositif d'échantillonnage des eaux ruisselées de toiture, sonde pluviomètre, station météorologique...) pour mesurer tous les paramètres.

Tableau 3-1. Systèmes expérimentaux utilisés dans des études sur la variation de la qualité des eaux de toiture

Étude	Type de toiture	Surface de toiture	Méthode de collecte de l'eau de pluie	Autre(s) dispositif(s)
(Doyle 2008)	Batiment (n=3)	1,58 ; 3,4 et 22,8 m <sup>2</sup>	4 à 6 bouteilles en série (0,56/15 L /bouteille)	Sonde pluviométrique
(Förster 1999)	Banc d'essai (n=5)	--	Fractionnement automatisée	Enregistrement de données météorologiques
(Lee et al., 2012)	Banc d'essai (n= 4)	2,55 m <sup>2</sup>	0,5L pris deux réservoir	Non spécifié
(Mendez et al., 2011)	Batiment (n=3)	2,16 et 5 m <sup>2</sup>	1 bouteille (2 L)	Sonde pluviométrique
(Martinson 2008)	Batiment (n=4)	1 et 2,4 m <sup>2</sup>	4 à 6 bouteilles en série (0,56/1,5 L /bouteille)	Enregistrement de données pluviométrique
(Schriewer et al. 2008)	Batiment (n=1)	238 m <sup>2</sup>	Fractionnement automatisée	Enregistrement de données météorologiques
(Yaziz et al., 1989)	Batiment (n=2)	15 m <sup>2</sup>	5 flacons en série (1 L/flacon)	Enregistrement de données météorologiques
(Zobrist et al., 2000)	Batiment (n=3)	109,2 ; 115,9 et 134 m <sup>2</sup>	Fractionnement automatisée	Sonde pluviométrique

Ces systèmes peuvent être montés sur des toitures en situation réelle ou sur des toitures expérimentales. Concernant les méthodes d'échantillonnage de l'eau de pluie mentionnées dans les articles (cf. Tableau 3-1, les différentes fractions sont récupérées grâce à un système de flacons en dérivation successives (Doyle 2008; Martinson 2008 et Yaziz et al. 1989) ou par un système automatisé de collecte fractionnée (Förster 1999; Zobrist et al. 2000 et Schriewer et al. 2008). Les deux méthodes d'échantillonnage présentent des avantages et des inconvénients (Anderson et al. 2008) :

- Le recours à des flacons successifs permet la mise en place de volumes collectés variables et son coût de conception est faible. Cette approche permet de mesurer des paramètres physico-chimiques et aussi des paramètres microbiologiques. Mais elle rend obligatoire la collecte des échantillons. De plus, la taille de toit ne peut pas excéder 50 m<sup>2</sup> pour garder des flacons de taille raisonnable.
- L'utilisation d'un préleveur automatique permet de suivre plus précisément l'EMCs (*event mean concentrations*) en collectant tout le volume de l'événement de pluie et en mesurant les concentrations de polluants. Le nombre d'échantillons varie selon les caractéristiques de l'événement pluvieux (en fonction du débit) mais le volume

des fractions collectées est fixé (il est imposé par le préleveur). Ce type de collecte n'est pas adapté pour les événements pluvieux longs et/ou intenses (remplissage prématuré de l'ensemble des échantillons). De plus, si le nombre des fractions est plus élevé, il y a des risques de mélange entre certaines fractions. Enfin, cette méthode ne permet pas de mesurer des paramètres microbiologiques car le préleveur automatique peut être contaminé. Son coût est également beaucoup plus élevé que celui du système de flacons successifs.

Dans cette étude, on doit évaluer la qualité de l'eau collectée à travers les paramètres physico-chimiques et aussi les paramètres microbiologiques. L'aménagement d'un dispositif pas cher et dont les volumes des fractions sont flexibles est souhaité. En tenant compte des avantages et des inconvénients listés ci-dessus, on a choisi **un dispositif d'échantillonnage par flacons successifs montés sur des toitures en situation réelle**. Le nombre de fractions collectées et le volume de chaque fraction collectée sont des paramètres importants à considérer. Idéalement, plus le nombre de fractions sera grand, meilleure sera l'exploitation des données expérimentales.

Pour ce système expérimental, une station météorologique ou un pluviomètre devrait également être nécessaire. De plus, un système de gouttière est essentiel afin de collecter l'eau de toit ou être branché sur le système de gouttières déjà existant. Le matériau des gouttières (de type plastique en PVC ou en métal comme le zinc) peut être important à considérer (Förster 1999), notamment pour quantifier ensuite les contaminants chimiques.

## **1.2 Conception et construction du dispositif d'échantillonnage de l'eau de pluie**

La conception de ce dispositif de succession de récipients est basée sur le travail de Yaziz et al. (1989) et de Martinson (2008). Plusieurs rangées de bouteilles ont été construites pour collecter l'eau de pluie à partir du toit. La Figure 3-1 montre le schéma du dispositif d'échantillonnage conçu par Yaziz et al. (1989). Cinq bouteilles de 1 litre ont été reliées *via* une tuyauterie PVC avec un diamètre de 3,1cm. Chaque bouteille contenait également une balle de pingpong pour bloquer le goulot de la bouteille une fois celle-ci remplie. Une contre pente de la canalisation principale de collecte avec un angle de 5° a été adoptée pour empêcher l'eau d'entrer dans les bouteilles ultérieures avant le remplissage complet des bouteilles précédentes.

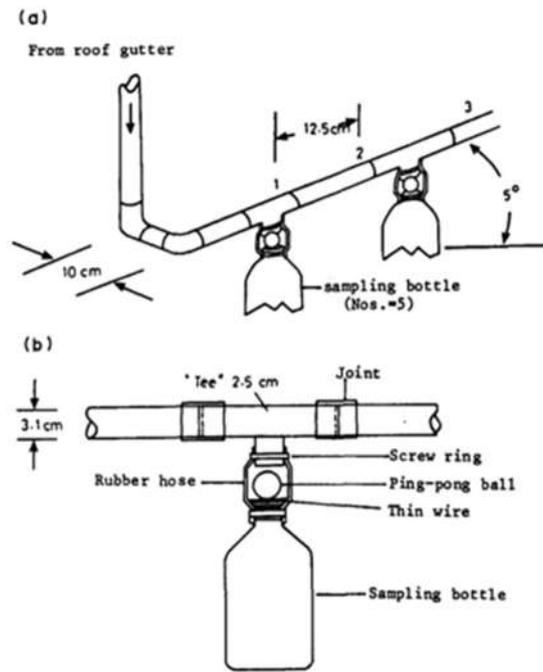


Figure 3-1. Dispositif d'échantillonnage des eaux ruisselées de toiture de Yaziz et al. (1989)

Dans cette étude, on a construit un dispositif d'échantillonnage similaire et mené des essais de performance au laboratoire avant la mise en place sur le site d'étude. Afin de réduire les pertes volumiques et démonter les bouteilles plus facilement, on a mis une petite balle de pingpong avec le diamètre de 25 mm directement dans les bouteilles et un joint mou de 22/38 mm sur la bouche de cette bouteille au lieu de fixer la balle en utilisant le tuyau en caoutchouc. Chaque flacon est relié à un té de 4,0 cm à l'aide d'un embout de tuyau de piscine de 3,8 cm. Les tuyauteries horizontales de 4,0 cm en PVC relient les différents flacons. Une inclinaison de la canalisation vers le haut est de 5° (voir Figure 3-2).

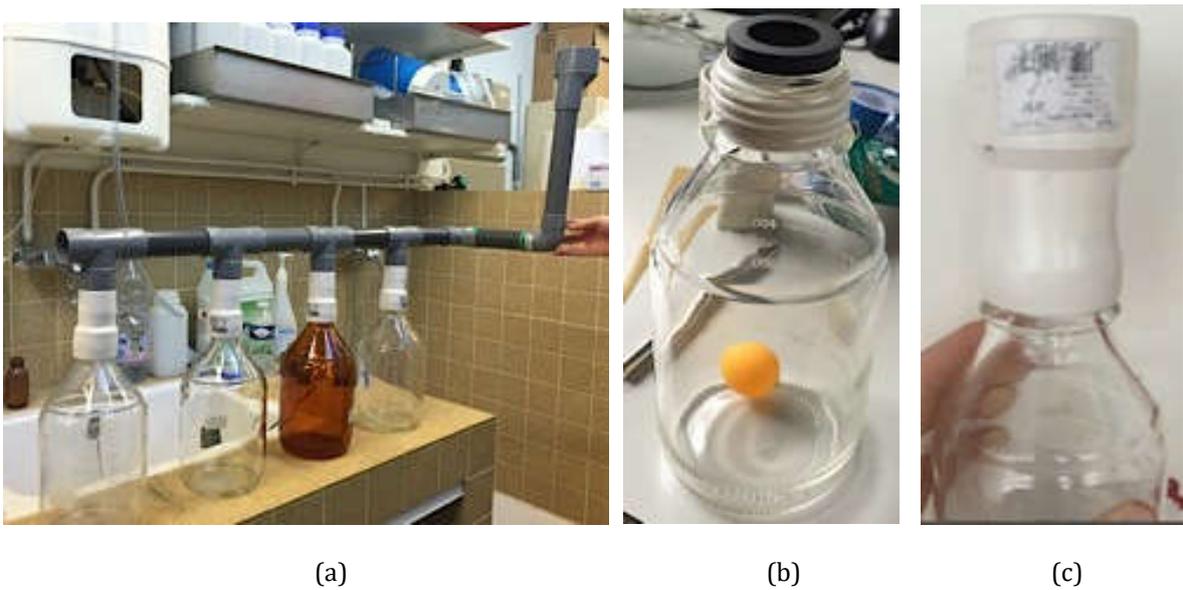


Figure 3-2. (a) Dispositif préliminaire ; (b) Balle de pingpong et joint ; (c) Embout de tuyau

En alimentant par l'eau d'un robinet directement en amont de ce dispositif et changeant le débit de l'eau entrée, il a été possible de simuler la variation d'intensité de la pluie réelle au laboratoire (Le débit  $Q$  de ruissellement dépend lui de la surface  $S$  de toit, du coefficient  $R$  de ruissellement et de l'intensité  $I$  de pluie, selon la formule  $Q = I \times S \times R$ ). Cet essai a mis en évidence que le dispositif peut fonctionner mais comporte des failles qu'il convient d'améliorer pour résoudre les problèmes rencontrés, à savoir :

a) Le système « anti-reflux »

Au cours du remplissage des flacons successifs, il peut survenir un phénomène de reflux, à savoir qu'une fraction de l'eau d'un flacon ressorte de celui-ci pour aller dans le flacon suivant. Ce phénomène est préjudiciable pour l'expérimentation.

Afin d'éviter ce phénomène de reflux, le dispositif de Yaziz et al. (1989) met en œuvre en sus d'une contrepenne de la canalisation horizontale de  $5^\circ$ , un système « anti-reflux » utilisant une balle flottante. Celle-ci remonte au fur et à mesure que le flacon se remplit et finit par obstruer son col quand le flacon est rempli. Comme dans notre étude, des analyses microbiologiques sont effectuées, il convient de limiter autant que possible les contaminations *via* des manipulations. Or, en raison de son matériau, il est difficile de stériliser totalement une balle de pingpong.

Afin de voir s'il était possible de se passer de l'ajout de balles de ping-pong dans les flacons pour assurer l'obstruction de leur entrée une fois leur remplissage terminé, un test simple a été effectué en laboratoire (voir Figure 3-3). Il a consisté à mettre en œuvre le système ci-dessous :



Figure 3-3. Expérimentation sur les effets éventuels de mélange sur la qualité de l'eau de chaque fraction

Deux flacons ont été montés en série, le premier contenant de l'eau colorée (à l'aide de café). On peut évaluer visuellement la qualité de l'eau dans le deuxième flacon après

remplissage à l'eau du robinet (il faut changer le débit d'eau entrée). Le résultat obtenu, à savoir l'absence de migration d'eau colorée en provenance du premier flacon dans le deuxième, montre que l'ajout de balles de ping-pong dans les flacons n'est pas obligatoire, les effets de mélange entre les fractions apparaissant négligeables.

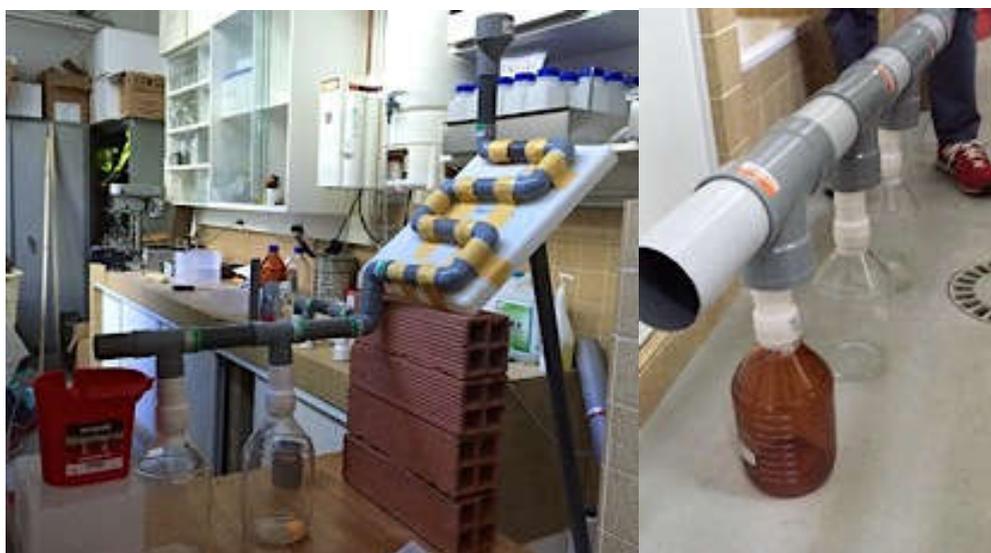
#### b) Le mélange des eaux dans les bouteilles

Le changement de débit d'eau provoque les états différents à l'entrée des bouteilles. Quand l'eau s'écoule lentement avec un débit faible, les bouteilles sont remplies l'une après l'autre. Mais lorsque le débit d'eau augmente et que la vitesse d'écoulement dans le tuyau devient supérieure à celle du déversement dans une bouteille, l'eau s'écoule dans les bouteilles suivantes bien que la première bouteille ne soit pas encore pleine. Cela signifie que pour une pluie d'intensité élevée, un débit important de ruissellement peut causer les mélanges des échantillons.

On sait que le débit volumique dépend lui de la vitesse de fluide et de la section de passage.

$$q_v = v \times S$$

On a testé deux options pour éviter les mélanges. La première vise à ralentir directement la vitesse de l'écoulement de l'eau par ajoutant plusieurs virages de tuyauterie (voir Figure 3-4-a). Le deuxième plan consiste à augmenter la section du tuyau et la taille de té afin de réduire la vitesse d'écoulement (voir Figure 3-4-b).



(a)

(b)

Figure 3-4. Schémas des deux plans pour réduire les mélanges d'eaux dans les bouteilles

Grâce à une série de tests, les résultats montrent que, si la première option peut réduire la vitesse d'écoulement, il y a encore des remous à l'entrée de la bouteille et des mélanges dans les bouteilles. En revanche, le deuxième plan qui propose d'utiliser le tuyau d'un diamètre supérieur fonctionne bien pour le système. Même en cas de débit

important, il n'y a pas de mélanges dans les bouteilles. C'est donc cette solution qui a été adoptée.

c) Les pertes volumiques et les fuites d'eaux du dispositif d'échantillonnage.

Dès qu'on a changé le tuyau de 4,0 cm par celui de 8,0 cm, on a besoin de changer la taille de té et d'ajouter une réduction entre les tés et les bouteilles. Cette réduction est remplie à hauteur de l'entrée du tuyau de diamètre 4,0 cm d'une couche de ciment peinte afin de se prémunir des pertes volumiques. Il est nécessaire de peindre le ciment afin de réduire l'augmentation de pH de l'eau et de le protéger contre la corrosion et les attaques des micro-organismes (voir Figure 3-5-a).

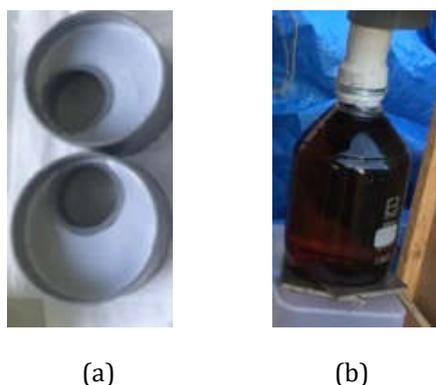


Figure 3-5. Photographies montrant l'obstruction des interstices des réductions 80 - 40 mm par du ciment peint et le collier de serrage fixé aux bouteilles

De plus, le té, la réduction et le tuyau en PVC doivent être collés entre eux pour limiter les fuites. En outre et toujours pour éviter les fuites au niveau de l'embout, l'utilisation de téflon et d'un collier de serrage sont nécessaires (voir Figure 3-5-b).

Pour la conception du dispositif d'échantillonnage de l'eau de pluie, le nombre de fractions collectées et le volume de chaque fraction collectée sont des paramètres importants à considérer. Le Tableau 2 présenté dans le chapitre 2 regroupe des propositions de volumes à dévier issues d'études précédentes (volumes compris entre 0,2 et 2 mm de hauteur de pluie précipitée). Le dimensionnement des fractions s'est effectué en s'appuyant sur ce tableau. Le souhait de disposer d'un dispositif fonctionnel (facile à transporter, encombrement réduit, etc.) a conduit à limiter sa longueur à environ 2,5 m. Conjugué aux contraintes d'espaces à aménager entre chaque fraction (réduction des risques de torrent de remplissage lors d'un événement intense), les dispositifs fractionnés par succession de 6 bouteilles et de 9 bouteilles ont donc été successivement construits et mis en place sur la descente des maisons.

En plus, il a été ajouté au dispositif un réservoir situé à l'extrémité de la canalisation de collecte, afin de permettre de déterminer le volume total d'eau récupérée. Associé aux données de pluviométrie, cela permet de déterminer le coefficient R de récupération du système global qui dépend notamment des caractéristiques de matériau, architecturales et d'orientation du toit et, le cas échéant, de paramètres météorologiques (notamment conditions d'évaporation), qui sont aussi des paramètres jouant sur la qualité de l'eau ruisselée.

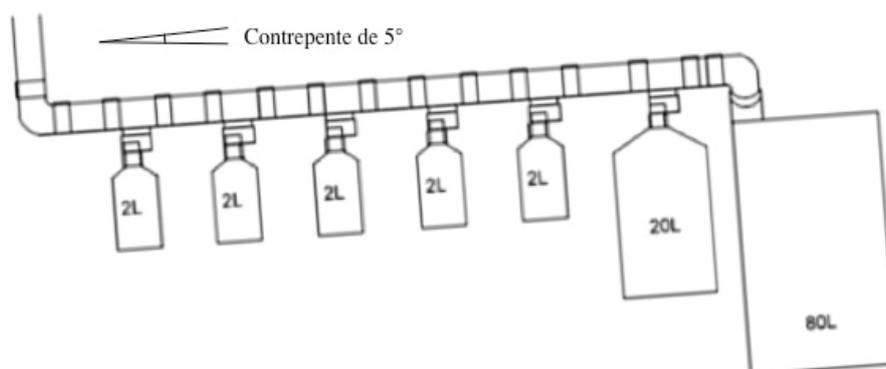
Par conséquent, après plusieurs essais et des améliorations, on a finalisé la conception montrée dans la Figure 3-6. Ce dispositif d'échantillonnage se compose de trois parties :

1) *une série de tuyaux en PVC pour le raccordement.* Il contient deux types de tuyaux : l'un sert à la connexion avec la descente existante, adapté à des retraits/mises en place fréquents du dispositif ; l'autre constitue la tuyauterie horizontale en PVC (collage et entretien faciles) reliant les fractions successives à la première partie du dispositif. Quel que soit le site d'étude choisi, tous ces éléments des tuyaux pour le raccordement dans cette étude ont un diamètre de 8 cm. Les méthodes de raccordement du dispositif et de la descente dans les différents sites d'étude sont décrites plus en détail dans la section 2.3 de ce chapitre ci-après.

2) *plusieurs bouteilles en verre brun SCHOTT DURAN (pouvant être stérilisées facilement en autoclave), pour le recueil des fractions.* Chaque flacon est relié à un té à l'aide d'un embout de tuyau PVC de 3,8 cm de diamètre se vissant sur le flacon, d'un tuyau en PVC de diamètre 4 cm et d'une réduction en PVC permettant le passage du diamètre de 8 à 4 cm. Le té, la réduction et le tuyau en PVC sont collés entre eux pour limiter les fuites. Une contre-pente égale ou inférieure à  $5^{\circ}$  a été appliquée à cette partie pour empêcher le phénomène de reflux. La première pluie tombe sur le toit et remplit la première bouteille. Une fois qu'une bouteille est pleine, l'écoulement peut circuler directement vers la bouteille suivante.

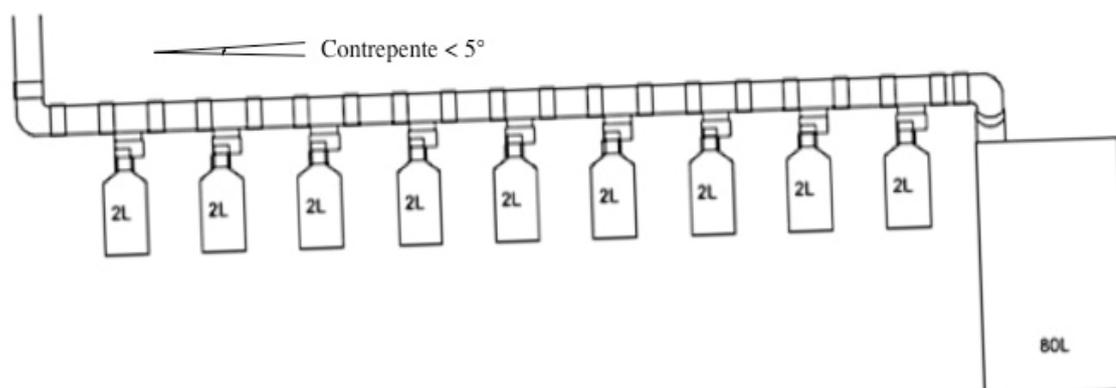
3) *un bidon en PVC de 80 L situé à l'extrémité de la canalisation de collecte, qui récupère la dernière proportion de ruissellement.* On peut calculer le coefficient R de récupération du système global associé aux données de pluviométrie.

Dans cette étude, deux dispositifs de volume total différent sont conçus : le premier avait 6 bouteilles en verre brun (Figure 3-6-a) : cinq bouteilles de 2 L et une bouteille de 20 L. Ensuite, ce dispositif a été optimisé pour assurer que les mesures tendent vers une constante, donc le deuxième avait 9 bouteilles en verre brun de 2 L (Figure 3-6-b).



(a) dispositif 6 échantillons

<sup>3</sup> La pente de  $5^{\circ}$  a été utilisée sur le premier dispositif à 6 flacons. Lorsque celui-ci a été remplacé par le dispositif à 9 flacons, la pente était légèrement inférieure, tout en assurant l'absence de reflux, cela pour une question de stabilité de l'ensemble.



(b) dispositif 9 échantillons

Figure 3-6. Schéma du dispositif d'échantillonnage

Les deux dispositifs d'échantillonnage ont successivement été utilisés sur les sites d'étude en France. Puis, le deuxième dispositif a été reconstruit et installé sur le site d'étude en Chine au lieu de le transporter. En plus de la raison économique et la complexité des transports, ça a permis de continuer à acquérir des données en France tout en ayant celles de Chine produites (travail en parallèle).

De plus, ce dispositif comporte aussi un coffrage conçu avec un bois résistant aux intempéries et supportant les différents éléments cités précédemment. Chaque flacon est placé sur des appuis dont le retrait lors de la collecte facilite leur dévissage. En considérant des différences de situation sur chaque site d'étude, la stabilité du meuble est assurée soit par les tréteaux en pin, soit par les briques ou soit par un banc existant. Une contre pente de la canalisation horizontale de 5° a été réalisée en ajustant la hauteur des deux côtés du dispositif. Des dispositifs sont recouverts d'une bâche en plastique assurant sa protection contre les intempéries pour le cas où il n'y a pas de couverture au-dessus. Comme la montre la Figure 3-7 ci-dessous, en prenant l'exemple de l'un des sites d'étude de Romainville, le dispositif est stabilisé par des briques et la hauteur de ses deux côtés est ajustée par le nombre et l'épaisseur des briques. Ce dispositif est protégé par une bâche bleue en plastique. Les autres méthodes adaptées aux autres sites seront décrites plus en détail dans la section 2.3 de ce chapitre.



Figure 3-7. Photographies de dispositif d'échantillonnage de Romainville

### 1.3 Le système de collecte des données météorologiques

Il peut s'agir d'une station météorologique automatisée enregistrant les données de pluviométrie, de vent, de température au cours du temps. Ce type de système permet d'envisager l'étude des impacts des variations d'une grande diversité de paramètres météorologiques sur la qualité des eaux de toiture. Néanmoins, l'utilisation d'un pluviomètre suffit quand le but recherché est uniquement de valider le bon déroulé des échantillonnages. En effet, l'extraction des données de hauteurs d'eau précipitées enregistrées sur la centrale d'acquisition permet de comparer les hauteurs de pluie collectées par le dispositif aux hauteurs de pluie précipitées. En outre, une réflexion sur la définition de l'événement pluvieux générant une collecte a été entreprise : la méthodologie de collecte d'une pluie sont présentées dans les deux sections suivantes.

Dans cette étude, il est nécessaire d'installer un pluviomètre sur le site d'étude au vu des éléments énoncés. Un pluviomètre à auget basculeur (un basculement tous les 0,2 mm de pluie), dont la centrale d'acquisition de données, doit être installé. Le volume d'eau estimé par le nombre de basculements d'auget a ensuite été comparé au volume réellement collecté dans un bidon relié au pluviomètre. L'écart entre ces deux volumes est acceptable puisqu'inférieur à 5%. La précision de l'auget (0,2 mm) entraîne une erreur potentielle de 0,2 mm sur le cumul de hauteur de pluie enregistrée lors d'une série de pluies. Ce pluviomètre doit être installé près de la toiture sélectionnée et installé en un endroit plus élevé. Il faut assurer qu'il n'y a aucun obstacle au-dessus comme une toiture ou un 'arbre. Dans tous les cas, la maintenance de ces appareils de mesure a été effectuée par nos soins. Cette maintenance consiste à vérifier que le dispositif de collecte n'est pas bouché et à vérifier le niveau de l'appareil.

### 1.4 Les limites du système expérimental

Le système expérimental est composé d'une partie d'un dispositif d'échantillonnage de l'eau de pluie et d'une autre partie d'un pluviomètre. Au travers des collectes de l'eau de pluie et de l'acquisition de données pluviométriques, on peut non seulement caractériser

l'évolution de la qualité de l'eau de pluie en termes de polluants, mais aussi étudier l'impact des caractéristiques de précipitation (intensité, durée de temps sec...) sur cette évolution. Toutefois, il faut souligner que, bien que nous ayons envisagé autant de problèmes que possible lors de la conception et de la construction, nous avons néanmoins constaté une limite de ce dispositif au cours de l'expérimentation : l'absence de connaissance de la relation précise dans le temps entre la pluie donnée par le pluviomètre et le remplissage des bidons.

Dans cette étude, au travers du calcul des coefficients de ruissellement et de l'estimation de la perte d'eau initiale, on propose une méthode pour estimer le début d'accumulation de l'eau dans le premier flacon et la durée de remplissage du dispositif d'échantillonnage pour les différents types d'événements de pluie sur différents sites d'étude (cette méthode sera décrite plus en détail dans la section 2.1.1 de chapitre 6). Pour les études au futur, on pourrait ajouter un débitmètre ou un capteur à l'entrée de l'équipement d'échantillonnage afin de simplifier et d'améliorer l'échantillonnage.

## **2. Choix des sites d'étude et de toitures**

Une fois le dispositif expérimental de collecte défini, on doit choisir les sites d'étude et les toitures.

### **2.1 Les critères de choix des sites d'installation du système expérimental**

Selon l'étude de Martinson (2008), les différents types de climat ont des impacts sur l'évolution de la qualité de l'eau. La vitesse d'accumulation, la quantité de précipitation et les régimes de précipitation peuvent influencer la qualité de l'eau récupérée. Quand on choisit les sites d'étude et les toitures, il faut prendre en compte l'influence du régime de pluviométrie, l'influence appréhendée par la comparaison entre un cas régulier et un cas très irrégulier. En outre, d'autres précautions doivent être prises en considération, comme le niveau de pollution qui peut déterminer l'environnement du site d'étude. Dans cette étude, on a réalisé les analyses dans deux régions de deux pays différents qui correspondent à des conditions expérimentales différentes : l'Ile-de-France en France et la ville de Tianjin en Chine.

Comme nous l'avons mentionné au chapitre 1, il existe des différences significatives dans les niveaux de pollution entre ces deux régions. Les valeurs des différents indicateurs qui peuvent présenter la qualité de l'air sont représentées dans le Tableau 1-5 au chapitre 1.

Nous savons que les quantités de polluants qui se déposent sur le toit et se déversent dans l'eau de pluie peuvent être plus élevées à Tianjin que dans la région parisienne. Donc il apparaît judicieux pour la région parisienne de sélectionner une zone d'étude proche de la source des pollutions concentrées. Ce choix assure une meilleure mise en évidence de la contamination.

Le choix du/des lieu(x) d'étude sur lesquelles le dispositif expérimental retenu sera installé doit être à proximité du laboratoire d'analyses. Il est préconisé de choisir un site d'étude à proximité du lieu de travail quotidien. En effet, un accès facile et rapide au(x) site(s) d'étude doit être privilégié afin de collecter rapidement les eaux de toiture (Stenstrom et Kayhanian, 2005). Pour les analyses en Ile de France, le LEESU est localisé sur deux sites : l'École des Ponts Paris Tech (Champs sur Marne, laboratoire de physico-chimie) et l'Université Paris-Est Créteil (Créteil, laboratoire de physico-chimie et microbiologie), les localisations des sites dans l'Est de l'agglomération parisienne est donc souhaitable afin de faciliter le transport des échantillons. De même pour les analyses à Tianjin, TEAS (Laboratoires de physico-chimie et microbiologie) étant localisé à Nankai District (au sud de Tianjin), un site d'étude proche de cet établissement est préférable. Donc, une localisation dans le sud de Tianjin est favorable. De plus, la facilité d'accès à tout moment conduit à privilégier des endroits de personnes sensibilisées à l'expérimentation (concrètement des chercheurs des institutions partenaires : LEESU et TAES).

Une fois le périmètre d'accueil du dispositif défini, une toiture doit être choisie. Cette étape de sélection doit répondre aux prérogatives suivantes :

- *Une toiture imperméable qui peut donner un fort ruissellement de bonne qualité et dont les matériaux et les caractéristiques sont représentatifs de la région d'étude.* Le matériau de couverture le plus ubiquitaire sont les tuiles en terre sur les toitures françaises (Robert-Sainte, 2009-a). Le coefficient de ruissellement typique de tuile est de 0,6 à 0,9. Bien qu'il puisse abriter de la végétation et que la contamination puisse exister dans la jointure des tuiles, la qualité des eaux de ruissellement est assez bonne pour ce matériau (Martinson 2008).

En Chine, le programme « Ré-Toiture »<sup>4</sup>, initié en 1999, s'attache à transformer les toitures plates en toitures en pente. Les bardeaux d'asphalte sont devenus le matériau de prédilection pour la toiture pente, car ils sont esthétiques et légers et offrent une bonne résistance à l'eau. De plus en plus de rénovations de toitures et de projets résidentiels neufs en Chine utilisent ce matériau (Feng et al. 2003). Son coefficient de ruissellement typique est de 0,9. Bien que les concentrations en carbone organique dissous sont plus élevées pour des eaux ruisselées sur les bardeaux d'asphalte, il peut produire une qualité de l'eau comparable à celle des autres matériaux de toiture (Mendez et al. 2011).

- *Une surface de toit expérimentable.* Sa taille ne doit par exemple pas excéder 50 m<sup>2</sup> car un dispositif de collecte fractionnée par succession de récipients a été retenu. En effet, pour ce type de dispositif, il faut prendre en compte la faisabilité d'expérimentation et la représentativité des résultats. Or, l'on sait que le volume de l'eau collectée dépend de la surface de toiture et de la hauteur de pluie ( $V = S \times H$ ). Pour un toit de 50 m<sup>2</sup>, une bouteille de 2 L peut récupérer au maximum de 0,04 mm

---

<sup>4</sup> Le toit plat résidentiel a été transformé en toit en pente à partir d'août 1999. Les objectifs de ce projet sont de résoudre le problème des fuites, d'améliorer les mauvaises performances d'isolation thermique et de bien s'insérer dans l'environnement. (Source : <http://www.eserexpo.com/?show-287-2.html>)

de hauteur de pluie (en considérant un coefficient de ruissellement de 1) et les deux dispositifs d'échantillonnage de 18 L et 30 L peuvent seulement récupérer au maximum de 0,36 - 0,6 mm de l'eau de pluie respectivement. Dans le cas où la surface du toit dépasse 50 m<sup>2</sup>, la quantité de l'eau collectée est très importante pour des précipitations peu importantes, ce qui rend impossible la mise en évidence la dynamique d'un événement pluvial au-delà d'une fraction initiale trop réduite.

- *Une toiture dont les points singuliers n'affectent pas la qualité de l'eau et les volumes théoriques d'eau ruisselée.* Dans l'équipement de toits réels, il est possible que la pluie puisse être en contact avec des points singuliers tels que les noues, rives, les cheminées, fenêtre de toits... Robert-Sainte (2009) a mis l'accent sur l'importance de ne pas négliger l'impact des points singuliers. Donc, pour choisir la toiture, il convient d'éviter de sélectionner les toits dont les points singuliers affectent la qualité et les volumes d'eau ruisselée. Par exemple, une cheminée qui est encore en cours d'utilisation peut augmenter les matériaux accumulés sur le toit ; les noues peuvent accumuler des matériaux ; les éléments en matériaux différents sur le toit peuvent affecter l'évaporation de l'eau au début de la pluie...

Les sélections du site d'étude et de la toiture sont déterminées par le recoupement des éléments de méthodologie énoncés ci-dessus. Les trois sites d'étude sont présentés dans la partie suivante.

## **2.2 Présentation des caractéristiques des sites d'étude**

Deux sites d'étude en Île-de-France (Vincennes et Romainville) et un site d'étude en Tianjin sont sélectionnés et présentés ci-dessous :

### **2.2.1 Site 1- Vincennes**

Le premier site est une maison située au Nord de la ville de Vincennes (94), une commune située dans le département du Val-de-Marne en région Île-de-France, à l'est de Paris (Figure 3-8). La commune comptait 49 461 habitants en 2015 (lors de dernier recensement) et la densité de population est de 24 802,1 par km<sup>2</sup>. Il est dans une zone urbaine résidentielle qui se trouve à 6,7 km du centre de Paris, à 3,3 km du plus grand parc public de la ville (Bois de Vincennes) et à 2,5 km de l'autoroute (A4).

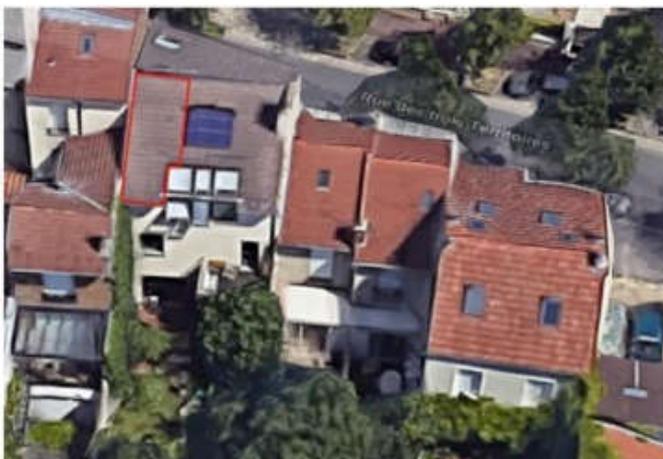
La toiture n'est donc pas située dans un environnement où des phénomènes de surconcentration en polluants sont observés. En effet, la consultation des bilans de pollution du Val de Marne révèle que la zone de ce site d'étude est soumise à un niveau d'exposition aux polluants atmosphériques faibles en termes de concentration en PM10 et le benzène mais assez élevé pour les PM 2,5 et le NO<sub>2</sub> (Annexe I). La valeur moyenne de PM10 mesurée dans la station météo à Nogent sur Marne (la distance à vol d'oiseau entre cette station et ce site d'étude est de 2,7 km) est de 19,3 µg/m<sup>3</sup> qui est inférieure que la valeur limite de 40 µg/m<sup>3</sup>.



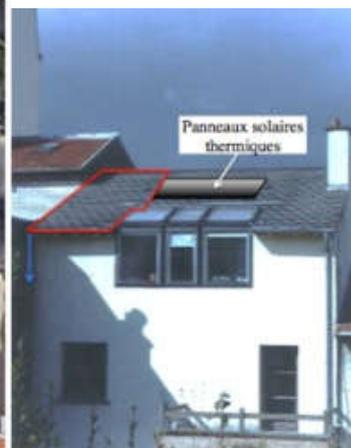
Figure 3-8. Localisation du 1er site d'étude (vue satellite) (2017)

La toiture se situe à côté d'un petit jardin. C'est le toit d'une maison de trois étages avec une hauteur de 7,6 m. Il n'y a pas de grands arbres autour, mais il y a beaucoup de lierre sur le mur près du toit. Des feuilles peuvent tomber sur la toiture et la gouttière. Cette toiture étudiée, composée de tuiles mécaniques de 25 ans, présente une gouttière en zinc, une orientation sud et une pente de  $27^\circ$ . Sa surface projetée est de  $10\text{m}^2$

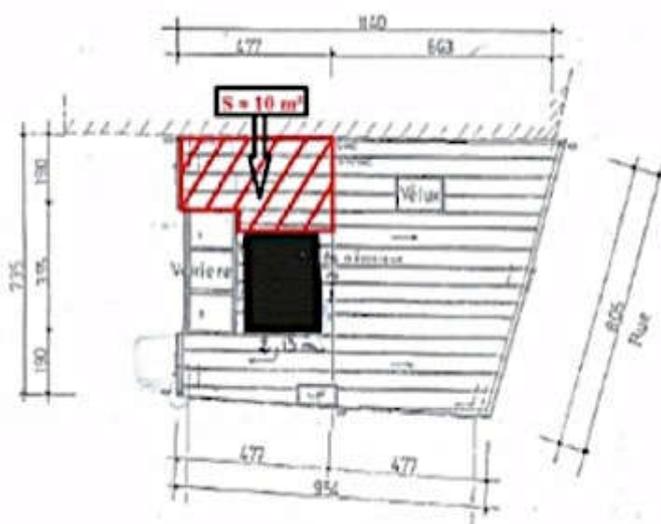
Il y a des points singuliers différents (une cheminée, un chauffe-eau et un velux) sur le toit qui peuvent affecter la qualité et les volumes d'eau ruisselée. Donc la surface projetée de  $10\text{m}^2$  ne collecte pas d'eau issue de points singuliers. La Figure 3-9 -a, la Figure 3-9 -b et la Figure 3-9 -c montrent la captation du ruissellement de la partie hachurée en couleur rouge.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 3-9. Photographies de la toiture de Vincennes

(a) Toiture en vue satellite (2016) ; (b) Toiture vue du sol ; (c) Plan dimensionné de la toiture en vue de dessus (la partie hachurée en rouge correspond à la surface de collecte de l'expérimentation) ; (d) Descente d'eau connectée au dispositif expérimental.

### 2.2.2 Site 2-Romainville

Le deuxième site d'étude est une maison située au nord de la ville de Romainville (93) qui se trouve dans le département de la Seine-Saint-Denis. La population de Romainville est de 26031 habitants en 2015 (lors de dernier recensement) et la densité de population est de 7567,2 habitants par  $\text{km}^2$ . Elle se situe dans une zone urbaine résidentielle (Figure 3-10), à environ 1 kilomètre de l'autoroute A3. Par ailleurs, aucune zone industrielle n'est à proximité du site donc on ne peut pas observer de phénomènes de surconcentration en polluants.

Les valeurs moyennes de PM 2,5, PM10, du  $\text{NO}_2$  et du benzène sont inférieures aux valeurs limites indiquées à l'Annexe I. La signification de cette valeur limite dont on parle est le niveau à ne pas dépasser afin de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine ou sur l'environnement dans son ensemble. La valeur moyenne de PM10 mesurée dans la station Bobigny (la distance à vol d'oiseau entre cette station et ce site d'étude est de 2,6 km), est de  $21,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  qui est inférieure à la valeur limite de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . La valeur moyenne de PM 2,5 est de  $13,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  lorsque sa valeur limite est de  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . La valeur moyenne de  $\text{NO}_2$  est de 30,2 qui est inférieure que la valeur limite de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .



Figure 3-10. Localisation du 2ème site d'étude (vue satellite) (2017)

La surface retenue est la toiture d'un garage à vélos (Figure 3-11-b). Il y a un grand arbre à côté de ce garage et les feuilles risquent de tomber sur la toiture et la gouttière. C'est une toiture orientée Nord et composée aussi de tuiles en céramique de 10 ans (Figure 3-12-a). Sa surface projetée est de 20 m<sup>2</sup>. Et il n'y a aucun point singulier sur cette toiture. La gouttière est en zinc tout comme la descente pluviale, qui est équipée d'une crapaudine (Figure 3-12-b). Il y a un clapet au milieu de descente pour adaptation d'un récupérateur d'eau de pluie (Figure 3-12-c).



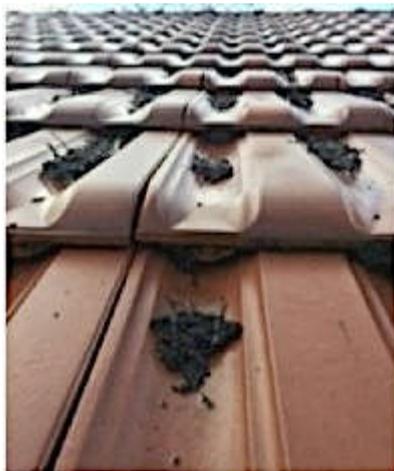
(a)



(b)

(a) Toiture en vue satellite (2017) ; (b) Garage à vélos

Figure 3-11. Photographies de la toiture de Romainville



(a)



(b)



(c)

Figure 3-12. Photographies de la toiture expérimentale de Romainville

(a) Rampant ; (b) Crapaudine ; (c) Clapet au milieu de descente pour adaptation d'un récupérateur d'eau de pluie

### 2.2.3 Site 3- Tianjin

Le troisième site est une maison située dans le district de Xiqing (au sud de la ville de Tianjin en Chine) (Figure 3-13 et Figure 3-14), autrefois connue sous le nom « banlieue Ouest ». Contrairement aux deux sites français étudiés, ce district est un nouveau quartier résidentiel (d'environ 684,690 habitants en 2010 (lors de dernier recensement) et de

1256 habitants/ km<sup>2</sup> de la densité de population), mais aussi un district de l'industrie rurale.

Cette maison se trouve à 14,2 km du centre-ville de Tianjin et 2,2 km du périphérique extérieur. Ce périphérique est principalement emprunté par les grands camions avec un trafic important, surtout en soirée. Il faut noter que des travaux sur le périphérique ont provoqué des embouteillages pendant juillet et août 2016 qu'il s'agit de l'année de l'expérimentation. Cette toiture est située dans un environnement où des phénomènes de surconcentration en polluants sont observés. La consultation des bilans de pollution est mesurée dans la station Xiqing (la distance à vol d'oiseau entre cette station et ce site d'étude est de 16 km) et présentée dans Annexe II. Le PM<sub>10</sub> est de 102,3 µg/ m<sup>3</sup> ce qui respecte la valeur limite journalière (150 µg/m<sup>3</sup>) de la norme de la qualité de l'air en Chine mais dépasse largement la valeur limite (40 µg/m<sup>3</sup>) de la norme en France. La valeur moyenne de PM<sub>2,5</sub> est de 71,7 µg/m<sup>3</sup> qui est inférieure mais très proche de la valeur limite en Chine de 75 µg/m<sup>3</sup> et très supérieure à la valeur limite en France de 25 µg/m<sup>3</sup>. La valeur moyenne de NO<sub>2</sub> est de 47,6 µg/ m<sup>3</sup> ce qui est inférieur à la valeur limite de 80 µg/m<sup>3</sup> en Chine mais légèrement supérieure à la valeur limite de 40 µg/m<sup>3</sup> en France.



Figure 3-13. Localisation du 3ème site d'étude (2017)



Figure 3-14. Localisation de 3ème site d'étude en vue satellite (2016)

Le périmètre de collecte, composé de bardeaux d'asphalte de couleur bordeaux, est la toiture d'un kiosque situé dans le jardin de la maison (Figure 3-15). Cette toiture est située dans un petit jardin et en contrebas d'une terrasse. Il n'y a pas de grands arbres autour. Il n'y a ni élément singulier, ni gouttière et ni descente sur cette toiture. Cette toiture a une orientation nord-ouest, une pente de  $25^\circ$  et une surface projetée de  $9,23 \text{ m}^2$ . Afin de collecter les échantillons de l'eau de pluie, on a construit une gouttière semi-fermée d'un diamètre de 10 cm et une descente d'un diamètre de 8 cm. Tous les éléments sont en PVC.

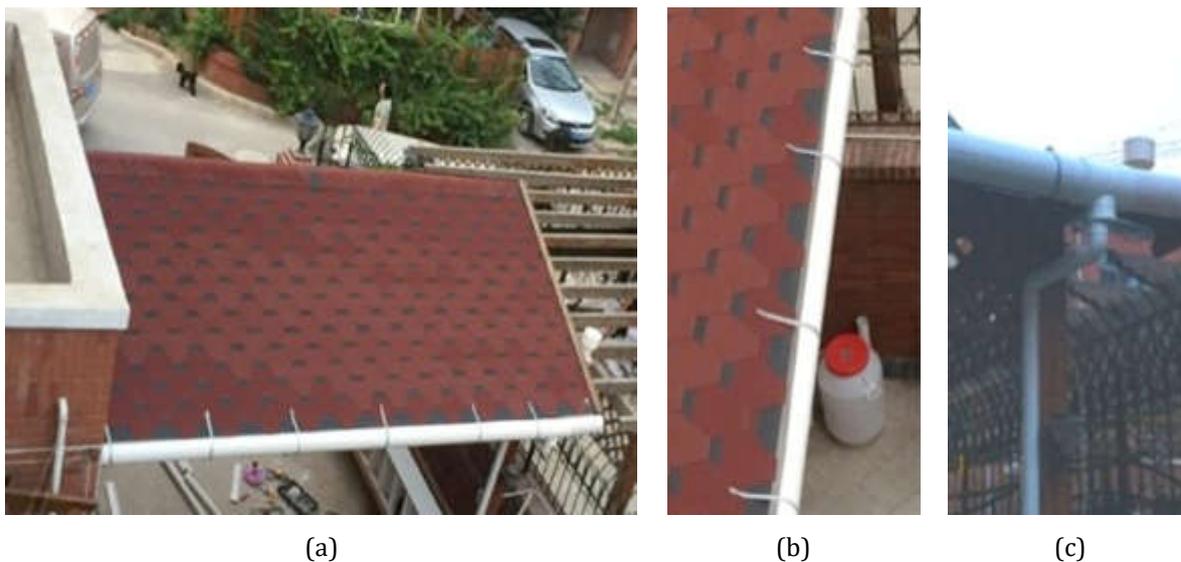


Figure 3-15. Photographies de la toiture expérimentale de Tianjin

(a) Vue générale ; (b) Gouttière semi-fermée ; (c) Descente connectée à l'expérimentation

## 2.3 Description du système

Des dispositifs d'échantillonnage de volume différents sont successivement mis en place sur les trois sites d'étude et des informations sont présentées ci-dessous :

### 2.3.1 Site 1-Vincennes

Pour le premier site d'étude (Vincennes), la descente d'origine en zinc d'un diamètre de 8 cm peut s'emboîter directement dans le tuyau en PVC de 8 cm. Ce tuyau de dispositif est maintenu et fixé au mur par un collier de descente. Deux tréteaux et deux blocs en béton sont utilisés pour assurer la stabilité du meuble et une contre pente de la canalisation horizontale de 5° est appliquée. L'ensemble du dispositif est recouvert d'une bâche en plastique assurant sa protection contre les intempéries (Figure 3-16).

Depuis l'année de 2015, 6 événements pluvieux ont été collectés par le premier dispositif (Figure 3-16-a). 2 évènements ont été collectés dans la continuité de cette première série, puis 5 événements ont collectés de la fin de 2016 au début de 2017 par le deuxième équipement (Figure 3-16-b). Ce changement consiste à optimiser le dispositif pour assurer que les mesures tendent vers une constante. Pour la surface projetée de 10 m<sup>2</sup>, les hauteurs de pluie totales qui peuvent être collectées par les deux systèmes sont respectivement de 3 mm (5 flacons de 2 L+ 1 flacon de 20 L) et de 1,8 mm (9 flacons de 2 L).



Figure 3-16. Photographies des dispositifs d'échantillonnage du premier site d'étude (Vincennes)

(a) Premier dispositif de 6 flacons ; (b) Deuxième dispositif de 9 flacons.

Un pluviomètre à auget basculeur a été installé sur un tronc d'arbre à environ 3 m de haut dans le jardin du site d'étude.



Figure 3-17. Photographie du pluviomètre du premier site d'étude

### 2.3.2 Site 2-Romainville

Pour le deuxième site d'étude (Romainville), le deuxième dispositif d'échantillonnage de 9 flacons est transporté et installé à côté de la toiture d'étude. Un récupérateur à clapet en zinc était déjà intégré directement à la descente originale en zinc d'un diamètre de 8 cm. Un tuyau en PVC de 8 cm du dispositif peut se raccorder directement avec le récupérateur. Afin d'éviter les fuites d'eau à la jonction des deux parties, une bande de Téflon est enroulée sur plusieurs tours et un film plastique de paraffine sur papier (parafilm M) est aussi utilisé. Le dispositif est stabilisé par des briques et la hauteur de ses deux côtés est ajustée par le nombre et l'épaisseur des briques afin d'assurer la contre-pente de 5°.

17 événements ont été collectés à Romainville. La surface projetée étant égale à 20 m<sup>2</sup>, le dispositif était en capacité de fractionner jusqu'à 0,9 mm de ruissellement.



Figure 3-18. Photographie du dispositif sur le deuxième site d'étude (Romainville)

Pour installer le pluviomètre, on a d'abord conçu et construit un plateau dans un bois résistant aux intempéries, puis fixé ce pluviomètre sur le plateau et enfin mis l'ensemble sur le pilier du garage de vélo. Un bidon de collecte récupère l'eau captée par le pluviomètre, permettant un contrôle des enregistrements par rapport au volume de précipitation recueilli.



Figure 3-19. Photographies du pluviomètre et du plateau du pluviomètre du site de Romainville

### 2.3.3 Site 3-Tianjin

Le deuxième dispositif de 9 flacons est reconstruit pour échantillonner sur le troisième site d'étude (Tianjin). Une gouttière demi-ronde en PVC d'un diamètre de 10 cm et une descente en PVC d'un diamètre de 8 cm sont construites avant d'installer ce dispositif. Le tuyau de dispositif de 8 cm est raccordé à la descente par une vanne manuelle PVC de 2 voies. En combinant avec une autre vanne installée sur la descente, on a conçu un système de « dérivation » en aval de la toiture (indiquée dans la Figure 3-20). En tournant les poignées des deux vannes, on peut contrôler la direction d'écoulement de l'eau de pluie à échantillonner ou à jeter.

9 événements ont été collectés et la hauteur de pluie totale qui peut être collectée par le dispositif d'échantillonnage est de 1,95 mm (la surface projetée est de 9,53 m<sup>2</sup>).



Figure 3-20. Photographie du dispositif au le premier site d'étude (Tianjin).

Un pluviomètre à auget basculeur (basculement tous les 0,2 mm de pluie) a également été utilisé à Tianjin. La précision (0,2 mm) de ce pluviomètre est identique à celle du pluviomètre utilisé en France. En revanche, le collecteur de ce pluviomètre qui dirige la pluie vers les augets et la centrale qui réalise l'acquisition de données sont deux pièces séparées et connectées par un câble. On a construit un plateau qui est similaire à celui de

Romainville et fixé le collecteur sur ce plateau (voir la Figure 3-21-a). La centrale du pluviomètre est fixée sur l'un des poteaux du kiosque (voir la Figure 3-21-b).



(a)

(b)

Figure 3-21. Le pluviomètre et la centrale d'acquisition de données associée sur le site de Tianjin

Les périodes de ces collectes, les caractéristiques de la toiture, ainsi que les caractéristiques du dispositif et les hauteurs de pluie acceptables par le dispositif sont indiqués dans le Tableau 3-2. Caractéristiques des dispositifs dans les trois sites.

Tableau 3-2. Caractéristiques des dispositifs dans les trois sites

Site expérimental	Caractéristique de la toiture			Caractéristique du dispositif		
	Surface de toiture	Matériaux de toiture	Matériaux de gouttière	Type de dispositif	Volume max de l'eau récupérée	Hauteur de pluie acceptable (mm)
Vincennes	10 m <sup>2</sup>	Tuiles mécaniques, âgées de 25 ans	Zinc	6 bouteilles	34,5L (5*2,3 L + 23 L)	3,45
						2,07
Romainville	20 m <sup>2</sup>	Tuile céramique, âgée de 10 ans	Zinc	9 bouteilles	20,7L (9* 2,3 L)	1,04
Tianjin	9,53 m <sup>2</sup>	Bardeaux d'asphalte, âgées de 6 ans	PVC			2,17

### 3. Échantillonnage

#### 3.1 Définition de l'événement pluvieux collecté

Concernant l'échantillonnage, une réflexion sur la définition de l'événement pluvieux générant une collecte a été entreprise. Dans les autres études, nous pouvons trouver certaines définitions de l'événement pluvieux, par exemple Bach et al. (2010) et Farreny et al. (2011) ont défini qu'une pluie est indépendante de la suivante lorsqu'il s'écoule plus de deux heures entre deux basculements d'auget. Dans cette étude, le protocole de l'échantillonnage a été déterminé selon la définition de l'événement pluvieux et celles que nous avons trouvées ne s'appliquent pas à notre situation. Par conséquent, il faut trouver une nouvelle définition que nous appelons « **l'événement pluvieux collecté** ».

Des critères d'exigence pour la collecte sur la/les pluie(s) composant l'événement pluvieux collecté n'ont pas été définis en termes de hauteur d'eau précipitée minimale et de temps écoulé entre deux basculements d'auget enregistrés par le pluviomètre. Seule une contrainte minimale de volume à atteindre pour procéder à la collecte a été fixée à un litre d'eau de pluie, correspondant au volume minimal requis pour procéder à l'ensemble des analyses d'une fraction. L'événement pluvieux collecté dans cette étude commence par le premier basculement d'auget du pluviomètre après l'installation des flacons et se termine par le dernier basculement d'auget du pluviomètre avant la récupération des échantillons. Cet événement pluvieux collecté est donc potentiellement décomposable en plusieurs périodes de pluie et période de temps sec.

#### 3.2 Protocole d'échantillonnage

Nous prévoyons les précipitations à travers les prévisions météorologiques et mettons en place des flacons stériles avant la pluie. En raison d'un besoin rapide de résultats et du délai d'analyse à ne pas dépasser pour certains paramètres (analyse à effectuer dans les 24 h suivant l'événement pluvieux collecté), la récupération des échantillons est effectuée dans les 24 heures (maximum) après la première goutte de pluie. Le suivi de ces critères contraint à définir une exclusion de la collecte des événements pluvieux ayant lieu entre le début de la matinée du vendredi (à 9 h) jusqu'au dimanche matin (à 9 h) (le laboratoire d'analyse étant non accessible le week-end). Le cumul de toutes les pluies répondant à ce critère et ayant lieu au cours de la journée ou de la nuit du dimanche soir au jeudi soir était collecté dans la matinée suivant l'événement.

Enfin, la connexion du dispositif à la gouttière en zinc et la pose des flacons, préalablement bien rincés, grillés (élimination des traces organiques) et stérilisés (passés à l'autoclave à 121 °C pendant 20 min) entre deux collectes, se planifiaient en amont de la pluie *via* la consultation de prévisions météorologiques détaillées (à 2 jours).

### **3.3 Description des événements pluvieux collectés dans cette étude**

Les dispositifs de 6 échantillons et de 9 échantillons sont successivement utilisés sur les trois sites d'étude. Plusieurs événements pluvieux collectés sont prélevés respectivement. Les descriptions de chaque événement qui consistent en la durée de temps sec précédant l'événement, la hauteur de pluie précipitée et la variabilité de l'intensité sont représentées dans le Tableau 3-3, le Tableau 3-4 et le Tableau 3-5. Les données pluviométriques pour chaque événement sont résumées dans l'Annexe III.

A Vincennes, depuis l'année 2015, 6 événements ont été collectés par le premier dispositif. 2 événements ont été collectés dans la continuité de cette première série, puis 5 événements ont été collectés fin 2016 et début 2017 par le deuxième dispositif. La description des événements à Vincennes est synthétisée dans le Tableau 3-3. On sépare l'intensité de la pluie en pluie faible (trace à 2 mm/h), pluie modérée (2 mm/h à 7,6 mm/h), pluie forte (plus de 7,6 mm/h) et pluie violente (> 50 mm/h) (Organisation météorologique mondiale, 1992). L'intensité de pluie mentionnée dans ce tableau est l'intensité instantanée qui est fournie par le pluviomètre et basée sur le temps entre 2 basculements d'augets.

Tableau 3-3. Description des événements pluvieux collectés à Vincennes

Date de début de collecte	Durée de temps sec précédant (h)	Hauteur totale de pluie précipitée (mm)	Description
13/05/2015	214,8	5,2	La pluie est faible au début pendant 1,2 mm. L'intensité augmente progressivement et la pluie devient forte quand la hauteur de pluie est entre 1,4 mm et 2,2 mm. La pluie est violente entre 2,4 et 2,6 mm avec une intensité de 57 mm/h. Les derniers 2,6 mm correspondre à une pluie modérée.
18/05/2015	61,7	1,6	La pluie est modérée au début pendant 0,8 mm (intensité varie de 2,7 à 6,3 mm/h) puis elle est faible jusqu'à la fin d'événement (l'intensité varie de 0,12 à 1,59 mm/h).
19/05/2015	18,1	1,4	La pluie est modérée au début pendant 1,1mm (l'intensité varie de 3,6 à 5,2 mm/h) puis elle est plus faible jusqu'à la fin de l'événement (l'intensité varie de 0,3 à 0,7mm/h).
31/05/2015	31,5	3,2	L'intensité est variable. Pour la plupart de temps, la pluie est faible et modérée (intensité varie de 0,01 à 2,3 mm/h) et la pluie est forte quand la hauteur de pluie est entre 1,8 mm et 2,2 mm (l'intensité varie de 11,2 à 24,4 mm/h)).
22/06/2015	170,7	4,6	La pluie est faible et modérée en cours d'événement (l'intensité varie de 0,2 à 5,2 mm/h).
26/07/2015	131,7	7,6	La pluie est faible et modérée au début pendant 3,2 mm (l'intensité varie de 0,01 à 4,0 mm/h). Jusqu'à le 3,4 mm, l'intensité des précipitations passe à 12,5 mm/h, puis la pluie redevient faible jusqu'à la fin d'événement.
14/09/2015	14,1	3,6	La pluie est forte au cours de l'ensemble de l'événement. L'intensité varie de 8,9 à 48,7 mm/h.
23/09/2015	78,9	6,0	La pluie est faible et modérée au début pendant 2,6 mm (de 1,8 à 5,4 mm/h), forte à partir de 2,6 mm (8,4-13,6mm/h), faible à partir de 4,4 mm et ce jusqu'à la fin d'événement (<2mm/h).
23/10/2016	126,3	3,6	La pluie est faible et modérée en cours d'événement (l'intensité varie de 0,3 à 5,3 mm/h).
17/11/2016	2,8	4,0	La pluie est faible et modérée au début pendant 1,2 mm (l'intensité varie de 0,1 à 3,2 mm/h). L'intensité augmente lentement et la pluie devient forte en cours d'événement jusqu'à 3,6 mm (l'intensité varie de 7,3 à 30,5 mm/h). La pluie est faible sur les derniers 0,4 mm.
20/11/2016	47,0	1,6	La pluie est faible et modérée en cours d'événement (l'intensité varie de 0,1 à 3,9 mm/h)
20/12/2016	6,3	2,4	La pluie est faible en cours d'événement (l'intensité varie de 0,5 à 1,8 mm/h).

12/01/2017	20,5	2,2	La pluie est faible en cours d'événement (l'intensité varie de 0,01 à 1,9 mm/h).
------------	------	-----	--

Sur les 13 événements pluvieux collectés, il y avait 2 événements avec un volume collecté dépassant la capacité du dispositif d'échantillonnage (27/07/2015 et 23/09/2015). Pour eux, les échantillons collectés correspondent uniquement au début de la pluie.

Pour Romainville, 17 événements ont été collectés par le deuxième dispositif de la fin de 2015 au début de 2016. La description de événement à Romainville est montrée dans le Tableau 3-4.

Tableau 3-4. Description des événements pluvieux collectés à Romainville

Date de début de collecte	Durée de temps sec précédant (h)	Hauteur totale pluie précipitée (mm)	Description
05/11/2015	26,2	1,0	La pluie est faible en cours d'événement et toutes les intensités instantanées sont inférieures à 1mm/h.
25/11/2015	66,2	10,2	La pluie est faible, les intensités sont inférieures à 2mm/h.
09/12/2015	39,5	11,0	La pluie est faible (intensités instantanées < 2 mm/h) et l'intensité augmente progressivement après le 4 mm.
31/01/2016	0,3	2,2	La pluie est faible en cours d'événement (maximum d'intensité instantanée = 1,0mm/h).
02/02/2016	39,5	2,0	La pluie est forte pendant 3,0 mm (intensité instantanée varie de 8,7 mm/h à 12,9 mm/h). Elle s'est ensuite transformée en pluie faible.
23/02/2016	26,4	7,2	La pluie est faible en cours d'événement (maximum d'intensité instantanée = 1,9 mm/h).
01/03/2016	146,6	4,2	La pluie est progressivement passée de faible (premier 0,6 mm) à modérée et a maintenu une intensité des précipitations légèrement supérieure à 2mm/h (de 0,8 mm à 2,4 mm), puis transformé en pluie faible.
24/04/2016	32,1	4,2	Intensités sont variables. Elle varie de 0,01mm/h à 11,0 mm/h pour le premier 2 mm.
25/04/2016	12,0	4,6	La pluie est faible et modérée en cours d'événement (maximum d'intensité instantanée = 2,4mm/h).
09/05/2016	162,2	6,0	La pluie est faible en cours d'événement (maximum d'intensité instantanée = 1,2 mm/h).
10/05/2016	8,6	11,8	La pluie est faible pour le premier 0,8 mm et modérée pour le premier 2mm. Elle est pluie faible sur le dernier 8 mm.
18/05/2016	131,9	11,0	La pluie est faible et modérée en cours d'événement (maximum d'intensité instantanée = 2,3mm/h).
19/05/2016	1,9	0,6	La pluie est faible en cours d'événement (maximum d'intensité instantanée = 1,5 mm/h).

22/05/2016	0,3	29,8	La pluie est faible aux premiers 0,6 mm et l'intensité a soudainement augmenté à 37,5mm /h au 0,8 mm. Puis la pluie est modérée et forte jusqu'à la fin d'événement.
29/05/2016	12,9	12,0	La pluie est faible et modérée en cours d'événement (maximum d'intensité instantanée = 4,1 mm/h).
12/06/2016	23,4	9,6	La pluie est faible pendant 2,2 mm. L'intensité augmente soudainement (elle varie de 12,1 mm/h à 100 mm/h pour la 2,4 - 6,4 mm de pluie). Elle est faible pour les derniers 3,2 mm.
14/06/2016	34,7	4,4	La pluie est faible et modérée pendant 2 mm. L'intensité augmente soudainement (varie de 12,5 mm/h à 84,7 mm/h pour le 2,2 - 1,8 mm de pluie). Elle est faible pour les derniers 2,6 mm.

Il n'y a que trois événements avec la hauteur de pluie inférieure à la capacité du dispositif d'échantillonnage (05/11/2015, 31/01/2016 et 19/05/2016). L'intensité de précipitation de la plupart des événements est sensiblement plus faible que à Vincennes.

Un autre dispositif de 9 échantillons a été installé en Chine (au lieu de transporter celui utilisé en France). Cela a permis de continuer à acquérir des données en France tout en ayant celles de Chine (produites en parallèle). 9 événements ont été collectés du 12 juillet 2016 au 28 octobre 2016 à Tianjin.

Tableau 3-5.Description des événements pluvieux collectés à Tianjin

Date de début de collecte	Durée de temps sec précédant (h)	Hauteur totale pluie précipitée (mm)	Description
12/07/2016	206,7	1,2	La pluie est faible en cours d'événement (intensité varie de 0,12 à 1,2 mm/h).
14/07/2016	50,6	5,6	La pluie est forte sur le premier 1 mm (intensité maximum = 32,7 mm/h), modérée jusqu'au 2 mm et faible jusqu'à la fin d'événement.
19/07/2016	160,8	9,4	La pluie est faible et modérée en cours d'événement (l'intensité varie de 1,34 à 5,14 mm/h).
25/07/2016	89,6	2,0	L'intensité est très variable. La pluie est faible pendant 0,4 mm, forte jusqu'à 0,8 mm (intensité maximum = 21,8 mm/h), violente jusqu'à 1mm (intensité instantanée = 93 mm/h) et modérée sur le dernier 1mm.
02/08/2016	24,7	1,8	La pluie est faible au cours d'événement (intensité varie de 0,01 à 2 mm/h).
08/08/2016	144,1	4,0	La pluie est modérée pendant les premières 0,6 mm, faible jusqu'à 1,4 mm et modérée sur le dernier 2,6 mm.
12/09/2016	198,0	5,0	L'intensité est variable. La pluie est forte pendant 0,6 mm, modérée jusqu'à 2,2 mm, forte jusqu'à 4,0mm et faible sur le dernier mm.

22/10/2016	30,5	1,6	La pluie est forte sur le premier 0,2 mm, faible et modérée jusqu'à la fin d'événement.
28/10/2016	130,2	3,6	L'intensité est variable. La pluie est modérée sur le premier 0,6 mm, forte sur le 0,8 mm et 1,0 mm, faible sur le 1,2 et modérée jusqu'à la fin d'événement.

Les événements pluvieux collectés à Tianjin sont effectués en été et en automne. L'intensité de précipitation de la plupart des événements est plus faible qu'à Vincennes mais plus forte qu'à Romainville. Il convient de noter que, contrairement aux autres événements, l'intensité de pluie du 25 juillet 2016 est très variable avec une intensité instantanée de 93,2mm/h. Cela peut avoir un impact sur l'évolution de la qualité de l'eau comme nous le verrons au chapitre

## Chapitre 4. Paramètres d'étude de la qualité d'eau de toiture et méthode de traitement statistique des données

Afin de caractériser la qualité de l'eau de pluie ruisselée sur la toiture et effectuer les analyses, il convient de sélectionner puis de mesurer des paramètres pour cette étude. Les méthodes de traitement statistiques des données pertinents sont aussi représentées.

### 1. Choix des paramètres

Dans cette étude, le choix doit reposer sur la hiérarchisation des paramètres. Pour le faire, on doit d'abord faire des études bibliographiques, puis résumer tous les paramètres repérés les références scientifiques précédentes, préciser les fonctions de ces paramètres et, enfin, dresser la liste des paramètres dans le but de comparer leur aptitude à délivrer des informations sur la qualité de l'eau de pluie, à présenter des valeurs encadrées réglementairement et à être plus ou moins facilement mesurables.

Deux catégories de paramètres seront mesurées : des paramètres physico-chimiques et des paramètres microbiologiques. Le Tableau 4-1 montre quelques études portant sur la qualité physico-chimique et microbiologique d'es eaux de ruissellement de toiture.

Tableau 4-1. Indicateurs de qualité des eaux de ruissellement de toiture utilisée dans les publications scientifiques

Référence	Localisation	Paramètres physico-chimiques	Paramètres microbiologiques
<b>Systemes sans <i>first flush</i></b>			
(Simmons et al., 2001)	Nouvelle Zélande (4 cuves pendant 2 ans)	Turbidité, pH Métaux (Zn, Cu, Pb, As)	Flore totale 22°C Coliformes totaux Coliformes fécaux Entérocoques
(Spinks et al., 2006)	Australie (49 cuves, pendant une période d'incendies)	pH, Turbidité, Couleur Métaux (As, Cu, Fe, Pb, Zn, Cr, Cd)	Coliformes totaux <i>E. coli</i> Entérocoques
(Jordan et al., 2008)	USA (11 cuves de maisons individuelles Système)	pH, Dureté, Turbidité, COT Cl <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> Métaux (As, Cu, Fe, Pb, Zn, Cr, Cd, Mn)	Flore totale 22°C et 36°C Coliformes totaux Entérocoques

			<i>E. coli</i>
(Ward et al., 2010)	UK (2 cuves pendant 6 mois)	pH, Conductivité, MES, Turbidité, COD NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Cl <sup>-</sup> BOD5, PAHs Métaux (As, Cu, Fe, Pb, Zn, Cr, Cd, Mn)	Flore total 22°C et 36°C Coliformes totaux Coliformes fécaux Entérocoques Pathogènes bactériens ( <i>Pseudomonas</i> spp., <i>Salmonella</i> spp., <i>Cryptosporidium</i> spp.)
(Vialle et al., 2011)	France (1 cuve pendant 1 an)	pH, Conductivité, Turbidité Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> Mg <sup>2+</sup> , K <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> Couleur, TOC, Alcalinité	Flore totale 22°C et 36°C Coliformes totaux <i>E. coli</i> Entérocoques
<b>Systemes avec first flush</b>			
(Coombes et al., 2000)	Australie (2 sites - 2 cuves de récupération)	Température, pH, MES NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> Métal (Fe, Pb, Ca)	Flore totale 22°C et 36°C Coliformes totaux Coliformes fécaux <i>Pseudomonas</i> spp
(Doyle, 2008)	Rwanda (3 sites-système avec une série de récipients)	Turbidité, Conductivité, Couleur	Coliformes totaux <i>E. coli</i>
(Martinson 2008)	Sri Lanka (4 types de matériaux de toitures, système avec une série de récipients)	Turbidité, Conductivité	Coliformes thermo-tolérants
(Despins et al., 2009)	Canada (7 sites - 1 et 2 cuves(s) de récupération)	pH, Turbidité, Couleur, COT Ntot	Coliformes totaux Coliformes fécaux
(Lee et al., 2012)	Corée du Sud (4 types de matériaux de toitures, 2 cuves de récupération)	pH, MES, COT Cl <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , PO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> Mg <sup>2+</sup> , K <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> Métal (Al, Cu, Fe, Pb, Zn)	Coliformes totaux, <i>E. coli</i> Entérocoques Pathogènes bactériens ( <i>Pseudomonas</i> spp., <i>Salmonella</i> spp., <i>Cryptosporidium</i> spp.)
(Gikas et al., 2017)	Grec (2 sites-Système avec 2 cuves de récupération)	Température, pH, Conductivité, MES, P <sub>tot</sub> , Alcalinité, Cl <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , PO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> Mg <sup>2+</sup> , K <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Coliformes totaux

On observe que l'estimation de la qualité n'est jamais effectuée par la mesure d'un paramètre unique, mais au travers d'un ensemble des paramètres de natures diverses. Ci-après, nous nous sommes efforcés de résumer tous les paramètres repérés les références scientifiques précédentes et à préciser les fonctions de ces paramètres (Tableau 4-2 et Tableau 4-3)

Tableau 4-2. Fonction(s) des paramètres physico-chimiques pouvant être étudiés

<b>Paramètres</b>	<b>Fonctions</b>
<b>Paramètres physico-chimiques</b>	
<i>Paramètres physiques</i>	
<b>Turbidité</b>	Indicateur de la qualité esthétique de l'EP (reflet de l'état de contamination de l'eau par les débris végétaux, reflet de la contamination microbienne).
<b>MES</b>	Indicateur de la qualité esthétique de l'EP (reflet de l'état de contamination de l'eau par les matières insolubles, les micro-organismes).
<b>Température</b>	La température de l'eau influe sur beaucoup d'autres Paramètres (facteur de croissance microbologique éventuelle, etc.).
<b>Conductivité</b>	Indicateur de la minéralisation de l'EP, indicateur approximatif de la dureté de l'EP. Il permet d'apprécier globalement l'ensemble des produits dissous dans l'eau.
<i>Paramètres Chimiques</i>	
<b>pH</b>	Indicateur de l'acidité de l'EP, indicateur du caractère agressif ou incrustant de l'EP.
<b>Dureté</b>	Indicateur de la charge combinée en calcium et magnésium.
<b>Oxygène dissous</b>	La présence d'oxygène dans l'eau est indispensable à la respiration des êtres vivants aérobies.
<b>Chlorures</b>	Indicateur pour le suivi des polluants de l'eau (un traceur) car il n'est pas facile d'être absorbé et ne se décompose pas. Indicateur de la stabilité des autres sels.
<b>Carbone organique total (COT)</b>	Indicateur pour connaître la charge organique d'un effluent. Il indique la présence de débris végétaux, de contamination animale.
<b>Carbone organique dissous (COD)</b>	Indicateur de la présence de débris végétaux, de contamination animale. Une fraction importante du COT excepté la matière organique des particules en suspension.
<b>Ammonium (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)</b>	Évaluation de la contamination en ammonium. Des traces d'ammoniaque existent dans les eaux de pluie. Elles sont liées aux retombées liées à sa volatilisation.
<b>Nitrites (N-NO<sub>2</sub>)</b>	Évaluation de la contamination en nitrites. Toxiques lorsque le pH de l'eau est inférieur à 7. Dans l'estomac, les nitrites, peuvent se transformer nitrosamines réputées cancérigènes.

<b>Nitrates (N-NO<sub>4</sub><sup>+</sup>)</b>	Évaluation de la contamination en nitrates. Il peut évoluer en nitrites dans l'estomac.
<b>Phosphore total (P<sub>tot</sub>)</b>	Évaluation de l'apport en phosphore du ruissellement de toit dans le bilan total en phosphore. Il provient de déjections d'oiseaux ou autres animaux.
<b>Micropolluants</b>	
<b>Métaux lourds</b>	Évaluation de la contamination en différents types des métaux lourds. Les éléments métalliques et leurs dérivés organiques sont pour certains très dangereux parce que potentiellement toxiques, non-biodégradables et bio-accumulables dans les chaînes alimentaires. Ils sont principalement d'origine industrielle (rejets atmosphériques des incinérateurs de déchets, ...).
<b>Micropolluants organiques</b>	Ces composés, très dangereux pour l'environnement (toxiques à faible concentration, parfois mutagènes, cancérigènes) sont des produits synthétiques assez peu solubles dans l'eau.  PAHs, Hydrocarbures chlorés, PCB, OCP...

Tableau 4-3.Fonction(s) des paramètres microbiologiques pouvant être étudiés

<b>Paramètres microbiologiques</b>	
<b>Flore totale à 22°C et 36°C</b>	Indicateur de présence possible de bactéries. Ici, 22°C est la température ambiante proche de celle d'une cuve de récupération et à 36°C et la température du corps humain.
<b>Coliformes totaux</b>	Indicateur de contamination microbiologique générale. Ils se répartissent en fait en deux catégories : Les germes d'origine fécale stricte et les germes provenant d'autre sources environnementales (aquatique et tellurique).
<b>Coliformes fécaux</b>	Indicateur de contamination fécale. Ils présentent les mêmes propriétés que les coliformes totaux mais leur origine fécale est plus nette.
<b><i>Escherichia coli (E. coli)</i></b>	Indicateur plus spécifique de contamination fécale. E. Coli est l'espèce la plus représentée dans la flore intestinale de l'homme et des animaux.
<b>Entérocoques</b>	Indicateur de contamination fécale. Par rapport aux coliformes, il est doté d'une plus grande résistance dans les eaux naturelles ; leur présence serait donc le signe d'une contamination fécale de l'eau plus ancienne.
<b>Pathogènes</b>	Indicateur d'une contamination pathogène, i.e. dangereuse pour l'homme et responsable de maladies. ( <i>Salmonella</i> spp., <i>Cryptospridium</i> spp., <i>Mycobactéries</i> , <i>Campylobacter</i> spp., <i>Staphylocoques</i> ...)  <i>Pseudomonas</i> spp et <i>Legionella</i> spp. sont aussi des indicateurs de qualité bactériologique

En se référant aux trois tableaux ci-dessus et en tenant compte de la faisabilité des mesures et de l'objectif d'étudier la qualité en termes de comparaisons entre la France et la Chine, on a simplifié les analyses et choisi les paramètres représentatifs pour caractériser la qualité. Lorsque on fait le choix, il faut considérer que :

- premièrement, il y a des paramètres qui sont suivis dans la *majorité des études* sur la qualité de l'eau de pluie tels que le pH, la conductivité et la turbidité. Il est recommandé de mesurer ces paramètres car on peut les comparer avec les résultats d'autres études ;
- deuxièmement, certains paramètres ont des *fonctions proches ou similaires*. Par exemple, turbidité et MES renseignent sur les matières particulaires. De même, COD et COT sont des indicateurs de matières organiques hydrophiles. Dans ces différents cas, se pose la question de la pertinence ou non de conserver les deux paramètres ou de n'en retenir qu'un seul ;
- troisièmement, les valeurs limites de qualité et/ou références de qualité présentées dans les référentiels ne concernent que certains paramètres. Dans le cas français, le pH, la conductivité, la turbidité, le COT, le nitrites, le nitrate, les métaux lourds, le *Escherichia coli* et les entérocoques se trouvent dans l'arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine. Dans le cas chinois, le pH, la turbidité, l'oxygène dissous, la flore totale et les coliformes totaux se trouvent dans la norme sanitaire pour l'eau potable GB 5749-2006.

Sur la base de ces considérations, les paramètres physico-chimiques retenus pour l'analyse des échantillons réalisés sur les trois sites d'étude sont les cinq suivants : **le pH, la conductivité, la turbidité, les MES et le COD.**

- Les mesures du pH, de la conductivité et de la turbidité donnent des informations de base sur la qualité physico-chimique de l'eau de pluie. La dernière peut renseigner sur l'évolution de matières particulaires présentes sur le toit et l'existence potentielle de l'effet de *first flush*. La turbidité en revanche n'inclut pas de matières décantables ;
- A l'instar de la turbidité, les mesures de la concentration en MES renseignent aussi sur l'évolution de la qualité concernant les matières particulaires. Bien qu'une corrélation forte entre eux est confirmée, les mesures de la turbidité ne peuvent pas estimer exactement la concentration en MES parce que les MES comprennent les matières décantables et non pas la turbidité. En plus, les MES jouent un rôle physico-chimique important pour l'adsorption de micropolluants organiques hydrophobes (HAP, etc.) ;
- La réglementation européenne (directive-cadre européenne sur l'eau 2000/60/DCE) recommande l'utilisation de l'indicateur COD dans la définition du bon état écologique des eaux (en vigueur depuis 2014). Cette mesure est plus facile à mettre en œuvre que celle du COT, car de nombreux analyseurs physicochimiques ne peuvent oxyder la

totalité du carbone particulaire non-dissous.

De plus, pour l'analyse des échantillons réalisés sur le troisième site d'étude (Tianjin), on fait les mesures supplémentaires sur les indicateurs nutriments (N-NO<sub>2</sub>, N-NO<sub>3</sub>, N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, N<sub>tot</sub> et P<sub>tot</sub>). En effet, les sources d'azote et de phosphore proviennent principalement des eaux usées de l'industrie, de l'agriculture et de l'eau domestique (régions fortement agricoles ou industrialisées). En général, dans les zones urbaines, les eaux récupérées de la toiture sont relativement plus propres dont les concentrations de l'azote et de phosphore sont faibles. Cependant, comme mentionné précédemment (la section 2.2.3 de ce chapitre), le troisième site d'étude se situe dans une zone rurale de l'industrie polluée. Par conséquent, nous analysons les échantillons de ce site à travers les indicateurs de nutriments afin de fournir une référence de pollution provenant de son environnement.

Concernant les paramètres microbiologiques, pour les analyses de paramètres microbiologiques, les indices microbiens et sa limitation dans la norme de qualité de l'eau en Chine ne sont pas identiques au cas de France. En plus, cet aspect microbiologique est moins approfondi que dans le cas français. En France, la flore totale, les coliformes fécaux et les coliformes totaux sont des indicateurs de moins en moins préconisés au profit d'*E.coli* et des entérocoques intestinaux. Donc, les paramètres microbiologiques choisis dans les deux pays sont différents et présentés dans le Tableau 4-4.

Tableau 4-4. Paramètres de qualité microbiologiques pour la France et la Chine

	France	Chine
<b>Contamination microbiologique globale</b>	Flore totale à 36 °C	Flore totale à 36°C
	Flore totale à 22 °C	
<b>Contamination fécale</b>	E. coli	Coliformes fécaux
	Entérocoques	Coliformes totaux

Pour les sites français étudiés, on a choisi la flore totale à 22 °C et à 36 °C comme indicateurs de contamination microbiologique globale et l'*E.coli* et les entérocoques comme indicateur de contamination fécale. Pour le site d'étude chinois, on a choisi flore totale à 36 °C pour représenter la contamination microbiologique globale et les coliformes fécaux et coliformes totaux pour représenter la contamination fécale. L'étude de la qualité en termes de comparaisons entre les deux pays est réalisée par la flore totale à 36 °C.

## 2. Méthodes analytiques utilisées

Les méthodes sont résumées dans le Tableau 4-5 et le Tableau 4-6. Ces tableaux précisent également la méthode de détermination utilisée dans cette étude et indique la norme de référence correspondante.



Tableau 4-5. Résumé des méthodes d'analyse physico-chimique

Paramètre physico-chimique	France		Chine	
pH	Électrode (Multi WTW®)	NF T 90-008	Électrode (Sevenmulti)	GB/T 13580.4-92
Conductivité ( $\mu\text{S.cm}^{-1}$ )	Sonde (Multi WTW®)	NF EN 27888	Sonde (FE30)	GB 13580.3-92
Turbidité (NTU)	Turbidimètre (2100P HACH®)	NF EN ISO 7027	Turbidimètre (2100N)	GB/T 5750.4-2006
MES (mg. L <sup>-1</sup> )	Filtration GF/F (Verrerie Sartorius® et filtre Whatman)	NF EN 872	Filtration et balance d'analyse (XS105)	GB 11901-89 1990
COD (mg C. L <sup>-1</sup> )	COT-mètre (TOC-Vcsn SHIMADZU®)	NF EN 1484	COT-mètre (Vario TOC select)	HJ 501-2009 2009
N-NO <sub>2</sub> (mg. L <sup>-1</sup> )			UV-VIS-spectrophotomètre à deux faisceaux (TU-1901)	GB/T 13580.7-92
N-NO <sub>3</sub> (mg. L <sup>-1</sup> )				GB/T 13580.7-92
N <sub>tot</sub> (mg. L <sup>-1</sup> )				GB/T 13580.11-92
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg. L <sup>-1</sup> )			UV-Vis spectrophotomètre (UV-2601)	HJ 636-2012
P <sub>tot</sub> (mg. L <sup>-1</sup> )				GB 11893-89 1990

Tableau 4-6. Résumé des méthodes d'analyse microbiologique

Paramètre microbiologique	France		Chine	
Entérocoques (npp.100mL <sup>-1</sup> )	Micro plate MUG/EC BIORAD®	NF EN ISO 7899-1		
<i>E. coli</i> (npp.100mL <sup>-1</sup> )	Micro plate MUG/SF BIOerRAD®	NF EN ISO 9308-3		
Flore totale à 22°C (log ufc. mL <sup>-1</sup> )	Culture sur gélose PCA	NF EN ISO 6222		
Flore totale à 36°C (log ufc. mL <sup>-1</sup> )	Culture sur gélose PCA	NF EN ISO 6222		
Coliformes totaux (ufc. L <sup>-1</sup> )			Culture sur gélose et en étuve (DHP-360)	GB/T 5750.12-2006
Coliformes fécaux (ufc. L <sup>-1</sup> )				HJ/T 347-2007 2007

Toutes les mesures de l'ensemble des paramètres retenus sont effectuées au laboratoire en raison de la disponibilité du matériel nécessaire. Les mesures sont effectuées aux laboratoires du LEESU de ENPC et de l'UPEC en France et de TEAS en Chine. Les détails des protocoles sont présentés dans la section 2.1 et 2.2 ci-dessous.

Pour les paramètres mesurés sur les trois sites d'étude (pH, conductivité, turbidité, MES, COD et flore totale), il n'y a pas de différence significative entre les protocoles analytiques français et chinois. Par conséquent, les résultats mesurés dans les deux pays peuvent être comparés.

## 2.1 Paramètres physico-chimiques

Les méthodes analytiques des paramètres physico-chimiques sont présentées ci-dessous :

- **Le pH**

Les mesures de pH en France sont effectuées selon la norme NF T 90-008 (AFNOR, 2001) avec une électrode pH de l'appareil Multi 340i WTW® comprenant une sonde de température intégrée ou Multiline P4 WTW® donnant le pH à 25 °C. Les deux électrodes ont une précision de 0,01 unité pH et sont préalablement étalonnées à l'aide de deux solutions tampons (pH = 4,01 et pH =7,01). Entre deux mesures, l'électrode est rincée à l'eau distillée et séchée à l'aide d'un papier absorbant. L'électrode est conservée dans une solution de stockage de KCl 3M à la fin des mesures.

Les mesures en Chine sont réalisées selon la norme chinoise GB/T 13580.4-92 avec les appareils *Sevenmulti*. Le protocole est identique à celui utilisé en France. L'électrode est conservée dans une solution commerciale de KCl à 3M fournie pour son entretien. Les solutions tampons (pH = 4,01 et pH =7,01) sont utilisées pour étalonner l'appareil une fois par semaine. La mesure est réalisée au laboratoire dès que possible après le prélèvement, après avoir laissé revenir les échantillons à température ambiante.

- **La conductivité ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )**

Les mesures en France sont effectuées selon la norme NF EN 27888 (AFNOR, 1994) avec une sonde de conductivité de l'appareil Multi 340i WTW® comprenant une sonde de température intégrée ou Multiline P4 WTW® donnant la conductivité spécifique à 25°C (précisions à 1  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et 0,1 °C). Les sondes sont préalablement étalonnées à l'aide d'une solution étalon ( $\sigma = 1278 \mu\text{S}/\text{cm}$  à 20 °C et 1413  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à 25 °C). Entre deux mesures, la sonde est rincée à l'eau distillée et séchée à l'aide d'un papier absorbant.

Il en va de même pour les mesures en Chine. Le protocole suivi est celui détaillé dans la norme GB/T 13580.3-92 et l'appareil utilisé est le conductimètre FE30. Le niveau de précision de cet appareil est de 1  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et 0,1 °C qui est comparable à celui utilisé en France. La mesure est réalisée au laboratoire dès que possible après le prélèvement.

- **La turbidité (NTU)**

La turbidité est la réduction de la transparence d'un liquide due à la présence de matières non dissoutes. En France, les mesures s'effectuent avec l'appareil portatif 2100P HACH® (précisions à 0,1 NTU) et selon la norme NF EN ISO 7027 (AFNOR, 2000) en remplissant un flacon d'environ 15 mL fourni avec le turbidimètre avec l'eau de l'échantillon en cours d'analyse après l'avoir au préalable rincé à l'échantillon. Il est important de bien homogénéiser l'échantillon avant de remplir le flacon de mesure. Avant de placer le flacon dans l'appareil, il est nécessaire d'homogénéiser son contenu et d'éliminer les traces de doigt à l'aide d'un papier absorbant (pour éviter la perturbation de la réfraction du rayon lumineux lors de la mesure). Le turbidimètre procède ensuite à une mesure optique de la turbidité. La mesure est répétée deux à trois fois par l'opérateur, les valeurs devant être semblables entre elles pour valider le résultat obtenu en calculant la moyenne des mesures.

En Chine, le protocole suivi est celui détaillé dans la norme GB/T 5750.4-2006 (2.1. L'appareil utilisé en Chine est le turbidimètre portatif modèle 2100N (précisions à 0,1 NTU).

- **Les concentrations en MES (mg. L<sup>-1</sup>) et COD (mgC.L<sup>-1</sup>)**

Pour les matières en suspension (MES), les mesures en France s'effectuent selon la norme NF EN 872 (AFNOR, 2005). Deux filtrations, chacune d'un volume d'environ 500 mL sont réalisées sur deux filtres en microfibre du type GFF de la marque Whatman (diamètre de 47 mm et porosité de 0,7 m) pour chaque fraction collectée. Les filtres sont ensuite séchés au minimum pendant 24 h à 60 °C avant leur pesée. La concentration en MES est déterminée par différence entre la masse du filtre après ( $m_1$  en mg) et avant filtration ( $m_0$  en mg) selon l'équation suivante :

$$\text{MES} \left( \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{m_1 - m_0}{V} \times 1000$$

Avec  $V$  = volume total filtré (mL)

En Chine, le protocole suivi est celui détaillé dans la norme GB 11901-89. L'appareil utilisé pour la pesée est la balance analytique XS105. Le contenu de ce protocole est semblable à celui utilisé en France.

Pour le carbone organique dissous (COD), les mesures s'effectuent après préparation de deux répétabilités par fraction collectée contenant chacun le filtrat résultant de l'opération de filtration pour les MES. Chaque répétabilité est constitué de 38 mL de filtrat et de 2 mL d'acide ortho phosphorique ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) servant à la conservation de l'échantillon. La mesure est réalisée selon la norme NF EN 1484 (AFNOR, 1997) par l'appareil TOC-

VCSN SHIMADZU®. La moyenne des deux mesures réalisées pour les MES et le COD est ensuite retenue. De la même façon, pour la mesure en Chine, le protocole suivi est celui détaillé dans la norme HJ 501-2009 et l'appareil est de Vario TOC select.

- **N-NO<sub>2</sub> (mg.L<sup>-1</sup>) et N-NO<sub>3</sub>(mg.L<sup>-1</sup>)**

Les mesures des ions nitrates et nitrites sont effectuées selon la norme GB/T 13580.5-92 (Détermination du fluorure, chlorure, nitrate, sulfate dans la précipitation humide Chromatographie ionique) avec l'appareil de chromatographie ionique ICS-900. Cette manipulation n'a été faite qu'en Chine.

Une colonne est composée d'une résine chargée soit positivement (pour séparer des anions) soit négativement (pour séparer des cations). L'éluant emporte les anions ou les cations à séparer. Selon que l'interaction électrostatique entre la résine de la colonne et les ions à séparer est plus ou moins forte, la séparation se fera plus ou moins facilement.

Pour effectuer un dosage, il est donc nécessaire de se référer à une solution étalon (1000 µg/L de la solution de NaNO<sub>2</sub> et KNO<sub>3</sub>). La surface relative permet de calculer les proportions des différents composés constituant la solution.

Les concentrations minimales détectables sont respectivement de 0,05mg/L pour les nitrates et de 0,1mg/L pour les nitrites.

- **N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (mg. L<sup>-1</sup>)**

Les mesures de l'azote ammoniacal s'effectuent selon la norme GB/T 13580.11-92 « Qualité de l'eau - Détermination de l'ammonium - Spectrophotométrie de réactif de Nessler » avec l'appareil UV Vis spectrophotomètre (UV-2601). Cette manipulation n'a été faite qu'en Chine.

L'ammoniac se présente sous forme d'état libre d'ammoniac et d'ion ammonium. L'azote ammoniacal réagit avec le réactif de Nessler pour former un complexe jaune brun. La concentration d'azote ammoniacal est proportionnelle à la profondeur de la couleur du complexe. L'absorbance est mesurée à une longueur d'onde de 420 nm.

- **N<sub>tot</sub> (mg. L<sup>-1</sup>)**

Les mesures de l'azote total s'effectuent selon la norme HJ 636-2012 « Qualité de l'eau. Détermination de l'azote totale - Méthode de spectrophotométrie UV par digestion au persulfate de potassium alcalin » avec l'appareil double-beam UV Vis Spectrophotomètre TU-1901. Cette manipulation n'a été faite qu'en Chine.

De 120 à 124 ° C, en présence de la solution de K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub> alcaline, des composés contenant de l'azote dans l'échantillon peuvent être convertis en nitrate. En utilisant la spectrophotométrie UV à une longueur d'onde de 220 nm et 275 nm, respectivement, l'absorbance a été mesurée (A<sub>220</sub> et A<sub>275</sub>). On a calculé la valeur d'absorbance corrigée par :

$$A = A_{220} - 2A_{275}$$

Et cette absorbance corrigée est proportionnelle à la teneur totale en azote. Le seuil de détection est de 0,05mg/L et le domaine de détermination se situe dans la frange 0,20~7,00 mg / L.

- **P<sub>tot</sub> (mg. L<sup>-1</sup>)**

Le phosphore total a été déterminé à l'aide des tests rapides UV Vis spectrophotomètre (UV-2601). Le protocole suivi est celui détaillé dans la norme GB 11893-89 « Qualité de l'eau. Dosage du phosphore total - Méthode spectrophotométrie au molybdate d'ammonium »

Le principe repose sur la minéralisation dans un thermo réacteur à 120°C pendant 30 min pour transformer le phosphore organique et les polyphosphates en orthophosphates. Les ions orthophosphates forment alors avec les ions molybdates l'acide phosphomolybdique dans une solution d'acide sulfurique. Celui-ci est réduit par l'acide ascorbique en bleu de phosphomolybdène qui est dosé par photométrie à 700 nm.

## 2.2 Paramètres microbiologiques

Les méthodes analytiques des paramètres microbiologiques sont présentées ci-dessous :

- ***E. coli* et entérocoques intestinaux (npp. 100mL<sup>-1</sup>)**

Les mesures ont été réalisées en respectant la norme NF EN ISO 9308-3 pour *E. coli* et la norme NF EN ISO 7899-1 pour les entérocoques intestinaux.

Une méthode par ensemencement de 96 puits de microplaques de type MUG (*E. coli*) et MUD (entérocoques) a été utilisée. Les dilutions des échantillons sont réalisées avec du DSM (Diluant Spécial pour Microplaques). Dans la norme, il est indiqué que le nombre de dilutions à ensemercer varie en fonction du niveau de contamination présumé de l'eau à analyser. Parce que des eaux de pluie sont *a priori* peu chargées en indicateurs de contamination fécale, seulement deux dilutions ont été effectuées. Pour *E. coli*, 48 puits sont ensemencés avec l'échantillon pur et 48 puits avec l'échantillon dilué au 1/10. Pour les entérocoques, 64 puits sont ensemencés avec l'échantillon pur et 32 puits avec l'échantillon dilué au 1/10.



Figure 4-1. Préparation de microplaques

La lecture des résultats est effectuée après 36 à 72 h d'incubation à 44 °C. Un puit est positif lorsqu'il présente une culture bactérienne (culot au fond du puits) et une fluorescence bleue sous UV ( $\lambda = 366 \text{ nm}$ ). Les résultats sont ensuite exprimés en NPP/100mL à l'aide d'un programme (Jarvis et *al.*, 2010).

- **Flore totale ( $\log \text{ ufc. mL}^{-1}$ )**

Le principe de mesure de la flore totale est de mélanger un échantillon ou ses dilutions dans un milieu de culture spécifique coulé dans des boîtes de Pétri. Après l'incubation à 36 °C ou 22 °C pendant une période, on calcule le nombre d'unités formant colonie (UFC) par millilitre à partir du nombre de colonies.

Pour les mesures en France, chaque échantillon est ensemencé pur ou dilué au 1/10, 1/100 et 1/1000 dans du milieu PCA sans glucose. On retourne les boîtes et incube un jeu à 36 °C pendant ( $44 \pm 4$ ) h et l'autre jeu à ( $22 \pm 2$ ) °C pendant ( $68 \pm 4$ ) h. On compte les colonies présentes dans chaque boîte et calcule le nombre estimé d'unités formant colonies présentes dans 1 ml d'échantillon. En Chine, à cause de la contamination plus élevée de l'eau récupérée, l'analyse a été effectuée seulement sur l'échantillon dilué. La dilution est ajustée au 1/10, 1/100 et 1/1000 pour la flore totale à 36 °C.



Figure 4-2. Flore totale à 36°C (Colonies caractéristique des trois dilutions)

- **Coliformes totaux ( $\text{ufc. mL}^{-1}$ )**

Les analyses ont été réalisées selon le « chapitre 5.2.6 Recherche et dénombrement des bactéries coliformes- Méthode par filtration sur membrane » de la « qualité des eaux de surface et eaux usées - la surveillance et les analyses » (Administration nationale de la protection de l'environnement, 2002)

100, 50, 10 ou 1 mL d'échantillon sont filtrés sur une membrane qui a la propriété de retenir les bactéries (porosité 0,45 µm, munie d'une grille-repère). Les volumes différents filtrés sont choisis pour que 20~60 colonies environ soient présentes sur la membrane. La membrane est ensuite déposée sur un milieu de culture sélectif. Ce milieu est incubé à 37 °C pendant 24 h avec une humidité relative supérieure à 90 %. Toutes les colonies, quelle que soit leur taille, sont comptées comme étant des bactéries lactose-positives, si le milieu sous la membrane présente une coloration rouge. Pour le dénombrement, on compte les colonies présentes dans chaque boîte et calcule le nombre estimé d'unités formant colonies présentes dans 1 mL d'échantillon.

- **Coliformes fécaux (ufc. mL<sup>-1</sup>)**

Les analyses ont été réalisées selon la norme HJ/T 347-2007 au « chapitre 5.2.6 Recherche et dénombrement des coliformes fécaux- Méthode par filtration sur membrane ».

100, 50, 10 ou 1 mL d'échantillon sont filtrés sur une membrane qui a la propriété de retenir les bactéries (porosité 0,45 µm, munie d'une grille-repère). Les volumes différents filtrés sont choisis pour que 20 ~ 60 colonies soient environ présentes sur la membrane. La membrane est ensuite déposée sur un milieu de culture sélectif M-FC. Ce milieu est incubé à (44, 5± 0, 5) °C pendant (24 ± 2) h avec une humidité relative supérieure à 90%. Toutes les colonies, quelle que soit leur taille, sont comptées comme étant des bactéries lactose-positives, si le milieu sous la membrane présente une coloration bleue ou bleue verte. Pour le dénombrement, on compte les colonies présentes dans chaque boîte et calcule le nombre estimé d'unités formant colonies présentes dans 1 mL d'échantillon.

### 3. Traitement statistique des données

Nous devons présenter et expliquer les méthodes de traitement de données pertinentes dans ce chapitre :

- Les boîtes à moustache. Cette méthode de statistique descriptive uni-variée permet de résumer, sous la forme d'un graphique, l'information fournie par l'étendue, ainsi que par les trois quartiles et les intervalles qui les séparent. Elles sont particulièrement recommandées lorsqu'on veut comparer des séries statistiques ou des distributions entre elles.
- Test U de Mann-Whitney. Ce test statistique non paramétrique permet de comparer deux échantillons indépendants de petite taille. Il est valide sur des données cardinales ou ordinales, voire des variables différentes observées sur deux populations.
- L'analyse en composante principale (ACP). Cette méthode, de la famille de la statistique multivariée, consiste à transformer des variables corrélées en nouvelles

variables décorréliées les unes des autres. Elle permet au praticien de réduire le nombre de variables et de rendre l'information moins redondante.

### 3.1 Boîtes à moustaches

La visualisation des données est illustrée sous la forme de boîtes à moustaches. La boîte à moustaches est un moyen rapide de figurer le profil essentiel d'une série statistique quantitative. Cette représentation graphique peut présenter schématiquement la distribution. Dans cette étude, elles ont été effectuées avec le logiciel XLSTAT.

Le schéma suivant illustre la représentation des boîtes à moustaches (la Figure 4-3) :

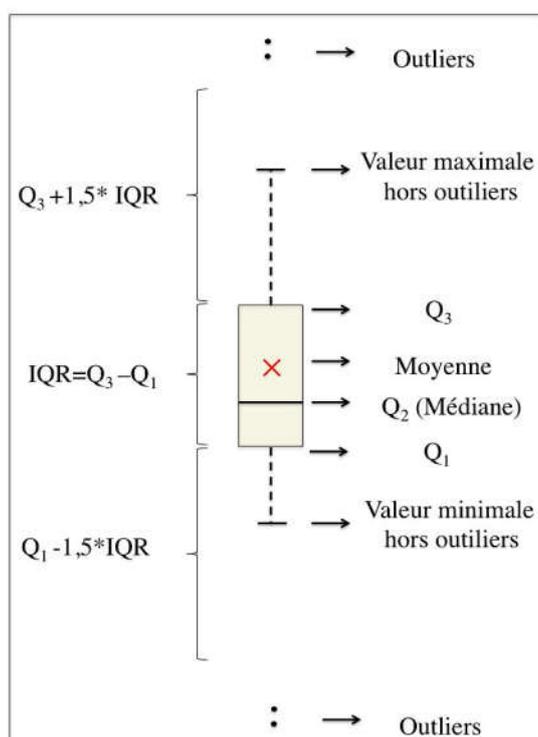


Figure 4-3. Illustration de la boîte à moustaches de Tukey

Dans les représentations graphiques de données statistiques, la boîte à moustaches (aussi appelée diagramme en boîte, boîte de Tukey ou *box-and-whisker plot* en anglais) est un moyen rapide de figurer le profil essentiel d'une série statistique quantitative. Ce diagramme est utilisé principalement pour comparer un même caractère dans deux populations de tailles différentes.

Les croix rouges sont les valeurs moyennes. Les barres horizontales centrales sont les valeurs médianes ( $Q_2$ ). Les limites inférieure et supérieure des boîtes sont les premier et troisième quartiles ( $Q_1$  et  $Q_3$ ), respectivement. 50% des données centrales se trouvent entre ces deux limites, 25% se trouvent au-dessus et 25% en-dessous.

Pour chaque boîte, les données situées respectivement en-dessous et au-dessus des extrémités inférieure et supérieure des moustaches peuvent être considérées comme hors-normes. Ce sont des données qui se trouvent en dehors de  $1,5 * IQR$  ( $Q_1 - 1,5 * IQR$  ou  $Q_3 + 1,5 * IQR$ ), où  $IQR$ , l'« écart interquartile » est la différence entre les premiers et troisièmes quartiles ( $Q_3 - Q_1$ ). Ces données "atypiques" appelées *outliers* situées au-delà des données adjacentes sont repérées par des marqueurs (les points en noir dans la Figure 4-3) pour les individualiser. L'extrémité de la moustache inférieure est la valeur minimum dans les données qui est supérieure à la valeur frontière basse  $Q_1 - 1,5 * IQR$  et l'extrémité de la moustache supérieure est la valeur maximum dans les données qui est inférieure à la valeur frontière haute  $Q_3 + 1,5 * IQR$ . La largeur horizontale des boîtes n'a pas de sens.

Ces représentations graphiques sont simples à construire. Elles permettent de voir aisément la manière dont les observations se répartissent et facilitent donc la comparaison, comme on peut le constater dans les figures.

### 3.2 Test U de Mann-Whitney

En statistique, le test U de Mann-Whitney (ou test de Wilcoxon-Mann-Whitney ou encore test de la somme des rangs de Wilcoxon) est un test statistique non paramétrique qui permet de tester l'hypothèse selon laquelle les médianes de chacun de deux groupes de données sont proches. Grâce à ce test, dans notre étude, nous pouvons déterminer si la différence entre les médianes des deux groupes de données est statistiquement significative. Elle est un test de comparaison d'une seule variable et a été réalisée à l'aide du logiciel de XLSTAT dans notre étude.

Pour le test U de Mann-Whitney, l'idée est de substituer à chaque valeur observée son numéro d'ordre croissant parmi l'ensemble des valeurs observées dans tous les échantillons des deux groupes, d'utiliser la somme des rangs pour chaque groupe afin de voir si la répartition des valeurs est homogène (nous proposons une hypothèse  $H_0$  selon laquelle la répartition est homogène).

Nous calculons une valeur p qui est utilisée pour quantifier la significativité statistique d'un résultat par le logiciel pour chaque comparaison. Pour déterminer si la différence entre les médianes est statistiquement significative, il faut comparer la valeur de p au seuil de signification. En général, un seuil de signification de 0,05 fonctionne bien (un seuil de signification de 0,05 indique un risque de 5 % de conclure à tort qu'une différence existe). Si la valeur de p est supérieure à 0,05, nous ne pouvons pas rejeter l'hypothèse  $H_0$ . Nous ne disposons pas des preuves suffisantes pour conclure que la différence entre les médianes de population est statistiquement significative. Si la valeur de p est inférieure ou égale à 0,05, nous pouvons rejeter  $H_0$  et concluons que la différence entre les médianes est statistiquement significative. En combinant à la situation réelle, nous pouvons ensuite

déterminer si la différence est significative dans la pratique. En outre, plus la valeur  $p$  est petite, plus nous pensons que la différence entre les deux groupes est significative. Pour les seuils de signification différents, les niveaux de significativité sont : \*  $p < 0,05$  ; \*\*  $p < 0,01$  ; \*\*\*  $p < 0,001$  ; \*\*\*\*  $p < 0,0001$ .

### **3.3 Analyses multi variées-ACP**

En présence d'un grand nombre de prélèvements décrits par plusieurs variables, il est utile de recourir à des méthodes d'analyse statistique multivariées pour caractériser les résultats obtenus. Des analyses multivariées ont été mises en œuvre pour faciliter l'interprétation du nombre de résultats disponibles. L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est l'une des méthodes d'analyse de données multivariées les plus utilisées qui consiste à transformer des variables corrélées en nouvelles variables décorréelées les unes des autres. L'objectif est de revenir à un espace de dimension réduite en déformant le moins possible la réalité. Elle permet au praticien de réduire le nombre de variables et de rendre l'information moins redondante. Dans cette étude, l'ACP a été réalisée à l'aide du logiciel de XLSTAT.

#### **3.3.1 Principe et méthode de l'ACP**

Pour des tableaux croisant observations (en lignes) et variables (en colonnes), l'ACP est une méthode de transformation qui crée des combinaisons (régression linéaire pondérée) des variables originales dans une nouvelle matrice avec de nouvelles variables. L'idée est de capturer autant de variance que possible dans la matrice tout en éliminant les corrélations. Les nouvelles variables sont créées à l'aide des vecteurs propres et des valeurs propres calculés à partir d'une matrice de covariance (ou la matrice de corrélation si on standardise des données) des variables originales.

Donc, afin d'effectuer l'ACP, la première étape est de calculer des variables centrées réduites et de créer la matrice des corrélations. Les nouvelles variables de l'ACP sont obtenues par diagonalisation de cette matrice qui en extrait les vecteurs propres. Les vecteurs propres correspondent aux vecteurs qui définissent les nouvelles variables et qui sont associés chacun à la valeur propre. Les nouvelles variables sont des combinaisons linéaires des anciens et ont la particularité de ne pas être corrélées entre elles. Ces nouvelles variables sont communément appelées « composantes principales ». La valeur propre s'interprète comme la « variance expliquée » par la variable. Le pourcentage de la valeur propre s'interprète comme la proportion de variance qui peut être vue comme une mesure de la qualité de représentation des données ou une mesure de l'importance relative des composantes principales.

Chaque composante principale correspond à une proportion de la variance qui lie à la qualité de la projection lorsque l'on passe de N dimensions à un nombre plus faible de dimensions (nombre de composantes principales). La proportion de la variance de chaque composante principale signifie que si l'on représente les données sur cette composante, alors on aura toujours un % de la variance qui sera préservée. Les composantes principales sont triées par ordre décroissant de proportion de la variance représentée. Le nombre de composantes principales "utiles" maximum est détecté par la proportion cumulée de la variance représentée.

### 3.3.2 Représentations graphiques des résultats de l'ACP

L'un des avantages de l'Analyse en Composantes Principales est qu'elle fournit une visualisation optimale des variables et des observations. Deux types de graphiques sont utilisées dans cette étude.

- **Cercle de corrélation- Représentation des variables**

Une fois les nouvelles variables calculées, il faut interpréter la signification de chaque composante principale. Pour cela, un graphique de cercle de corrélation est créé pour faciliter l'interprétation. Ce graphique correspond à une projection des variables initiales sur un plan à deux dimensions constituées par les deux nouvelles composantes principales. Les anciennes variables sont représentées sur un cercle de rayon 1. Les coefficients de corrélation avec les nouvelles variables sont ses coordonnées sur ce graphique. Lorsque deux variables sont loin du centre du graphique, plusieurs cas de figure se présentent :

- si elles sont proches les unes par rapport aux autres, alors elles sont positivement corrélées ;
- si elles sont orthogonales les unes par rapport aux autres, alors elles sont non-corrélées ;
- si elles sont opposées par rapport au centre, alors elles sont négativement corrélées.

L'interprétation de la signification de la composante principale peut être combinée avec les corrélations entre les anciennes variables.

- **Biplots d'une Analyse en Composantes Principales- Représentation des individus**

A travers du graphique de Biplots, il est possible de représenter simultanément dans l'espace des facteurs à la fois les observations et les variables. Les points projetés sur le vecteur variable doivent respecter l'ordre et les distances relatives des données de départ correspondant à la même variable. La position de deux observations projetées sur un

vecteur variable permet de conclure quant à leur niveau relatif sur cette même variable. Et la longueur d'un vecteur variable dans l'espace de représentation est représentative du niveau de contribution de la variable à la construction de cet espace.

## **Conclusion de la partie 2**

Cette partie consistée à concevoir et mettre en place un dispositif expérimental permettant l'étude de l'évolution de la qualité des eaux de ruissellement de toit au cours d'événements pluviaux, en respectant les conditions réelles d'emploi d'un système de collecte des eaux de pluie de toit (mise en place du système sur les toitures des maisons situées en milieu urbain, et exposées à la pollution atmosphérique). Le système expérimental a ensuite été utilisé pour étudier les eaux fractionnées. Différents paramètres physico-chimiques et microbiologiques ont alors été analysés.

On a choisi 3 sites dans 2 pays qui correspondent aux différents types de climat, aux différents environnements et aux différents niveaux de pollution. Entre mai 2015 et janvier 2017, 41 expérimentations ont été menées (16 expérimentations à Vincennes, 15 expérimentations à Romainville et 10 expérimentations à Tianjin). A travers les analyses, on a réalisé la constitution d'une base de données pour différents paramètres de qualité de l'eau ruisselée sur la toiture et de données météorologiques (intensité de pluie, période de temps sec, etc.). Le système apparaît fonctionnel, démontrant la faisabilité de l'approche expérimentale effectuée, ce qui constituait l'objectif principal de ce chapitre.

La partie suivante concerne la présentation et la discussion des résultats. Il s'agira d'abord d'identifier les différents facteurs affectant la qualité et de mettre en évidence les facteurs les plus déterminants. Ce travail est réalisé par les comparaisons entre les deux sites en France et aussi entre la Chine et la France. Ensuite, il s'agira d'étudier l'évolution de la qualité en cours d'événement et d'identifier des motifs d'évolution caractéristiques.

**PARTIE 3. Caractérisation et modélisation de  
l'évolution de la qualité des eaux de toiture**

Cette partie III s'attache à la présentation et à l'interprétation des résultats expérimentaux. Elle est composée de deux chapitres : le chapitre 5 concerne la représentation de la qualité moyenne de l'eau sur les trois sites, l'étude de l'influence des facteurs principaux sur la qualité de l'eau et la sélection de paramètres-clés pour la modélisation de l'évolution de la qualité en cours d'événement. Ceux-ci sont ensuite utilisés dans le chapitre 6 pour l'analyse par modélisation de l'évolution de la qualité de l'eau de ruissellement de toiture au cours d'un événement pluvieux. Ce 6<sup>ème</sup> chapitre s'intéresse à l'influence des facteurs déterminants sur l'évolution de la qualité, les effets des caractéristiques de pluie et propose différentes alternatives de modélisation.

## Chapitre 5. Étude de la qualité des eaux collectées

### ruisselées et sélection de paramètres caractéristiques

La manière dont évolue la qualité de l'eau de ruissellement de toiture au cours des événements pluviaux est appréhendée par l'évolution de la qualité des échantillons d'eau de pluie collectés. La variabilité de la qualité physico-chimique et microbiologique est liée à la variation des facteurs présentés au chapitre 1, relatifs à la nature du toit, la nature de la précipitation et la météorologie. Parmi eux, la saisonnalité et la durée de temps sec précédant la précipitation (ADD : *Antecedent Dry Days*) ont un impact important. Nous avons mis en place des dispositifs sur trois sites différents qui correspondent à différents types de climat, environnements et niveaux de pollution (cf. chapitre 3) puis suivi la qualité de l'eau au cours d'un événement pluvieux sur la base d'échantillons collectés (mesures faites au laboratoire). Les données pluviométriques ont également été collectées. La comparaison de la qualité des eaux de pluie sur les différents sites et l'analyse des effets des conditions externes permettent de fournir une compréhension globale de la qualité de l'eau.

Dans cette étude, la qualité est estimée au travers d'un ensemble de paramètres de natures diverses (9 paramètres sur les deux sites situés en France et 13 paramètres sur le site situé en Chine) ; l'analyse de leur indépendance est cruciale dans un objectif ultérieur de modélisation parcimonieuse.

En conséquence, ce chapitre exploite l'intégralité des résultats acquis expérimentalement en poursuivant deux objectifs :

- Le premier objectif est de fournir une analyse entre les trois sites d'étude de la qualité de l'eau de pluie collectée. Le système expérimental mis en place sur chaque site collectant des fractions de ces premiers millimètres, il sera nécessaire d'estimer la qualité moyenne de l'eau de pluie pour le 1<sup>er</sup> et le 2<sup>ème</sup> millimètre sur la base des différentes échantillons collectés.
- Par ailleurs, dans un objectif de modélisation parcimonieuse, il est nécessaire de rechercher le nombre minimal de paramètres indépendants permettant de décrire l'évolution de la qualité en cours d'évènement. Cette réduction constitue également un enjeu opérationnel, préoccupation centrale dans cette thèse. C'est, le second objectif de ce chapitre.

Ce chapitre est organisé en trois sections.

- La première présente (Vincennes et Romainville en France et Tianjin en Chine).
- Sur la base d'une analyse en composantes principales (ACP), la deuxième section effectue la réduction des paramètres pour qualifier l'évolution de la qualité en cours d'évènement.

- Enfin, une troisième et dernière section s'attache à l'étude de l'influence de deux facteurs déterminants sur la qualité : la saisonnalité et la durée de temps sec précédant la précipitation (ADD).

## **1. Approche comparative de la qualité moyenne des premiers millimètres d'eau de toiture**

Cette section concerne la description statistique des résultats de la qualité moyenne des deux premiers millimètres de pluie par événement pluvieux sur les trois sites d'étude.

### **1.1 Caractérisation de la qualité moyenne de l'eau de toiture.**

Étant donné que la surface de collecte n'est pas identique sur les trois sites, chaque fraction collectée correspond à une hauteur d'eau précipitée différente (0,23 mm pour Vincennes, 0,115 mm pour Romainville, et 0,24 mm pour Tianjin). Pour pouvoir comparer la qualité moyenne d'une même quantité d'eau de pluie collectée entre les différents sites, il est nécessaire de considérer un même cumul de pluie. Nous avons retenu des cumuls millimétriques. Ce travail s'effectue en pratique en 2 étapes.

La première étape consiste à **définir la hauteur de précipitation à prendre en compte.**

Les différents cumuls millimétriques sont recomposés à partir des échantillons des dispositifs expérimentaux mis en place dont les fractions unitaires sont inférieures au cumul millimétrique. Le Tableau 5-1 rappelle les caractéristiques des dispositifs d'échantillonnage.

Tableau 5-1. Caractéristiques des dispositifs d'échantillonnage et hauteur de pluie recueillie

	Volume total du dispositif (L)	Surface projetée (m <sup>2</sup> )	Hauteur de pluie par échantillon (mm)	Hauteur de pluie maximale recueillie (mm)	Nombre de cumuls millimétriques reconstitués
Vincennes (6 bouteilles)	34,5 (5*2,3 L + 23 L)	10	0,23 et 2,3 (dernier flacon)	3,45	3 (1, 2 et 3mm)
Vincennes (9 bouteilles)			0,23	2,07	
Romainville (9 bouteilles)	20,7 (9 *2,3 L)	20	0,115	1,04	1 (1mm)
Tianjin (9 bouteilles)		9,53	0,24	2,17	2 (1 et 2mm)

Nous pouvons observer qu'en raison de la différence de la surface expérimentale d'un site à l'autre, les hauteurs de pluie sur les trois sites d'étude sont différentes pour un même volume d'eau collectée. Ici, les hauteurs de pluie totales des dispositifs d'échantillonnage (appelée hauteur de pluie acceptable dans le Tableau 5-1) sont égales au volume total du dispositif divisé par la surface projetée de la toiture. Elles sont respectivement de 3,45 mm et 2,07 mm pour Vincennes, 1,04 mm pour Romainville et 2,17 mm pour Tianjin. Afin de permettre la comparaison des sites entre eux, des échantillons correspondants aux cumuls millimétriques sont reconstitués. Sur Romainville seul le cumul du premier millimètre peut être reconstitué contre 2 ou 3 sur Vincennes selon la configuration du dispositif expérimental et 2 sur Tianjin.

Pour Vincennes et Tianjin où il est possible de reconstituer deux, voire trois cumuls millimétriques il est également possible d'analyser les évolutions entre cumuls successifs. Martinson et Thomas (2009) considèrent que pour le 2<sup>ème</sup> mm précipité, la charge de contamination est réduite de moitié. Nous pourrions vérifier cette constatation dans notre travail.

La deuxième étape consiste à **préciser et appliquer les modalités de recomposition des échantillons millimétriques** pour différents paramètres.

Remarque préalable : Il convient de bien insister sur le fait que les valeurs des paramètres à l'échelle de l'échantillon millimétrique sont recomposées. Elles constituent donc seulement des proxys de valeurs réelles qui, pour être établies rigoureusement, auraient nécessité le recours à un dispositif expérimental différent de celui mis en œuvre dans le cadre de cette thèse qui vise également à saisir l'évolution fine de la qualité de l'eau en cours d'évènement.

La Figure 5-1 montre que le cumul de quatre fractions sur Tianjin et Vincennes et de neuf fractions sur Romainville permet d'atteindre à moins de 10% près le cumul millimétrique par défaut (Tianjin et Vincennes) ou par excès (Romainville).

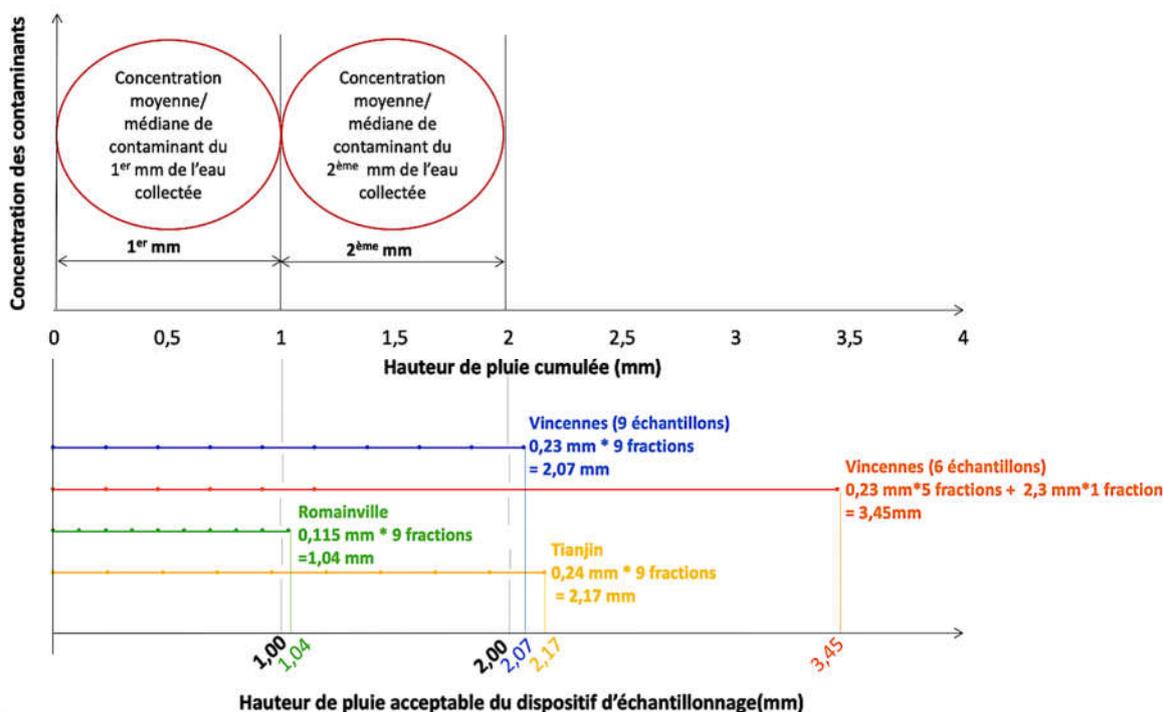


Figure 5-1. Division des cumuls millimétriques de l'eau collectée

Il pourrait être envisagé de considérer une partie de la 5<sup>ème</sup> fraction sur Vincennes et Tianjin ou de la 9<sup>ème</sup> fraction sur Romainville pour constituer un cumul millimétrique d'un millimètre exactement. Toutefois cela n'amènerait pas à une amélioration de la précision des analyses. En effet comme cela a déjà été indiqué (chapitre 3) le dispositif expérimental, malgré les précautions prises implique la présence d'un volume mort, et n'est pas exempt de légères fuites. D'autre part, ne prendre en compte qu'une partie d'une fraction imposerait de faire une hypothèse sur la manière dont la qualité de l'eau évolue au cours du remplissage du flacon correspondant à cette fraction. Nous ne disposons d'aucune information à ce sujet ; l'hypothèse d'une qualité de l'eau constante au cours du remplissage paraîtrait la plus évidente, mais rajouterait également une incertitude dans les résultats.

Ainsi, par raison de simplicité, mais également compte tenu du fait que la recherche de cumuls millimétriques « exacts » n'amènerait qu'à une précision illusoire, nous avons préféré arrondir au millimètre le plus proche le cumul des fractions suivantes sur les trois sites :

- Vincennes : cumul des fractions 1 à 4 (0,92mm) pour le premier cumul millimétrique et cumul des fractions 1 à 9 (2,07mm) pour le deuxième cumul millimétrique ;

- Tianjin : cumul des fractions 1 à 4 (0,96mm) pour le premier cumul millimétrique et cumul des fractions 1 à 9 (2,16mm) ;
- Romainville : cumul des fractions 1 à 9 (1,04mm) pour le premier cumul millimétrique.

Concernant les paramètres physico-chimiques, la valeur sur les cumuls millimétriques est déterminée par la moyenne des valeurs des fractions constituant le cumul millimétrique. Il faut noter que le paramètre pH est particulier. En effet,

$$pH = \log_{10}[H^+] \quad \text{Équation 2}$$

Où  $[H^+]$  désigné l'activité des ions hydrogène  $H^+$ .

Donc, on ne peut pas calculer le pH moyen par la moyenne des fractions : il faut repasser par la concentration en  $H^+$ .

## 1.2 Comparaison par cumuls millimétriques de la qualité des eaux collectées

On a calculé les valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques et les valeurs médianes des paramètres microbiologiques de chaque événement pluvieux collecté pour les différents cumuls millimétriques. Le nombre d'échantillons disponible sur chacun des sites varie de 8 (Tianjin) à 17 (Romainville). Ce nombre est trop faible pour pouvoir s'assurer de l'appartenance des échantillons à une population suivant une loi normale d'une part et d'autre part le caractère stochastique du phénomène pluvieux, ainsi que la variabilité des intensités des phénomènes pluvieux enregistrés ne permet en aucun cas de considérer que cette population suit une loi normale. (voir Chapitre 3, section 3.3). Il n'y a donc aucune raison que l'hypothèse d'un ajustement de nos échantillons à une loi normale soit justifiée. Ainsi, dans la suite de notre analyse nous ne considérerons que des statistiques non paramétriques, même si nous indiquerons les valeurs des moyennes et des écarts types, indicateurs classiquement mentionnés.

Les Tableau 5-2, Tableau 5-3 et Tableau 5-4 présentent les séries de résultats statistiques obtenus sur les cumuls millimétriques pour les paramètres (physico-chimiques et microbiologiques) sur les trois sites d'étude. Y figurent également les critères français de qualité des eaux destinées à la consommation humaine (Arrêté du 11 janvier 2007), les prescriptions minimales applicables aux eaux issues du traitement d'épuration des eaux résiduaires urbaines réutilisées pour l'irrigation de cultures ou d'espaces verts (Arrêté du 2 août 2010). Les critères chinois de la norme de qualité de l'eau pour la consommation d'eau distribuée<sup>5</sup> en milieu urbain (GB/T 18920-2002) ont également été reportés dans ce tableau lorsqu'ils existaient pour le paramètre considéré.

---

<sup>5</sup> L'eau distribuée en milieu urbain en Chine n'est pas potable. C'est une des raisons pour laquelle les paramètres de la norme chinoise diffèrent sensiblement de ceux de la réglementation française.

Tableau 5-2. Grandeurs statistiques pour les paramètres physico-chimiques des cumuls millimétriques consécutives de l'eau sur les trois sites

Paramètre physico-chimique (Valeur moyenne)	Critères de qualité		Vincennes		Romainville	Tianjin	
			1mm (n=13)	2mm (n=10)	1mm (n=17)	1mm (n=9)	2mm (n=8)
pH	6,5-9,0 (a) ; 6,0-9,0 (c)	MIN	6,6	6,8	6,5	6,7	6,7
		MAX	9,2	8,4	7,6	7,4	7,8
		Q <sub>1</sub>	7,2	7,1	6,7	6,8	7,0
		MED	7,4	7,2	7,1	6,9	7,2
		Q <sub>3</sub>	7,8	7,3	7,4	7,1	7,4
		MOY	7,6	7,3	7,1	7,0	7,2
		ET	0,7	0,5	0,4	0,2	0,3
Conductivité (μS.cm <sup>-1</sup> )	180 à 1000 (a)	MIN	51	22	9	131	55
		MAX	158	66	64	290	173
		Q <sub>1</sub>	81	33	27	201	81
		MED	106	41	33	230	95
		Q <sub>3</sub>	119	47	47	282	105
		MOY	104	41	37	226	99
		ET	33	15	15	64	34
Turbidité (NTU)	2 (a) ; 5 (c)	MIN	3,6	3,4	1,5	14,8	7,3
		MAX	38,3	7,0	15,3	141,0	102,2
		Q <sub>1</sub>	4,6	3,5	2,5	28,8	17,8
		MED	6,1	3,9	3,7	33,0	26,2
		Q <sub>3</sub>	10,4	4,3	4,5	54,1	39,4
		MOY	9,7	4,3	4,4	54,5	36,2
		ET	9,4	1,4	3,1	44,9	32,2
MES (mg. L <sup>-1</sup> )	5-10 (c)	MIN	5,9	4,0	2,0	27,0	9,0
		MAX	109,8	19,0	34,1	293,8	242,4
		Q <sub>1</sub>	10,5	5,5	5,4	52,6	33,8
		MED	17,6	7,0	7,5	90,0	44,0
		Q <sub>3</sub>	37,1	8,6	13,0	235,7	163,2
		MOY	27,8	8,5	10,5	134,6	85,9
		ET	27,9	5,4	9,2	103,2	86,6
COD (mg C. L <sup>-1</sup> )	60 (a)	MIN	2,4	0,6	0,6	12,8	2,9
		MAX	28,5	2,7	6,3	41,9	21,7
		Q <sub>1</sub>	3,1	0,8	1,6	14,6	5,9
		MED	5,9	1,4	2,1	20,0	8,9
		Q <sub>3</sub>	11,4	2,3	3,4	24,2	10,0
		MOY	8,1	1,6	2,8	21,7	9,3
		ET	7,2	0,9	1,7	9,5	5,7

MIN= minimum, MAX=maximum, Q<sub>1</sub>=1<sup>er</sup> Quartile, MED=médiane (2<sup>ème</sup> Quartile), Q<sub>3</sub>= 3<sup>ème</sup> Quartile, MOY=moyenne, ET=Écart-type. (a) Eau distribuée (Arrêté du 11 janvier 2007) ; (c) Norme de qualité de l'eau pour la consommation d'eau distribuée en milieu urbain GB/T 18920-2002 (Chine)

Tableau 5-3. Grandeurs statistiques pour les paramètres microbiologiques des cumuls millimétriques consécutives de l'eau sur les trois sites

Paramètres microbiologiques (Valeur médiane)	Critères de qualité		Vincennes		Romainville	Tianjin	
			1mm (n=13)	2mm (n=10)	1mm (n=17)	1mm (n=9)	2mm (n=8)
<i>E. coli</i> (npp.100mL <sup>-1</sup> )	250(b)	MIN	0	0	0		
		MAX	57	103	98		
		Q <sub>1</sub>	0	8	0		
		MED	0	21	0		
		Q <sub>3</sub>	0	50	0		
		MOY	9	35	6		
		ET	20	39	24		
Entérocoques (npp.100mL <sup>-1</sup> )	(10000 npp. mL <sup>-1</sup> ) (b)	MIN	10	10	0		
		MAX	2300	645	270		
		Q <sub>1</sub>	130	94	0		
		MED	430	190	0		
		Q <sub>3</sub>	908	324	13		
		MOY	636	244	24		
		ET	646	231	68		
FT à 22°C (log ufc. mL <sup>-1</sup> )		MIN	2,7	3,5	1,2		
		MAX	5,0	5,1	4,8		
		Q <sub>1</sub>	3,6	3,5	2,6		
		MED	4,1	3,6	3,6		
		Q <sub>3</sub>	4,6	3,9	4,1		
		MOY	4,1	3,9	3,3		
		ET	0,7	0,6	1,0		
FT à 36°C (log ufc. mL <sup>-1</sup> )		MIN	1,9	1,7	1,1	3,6	3,2
		MAX	4,7	3,7	4,5	5,6	4,6
		Q <sub>1</sub>	2,3	2,2	2,1	4,3	3,6
		MED	3,3	2,5	2,5	4,4	4,1
		Q <sub>3</sub>	4,2	3,2	2,8	4,4	4,5
		MOY	3,3	2,7	2,5	4,5	4,0
		ET	1,0	0,7	1,0	0,6	0,6

MIN= minimum, MAX=maximum, Q<sub>1</sub>=1<sup>er</sup> Quartile, MED=médiane (2<sup>ème</sup> Quartile), Q<sub>3</sub>= 3<sup>ème</sup> Quartile, MOY=moyenne, ET=Écart-type ; (b) Eau « reuse » (Arrêté du 2 août 2010).

Tableau 5-4. Grandeurs statistiques pour les paramètres supplémentaires des différentes cumuls millimétriques de l'eau à Tianjin

Paramètres physico-chimiques (Valeur moyenne)					Paramètres microbiologiques (Valeur médiane)				
Paramètres	Critères de la qualité		1mm (n=9)	2mm (n=8)	Paramètres	Critères de la qualité		1mm (n=9)	2mm (n=8)
N-NO <sub>2</sub> (mg. L <sup>-1</sup> )		MIN	0,1	0	Coliformes total (log ufc. mL <sup>-1</sup> )	≤3 (c)	MIN	2,9	2,5
		MAX	1	0,1			MAX	4,4	3,9
		Q <sub>1</sub>	0,1	0			Q <sub>1</sub>	3,2	2,6
		MED	0,2	0			MED	3,8	2,9
		Q <sub>3</sub>	0,4	0,1			Q <sub>3</sub>	3,8	3,3
		MOY	0,3	0			MOY	3,6	3,0
		ET	0,3	0			ET	0,4	0,5
N-NO <sub>3</sub> (mg. L <sup>-1</sup> )		MIN	1,7	0,5	Coliformes fécaux (log ufc. mL <sup>-1</sup> )		MIN	2,5	1,8
		MAX	9,7	2,9			MAX	3,9	3,4
		Q <sub>1</sub>	2,4	1			Q <sub>1</sub>	2,9	2,3
		MED	3,8	1,3			MED	3,4	2,5
		Q <sub>3</sub>	4,4	1,9			Q <sub>3</sub>	3,8	2,7
		MOY	4	1,4			MOY	3,3	2,6
		ET	2,4	0,8			ET	0,5	0,5
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg. L <sup>-1</sup> )	5 (c)	MIN	3,9	1,6			MIN		
		MAX	8,8	5,8			MAX		
		Q <sub>1</sub>	4,1	2,8			Q <sub>1</sub>		
		MED	4,4	3,3			MED		
		Q <sub>3</sub>	6,2	3,4			Q <sub>3</sub>		
		MOY	5,2	2,9			MOY		
		ET	1,8	1,3			ET		
N <sub>tot</sub> (mg. L <sup>-1</sup> )		MIN	6,3	2,6			MIN		
		MAX	20,8	8,4			MAX		
		Q <sub>1</sub>	7,7	4,6			Q <sub>1</sub>		
		MED	9,3	5,1			MED		
		Q <sub>3</sub>	11,4	5,5			Q <sub>3</sub>		
		MOY	10,3	5,2			MOY		
		ET	4,5	1,7			ET		
P <sub>tot</sub> (mg. L <sup>-1</sup> )	1 (c)	MIN	0,2	0,1			MIN		
		MAX	0,8	0,5			MAX		
		Q <sub>1</sub>	0,3	0,2			Q <sub>1</sub>		
		MED	0,4	0,3			MED		
		Q <sub>3</sub>	0,5	0,4			Q <sub>3</sub>		
		MOY	0,4	0,3			MOY		
		ET	0,2	0,2			ET		

MIN= minimum, MAX=maximum, Q<sub>1</sub>=1<sup>er</sup> Quartile, MED=médiane (2<sup>ème</sup> Quartile), Q<sub>3</sub>= 3<sup>ème</sup> Quartile, MOY=moyenne, ET=Écart-type. (c) Norme de qualité de l'eau pour la consommation d'eau distribuée en milieu urbain GB/T 18920-2002 (Chine)

La comparaison de la qualité entre les cumuls millimétriques des trois sites est menée sur les cinq paramètres physico-chimiques communs (Tableau 5-2) et les cinq indicateurs nutriments supplémentaires à Tianjin (Tableau 5-4). Nous pouvons observer que, pour tous les paramètres physicochimiques (sauf le pH), les valeurs sur le deuxième mm sont toujours inférieures à celles du premier (Vincennes et Tianjin). Ainsi, statistiquement, dévier le premier mm d'eau permet de réduire concentration des matières en suspension et des substances dissous dans le stockage. Si ces tendances pour les paramètres physico-chimique sont nettes, il en va différemment pour les paramètres microbiologiques (Tableau 5-3 et Tableau 5-4).

Plus spécifiquement, pour chaque paramètre, nous pouvons comparer les valeurs des cumuls millimétriques consécutifs sur des différents sites d'étude et les comparer aux normes. Cela va être traité plus en détail dans les sections 1.2.1 et 1.2.2. Pour une observation plus aisée, l'étape suivante consiste à illustrer de manière graphique et caractériser la variabilité globale. En plus, des tests U de Mann-Whitney (appariés lorsque cela a un sens) ont été utilisés pour chaque paramètre pour évaluer les différences et le niveau de significativité des différences entre les 2 premiers millimètres de l'eau de pluie collectée sur les différents sites d'étude.

### **1.2.1 Qualité physico-chimique**

La comparaison entre les trois sites est menée sur cinq paramètres : pH, conductivité, turbidité, MES et COD. Les paramètres supplémentaires d'indicateurs de nutriments (N-NO<sub>2</sub>, N-NO<sub>3</sub>, N-NH<sub>4</sub><sup>+1</sup>, N<sub>tot</sub> et P<sub>tot</sub>.) n'ont été mesurés que sur le troisième site d'étude (Tianjin).

- **pH**

Les résultats statistiques en boîtes à moustaches de pH sur des trois sites sont présentés sur la Figure 5-2. La description des éléments de la boîte à moustache a été présentée au chapitre 4 (section 3.1).

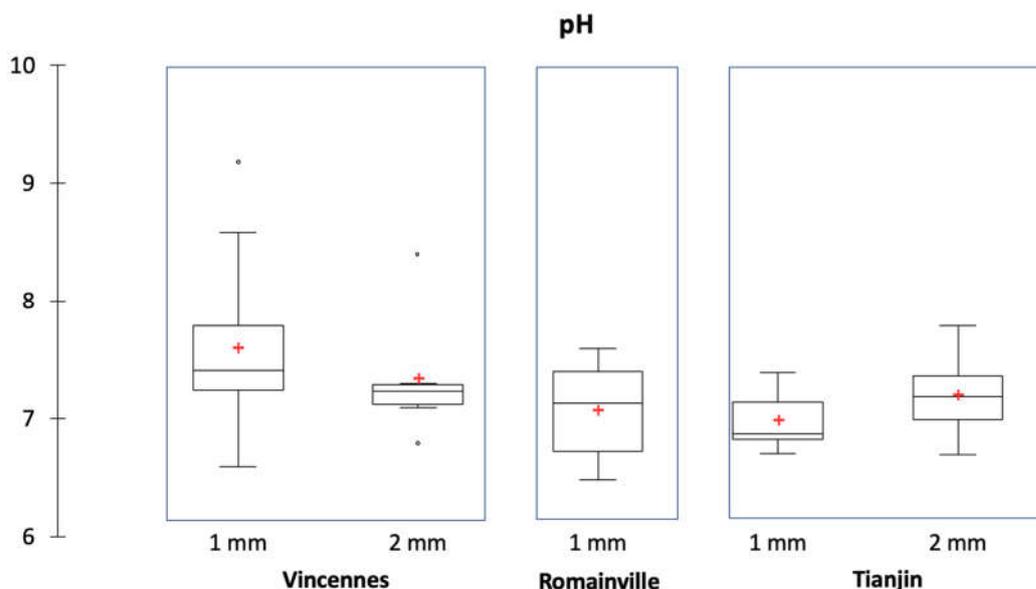


Figure 5-2. Valeurs de pH dans les eaux de pluie collectée du trois sites d'étude

Les résultats du test U de Mann-Whitney (les valeurs p et les niveaux de significativité) pour le pH sont représentés dans le Tableau 5-5. Lorsque la valeur p est supérieure à 0,05, il n'y a pas de différence statistique significative entre les deux échantillons. Lorsque la valeur p est inférieure à 0,05, il existe une différence statistique significative entre les deux échantillons et les niveaux de significativité sont : \*  $p < 0,05$  ; \*\*  $p < 0,01$  ; \*\*\*  $p < 0,001$  ; \*\*\*\*  $p < 0,0001$ .

Tableau 5-5. Résultat du test U de Mann-Whitney sur le pH pour les 1<sup>ers</sup> mm et 2<sup>ème</sup> mm de l'eau collectée

	Vincennes(1mm)	Vincennes(2mm)	Romainville(1mm)	Tianjin(1mm)
Vincennes (2 mm)	0,260 (non)			
Romainville(1mm)	0,023 (*)	0,431 (non)		
Tianjin (1 mm)	0,011 (*)	0,181 (non)	0,579 (non)	
Tianjin (2 mm)	0,205 (non)	0,929 (non)	0,625 (non)	0,234 (non)

Pour le pH, hormis pour le 1<sup>er</sup> mm de Vincennes et de Romainville d'une part, le 1<sup>er</sup> mm de Vincennes et de Tianjin d'autre part, les différences entre tous les autres cumuls millimétriques ne sont pas significatives. Sur les trois sites d'étude, hormis le 1<sup>er</sup> millimètre de l'eau de pluie cumulée du 31 mai 2015 à Vincennes où le pH médian est supérieur à 9, les valeurs du pH sont comprises entre 6 à 9 (i.e. dans les limites de valeurs indiquées dans les critères français et critères chinois). Cette valeur anormale de pH peut être causée par une correction du dispositif de collecte et l'ajout de ciment au raccordement du dispositif d'échantillonnage juste avant cet échantillonnage.

En comparant le pH du 1<sup>er</sup> millimètre de l'eau de pluie collectée sur les trois sites d'étude, nous observons que le pH médian de Romainville (7,1) est très proche de celui de Tianjin (6,9) alors que le pH de Vincennes est plus élevé (7,4). Cette valeur est sensiblement plus élevée que celle de l'eau de pluie seulement saturée en dioxyde de carbone (pH=5,6), et traduit vraisemblablement une interaction avec les matériaux de toiture sur lesquels l'eau à ruisselé.

- **Conductivité**

Les résultats statistiques en boîtes à moustaches de conductivité sur les trois sites sont présentés sur la Figure 5-3.

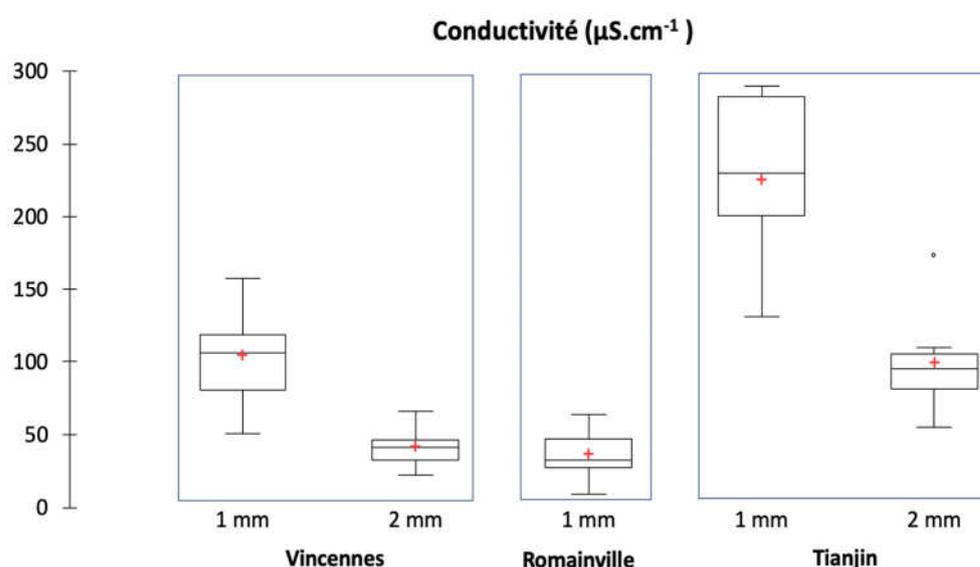


Figure 5-3. Valeurs de conductivité dans les eaux de pluie collectée des trois sites d'étude

Les résultats du test U de Mann-Whitney (les valeurs p et les niveaux de significativité) sont représentés dans le Tableau 5-6:

Tableau 5-6. Résultat du test U de Mann-Whitney sur la conductivité pour 1<sup>er</sup> mm et 2<sup>ème</sup> mm de l'eau collectée

	Vincennes(1mm)	Vincennes(2mm)	Romainville(1mm)	Tianjin(1mm)
Vincennes (2mm)	0,0003 (***)			
Romainville(1mm)	<0,0001 (****)	0,561 (non)		
Tianjin(1mm)	0,0001 (***)	0,0007 (***)	<0,0001 (****)	
Tianjin(2mm)	0,605 (non)	0,0013 (**)	<0,0001 (****)	0,0006 (***)

A travers les représentations graphiques et leur confirmation par les résultats du test U de Mann-Whitney, nous pouvons observer que la conductivité du deuxième millimètre de

Tianjin n'est pas différente de celle du premier millimètre de Vincennes, alors que celle du premier millimètre de Romainville n'est pas différente de celle du deuxième millimètre de Vincennes. Au contraire, les différences entre les deux cumuls millimétriques consécutifs à Vincennes et à Tianjin sont importantes ( $p < 0,001$ ). Le changement de qualité de l'eau au cours d'un événement pluvieux, peut être significatif.

La valeur limite pour l'eau potable distribuée indiquée dans l'arrêté du 11 janvier 2007 est entre 180 et 1000  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  (cet indicateur n'est pas mentionné dans le critère chinois). Toutes les données de conductivité sont inférieures que 1000  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  et celles obtenues sur les deux sites en Île-de-France sont inférieurs à 180  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ .

Pour les eaux de pluie collectées dans le 1<sup>er</sup> millimètre, la valeur médiane de Tianjin (230  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) est presque le double de celle de Vincennes (106  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) alors que la valeur médiane de Vincennes est le triple de celle de Romainville (33  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ). Cette différence peut être causée par l'environnement local et l'état de la toiture : à Tianjin, la pollution de l'air est plus importante, ce qui peut entraîner davantage de dépôts sur le toit. De plus, l'eau de ruissellement de toiture à Tianjin est de couleur rouge clair et le matériau de toiture est un bardeau d'asphalte coloré neuf (couleur bordeaux), la peinture peut également causer une augmentation de la conductivité.

En comparant les cumuls millimétriques consécutifs, on observe qu'à Vincennes, la valeur médiane de conductivité du 2<sup>ème</sup> millimètre (41  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) de l'eau de pluie est réduite de plus de la moitié par rapport au 1<sup>er</sup> millimètre (106  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ). De même pour Tianjin, la valeur médiane du 2<sup>ème</sup> millimètre (95  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) est également réduite de la moitié par rapport au 1<sup>er</sup> millimètre (230  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ). Cette observation corrobore, pour la conductivité, l'analyse de Martinson, B. et Thomas, T. (2009) : la charge de contamination est réduite de moitié par rapport au 1mm.

- **Turbidité**

Les données de turbidité représentées sous la forme de boîtes à moustaches sur les trois sites sont présentées sur la Figure 5-4.

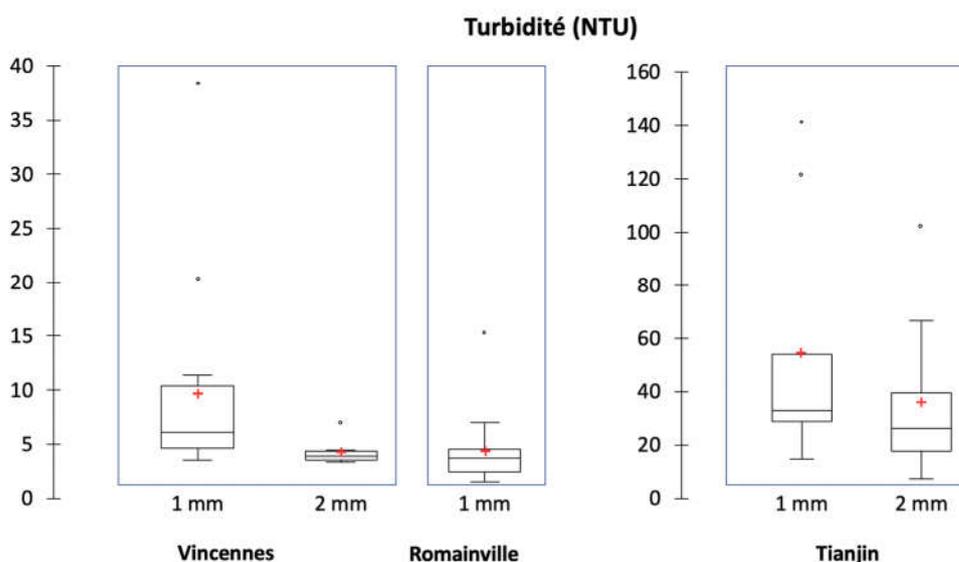


Figure 5-4. Valeurs de turbidité dans les eaux de pluie collectée des trois sites d'étude

Les résultats du test U de Mann-Whitney sont représentés dans le Tableau 5-7.

Tableau 5-7. Résultat du test U de Mann-Whitney sur la turbidité pour 1<sup>er</sup> mm et 2<sup>ème</sup> mm de l'eau collectée

	Vincennes(1mm)	Vincennes(2mm)	Romainville(1mm)	Tianjin(1mm)
Vincennes (2mm)	0,032 (*)			
Romainville(1mm)	0,0026 (**)	0,561 (non)		
Tianjin(1mm)	0,0001 (***)	0,0004 (***)	<0,0001 (****)	
Tianjin(2mm)	0,051 (non)	0,0007 (***)	<0,0001 (****)	0,165 (non)

Tant sur Vincennes que sur Tianjin on observe un resserrement des distributions entre le premier et le second cumul millimétrique. Au plan opérationnel, dévier le premier millimètre permet, de réduire la variabilité inter-événementielle de la turbidité. Concernant les cumuls millimétriques consécutifs, la différence n'est pas significative à Tianjin ( $p > 0,05$ ) et le niveau de significativité est faible à Vincennes ( $0,01 < p < 0,05$ ).

Hormis une valeur observée à Romainville, toutes les données obtenues aux deux sites en Île-de-France sont supérieures à 2 NTU (valeur de référence sur l'eau distribuée dans l'arrêté du 11 janvier 2007) et toutes les données obtenues à Tianjin sont supérieures à 5 NTU (valeur de référence dans la norme de qualité de l'eau pour la consommation d'eau distribuée en milieu urbain). Pour le premier millimètre, sur les trois sites, la valeur médiane de Tianjin (33,0 NTU) est environ 5 fois plus élevée que celle de Vincennes (6,1 NTU) et environ 8,9 fois plus élevée que celle de Romainville (3,7 NTU). Cela montre que les matières particulaires dans l'eau sont beaucoup plus nombreuses à Tianjin. On sait que les valeurs moyennes de PM 2,5 et le PM 10 à Tianjin sont 5,5 fois plus élevées que

celles de Paris. Cette grande différence de qualité de l'air peut entraîner des différences de la quantité de particules déposées sur le toit et de poussières dans l'atmosphère, ce qui peut contribuer également à cette différence considérable de qualité de l'eau de pluie collectée.

En comparant la qualité des cumuls millimétriques consécutives, la valeur médiane du 2<sup>ème</sup> mm de l'eau (3,9 NTU) est réduite de 36,1% par rapport au 1<sup>er</sup> mm (6,1 NTU), à Vincennes alors que la valeur médiane du 2<sup>ème</sup> millimètre (26,2 NTU) est réduite de 20,6 % par rapport au 1<sup>er</sup> millimètre (33,0 NTU) à Tianjin. Cela montre qu'en déviant le 1<sup>er</sup> mm d'eau, une proportion importante (plus du tiers) des matières particulaires peut être éliminée.

- **MES**

Les données de MES représentées sous la forme de boîtes à moustaches sur les trois sites sont présentées sur la Figure 5-5.

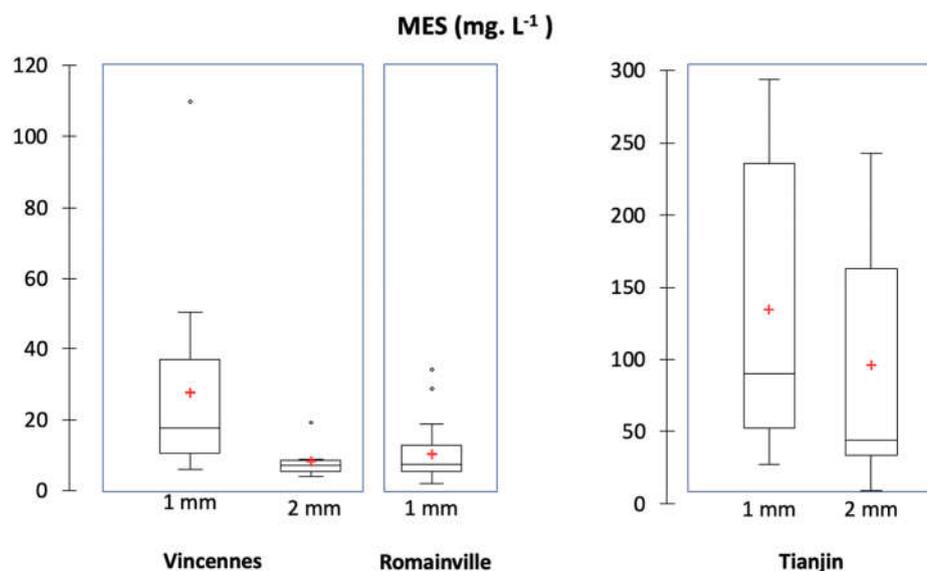


Figure 5-5. Valeurs de MES dans les eaux de pluie collectée du trois sites d'étude

Les résultats du test U de Mann-Whitney sont représentés dans le Tableau 5-8.

Tableau 5-8. Résultat du test U de Mann-Whitney sur les MES pour 1<sup>er</sup> mm et 2<sup>ème</sup> mm de l'eau collectée

	Vincennes(1mm)	Vincennes(2mm)	Romainville(1mm)	Tianjin(1mm)
Vincennes (2mm)	0,011 (*)			
Romainville(1mm)	0,006 (**)	0,827 (non)		
Tianjin(1mm)	0,0006 (***)	0,0004 (***)	<0,0001 (****)	
Tianjin(2mm)	0,067 (non)	0,0013(**)	0,0003 (***)	0,191 (non)

Le test U de Mann-Whitney permet de confirmer qu'il existe une amélioration significative de la teneur en MES entre le premier et le deuxième cumul millimétrique sur Vincennes, mais pas sur Tianjin. Ainsi, la valeur médiane du 2<sup>ème</sup> mm d'eau collectée (7,0 mg. L<sup>-1</sup>) est réduite de 60,2 % par rapport à celle du 1<sup>er</sup> mm (17,6mg. L<sup>-1</sup>) à Vincennes. La valeur médiane du 2<sup>ème</sup> mm (44,0 mg. L<sup>-1</sup>) a une réduction de 51,1% de à partir du 1<sup>er</sup> mm (90,0 mg. L<sup>-1</sup>).

Toutes les données mesurées à Tianjin sont extrêmement supérieures aux valeurs limites indiquées de la norme de qualité de l'eau pour la consommation d'eau distribuée en milieu urbain (5 à 10 mg. L<sup>-1</sup>). Pour ce paramètre, les valeurs sont largement au-dessus la limite de qualité à Tianjin. En Île-de-France, il n'y a pas de référence pour les MES. Si on compare les valeurs obtenues à Vincennes et à Romainville avec la norme chinoise, on peut observer que la valeur médiane du 2<sup>ème</sup> mm de Vincennes (7,0 mg. L<sup>-1</sup>) et celle du 1<sup>er</sup> mm de Romainville (7,5 mg. L<sup>-1</sup>) se situent dans cette gamme.

D'une manière générale, les valeurs de MES observées sont élevées. La concentration de MES est beaucoup plus élevée à Tianjin que sur les sites français. Pour le 1<sup>er</sup> millimètre des eaux de pluie collectées sur les trois sites, la valeur médiane de Tianjin (90,0 mg. L<sup>-1</sup>) est 5 fois plus élevée que celle de Vincennes (17,6 mg. L<sup>-1</sup>) et 12 fois plus élevée que celle de Romainville (7,5 mg. L<sup>-1</sup>). De même que pour la turbidité, cela pourrait être dû aux niveaux de pollution de l'air relativement élevés à Tianjin.

- **COD**

Les données de COD représentées sous la forme de boîtes à moustaches sur les trois sites sont présentées sur la Figure 5-6.

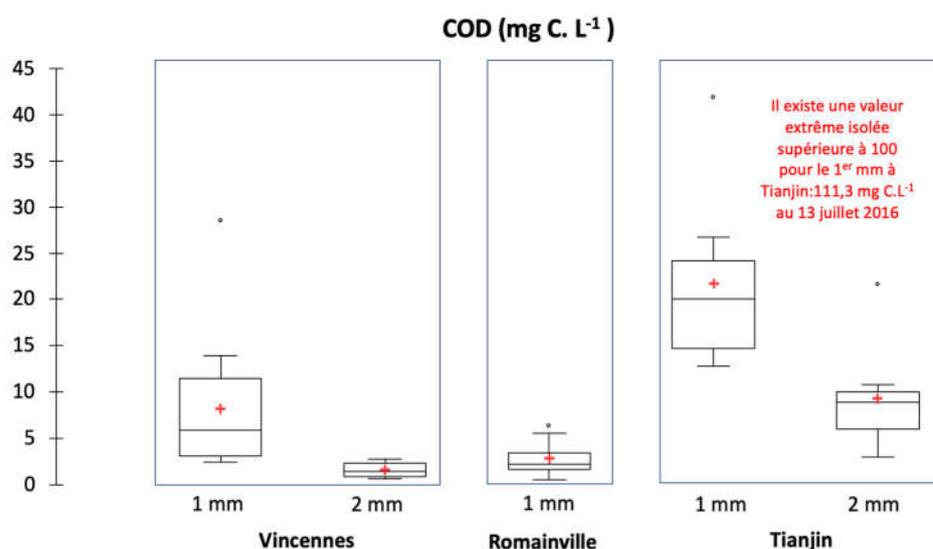


Figure 5-6. Valeurs de COD dans les eaux de pluie collectées des trois sites d'étude

Les résultats du test U de Mann-Whitney sont représentés dans le Tableau 5-9.

Tableau 5-9. Résultat du test U de Mann-Whitney sur le COD pour 1<sup>er</sup> mm et 2<sup>ème</sup> mm de l'eau collectée

	Vincennes(1mm)	Vincennes(2mm)	Romainville(1mm)	Tianjin(1mm)
Vincennes (2mm)	0,0002 (***)			
Romainville(1mm)	0,0008 (***)	0,128 (non)		
Tianjin(1mm)	0,0006 (***)	0,0007 (***)	<0,0001 (****)	
Tianjin(2mm)	0,364 (non)	0,0007 (***)	0,0003 (***)	0,0003 (***)

D'après le Tableau 5-9, comme pour d'autres paramètres physico-chimiques, les valeurs médianes de COD du deuxième millimètre de Tianjin sont très proches de celles du premier millimètre de Vincennes, alors que celles du premier millimètre de Romainville sont proches de celle du deuxième millimètre de Vincennes. Concernant les cumuls millimétriques consécutifs, la différence entre le 1<sup>er</sup> mm et le 2<sup>ème</sup> mm est importante et significative ( $p < 0,001$ ) comme pour la conductivité (Vincennes, Tianjin). Cela montre que, tant sur les substances dissoutes minérales (conductivité) qu'organiques (COD) une amélioration nette de la qualité de l'eau de pluie recueillie est obtenue en éliminant le 1<sup>er</sup> millimètre écoulé. Concernant les particules, on observe également une amélioration mais moins nette et significative.

Les concentrations en COD, sont plus élevées à Tianjin que sur les deux sites en Île-de-France. Pour le premier cumul millimétrique, la valeur médiane de Tianjin (20,0 mg. L<sup>-1</sup>)

est 3,4 fois plus élevée que celle de Vincennes (5,9 mg C. L<sup>-1</sup>) et environ 9,5 fois plus élevée que celle de Romainville (2,1 mg C. L<sup>-1</sup>). Cette différence peut être causée par l'environnement local et l'état et le type de toiture.

Aucune valeur de référence n'est mentionnée dans la norme chinoise. Si l'on compare toutes les données obtenues sur les trois sites avec la valeur limite dans l'arrêté français du 11 janvier 2007 ( $\leq 60$  mg. L<sup>-1</sup>), on peut observer que, hormis une valeur extrême isolée supérieure à 100 mg C.L<sup>-1</sup> pour le 1<sup>er</sup> mm à Tianjin (111,3 mg. L<sup>-1</sup> au 13 juillet 2016), toutes les données sont inférieures à 60 mg. L<sup>-1</sup>. Les teneurs en carbone matière organique dissoute dans les eaux récoltées restent modérées et inférieures à cette valeur de 60 mg. L<sup>-1</sup>.

Concernant les cumuls consécutifs, la valeur médiane correspondant au 2<sup>ème</sup> mm (1,4 mg. L<sup>-1</sup>) est réduite de 76,3% par rapport à celle du 1<sup>er</sup> mm (5,9 mg C. L<sup>-1</sup>) à Vincennes alors que celle du 2<sup>ème</sup> mm (8,9 mg. L<sup>-1</sup>) à Tianjin une réduction de 55,5% par rapport au 1<sup>er</sup> mm (20 mg. L<sup>-1</sup>).

- **Indicateurs nutriments**

Contrairement aux sites d'Île-de-France, le site d'étude à Tianjin est situé dans une banlieue industrielle polluée. Les indicateurs nutriments (Azote et Phosphore) n'ont été mesurés qu'à Tianjin afin de fournir une référence de pollution provenant de son environnement. La Figure 5-7 et la Figure 5-8 présentent les variabilités associées à ces indicateurs.

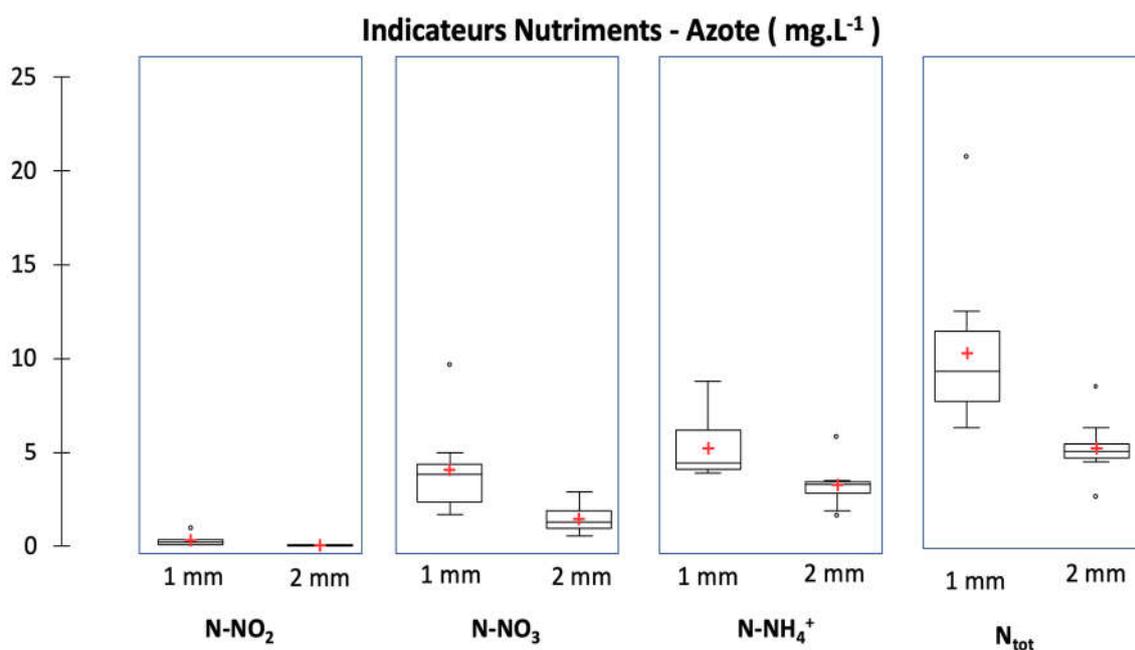


Figure 5-7. Valeurs des indicateurs Nutriments (Azote) dans les eaux de pluie collectée à Tianjin

$$(N_{\text{tot}} = N\text{-NH}_4^+ + N\text{-NO}_3 + N\text{-NO}_2 + N\text{-org})$$

### Indicateurs Nutriments – Phosphore total (mg.L<sup>-1</sup>)

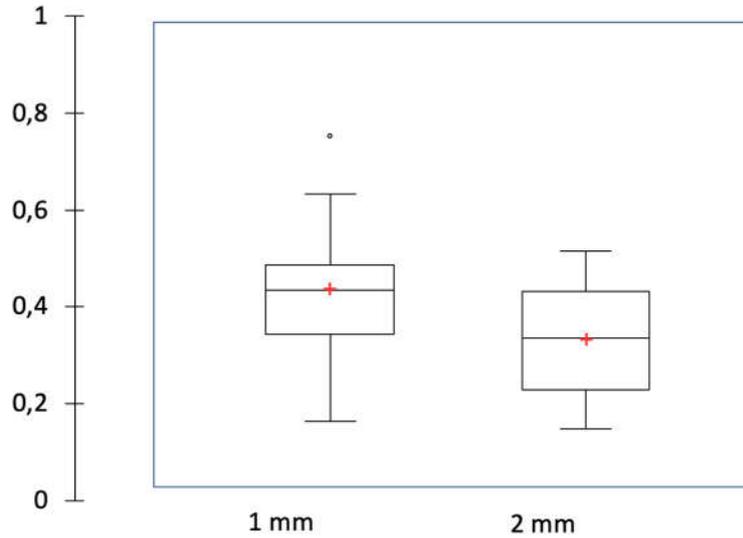


Figure 5-8. Valeurs de phosphore total dans les eaux de pluie collectée à Tianjin

Les résultats du test U de Mann-Whitney (les valeurs p) sont représentés dans le Tableau 5-10.

Tableau 5-10. Résultat du test U de Mann-Whitney sur les indicateurs nutriments

	<b>N-NO<sub>2</sub></b>	<b>N-NO<sub>3</sub></b>	<b>N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	<b>N<sub>tot</sub></b>	<b>P<sub>tot</sub></b>
	Tianjin(1mm)	Tianjin(1mm)	Tianjin(1mm)	Tianjin(1mm)	Tianjin(1mm)
Tianjin(2mm)	0,0002 (***)	0,003 (**)	0,003 (**)	0,002 (**)	0,272 (non)

A l'exception du phosphore total, pour les autres paramètres nutriments, les différences entre deux cumuls millimétriques consécutives sont significatives ( $p < 0,001$  pour N-NO<sub>2</sub>,  $p < 0,01$  pour N-NO<sub>3</sub>, N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> et N<sub>tot</sub>).

De plus, la valeur limite dans la norme de qualité de l'eau distribuée en milieu urbain est de 5 mg. L<sup>-1</sup> pour N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> et de 1 mg. L<sup>-1</sup> pour le phosphore total. Pour le N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, la valeur maximale (8,8 mg. L<sup>-1</sup>), la valeur de troisième quartile (6,2 mg. L<sup>-1</sup>) et la valeur moyenne (5,2 mg. L<sup>-1</sup>) du 1<sup>er</sup> mm de l'eau collectée sont supérieures à la valeur limite alors que la plupart des valeurs du 2<sup>ème</sup> mm sont inférieures à cette limite. Sur le site de Tianjin avec des niveaux de pollution relativement élevés, éliminer le 1<sup>er</sup> mm de l'eau collectée dont la teneur en azote ammoniacal permet d'être conforme à la norme de l'eau distribuée.

En conclusion, concernant les paramètres physico-chimiques sur les trois sites d'étude, on constate que :

- 1) En raison de la grande différence entre l'environnement extérieur et l'état du toit des trois sites, les qualités de l'eau sont assez différentes. Les paramètres mesurés à Tianjin sont supérieurs à ceux mesurés en Île-de-France, ce qui est cohérent avec le niveau de pollution local dans ces mégapoles. En comparant avec les valeurs limites dans les critères de qualité de l'eau, les valeurs médianes sur le 2<sup>ème</sup> mm des paramètres correspondant aux matières particulaires (turbidité et MES) dépassent les valeurs limites de qualité, mais concernant les substances dissoutes (conductivité, COD, N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> et P<sub>tot</sub>), toutes les valeurs médianes de 1<sup>er</sup> mm restent inférieures aux valeurs limites.
- 2) En comparant les cumuls millimétriques consécutifs, nous constatons que, pour Vincennes, tous les paramètres physico-chimiques varient sensiblement entre le premier et le deuxième millimètre, tandis que pour Tianjin, la différence en matières particulaires et en P<sub>tot</sub> entre les deux millimètres est faible, mais la différence en polluants dissous est très grande. En comparant les valeurs médianes de chaque paramètre, nous observons que tous les contaminants physico-chimiques sont diminués en éliminant le 1<sup>er</sup> mm de l'eau. Pour étudier plus précisément, l'efficacité de l'élimination du premier millimètre d'eau collectée, le Tableau 5-11 résume les taux de réduction des valeurs médianes de paramètres physico-chimiques du deuxième millimètre de l'eau par rapport au premier millimètre pour Vincennes et Tianjin (Romainville ne recueille qu'un millimètre).

Tableau 5-11. Pourcentage de réduction de la concentration des polluants en enlevant le 1<sup>er</sup> mm d'eau

	<b>Cond.</b>	<b>Turb.</b>	<b>MES</b>	<b>COD</b>	<b>N-NO<sub>2</sub></b>	<b>N-NO<sub>3</sub></b>	<b>N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	<b>N<sub>tot</sub></b>	<b>P<sub>tot</sub></b>
Vincennes	60,6%	55,7%	69,4%	80,2%					
Tianjin	56,2%	33,6%	36,2%	57,1%	84,1%	65,0%	44,2%	49,5%	25,0%

On observe une réduction importante pour toutes les valeurs des paramètres physico-chimiques. Pour Vincennes, tous les taux d'élimination sont supérieurs à 55%. Pour Tianjin, hormis les taux un peu inférieurs de réduction de la turbidité, des MES et du P<sub>tot</sub> (33,6%, 36,2% et 25,0% respectivement), les autres paramètres ont des taux d'élimination qui sont approximativement égaux ou supérieurs à 50%. Par conséquent, pour les polluants physico-chimiques, qu'ils soient dissous ou particulaires, nous pouvons améliorer la qualité de l'eau en éliminant le premier millimètre de l'eau. Chaque millimètre d'eau de pluie éliminée peut augmenter la qualité de l'eau de 50% (ou plus).

## 1.2.2 Qualité microbiologique

Afin de caractériser la qualité microbiologique, deux types d'indicateurs microbiologiques sont souvent utilisés. La section suivante (2) fournit une description de la contamination microbiologique globale (flore totale à 36°C et à 22°C), tandis que celle d'après (2) présentera la contamination fécale (*E. coli* et Entérocoques dans le cas français et coliformes fécaux et coliformes totaux dans le cas chinois).

- **Contamination microbiologique globale**

Pour représenter les contaminations microbiologiques globales, nous utilisons la flore totale à 36°C et à 22°C.

### a) Flore totale à 36°C

La Figure 5-9 présente les concentrations en flore totale à 36°C obtenues sur les sites d'étude. Elle est le seul paramètre commun microbiologique sur les deux pays qui donne une indication sur les contaminations microbiologiques globales.

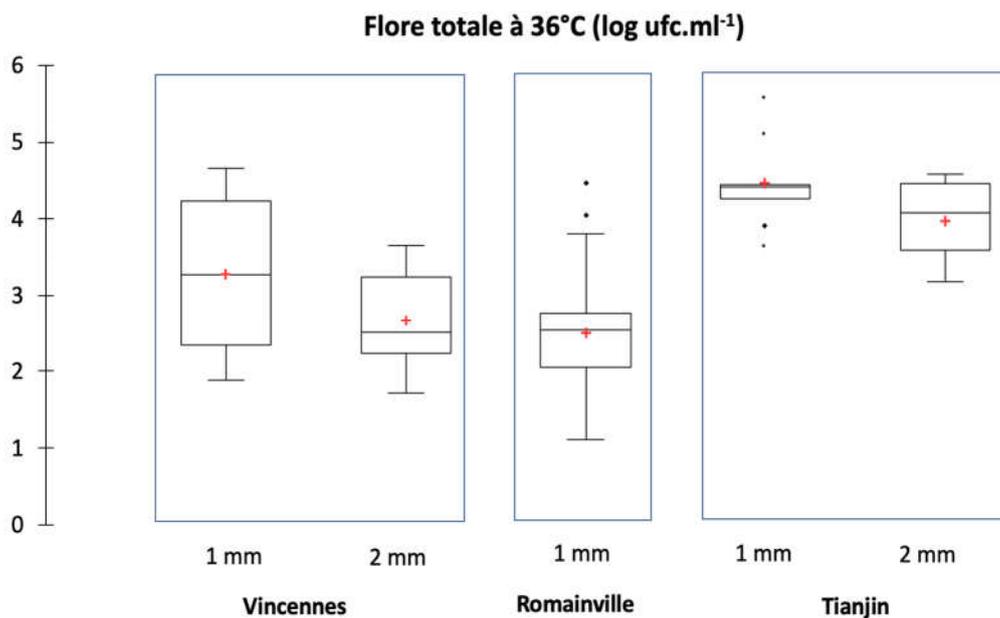


Figure 5-9. Concentration en flore totale à 36°C sur les trois sites d'étude

(Boîtes à moustaches avec échelle logarithmique)

Les résultats du test U de Mann-Whitney qui contient les valeurs p et les niveaux de significativité sont représentés dans le Tableau 5-12:

Tableau 5-12. Résultat du test U de Mann-Whitney sur la flore totale à 36°C pour 1<sup>er</sup> mm et 2<sup>ème</sup> mm de l'eau collectée

	Vincennes(1mm)	Vincennes(2mm)	Romainville(1mm)	Tianjin(1mm)
Vincennes (2mm)	0,764 (non)			
Romainville(1mm)	0,674 (non)	0,453 (non)		
Tianjin(1mm)	0,0037 (**)	0,0105 (*)	0,0030 (**)	
Tianjin(2mm)	0,061 (non)	0,048 (*)	0,0403 (*)	0,802 (non)

En observant les résultats du test U de Mann-Whitney sur le 1<sup>er</sup> mm des trois sites d'étude, nous constatons que, pour la flore totale à 36°C, la différence entre les deux sites en Île-de-France n'est pas significative ( $p > 0,05$ ) alors que les différences statistiques entre Vincennes et Tianjin et entre Romainville et Tianjin sont significatives ( $p < 0,01$ ). La médiane de Tianjin (4,5 log ufc.ml<sup>-1</sup>) est de 1,2 log supérieure à celle de Vincennes (3,3 log ufc.ml<sup>-1</sup>) et de 1,9 log supérieure à celle de Romainville (2,6 log ufc.ml<sup>-1</sup>), alors que la différence entre les deux sites en Île-de-France est de 0,7 log. Donc on peut confirmer que la différence entre les deux pays est plus importante qu'entre les deux sites en Île-de-France. En plus de l'impact de différences de niveaux de pollution entre les deux pays, il faut noter que les échantillons prélevés à Tianjin l'étaient principalement en été, tandis que ceux des autres villes étaient distribués tout au long de l'année. L'activité biologique est plus intense en été, ce qui peut provoquer cette différence de concentration dans l'eau de pluie collectée.

En comparant les cumuls millimétriques consécutifs, on observe qu'à Tianjin, la médiane du 2<sup>ème</sup> mm (4,1 log ufc.ml<sup>-1</sup>) est de 0,9 log plus basse que celle du 1<sup>er</sup> mm (5,0 log ufc.ml<sup>-1</sup>). A Vincennes, la médiane de 2<sup>ème</sup> mm (2,7 log ufc.ml<sup>-1</sup>) est réduite de 0,6 log par rapport au 1<sup>er</sup> mm (3,3 log ufc.ml<sup>-1</sup>). Les résultats du test U de Manne-Whitney montre que les différences ne sont pas significatives entre les cumuls millimétriques consécutifs qu'il s'agisse de Vincennes ou de Tianjin ( $p > 0,05$ ). La réduction de la variabilité inter-événementielle ne peut pas être réalisée en déviant le premier millimètre de l'eau de ruissellement.

### **b) Flore totale à 22°C**

La Figure 5-10 présente les concentrations en flore totale à 22°C.

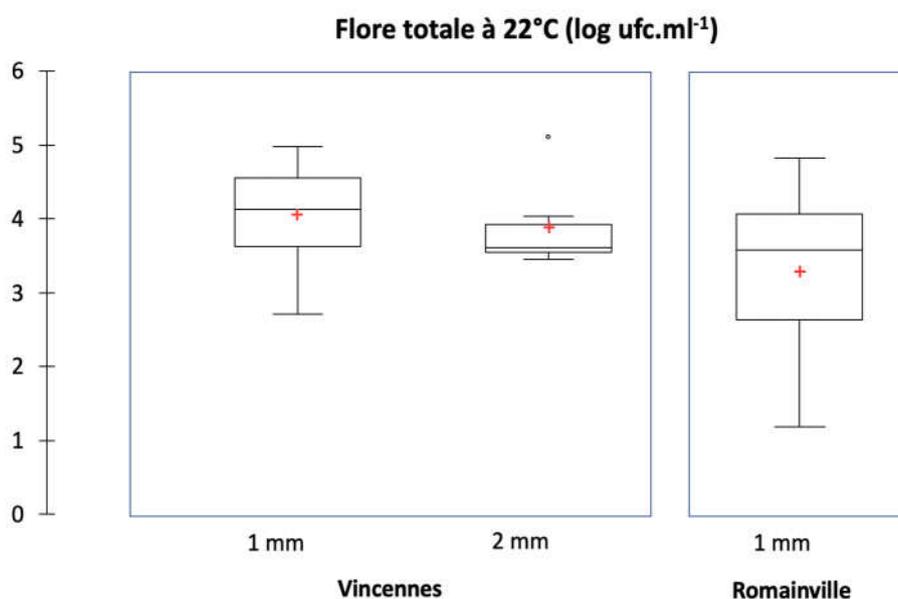


Figure 5-10. Concentration en flore totale à 22°C obtenues sur les deux sites franciliens  
(Boîtes à moustaches avec échelle logarithmique)

Les résultats du test U de Mann-Whitney sont représentés dans le Tableau 5-13:

Tableau 5-13. Résultat du test U de Mann-Whitney sur la flore totale à 22°C pour 1<sup>er</sup> mm et 2<sup>ème</sup> mm de l'eau collectée

	Vincennes(1mm)	Vincennes(2mm)
Vincennes (2mm)	0,509 (non)	
Romainville(1mm)	0,246 (non)	0,136 (non)

Concernant la flore totale à 22 °C, pour laquelle il n'y a pas de données sur Tianjin, on observe sur le premier cumul millimétrique collecté, à Vincennes, la médiane (4,1 log ufc.ml<sup>-1</sup>) est de 0,5 log supérieure à celle de Romainville (3,6 log ufc.ml<sup>-1</sup>) et les différences entre cumuls millimétriques consécutifs sont de 0,5 log entre le 1<sup>er</sup> mm et le 2<sup>ème</sup> mm (3,6 log ufc.ml<sup>-1</sup>). A travers les résultats du test U de Mann-Whitney, les différences entre les deux sites d'étude à l'Île-de France et entre les deux cumuls millimétriques consécutives à Vincennes ne sont pas très importantes ( $p > 0,05$ ). Cela montre que nous ne pouvons pas forcément améliorer la qualité microbiologique de l'eau en retirant le 1<sup>er</sup> mm d'eau.

De plus, pour un même site d'étude, la flore totale à 22°C est plus élevée que celle à 36°C. Cela peut être dû au fait que, sur les sites expérimentaux d'Île-de-France, la température n'est jamais très élevée au cours de l'année (même en juillet et août, la température moyenne mensuelle est inférieure à 25°C). Cette température extérieure est donc plus propice à la croissance de la flore totale à 22°C.

- **Contamination fécale**

Pour représenter les contaminations fécales, on utilise l'*E. coli* et les entérocoques comme indicateurs en France et les coliformes fécaux et coliformes totaux en Chine.

**a) *E. coli* et entérocoques**

La Figure 5-11 présente les concentrations en *E. coli* et entérocoques obtenues au cours des campagnes d'analyses sur les deux sites.

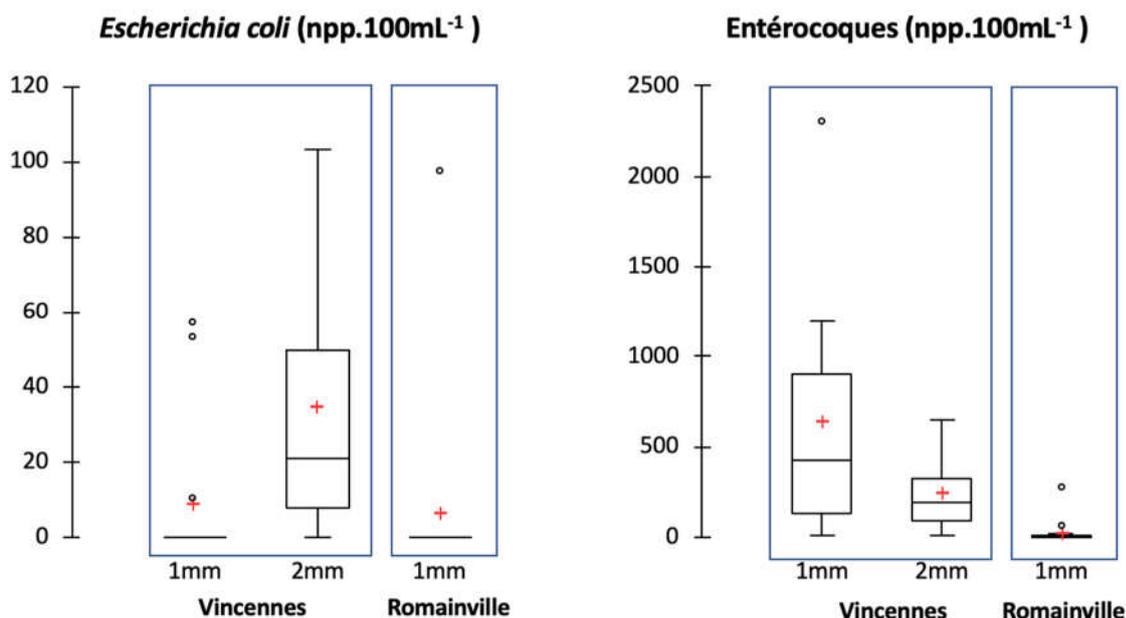


Figure 5-11. Concentrations en *Escherichia coli* et entérocoques obtenues sur Vincennes et Romainville

Les résultats du test U de Mann-Whitney (les valeurs p et les niveaux de significativité) sont représentés dans le Tableau 5-14 :

Tableau 5-14. Résultat du test U de Mann-Whitney sur *E. coli* et entérocoques pour 1<sup>er</sup> mm et 2<sup>ème</sup> mm de l'eau collectée en l'Île-de-France

<b><i>E. coli</i></b>		
	Vincennes(1mm)	Vincennes(2mm)
Vincennes (2mm)	0,0220 (*)	
Romainville(1mm)	0,660 (non)	0,0033 (**)
<b>Entérocoques</b>		
	Vincennes(1mm)	Vincennes(2mm)
Vincennes (2mm)	0,085 (non)	
Romainville(1mm)	<0,0001 (****)	0,0041(**)

Les résultats du test U de Mann-Whitney montre que pour *E. coli*, la différence du 1<sup>er</sup> mm des eaux de pluie collectées entre Vincennes et Romainville n'est pas significative ( $p > 0,05$ ). C'est peut-être parce que les valeurs mesurées sur les deux sites d'étude sont faibles. 54% des échantillons à Vincennes et 74% des échantillons à Romainville sont en deçà du seuil de détection (on note 0 dans ce cas). La variation de la médiane des collectes oscille entre 0 et 103 npp.100mL<sup>-1</sup>. Toutes les valeurs sont inférieures à la valeur limite (250 npp/100mL<sup>-1</sup>) indiquée dans l'Arrêté du 2 août 2010 relatif à la réutilisation de l'eau usée traitée. Sur les deux cumuls millimétriques consécutifs sur Vincennes, la valeur correspondant au 2<sup>ème</sup> mm de l'eau collectée est plus grande que celle au 1<sup>er</sup> mm.

Concernant les entérocoques, ils sont plus détectés que le *E. coli* parce que les entérocoques ont une plus grande capacité à survivre dans les eaux que le *E. coli*. La différence entre Vincennes et Romainville est très significative ( $p < 0,0001$ ) alors que la différence entre les deux cumuls millimétriques consécutifs sur Vincennes n'est pas importante.

Enfin, comme la flore totale, pour les deux types de contamination fécale, nous ne pouvons pas les réduire en relevant 1<sup>er</sup> mm de l'eau de ruissellement.

## b) Coliformes fécaux et coliformes totaux

A Tianjin, les coliformes fécaux et coliformes totaux sont utilisés pour représenter la contamination fécale. La Figure 5-12 présente leurs concentrations en boîte à moustaches. Comme la contamination microbiologique globale, les données sont sous forme d'échelle logarithmique.

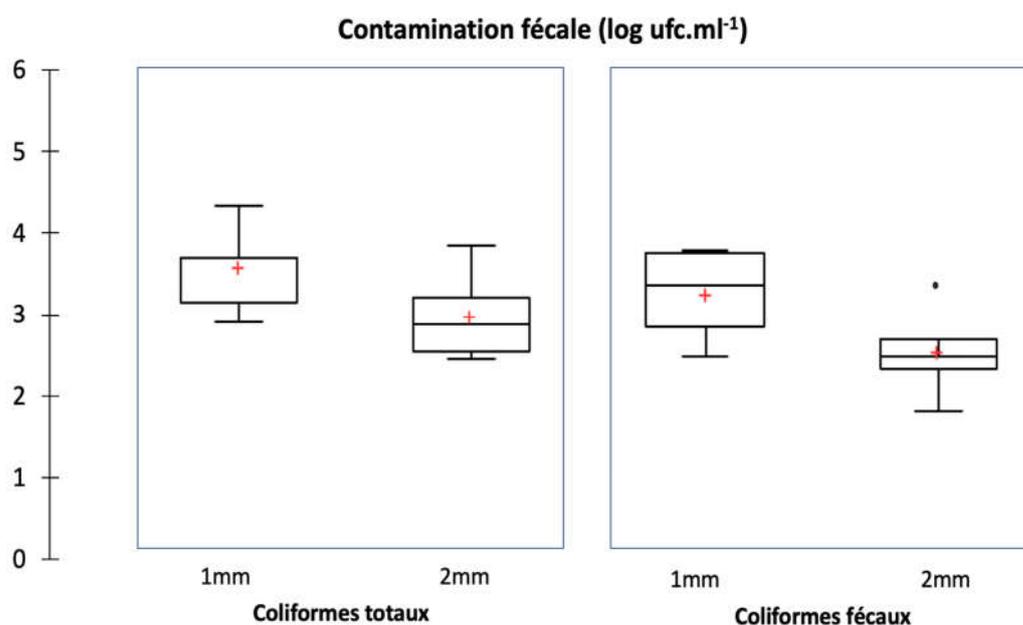


Figure 5-12. Concentrations en coliformes fécaux et coliformes totaux obtenus sur Tianjin

(Boîtes à moustaches avec échelle logarithmique)

Les résultats du test U de Mann-Whitney (les valeurs p et les niveaux de significativité) sont représentés dans le Tableau 5-15 :

Tableau 5-15. Résultat du test U de Mann-Whitney sur coliformes totaux et coliformes fécaux pour 1<sup>er</sup> mm et 2<sup>ème</sup> mm de l'eau collectée à Tianjin

Coliformes totaux		Coliformes fécaux	
	1mm		1mm
2mm	0,368 (non)	2mm	0,528 (non)

Même si les paramètres de la contamination fécale diffèrent entre les sites français et chinois, les résultats du test U de Mann-Whitney montrent que, que ce soit à Tianjin ou à Vincennes, les différences entre les deux cumuls millimétriques consécutives ne sont pas significatives ( $p > 0,05$ ). La médiane du deuxième millimètre de l'eau est réduite de 0,9 log par rapport au premier millimètre pour les coliformes totaux et aussi 0,9 log pour les coliformes fécaux. En comparant avec la valeur limite indiquée dans la norme de la qualité de l'eau pour la consommation d'eau distribuée en milieu urbain GB/T 18920-2002 ( $< 3$  log ufc. ml<sup>-1</sup>), la médiane du 1<sup>er</sup> mm (3,8 log ufc. ml<sup>-1</sup>) est plus grande que cette valeur limite alors la médiane du 2<sup>ème</sup> mm (2,9 log ufc. ml<sup>-1</sup>) est moins. Pour les eaux de ruissellement de toiture, une contamination importante est observée, en comparaison des valeurs mentionnées dans les autres études (1,7-2,0 log ufc. ml<sup>-1</sup> dans l'étude de May et Prado (2006) ; 0-2,7 dans l'étude de Sazakli et al. (2007) ; 0-2,6 log ufc. ml<sup>-1</sup> dans l'étude de Despins et al. (2009)).

En conclusion, nous constatons que, à l'exception d'*E. coli*, les différences entre les deux cumuls millimétriques consécutifs ne sont pas significatives ( $p > 0,05$  pour tous les autres paramètres microbiologiques). En plus, pour *E. coli*, la valeur médiane du deuxième millimètre est supérieure à celle du premier millimètre. Tout cela indique que d'un point de vue opérationnel, nous ne pouvons pas optimiser la qualité de l'eau en retirant le 1<sup>er</sup> mm de l'eau pour des paramètres microbiologiques.

## 2. Détermination des paramètres-clés pour l'étude de l'évolution de la qualité

La partie précédente permet une compréhension globale de la qualité de l'eau au travers de 9 paramètres en France et de 13 paramètres en Chine. Dans une double optique scientifique et opérationnelle, ces nombres sont trop élevés pour être exploités de manière efficace. Aussi, nous devons chercher à réduire le nombre de paramètres, tout en

veillant à intégrer le maximum de l'information contenue dans l'échantillon, et dans la mesure du possible, retenir des paramètres faciles à mesure du point de vue opérationnel.

En d'autres termes, les paramètres qui fournissent des informations redondantes pourront être éliminés de manière à avoir une approche parcimonieuse qui permette d'avoir le maximum d'information pour un suivi le plus allégé possible.

Ainsi, cette seconde partie de chapitre consiste à opérer une réduction des paramètres répondant à une double contrainte de représentativité et faisabilité opérationnelle.

Dans cette étude, la réduction des paramètres est réalisée par l'analyse en composantes principales (ACP) et à l'aide du logiciel de XLSTAT (la méthode ACP est présentée dans le chapitre 4 - section 3.3). Cette méthode d'analyse permet d'exprimer un grand nombre de données par un ensemble de quelques composantes indépendantes qui deviennent les composantes principales. Elle permet de réduire le nombre de variables descriptives (les paramètres dans cette étude) et de rendre l'information moins redondante. Dans notre étude, nous utilisons l'ACP pour réduire les neuf (cas français) ou treize (cas chinois) variables décrivant la qualité de l'eau en deux ou trois composantes non liées, tout en conservant un maximum d'informations du jeu de données d'origine.

Les étapes principales de ce processus sont les suivantes :

1) Prétraitement des données brutes.

Pour la construction de la matrice de données, tous les paramètres analysés de toutes les fractions des collectes sont retenus. Sont toutefois écartés les prélèvements pour lesquels certains résultats étaient manquants. Dans notre cas, 10 fractions provenant de deux événements<sup>6</sup> sur Tianjin ont ainsi été écartées.

2) Réalisation de l'ACP et choix des composantes principales à retenir

Après le prétraitement des données, nous effectuons l'ACP en utilisant le logiciel XLSTAT. Les composantes principales sont obtenues par diagonalisation de la matrice de covariance qui en extrait les vecteurs propres et sont triées par ordre décroissant de proportion de la variance représentée. Cela été réalisé en prenant des variables centrées réduites. Le nombre de composantes principales à conserver est estimé par l'utilisateur en fonction de du cumul de variance des composantes principales successives.

3) Interprétation de la signification des composantes principales et représentation des paramètres analysés.

L'ACP fournit une visualisation des variables par un graphique du cercle de corrélation. Dans notre étude, il correspond à une projection des paramètres

---

<sup>6</sup> Il s'agit de l'évènement du 12/09/2016 dans son intégralité (9 fractions), pour lequel les valeurs sont aberrantes, et de la dernière fraction de l'évènement du 27/10/2016, pour laquelle on ne dispose pas de valeurs sur les paramètres d'azote et de phosphore.

analysés sur un plan à deux composantes principales. La représentation des paramètres se fait sur ce cercle de rayon 1 en utilisant comme coordonnées les coefficients de corrélation (compris entre -1 et 1) avec les composantes principales. La qualité de représentation des paramètres s'évalue visuellement à partir de la distance au bord du cercle. Il est d'autant mieux représenté par les axes qu'il est proche du bord du cercle. Afin de décrire plus précisément la distance, il est aussi nécessaire de se référer à la matrice de corrélation (matrice de coordonnées) pour interpréter les résultats.

- 4) Détermination des paramètres représentatifs pour l'étude de l'évolution de la qualité --- réduction des paramètres.

Après la détermination des composantes principales, il est nécessaire de revenir aux paramètres mesurables dans un objectif opérationnel et d'analyse fine des données. Dans cet objectif nous recherchons les paramètres contribuant de manière prépondérante aux composantes principales retenues.

À travers les étapes d'analyse ci-dessus, nous pouvons déterminer les paramètres représentatifs. L'objectif est que la perte d'information liée à l'élimination de certains paramètres soit la plus faible possible et que les paramètres subsistants soient suffisants pour caractériser la qualité de l'eau de ruissellement de toiture. Ce sont ces paramètres qui seront utilisés ultérieurement pour étudier les influences des facteurs pertinents sur la qualité (saisonnalité et l'ADD dans ce chapitre), mais également la manière dont la qualité de l'eau évolue dans le chapitre suivant.

## **2.1 Vérification et réduction de paramètre sur trois sites d'étude**

Les paramètres de qualité de l'eau que nous avons analysés dans les deux pays ne sont pas exactement semblables et les qualités de l'eau collectée à chaque endroit sont également très différentes. Donc, l'étude de paramètres représentatifs est réalisée séparément sur chaque site dans cette section.

### **2.1.1 ACP sur les données collectées à Tianjin**

Nous avons d'abord étudié les échantillons de Tianjin car le nombre de paramètres mesurés à Tianjin est le plus élevé et les concentrations observées les plus importantes parmi les trois sites expérimentaux, donc les plus à même de mettre en évidence des résultats nets dans l'ACP. En observant les données brutes, nous constatons que les données de l'événement du 12/09/2016 montrent un comportement surprenant, en particulier pour les Matières en Suspension, particulièrement élevées, alors que la turbidité reste faible. Une représentation graphique MES en fonction de la Turbidité (Figure 5-13) montre que cet événement n'a pas un comportement comparable aux autres. Contrairement à Vincennes et Romainville où toutes les analyses ont été réalisées par nos soins, certains événements à Tianjin ont été confiés au personnel technique du TAES (l'événement du 12/09/2016, du 22/10/2016 et 27/10/2016). Tout laisse penser

que sur cet événement du 12/09/2016, des erreurs d'analyses sont à craindre, et dans la mise en œuvre de l'ACP, nous enlevons les données de cet événement. La matrice analysée comprend 56 colonnes représentant les différentes fractions des 8 événements de collecte à Tianjin et 13 lignes correspondant aux paramètres analysés.

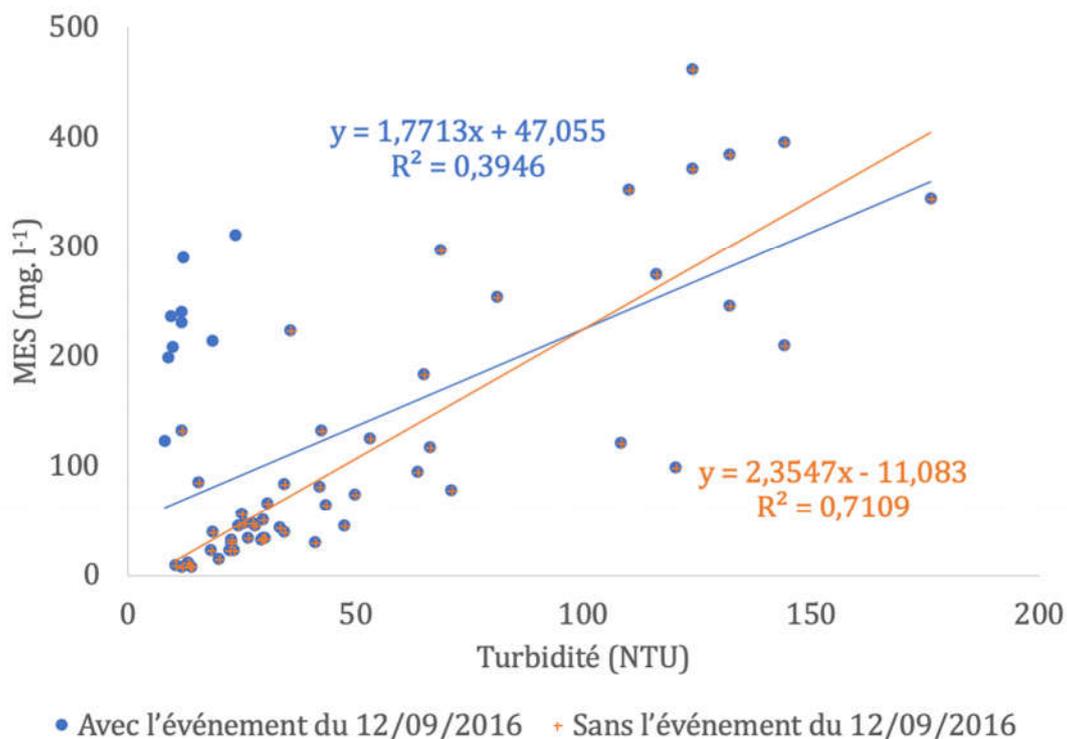


Figure 5-13. Représentation graphique des MES en fonction de la Turbidité

Le Tableau 5-16 ci-dessous présente les résultats de l'ACP de la qualité de l'eau de toiture ruisselée à Tianjin qui contient les proportions de variance des 13 composantes principales, les proportions cumulées, la matrice de corrélation (appelée aussi la matrice de coordonnées) et les contributions de chaque paramètre aux composantes principales (les chiffres entre parenthèse dans ce tableau).

Il est à noter que la matrice de coordonnées est établie par des coefficients de corrélation entre chaque paramètre et chaque composante principale. Pour le paramètre, plus la valeur absolue de la coordonnée est grande, plus le paramètre est corrélé avec la composante principale correspondante. La valeur la plus grande de chacun paramètre est indiquée en gras dans le Tableau 5-16.

Tableau 5-16. Résultats d'ACP sur la proportion, la matrice de corrélation et les contributions des paramètres issue de qualité l'eau ruisselée de toiture à Tianjin

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10	PC11	PC12	PC13
Proportion (%)	47,8	22,85	16,13	5,22	2,83	1,8	1,49	0,91	0,61	0,24	0,06	0,04	0,02
Proportion cumulée	47,8	70,65	86,78	92	94,83	96,63	98,13	99,03	99,64	99,88	99,94	99,98	100
pH	<b>-0,527</b>	-0,248	0,513	0,541	0,306	0,078	0,046	0,024	-0,05	-0,009	-0,003	-0,003	0
	<b>5,00%</b>	0,76%	17,84%	43,20%	25,44%	2,60%	1,08%	0,48%	3,12%	0,23%	0,10%	0,14%	0,01%
Conductivité	<b>0,952</b>	0,069	0,057	0,241	-0,092	-0,055	0,035	-0,07	0,038	0,071	-0,051	0,025	0,012
	<b>14,25%</b>	0,08%	0,72%	8,58%	2,30%	1,30%	0,61%	4,13%	1,80%	16,27%	31,94%	12,20%	5,81%
Turbidité	0,079	0,305	<b>0,899</b>	-0,144	0,073	-0,16	-0,083	-0,115	0,141	-0,038	0,003	-0,003	-0,003
	0,28%	15,63%	<b>23,47%</b>	3,08%	1,46%	10,91%	3,56%	11,10%	25,08%	4,74%	0,14%	0,18%	0,36%
MES	0,004	0,271	<b>0,879</b>	-0,211	-0,222	0,008	0,189	0,128	-0,084	0,018	-0,003	0	0,001
	0,05%	14,48%	<b>23,12%</b>	6,57%	13,39%	0,03%	18,34%	13,88%	8,95%	1,04%	0,09%	0,00%	0,07%
COD	<b>0,978</b>	-0,046	0,026	0,121	-0,011	-0,077	0,027	-0,087	-0,039	0,089	0,053	-0,019	-0,006
	<b>14,39%</b>	0,80%	1,40%	2,15%	0,03%	2,52%	0,37%	6,39%	1,95%	25,60%	35,82%	6,92%	1,65%
N-NO <sub>2</sub>	<b>0,884</b>	0,165	-0,046	0,313	-0,175	0,115	0,042	0,144	0,152	-0,043	0,017	-0,005	-0,005
	<b>12,79%</b>	0,01%	0,12%	14,42%	8,30%	5,60%	0,91%	17,57%	29,13%	6,04%	3,46%	0,53%	1,12%
N-NO <sub>3</sub>	<b>0,947</b>	0,222	0,014	0,066	-0,093	0,058	0,026	-0,128	-0,104	-0,083	-0,027	-0,029	-0,01
	<b>14,94%</b>	0,07%	0,02%	0,65%	2,34%	1,41%	0,36%	13,95%	13,65%	22,21%	9,41%	17,40%	3,59%
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	<b>0,909</b>	0,043	-0,104	-0,116	0,25	-0,201	-0,086	0,19	-0,02	0,012	-0,023	-0,018	-0,006
	<b>12,87%</b>	0,71%	0,03%	1,98%	16,93%	17,21%	3,81%	30,43%	0,50%	0,49%	6,88%	6,66%	1,51%
N <sub>tot</sub>	<b>0,981</b>	0,099	0,035	-0,013	0,074	-0,047	-0,054	0,014	-0,089	-0,071	0,03	0,043	0,013
	<b>15,28%</b>	0,06%	0,34%	0,03%	1,48%	0,93%	1,51%	0,17%	9,98%	16,23%	11,22%	36,61%	6,16%
P <sub>tot</sub>	<b>0,759</b>	-0,374	0,018	-0,355	0,219	0,326	0,024	-0,022	0,043	0,022	-0,004	0,001	0,002
	<b>7,32%</b>	4,73%	6,03%	18,59%	13,00%	45,29%	0,30%	0,39%	2,37%	1,61%	0,24%	0,01%	0,11%
Flore totale à 36°C	0,063	<b>0,921</b>	0,331	0,043	0,011	0,106	-0,15	0,02	-0,016	0,018	0,005	-0,022	0,033
	0,81%	<b>24,50%</b>	3,56%	0,27%	0,03%	4,83%	11,61%	0,33%	0,32%	1,08%	0,33%	10,17%	42,15%
Coliformes totaux	0,048	<b>0,912</b>	0,348	0,036	0,007	0,124	-0,155	0,009	-0,034	0,036	-0,004	0,021	-0,031
	0,69%	<b>24,75%</b>	3,02%	0,19%	0,01%	6,51%	12,38%	0,08%	1,48%	4,31%	0,18%	8,92%	37,46%
Coliformes fécaux	0,13	<b>0,91</b>	-0,066	-0,045	0,237	-0,045	0,296	-0,036	0,036	-0,007	0,004	0,004	0

---

1,32%   **13,41%**   20,33%   0,30%   15,28%   0,86%   45,15%   1,10%   1,65%   0,14%   0,18%   0,27%   0,00%

Nous pouvons observer que, parmi les 13 composantes principales, la première (PC1) explique 47,80% de la variance totale alors que la deuxième (PC2) explique 22,85% et la troisième (PC3) explique 16,13%. Les trois premières composantes expliquent 86,78% de la variance totale, ce qui est un résultat très satisfaisant. Pour Tianjin, les 3 premières composantes sont conservées. De cette manière, le passage de 13 paramètres de qualité de l'eau à 3 composantes principales, permet une réduction de la dimensionnalité de 76,9%.

Pour représenter plus visuellement les résultats selon les trois composantes principales, la Figure 5-14 et la Figure 5-15 présentent les cercles des corrélations définis par axes PC1 et PC2 et aussi PC1 et PC3. Les contributions des paramètres sont présentées dans le Tableau 5-16 (valeurs entre parenthèses).

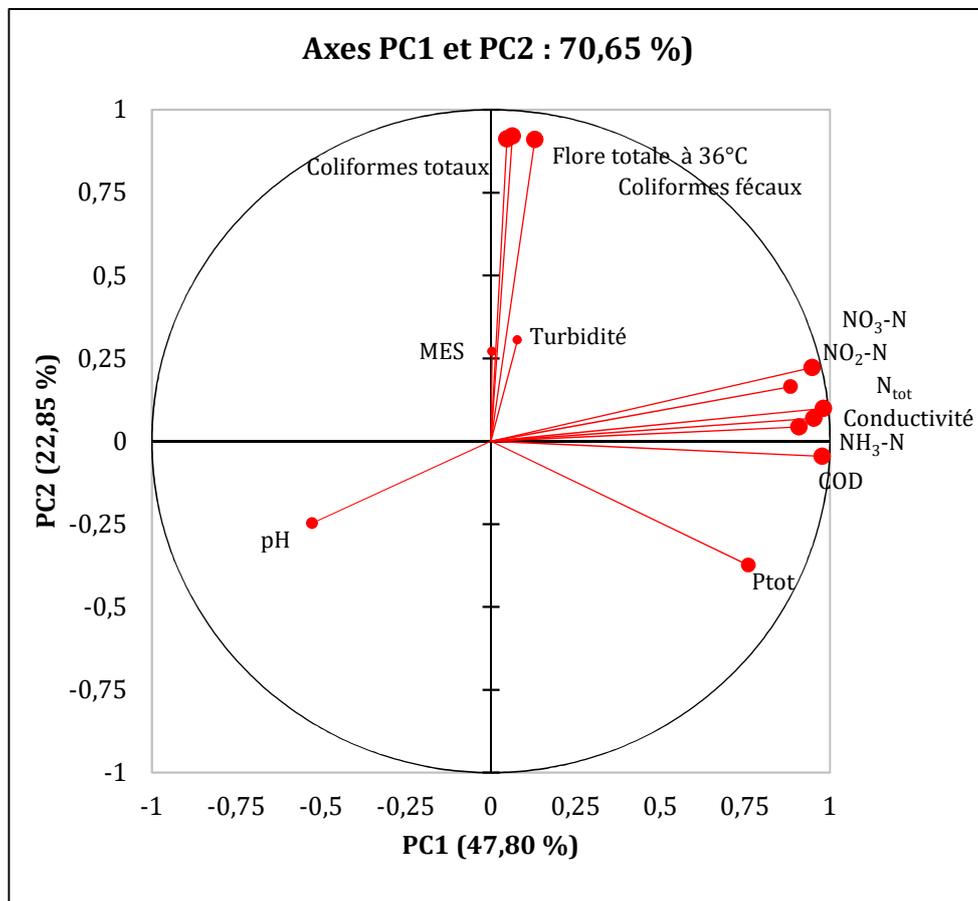


Figure 5-14. ACP sur la matrice de données de la qualité de l'eau à Tianjin-Cercle des corrélations selon les axes PC1 et PC2

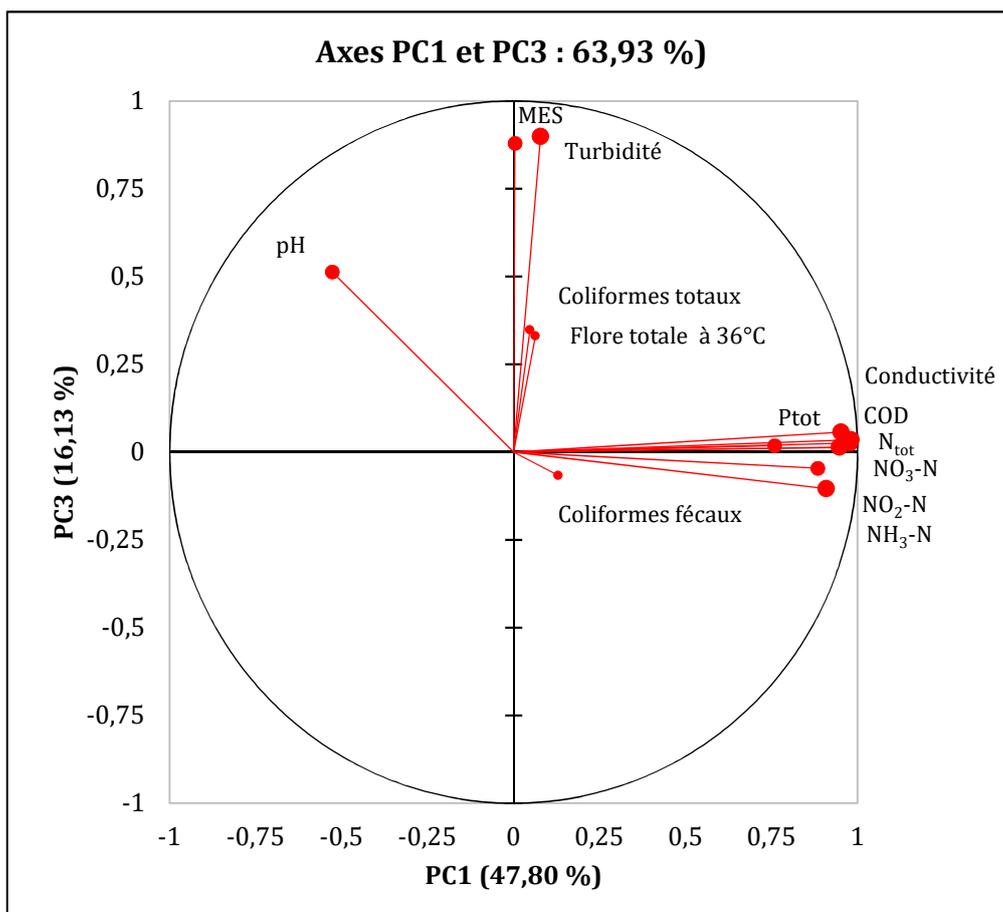


Figure 5-15. ACP sur la matrice de données de la qualité de l'eau à Tianjin-Cercle des corrélations selon les axes PC1 et PC3.

On peut observer que les paramètres fortement liés à la première composante principale sont le COD, le  $N_{tot}$ , la conductivité, le  $N-NO_3$ , le  $N-NH_4^+$ , le  $N-NO_2$  et le  $P_{tot}$  car leurs valeurs de coordonnée projetée sur la première composante principale sont les plus grandes. A partir de ce que ces paramètres représentent, on observe que la signification de la première composante principale est essentiellement les **polluants dissous** dans l'eau de pluie ruisselée. La deuxième composante principale est essentiellement liée aux **paramètres microbiologiques** via la concentration de flore totale, coliformes totaux et coliformes fécaux. La troisième composante principale représente des **matières particulières** via la turbidité et les MES, et aussi le pH.

Après avoir déterminé le nombre de composantes principales et la signification de chaque composante, nous devons choisir les paramètres représentatifs parmi les trois composantes principales en voyant les trois critères proposés précédemment (qualité de représentation de paramètres, coefficient de corrélation entre eux et facilité de mesure).

Le Tableau 5-17 ci-dessous présente les résultats de l'analyse de corrélation entre les différents paramètres avec les valeurs de coefficient de corrélation ( $r$ ) et de niveau de significativité ( $p$ ). Nous examinons d'abord la valeur de signification ( $p$ ). Il est utilisé

pour déterminer si le coefficient de corrélation a une signification statistique. Le coefficient de corrélation n'est pas statistiquement significatif quand la valeur  $p$  est supérieure à 0,05. Dans ce cas, quelle que soit la valeur de  $r$ , cela indique qu'il n'y a pas de corrélation entre les deux. Si la valeur  $p$  est  $<0,05$ , il existe une corrélation entre les deux. Ensuite, nous examinons la valeur de  $r$ . Plus la valeur de  $|r|$  est grande, meilleure est la corrélation. La signification des coefficients de  $r$  est la suivante : 0.8-1.0 (très forte), 0.6-0.8 (forte), 0.4-0.6 (modérée), 0.2-0.4 (faible), 0.0-0.2 (très faible ou pas de corrélation). Les valeurs marquées en rouge dans le Tableau 5-17 représentent des paramètres fortement corrélés ( $r > 0,6$  et  $p < 0,05$ ).

Tableau 5-17. Corrélacion entre les différents paramètres mesurés dans les fractions collectées à Tianjin

	pH	Cond.	Turb.	MES	COD	N-NO <sub>2</sub>	N-NO <sub>3</sub>	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	N <sub>tot</sub>	P <sub>tot</sub>	FT à 36°C	CT
Cond.	-0,409* (0,010)											
Turb.	0,326* (0,043)	0,055 (0,740)										
MES	0,369* (0,021)	-0,039 (0,815)	0,875** ( $< 0,0001$ )									
COD	-0,448** (0,004)	0,974*** ( $< 0,0001$ )	-0,008 (0,961)	-0,108 (0,513)								
N-NO <sub>2</sub>	-0,406* (0,010)	0,941*** ( $< 0,0001$ )	-0,034 (0,836)	-0,097 (0,556)	0,885*** ( $< 0,0001$ )							
N-NO <sub>3</sub>	-0,527** (0,001)	0,959*** ( $< 0,0001$ )	0,093 (0,573)	-0,017 (0,918)	0,962*** ( $< 0,0001$ )	0,882*** ( $< 0,0001$ )						
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-0,592*** ( $< 0,0001$ )	0,810*** ( $< 0,0001$ )	-0,101 (0,542)	-0,240 (0,141)	0,867*** ( $< 0,0001$ )	0,780*** ( $< 0,0001$ )	0,853*** ( $< 0,0001$ )					
N <sub>tot</sub>	-0,517** (0,001)	0,924*** ( $< 0,0001$ )	0,052 (0,753)	-0,076 (0,646)	0,958*** ( $< 0,0001$ )	0,862*** ( $< 0,0001$ )	0,969*** ( $< 0,0001$ )	0,934*** ( $< 0,0001$ )				
P <sub>tot</sub>	-0,410** (0,010)	0,657*** (0,000)	-0,202 (0,218)	-0,267 (0,100)	0,675*** ( $< 0,0001$ )	0,481** (0,002)	0,596*** ( $< 0,0001$ )	0,674*** ( $< 0,0001$ )	0,677*** ( $< 0,0001$ )			
FT à 36°C	-0,058 (0,727)	0,114 (0,490)	0,650*** ( $< 0,0001$ )	0,573*** (0,000)	0,006 (0,971)	0,158 (0,337)	0,213 (0,194)	0,062 (0,706)	0,142 (0,387)	-0,370* (0,020)		
CT	-0,039 (0,812)	0,097 (0,555)	0,655*** ( $< 0,0001$ )	0,585*** ( $< 0,0001$ )	-0,010 (0,950)	0,136 (0,410)	0,197 (0,229)	0,034 (0,835)	0,124 (0,453)	-0,371* (0,020)	0,996*** ( $< 0,0001$ )	
CF	-0,351* (0,029)	0,182 (0,266)	0,348 (0,030)	0,265 (0,102)	0,120 (0,467)	0,199 (0,224)	0,295 (0,068)	0,301 (0,062)	0,254 (0,119)	-0,231 (0,157)	0,812*** ( $< 0,0001$ )	0,794*** ( $< 0,0001$ )

*L'étude a été effectuée avec le test de Pearson. Les coefficients de Pearson r: 0.8-1.0(très forte), 0.6-0.8 (forte), 0.4-0.6 (modérée), 0.2-0.4 (faible), 0.0-0.2 (très faible ou pas de corrélation). Niveaux de significativité : \*  $p < 0,05$  ; \*\*  $p < 0,01$  ; \*\*\*  $p < 0,001$ .*

La première composante principale concerne les variables des polluants dissous : le  $N_{tot}$ , le  $N-NO_3$ , le COD, la conductivité, le  $N-NH_4^+$ , le  $N-NO_2$  et le  $P_{tot}$ . Leurs contributions à la première composante principale sont respectivement de 15,28%, 14,94%, 14,39%, 14,25%, 12,87%, 12,79% et 7,23%. Tous les paramètres ont une bonne qualité de représentation. La conductivité et le COD sont également mesurés en France. Leurs qualités de représentation sont les meilleures et leurs valeurs de contribution sont très proches. De plus, on peut observer que presque tous les paramètres dans la 1<sup>ère</sup> composante principale sont fortement corrélés avec les coefficients de corrélation supérieures à 0,6 ( $p < 0,001$ ). Bien que le  $P_{tot}$  ne soit corrélé que modérément avec le  $N-NO_2$  ( $p < 0,05$  mais  $0,4 < r < 0,6$ ) et n'est pas corrélé avec le  $N-NO_3$  ( $p > 0,05$ ), il est fortement corrélé à la conductivité et le COD ( $r$  égale 0,657 et 0,675 respectivement). En considérant l'aspect opérationnel, la méthode de mesure de la conductivité par une sonde est la plus facile à réaliser. C'est pourquoi, nous choisissons **la conductivité** pour représenter tous les polluants dissous.

La deuxième composante principale concerne les paramètres relatifs à la qualité microbiologique : la flore totale à 36°, les coliformes totaux et les coliformes fécaux. La qualité de leur représentation est bonne (valeurs de contribution de paramètres sont respectivement de 24,50%, 24,75% et 13,41%) et les corrélations entre eux sont très fortes ( $r > 0,8$ ). Au niveau opérationnel, les trois paramètres sont similaires en termes de méthode de mesure, de temps et de prix. Cependant, **la flore totale à 36°C** est mesurée aussi en France. Nous choisissons ce paramètre pour représenter des polluants microbiologiques à Tianjin afin de pouvoir comparer les trois sites d'étude.

La troisième composante principale concerne les paramètres relatifs à la pollution particulaire et le pH. Nous observons que les corrélations entre le pH et tous les autres paramètres ne sont pas fortes. Cela peut être dû au fait que l'évolution du pH est différente de celle d'autres paramètres : la qualité vis à vis du pH n'est pas relative à un seuil, mais impose qu'il se situe dans un intervalle. Les valeurs limites basse et haute de l'intervalle sont de 6 à 9 dans les normes (eau potable) mentionnées dans les sections 1.2 de ce chapitre. Pour cette raison, bien que le pH soit un paramètre important de la qualité de l'eau, dans le cadre de nos recherches sur l'évolution de la qualité de l'eau, il est difficile de l'utiliser pour déterminer si la qualité de l'eau est optimisée en cours d'événement de pluie. Concernant la turbidité et les MES, leur corrélation est forte ( $r > 0,6$ ) et leurs qualités de représentation sont bonnes (leurs contributions sont de 23,47% et 23,12% respectivement). En raison de sa facilité de mesure et de la faisabilité de sa mesure en continu, nous choisissons **la turbidité** pour représenter la pollution particulaire.

En conséquence, dans le cas de Tianjin, il a donc été possible de réduire à 3 paramètres représentatifs pour l'étude de l'évolution de la qualité : **la conductivité, la turbidité et la flore totale à 36°C**. Ces trois paramètres peuvent représenter les polluants dissous, les matières particulaires et les polluants microbiologique.

Afin d'évaluer si ces trois paramètres permettent effectivement de bien représenter les autres paramètres pour décrire la qualité de l'eau à Tianjin, nous pouvons étudier la qualité de la relation entre ces autres paramètres et les trois variables retenues. Étant donné que les composantes principales sont des combinaisons linéaires des variables de départ, pour chaque paramètre à l'exception des trois retenus, une analyse de régression linéaire multiple est effectuée :

$$[\text{Paramètre non sélectionné}] = a \times [\text{Conductivité}] + b \times [\text{Turbidité}] + c \times [\text{Flore totale à } 36^{\circ}\text{C}]$$

Plus le coefficient de détermination  $R^2$  de la régression sera grand, mieux les trois paramètres retenus permettront de bien décrire ce paramètre. Le Tableau 5-18 résume les paramètres d'équations de régression.

Tableau 5-18. Coefficients de calage (a, b et c) et le  $R^2$  d'équation de régression linéaire à Tianjin

	$R^2$	Coefficient de calage		
		a	b	c
Coliformes totaux	0,999	-3,93	0	1,56
Coliformes fécaux	0,997	0	0	1,44
pH	0,989	0	0,01	1,74
COD	0,959	0,09	0,03	0,37
$N_{\text{tot}}$	0,94	0,02	0	0,9
N- $\text{NO}_3$	0,928	0,01	0	0,12
N- $\text{NO}_2$	0,895	0	0	0
N- $\text{NH}_4^+$	0,894	0,01	0,01	0,75
$P_{\text{tot}}$	0,882	0	0	0,08
MES	0,852	-0,03	2,37	1,43

En observant les valeurs de  $R^2$ , nous constatons que, tous les paramètres sont bien décrits par les trois paramètres représentatifs. Parmi eux, la corrélation entre les paramètres de contamination fécale et ces trois paramètres sont les plus significatives. Nous concluons que ce choix de paramètre représentative est efficace et pertinent dans le cas à Tianjin.

### 2.1.2 ACP sur les données collectées à Vincennes.

Après la définition des 3 paramètres représentatifs sur Tianjin, nous pouvons tester ce choix sur l'Île-de-France. C'est-à-dire que sur la base des mêmes paramètres, nous observons les résultats sur Vincennes et sur Romainville et la perte éventuelle d'information.

A Vincennes, la matrice de données comprend 89 colonnes représentant les différentes fractions des 13 événements de collecte et 9 lignes correspondant aux paramètres analysés. Après l'ACP est effectuée, une matrice de corrélation de 9 paramètres et 9 composantes principales est créée. Parmi les 9 composantes principales, la proportion de variance de la première (PC1) est de 27,98%. Celle de la deuxième (PC2) est de 25,47% alors que celle de la troisième (PC3) est de 14,87%. Ainsi, les trois premières composantes permettent d'expliquer 68,32% de la variance totale des données, valeur que nous considérons suffisante pour ne pas intégrer la 4<sup>ème</sup> composante principale. Le nombre de composantes principales retenu à Vincennes est de 3 et on a réduit le nombre de 9 à 3 (une réduction de 66,6%) avec une perte de 31,68% de l'information. L'analyse des 3 premières composantes principales a pu refléter la majorité des informations de qualité de l'eau à Vincennes.

Le Tableau 5-19 présente les résultats de l'ACP qui contient les proportions de variance de chaque composante principale, les proportions cumulées, la matrice de corrélation et les contributions des paramètres. Les paramètres qui sont le plus liés à chaque composante principale sont indiqués en gras dans le tableau.

Tableau 5-19. Résultats d'ACP sur la proportion cumulée, la matrice de corrélation et les contributions des paramètres issue de qualité l'eau ruisselée de toiture à Vincennes

	PC1	PC2	PC3
Proportion	27,98%	25,47%	14,87%
Proportion cumulée	27,98%	53,45%	68,32%
pH	<b>0,726 (20,9%)</b>	-0,150 (1,0%)	0,359 (9,7%)
Conductivité	<b>0,826 (27,1%)</b>	0,225 (2,2%)	-0,200 (3,0%)
Turbidité	0,096 (0,4%)	<b>0,897 (35,1%)</b>	-0,003 (0,0%)
MES	0,027 (0,0%)	<b>0,904 (35,6%)</b>	0,005 (0,0%)
COD	<b>0,866 (29,8%)</b>	0,164 (1,2%)	-0,102 (0,8%)
<i>E. coli</i>	-0,251 (2,5%)	-0,202 (1,8%)	<b>0,685 (35,1%)</b>
Entérocoques	<b>0,594 (14,0%)</b>	-0,189 (1,6%)	0,214 (3,4%)
Flore totale à 22°C	-0,050 (0,1%)	0,434 (8,2%)	<b>0,585 (25,6%)</b>

Flore totale à 36°C

0,364 (5,2%)

0,548 (13,3%)

**0,552 (22,5%)**

Pour représenter plus visuellement les résultats d'analyse des trois composantes principales, la Figure 5-16 et la Figure 5-17 ci-dessous présentent les cercles des corrélations définis par axes PC1 et PC2 et aussi PC1 et PC3.

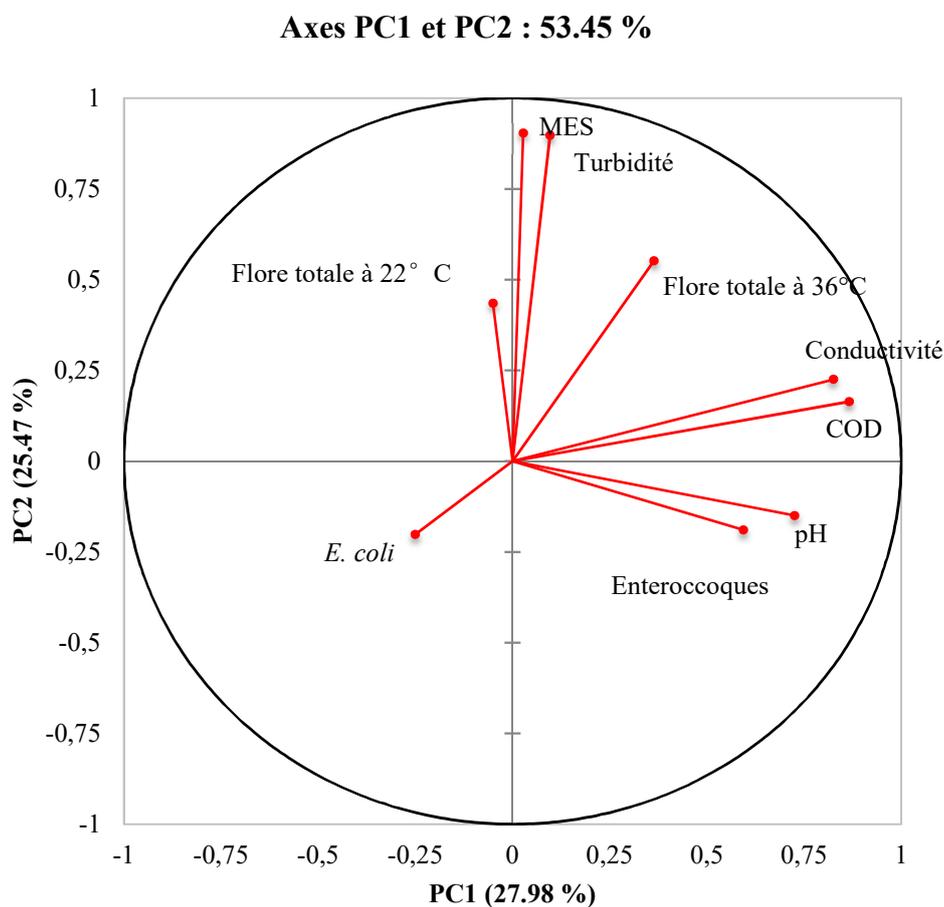


Figure 5-16. ACP sur la matrice de données de la qualité de l'eau à Vincennes-Cerle des corrélations selon les axes PC1 et PC2

### Axes PC1 et PC3 : 42.85 %

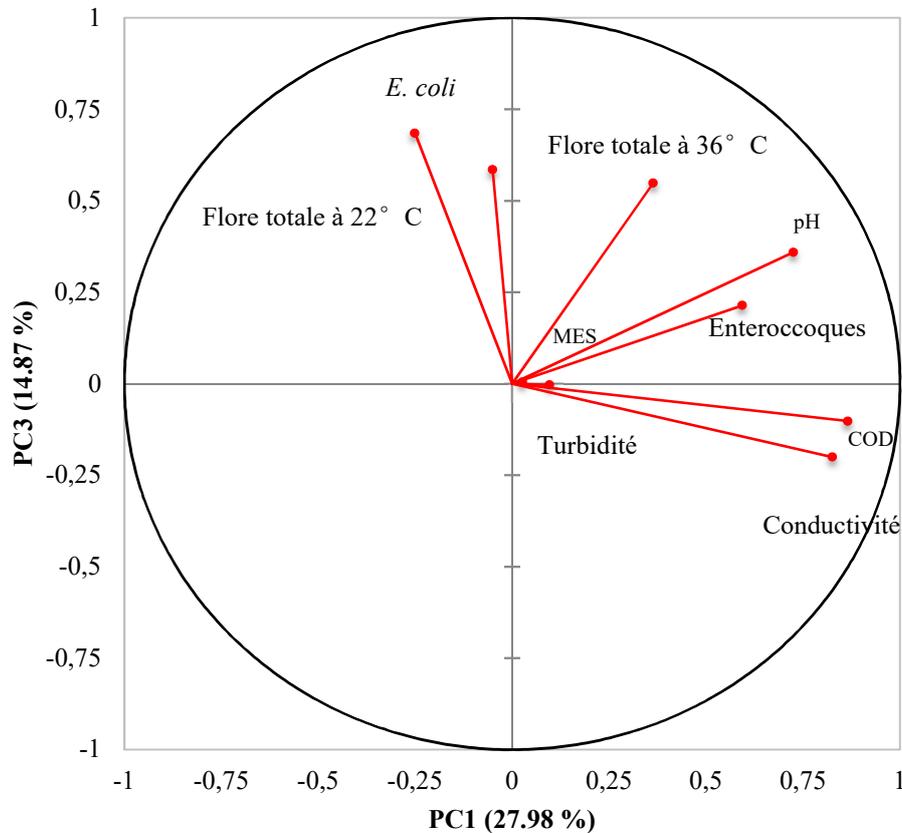


Figure 5-17. ACP sur la matrice de données de la qualité de l'eau à Vincennes-Cercle des corrélations selon les axes PC1 et PC3

On peut observer que les paramètres qui contribuent le plus à la première composante principale sont **la conductivité, le COD, le pH et les entérocoques**. La deuxième composante principale est liée aux **matières particulières** *via* la turbidité et les MES. La troisième représente le ***E. coli* et les variables des contaminations microbiologiques globales** (flore totale à 36°C et à 22 °C). Les trois paramètres représentatifs (conductivité, turbidité et flore totale à 36°C) sur Tianjin appartiennent respectivement aux trois composantes principales et nous devons analyser chaque composante principale séparément.

Le Tableau 5-20 présente les résultats de l'analyse de corrélation avec les coefficients de corrélations entre les différents paramètres mesurés ( $r$ ) et les niveaux de significativité ( $p$ ). Les valeurs marquées en rouge dans le Tableau 5-20 représentent des paramètres fortement corrélés ( $r > 0,6$  et  $p < 0,05$ ).

Tableau 5-20. Corrélation entre les différents paramètres mesurés dans les fractions collectées à Vincennes

	pH	Cond.	Turb.	MES	COD	<i>E coli</i>	Entero.	F.T. à 22°C
Cond.	0,467*** (p=0.000)							
Turb.	-0,060 (p=0.149)	0,263*** (p=0.000)						
MES	-0,106*** (p=0.000)	0,198* (p=0.021)	0,770*** (p=0.000)					
COD	0,422*** (p=0.000)	0,751*** (p=0.000)	0,227*** (p=0.000)	0,158*** (p=0.000)				
<i>E coli</i>	-0,018 (p=0.841)	-0,256** (p=0.009)	-0,096 (p=0.720)	-0,093 (p=0.453)	-0,196* (p=0.045)			
Enter o	0,308*** (p=0.000)	0,250 (p=0.318)	-0,034 (p=0.406)	-0,052 (p=0.592)	0,443** (p=0.007)	0,011 (p=0.948)		
F.T. à 22°C	0,046 (p=0.171)	-0,020 (p=0.618)	0,283** (p=0.007)	0,272*** (p=0.000)	0,006 (p=0.571)	0,076** (p=0.008)	0,030 (p=0.021)	
F.T. à 36°C	0,426*** (p=0.000)	0,260* (p=0.028)	0,456*** (p=0.000)	0,467*** (p=0.000)	0,301*** (p=0.000)	0,062 (p=0.261)	0,111* (p=0.066)	0,612*** (p=0.000)

L'étude a été effectuée avec le test de Pearson. Les coefficients de Pearson  $r$ : 0.8-1.0 (très forte), 0.6-0.8 (forte), 0.4-0.6 (modérée), 0.2-0.4 (faible), 0.0-0.2 (très faible ou pas de corrélation). Niveaux de significativité : \*  $p < 0,05$  ; \*\*  $p < 0,01$  ; \*\*\*  $p < 0,001$ .

Pour la première composante principale, on peut observer que les variables COD, conductivité, pH et entérocoques qui sont caractérisés par des grandes coordonnées de paramètre positives contribuent le plus. Les contributions de ces paramètres égalent respectivement 29,8%, 27,1%, 20,9 et 14,0%. Parmi eux, les contributions du COD et de la conductivité sont plus élevées et la conductivité est très corrélée avec le COD avec un coefficient de corrélation de 0,751 ( $p < 0,001$ ). En comparant la simplicité de mesure des deux paramètres, la mesure de conductivité est plus facile. La **conductivité** elle-même est un bon choix comme un paramètre représentatif.

La proportion associée à la deuxième composante principale est de 25,47%. Cette valeur est très proche de la valeur de la première composante principale : elle ne contient que 2,5% d'informations en moins. Cette deuxième composante principale est essentiellement liée aux matières particulaires : les MES et la turbidité. Leurs contributions à la deuxième composante principale sont similaires : 35,6% et 35,1% respectivement. En plus, la turbidité est très corrélée avec la MES avec un coefficient de corrélation de 0,770 ( $p < 0,001$ ), à cause de la facilité de mesure par une sonde et la faisabilité d'un suivi en continu pour **la turbidité**, nous le choisissons parmi les deux paramètres corrélés à la deuxième composante principale.

La troisième composante principale représente les contaminants fécaux via les concentrations en *E. coli* et aussi les contaminants microbiologiques globaux via les concentrations en flore totale à 22°C et à 36°C. Contrairement aux résultats d'autres travaux (Vialle, 2010 ; Corre et al., 2007 ; Wilkes et al., 2011), les deux indicateurs de contamination fécale, *E. coli* et entérocoques ne sont pas corrélés et ils ne se retrouvent pas dans la même composante principale. Cela peut s'expliquer par le fait que les entérocoques, tout comme *E. coli*, sont incapables de se reproduire dans l'eau, mais ont une plus grande capacité à survivre. Pour les entérocoques, une seule valeur mesurée des 89 échantillons est nulle, mais la détection de *E. coli* dans l'eau collectée est faible avec un taux de détection de 45,88%. Ces différences de concentration rendent leur corrélation faible. De plus, le taux de détection d'*E. coli* étant trop faible, il convient de ne pas de l'utiliser comme paramètre représentatif pour étudier l'évolution de la qualité de l'eau. Concernant les deux contaminants microbiologiques globaux, la corrélation entre eux est forte avec un coefficient de corrélation de 0,612 ( $p < 0,001$ ). **La flore totale à 36°C** est le seul paramètre microbiologique commun mesuré sur les trois endroits. Elle peut être choisie pour représenter des polluants microbiologiques à Vincennes et réaliser une comparaison entre les autres sites d'étude.

Nous constatons que les 3 paramètres sélectionnés (**conductivité, turbidité et flore totale à 36°C**) sur Tianjin peuvent également l'être sur Vincennes. Comme à Tianjin, nous évaluons si ces trois paramètres peuvent décrire la qualité de l'eau en observant le coefficient de détermination de l'équation de régression linéaire multiple (Tableau 5-21).

Tableau 5-21. Coefficients de calage (a, b et c) et le R<sup>2</sup> d'équation de régression linéaire à Vincennes

	R <sup>2</sup>	Coefficient de calage		
		a	b	c
pH	0,933	0,03	0,09	1,72
Flore totale à 22°C	0,912	0,00	0,00	0,98
MES	0,74	-0,06	3,31	1,03
COD	0,726	0,10	0,02	0,56
Entérocoques	0,523	4,14	-15,67	97,86
<i>E. coli</i>	0,231	-0,22	-1,04	14,56

En observant les R<sup>2</sup>, nous constatons que les trois paramètres décrivent bien le pH, le MES et le COD, mais mal, voire très mal les paramètres de contamination fécale (via *E. coli* et entérocoques). Cela peut être lié au fait que le taux de détection de la contamination fécale est très faible sur ce site d'étude. Nous avons des valeurs nulles en Entérocoques pour une partie des échantillons et des valeurs nulles en *E. Coli* pour une majorité d'entre eux. Le

R<sup>2</sup> est d'ailleurs plus faible dans le cas des *E. Coli* où le nombre de valeurs nulles est plus important.

### 2.1.3 ACP sur les données collectées à Romainville :

Comme sur Vincennes, nous faisons le même test de choix sur Romainville en prenant les mêmes paramètres représentatifs.

Pour la construction de la matrice de données à Romainville, tous les paramètres analysés de toutes les fractions des collectes ont été retenus. Ainsi, la matrice de données comprend 9 lignes représentant les paramètres analysés et 145 colonnes correspondant aux fractions des 17 événements de collecte. La matrice de corrélation de l'ACP composée de 9 paramètres et 9 composantes principales est puis construite.

Parmi les 9 composantes principales, la première (PC1) explique 29,43% de la variance totale, la deuxième (PC2) 25,12% et la troisième (PC3) 12,27%. Ainsi, les trois premières composantes permettent d'expliquer 66,83% de la variance totale des données et suffisent à refléter la majorité des informations de qualité de l'eau. Ainsi, pour Romainville, le nombre de composantes principales est de 3 et on peut passer de 9 paramètres à 3 composantes principales (une réduction de 66,6%) avec une perte de 33,17% de l'information.

Le Tableau 5-22 ci-dessous présentent les résultats de l'ACP. Les proportions de chaque composante principale, les proportions cumulées, la matrice de corrélation et les contributions des paramètres sont présentées.

Tableau 5-22. Résultats d'ACP sur la proportion cumulée, la matrice de corrélation et les contributions des paramètres issue de qualité l'eau ruisselée de toiture à Romainville

	PC1	PC2	PC3
Proportion	29,43%	25,12%	12,27%.
Proportion cumulée	29,43%	54,56%	66,83%
pH	0,017 (0,0%)	<b>-0,769 (26,8%)</b>	0,191 (3,3%)
Conductivité	<b>0,730 (20,1%)</b>	-0,410 (7,4%)	0,125 (1,4%)
Turbidité	<b>0,871 (28,6%)</b>	0,171 (1,3%)	-0,085 (0,7%)
MES	<b>0,839 (25,3%)</b>	0,188 (1,6%)	-0,157 (2,2%)
COD	<b>0,800 (24,1%)</b>	0,018 (0,0%)	0,206 (3,8%)
<i>E. coli</i>	0,154 (0,9%)	0,178 (1,4%)	<b>-0,579 (30,4%)</b>
Entérocoques	0,060 (0,1%)	0,079 (0,3%)	<b>0,777 (54,8%)</b>

Flore totale à 22°C	0,068 (0,2%)	<b>0,851 (32,0%)</b>	-0,028 (0,1%)
Flore totale à 37°C	0,123 (0,6%)	<b>0,812 (29,2%)</b>	0,191 (3,3%)

Le Tableau 5-22 met l'accent sur les paramètres qui sont le plus liés à chaque composante principale (les valeurs marquées en gras) et présente aussi les contributions de chaque paramètre. Deux figures des cercles des corrélations définis par axes PC1 et PC2 et aussi PC1 et PC3 peuvent rendre les résultats plus visuels (Figure 5-18 et Figure 5-19). Les variables sont d'autant mieux représentées par un axe qu'elles sont proches du bord du cercle.

**Axes PC1 et PC2 : 54.56 %**

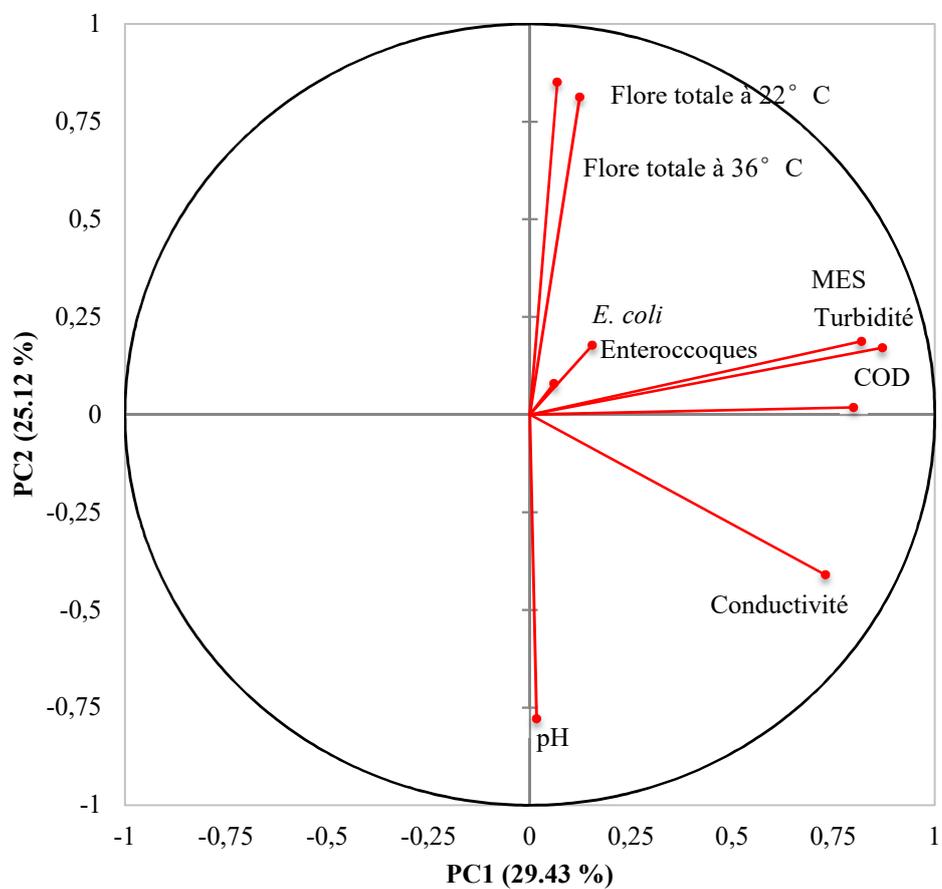


Figure 5-18. ACP sur la matrice de données de la qualité de l'eau à Romainville- Axes PC1 et PC2

### Axes PC1 et PC3 : 41.70 %

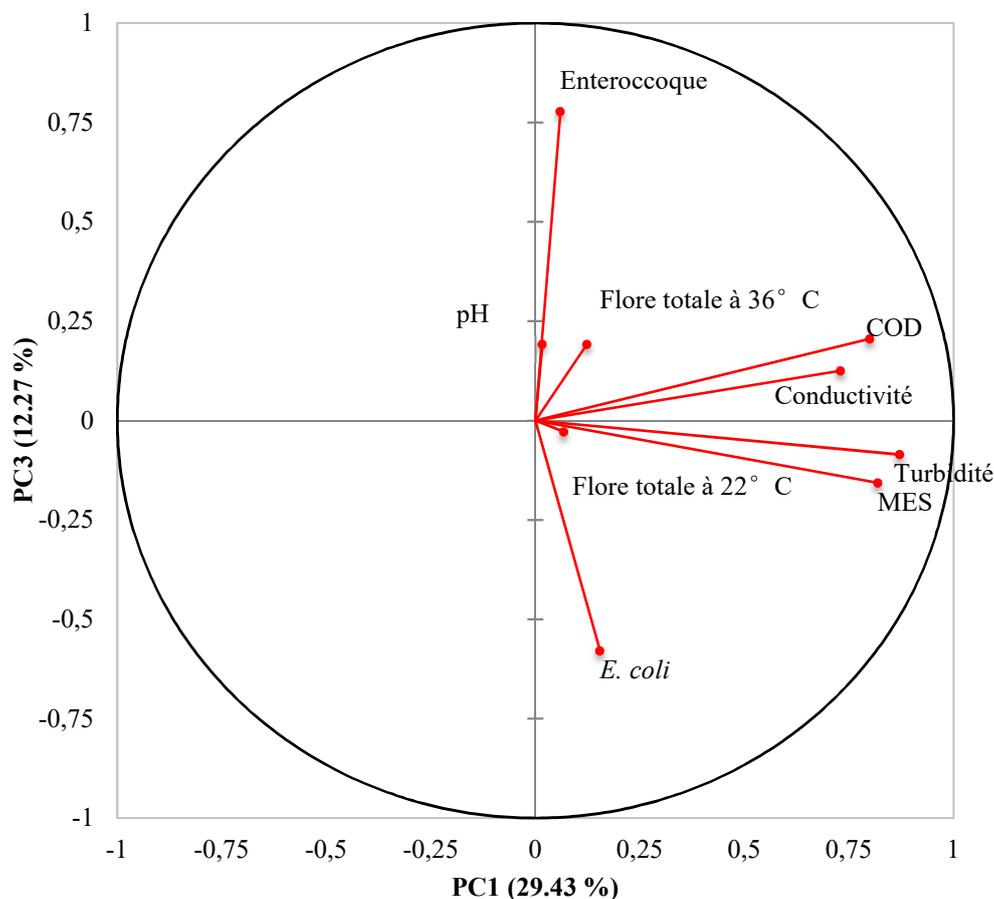


Figure 5-19. ACP sur la matrice de données de la qualité de l'eau à Romainville-Axes PC1 et PC3

On peut observer que, pour Romainville, les paramètres qui sont le plus corrélés à la première composante principale sont la turbidité, les MES, le COD et la conductivité, c'est-à-dire des **paramètres physico-chimiques**. La deuxième composante principale est liée aux paramètres de **contamination microbiologique globale** via la flore totale à 36°C et à 22°C. La troisième composante principale représente des **contaminations fécales** via les entérocoques et *E. coli*.

Les paramètres représentatifs sont déterminés en prenant en compte la contribution des paramètres, les coefficients de corrélation et facilité de mise en œuvre opérationnelle. Le Tableau 5-23 ci-dessous présente les résultats de l'analyse de corrélation entre les différents paramètres avec les valeurs du coefficient de corrélation ( $r$ ) et du niveau de significativité ( $p$ ). Les valeurs marquées en rouge dans le Tableau 5-23 représentent des paramètres fortement corrélés ( $r > 0,6$  et  $p < 0,05$ ).

Tableau 5-23. Corrélation entre les différents paramètres mesurés dans les fractions collectées à Romainville

Variables	pH	Cond.	Turb.	MES	COD	<i>E. coli</i>	Entero.	FT à 22°C
Cond.	0,302*** (p=0.000)							
Turb.	-0,147 (p=0.149)	0,408*** (p=0.000)						
MES	-0,193*** (p=0.000)	0,339* (p=0.021)	0,850*** (p=0.000)					
COD	0,082*** (p=0.000)	0,634*** (p=0.000)	0,529*** (p=0.000)	0,444*** (p=0.000)				
<i>E. coli</i>	-0,181 (p=0.841)	0,070** (p=0.009)	0,121 (p=0.720)	0,101 (p=0.453)	0,020* (p=0.045)			
Entero.	0,012*** (p=0.000)	0,069 (p=0.318)	0,050 (p=0.406)	0,001 (p=0.592)	0,059** (p=0.007)	-0,060 (p=0.948)		
FT à 22°C	-0,492 (p=0.171)	-0,273 (p=0.618)	0,141** (p=0.007)	0,166*** (p=0.000)	0,159 (p=0.571)	0,144** (p=0.008)	-0,042 (p=0.021)	
FT à 36°C	-0,460*** (p=0.000)	-0,111 (p=0.028)	0,169*** (p=0.000)	0,117*** (p=0.000)	0,190*** (p=0.000)	0,088 (p=0.261)	0,086* (p=0.066)	0,634*** (p=0.000)

L'étude a été effectuée avec le test de Pearson. Les coefficients de Pearson  $r$ : 0.8-1.0 (très forte), 0.6-0.8 (forte), 0.4-0.6 (modérée), 0.2-0.4 (faible), 0.0-0.2 (très faible ou pas de corrélation). Niveaux de significativité : \*  $p < 0,05$ ; \*\*  $p < 0,01$ ; \*\*\*  $p < 0,001$ .

Pour la première composante, les contributions des paramètres corrélés sont 28,6% pour la turbidité, 25,3% pour les MES, 24,1% pour le COD et 20,1% pour la conductivité. Leurs valeurs de contribution sont très proches et tous les quatre paramètres ont une bonne qualité de présentation. Parmi eux, les deux paramètres qui caractérisent les matières particulaires et les deux paramètres qui caractérisent les polluants dissous sont fortement corrélés. Le coefficient de corrélation entre la turbidité et les MES est de 0,850 ( $p < 0,001$ ) et celui entre le COD et la conductivité est de 0,634 ( $p < 0,001$ ). Dans ce cas-là, on peut choisir **la turbidité** pour représenter les matières particulaires et aussi **la conductivité** pour représenter les polluants dissous en raison de leur facilité de mesure.

La deuxième composante principale représente d'abord les deux contaminants microbiologiques globaux (flore totale à 22°C et à 36°C). Ses contributions égalent respectivement à 32,021% et 29,186%. La corrélation entre eux est très significative avec un coefficient de corrélation de 0,634 ( $p < 0,001$ ). De même, **la flore totale à 36°**

est le seul paramètre microbiologique commun qui peut être choisie pour présenter les contaminants microbiologiques globaux.

La troisième composante principale est essentiellement liée aux contaminants fécaux *via* les concentrations en entérocoques et en *E. coli*. Leurs contributions sont 54,7% et 30,393% respectivement. Les deux variables ne corrèlent pas avec un coefficient de corrélation de -0,06 et une valeur de significativité de 0,948 (> 0,05). Comme indiqué dans la section consacrée à Vincennes, contrairement aux autres études, ils ne sont pas corrélés car le taux de détection est faible (valeurs mesurées pour nombreux échantillons nulles) dans cette étude. Dans le cas de Romainville, la qualité de l'eau de pluie collectée est meilleure que celle de Vincennes. Les taux de détection sont respectivement 27,08% et 41,67%. La plupart des échantillons sont mesurés à 0. Dans ce cas, nous ne pensons qu'aucun d'eux n'est approprié pour être sélectionné comme paramètre représentative pour l'étude d'évolution de la qualité.

Par conséquence, comme à Tianjin et à Vincennes, il est possible de réduire le nombre de paramètres à 3 à Romainville : **conductivité, turbidité et flore totale à 36°C**. Puis, nous montrons les coefficients de détermination  $R^2$  d'équation de régression linéaire multiple à Romainville dans le Tableau 5-24 pour évaluer la corrélation entre ces trois paramètres et chaque des paramètres restants.

Tableau 5-24. Coefficients de calage (a, b et c) et le  $R^2$  d'équation de régression linéaire à Romainville

	$R^2$	Coefficients de calage		
		a	b	c
Flore totale à 22°C	0,915	0,01	0,01	0,55
pH	0,895	0,09	-0,10	1,51
COD	0,817	0,05	0,12	0,20
MES	0,806	-0,02	3,06	0,49
<i>E. coli</i>	0,16	0,06	0,45	2,13
Entérocoques	0,068	0,54	0,31	18,22

Nous observons que les résultats à Romainville sont très similaires à ceux de Vincennes. Les trois paramètres ont une forte corrélation avec le COD et MES, et l'absence de corrélation avec *E. Coli*. et entérocoques y encore plus marquée. A Romainville, le nombre d'échantillons avec des valeurs nulles pour ces deux paramètres est majoritaire.

## 2.2 Hiérarchisation des paramètres d'étude au niveau opérationnel

En combinant les conclusions précédentes de l'étude sur chaque endroit, au niveau opérationnel, une hiérarchisation des paramètres est apportée afin de simplifier le processus expérimental :

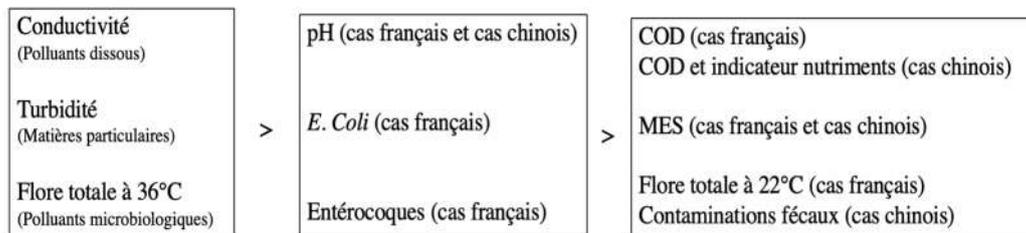


Figure 5-20. Hiérarchisation et sélection des paramètres d'étude

La première colonne correspond aux paramètres les plus prioritaires : la conductivité, la turbidité et la flore totale à 36°C. Ce sont les paramètres-clés pour l'étude de l'évolution de la qualité dans cette étude. Les trois paramètres contiennent la plupart des informations sur la qualité avec les valeurs de contributions élevées. De par la grande fiabilité, la sensibilité et le faible coût, ce sont des potentiellement des variables de premier ordre pour toute application de surveillance.

La deuxième colonne correspond aux indicateurs qui donneront des informations complémentaires de caractérisation globale dans les analyses des trois sites séparés (le pH, l'*E. coli*. et les entérocoques). Ils sont importants mais ne sont pas les meilleurs choix en tant que « paramètres représentatifs » en raison de leur faible représentativité de la qualité et de leur faible sensibilité. Cependant, ils peuvent servir de référence importante pour l'évaluation de la qualité de l'eau.

La troisième colonne correspond aux indicateurs qui sont très corrélées avec ceux de la première colonne, mais qui ne sont pas pratiques à mesurer. Ces indicateurs peuvent être ignorés afin de simplifier le protocole d'expérimentation.

Par conséquent, dans l'étude sur l'identification des facteurs déterminant pour la qualité globale (partie 3 du chapitre 5) et l'étude sur les évolutions de qualité (chapitre 6), nous utiliserons les paramètres dans la première colonne qui concerne **la turbidité, la conductivité et la flore totale à 36°C.**

### **3. Étude des influences des facteurs déterminants sur la qualité moyenne**

Comme nous l'avons présenté au début de ce chapitre, les influences de la saisonnalité et de la durée de temps sec précédent probablement ont un impact important sur la qualité de l'eau de ruissellement de toiture. Nous devons discuter de leur impact sur la qualité à travers les trois paramètres représentatifs qui ont été identifiés.

#### **3.1 Influence de la saisonnalité**

Les saisons peuvent peut-être affecter la qualité des eaux de ruissellement sur la toiture. Pour le vérifier, nous avons étudié la qualité des eaux ruisselées des trois sites séparément au travers des trois paramètres représentatifs (turbidité, de conductivité et de flore totale à 36°C).

Pour chaque site d'étude, nous divisons d'abord tous les événements de collecte par saison. Puis nous étudions l'influence de la saison sur la qualité de l'eau de chaque fraction collectée en utilisant les valeurs mesurées de l'ensemble des paramètres représentatifs. Cette étape est réalisée en représentant les fractions collectées dans le plan des composantes principales déterminées précédemment. A la différence du graphique de cercle de corrélation de rayon 1 (utilisé dans la deuxième partie de ce chapitre), dans ce type de graphique, nous projetons les données brutes des fractions des événements selon la saison durant laquelle ils se sont produits.

Enfin nous montrons les distributions des médianes de chaque événement pluvieux collecté des trois paramètres représentatifs selon les différentes saisons.

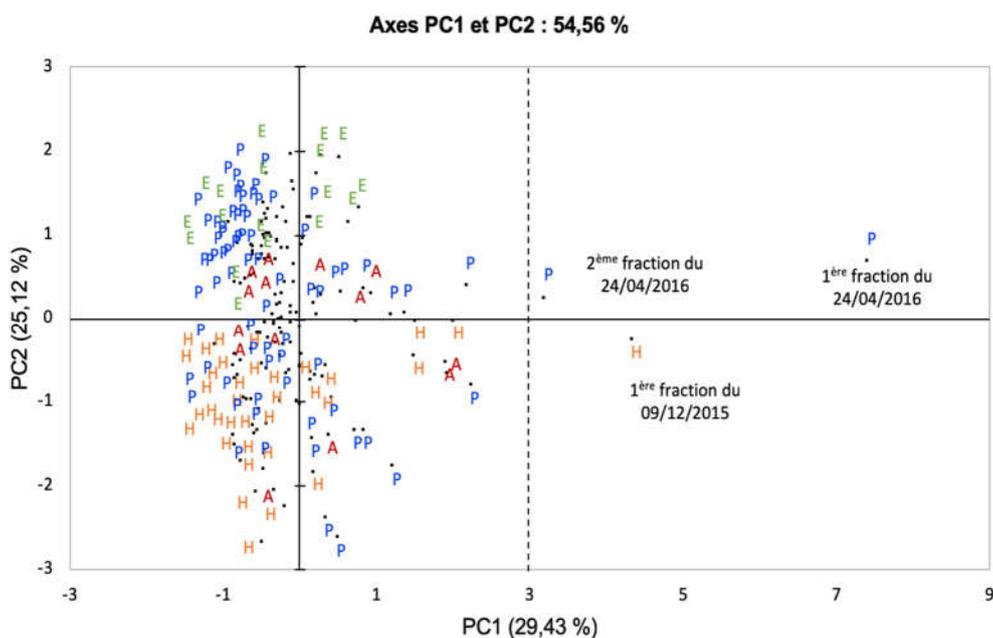
Les événements de collectes ont été identifiés en fonction des saisons. Dans cette étude, le climat et le contexte météorologique sont les facteurs déterminants qui affectent la qualité de l'eau de ruissellement de toiture. Donc, les dates de collecte sont classées selon la saison, selon sa définition au sens météorologique ou climatique. Pour la France et la Chine, appartenant à l'hémisphère nord, le printemps s'étend par définition du 1<sup>er</sup> mars au 31 mai. L'été correspond à la période du 1<sup>er</sup> juin au 31 août. L'automne est celle courant du 1<sup>er</sup> septembre au 30 novembre et l'hiver du 1<sup>er</sup> décembre au 28 février de l'année suivante. Pour les événements de collecte sur les deux sites d'étude en France, la durée de l'expérimentation est de plus d'un an tandis que les données collectées en Chine l'ont été principalement en été et automne.

Selon ces règles, nous observons que, à Vincennes, 4 prélèvements ont été réalisés au printemps, 2 en été, 5 en automne et 2 en hiver ; à Romainville, 9 prélèvements ont été réalisés au printemps, 2 en été, 2 en automne et 4 en hiver ; à Tianjin, 7 collectes ont été réalisés en été et 2 collectes en automne.

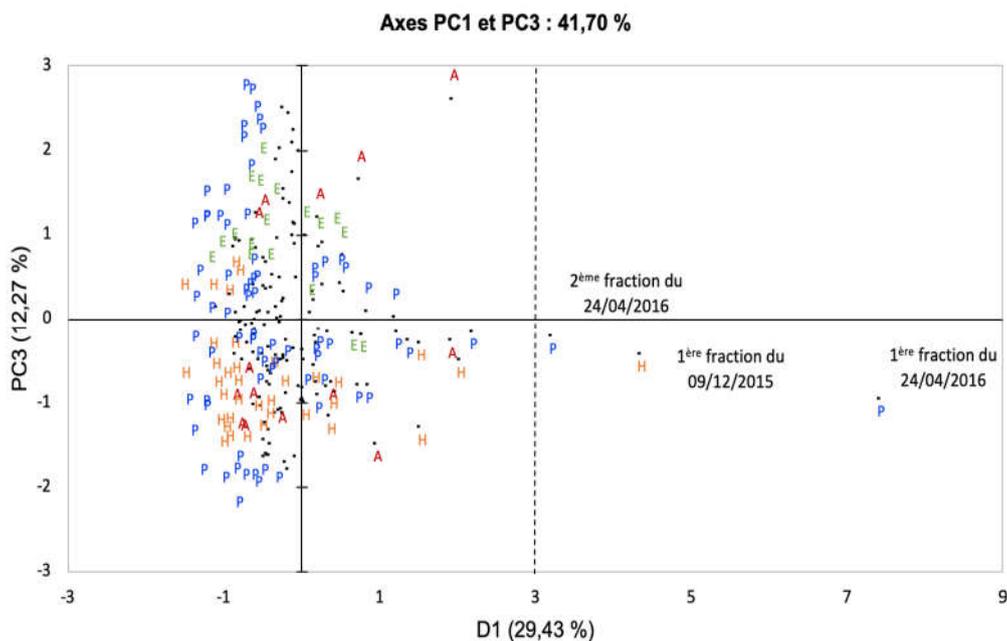
Contrairement à l'ordre de présentation des résultats observé précédemment, nous commençons par présenter les résultats sur Romainville, car c'est sur ce site que le nombre d'événements pluvieux collecté est le plus élevé, puis Vincennes et enfin Tianjin.

### 3.1.1 Romainville

Toutes les fractions des événements selon leur saison en termes sont présentées dans les plans des composantes principales dans deux figures définies par les axes PC1 et PC2 (Figure 5-21-a) et aussi par les axes PC1 et PC3 (Figure 5-21-b).



(a) Représentation des données selon les axes PC1 et PC2.



(b) Représentation des données selon les axes PC1 et PC3

Figure 5-21. Représentation des données de la qualité de l'eau collectée à Romainville selon la saison, dans le plan des axes PC1/PC2 et PC1/PC3.

P=printemps ; E=été ; A=automne ; H=hiver.

Selon la Figure 5-21, nous observons que, deux des fractions collectées au printemps (la première et deuxième fraction du 24/04/2016) et une de fraction en hiver (la première fraction du 09/12/2015) sont très liées à la première composante principale (qui est liée aux paramètres physico-chimiques). Les valeurs mesurées des paramètres physico-chimiques de ces trois fractions sont supérieures à celles des autres fractions.

En observant la distribution des fractions des quatre saisons sur les deux figures définies par les trois composantes principales, nous constatons que les fractions du printemps et de l'automne apparaissent dans les quatre quadrants des deux figures, c'est-à-dire ces fractions et les trois principales composantes sont liés. Quels que soient les paramètres physico-chimiques (1<sup>ère</sup> composante principale) ou les paramètres microbiologiques (2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> composante principale), toutes les mesures des fractions au cours de ces deux saisons sont proches.

Selon la Figure 5-21-(a), nous observons que plusieurs des fractions des événements collectés en été et en hiver sont plus proches de la deuxième composante principale qui est liée à la contamination microbiologique globale. Les fractions d'été sont dans le demi-plan supérieur alors que celles d'hiver sont dans le demi-plan inférieur. Cela traduit le fait que la contamination microbiologique globale des fractions est plus basse en hiver et plus élevée en été. De même, dans la Figure 5-21-(b) (plan PC1-PC3), comme précédemment, les fractions d'été sont dans le demi-plan supérieur alors que celles d'hiver sont dans le demi-plan inférieur. PC3 est, comme PC2, également lié à la contamination fécale (*via* les entérocoques et *E. coli*). L'été et l'hiver montrent des comportements distincts entre ces deux saisons. Par contre les fractions collectées au printemps et en automne ne sont pas discriminables des autres saisons et sont réparties dans l'ensemble du plan.

Concernant les trois paramètres représentatifs, les valeurs médianes de turbidité, de conductivité et de flore totale à 36°C en fonction des saisons sont présentées dans la Figure 5-22. Le point marqué en bleu correspond à la médiane des observations des polluants de chaque événement pluvieux collecté. Les médianes de chaque saison sont reliées par une ligne orange. Nous pouvons observer visuellement la variabilité entre les quatre saisons.

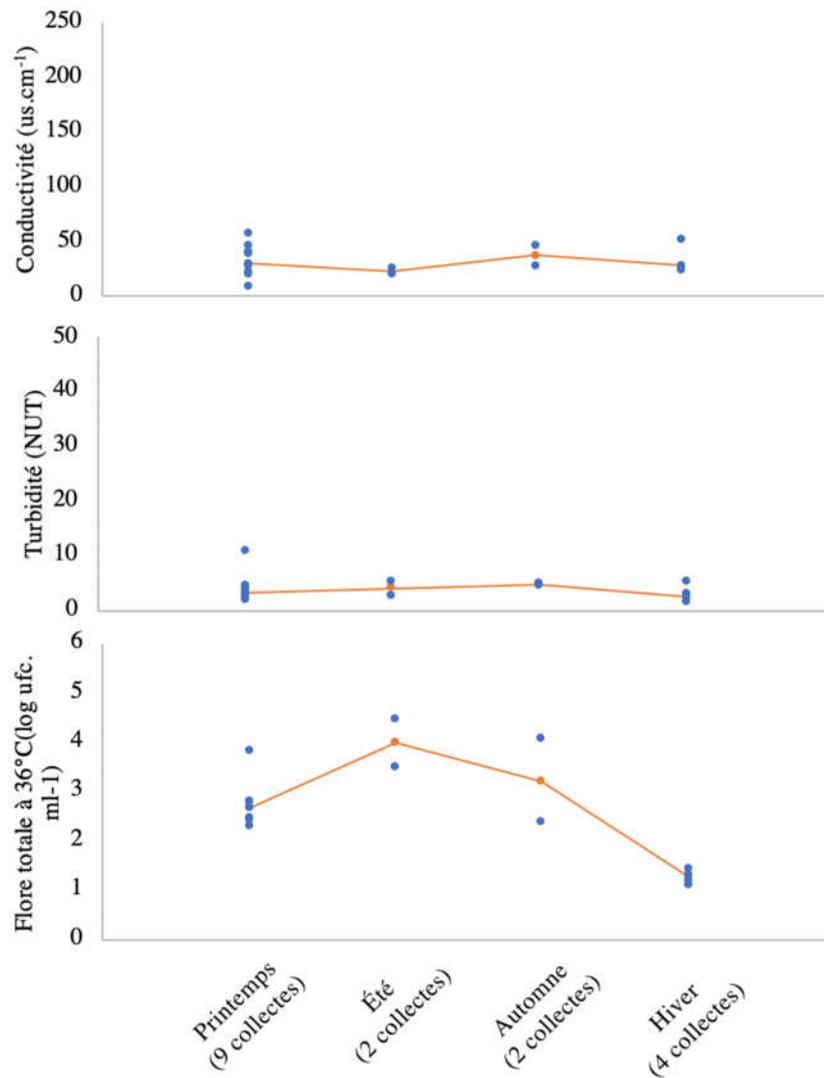


Figure 5-22. Saisonnalité des valeurs des paramètres représentatifs à Romainville

Comme le montre la Figure 5-22, pour la conductivité et la turbidité, de toute évidence, les médianes des quatre saisons ne sont pas différentes. Nous constatons que le maximum de conductivité de tous les événements à Romainville est de 58,0  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  alors que le maximum de turbidité est de 10,7 NTU. Ces deux valeurs sont très petites. Pour les eaux à très faible concentration en polluants, il n'est pas possible de mettre en évidence un effet de saisonnalité.

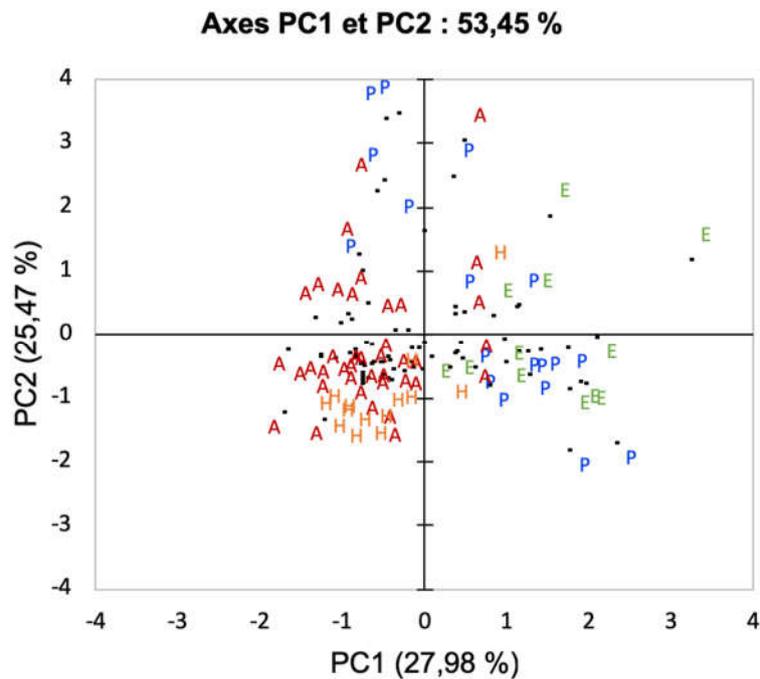
Pour la flore totale à 36°C, il semble y avoir une tendance. La concentration augmente du printemps à l'été, puis diminue de l'été à l'automne jusqu'à atteindre son minimum en hiver. Cependant, le nombre d'événements en été et en automne étant très petit (seulement deux), cela pourrait affecter la robustesse du raisonnement. Par contre, il semble plausible que la concentration de toutes les événements pluvieux d'hiver est inférieure à celle des trois autres saisons. Cela est probablement dû à l'activité moindre des petits mammifères, des oiseaux ou des insectes en hiver susceptibles d'être des sources de germes. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus précédemment qui

montrent une différence de comportement entre l'été et d'hiver. Toutefois le passage des fractions collectées aux médianes par événement, ainsi que la limitation aux trois paramètres représentatifs rend moins nette la différence entre l'été et l'hiver d'une part et les deux saisons intermédiaires d'autre part.

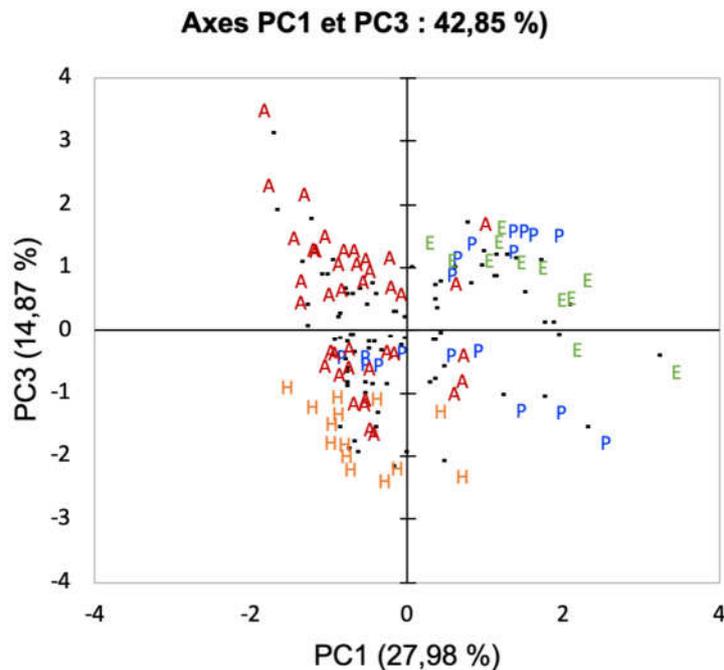
En conclusion, pour Romainville, la qualité reflétée par les paramètres microbiologiques présente des caractéristiques saisonnières. Pour la qualité physico-chimique, à l'exception de quelques fractions recueillies au printemps et en hiver, les autres valeurs ne montrent pas de variation saisonnière.

### 3.1.2 Vincennes

Comme pour Romainville, toutes les fractions des événements pluvieux collectés sont représentées dans les plans des composantes principales PC1 et PC2 (Figure 5-23-a) et, d'autre part, par les axes PC1 et PC3 (Figure 5-23-b).



(a) Représentation des données selon les axes PC1 et PC2.



(b) Représentation des données selon les axes PC1 et PC3

Figure 5-23. Représentation des données de la qualité de l'eau collectée à Vincennes selon la saison, dans le plan des axes PC1/PC2 et PC2/PC3

P=printemps ; E =été ; A=automne ; H=hiver.

En observant la distribution des quatre saisons dans la Figure 5-23, nous constatons que, bien que les fractions collectées au printemps soient présentes dans trois quadrants des deux figures (cela indique qu'il n'y a pas de saisonnalité), des valeurs élevées sur l'axe PC2 sur certaines fraction sont observées, ce qui traduit des matières particulaires élevées sur ces fractions. De même, bien que les fractions collectées à l'automne soient présentes dans les quatre quadrants, le même effet que précédemment peut être observé sur l'axe PC2, mais également sur l'axe PC3, ce qui traduit des valeurs mesurées de matières particulaires et de contamination microbiologique globale élevées sur cette saison.

Comme pour Romainville, une différence marquée peut être observée entre l'été et l'hiver, mais là le long de l'axe PC1 qui représente les matières dissoutes et *E. coli*. Celles-ci apparaissent plus élevées en été.

Les fractions collectées en été, automne et hiver sont réparties le long de la troisième composante principale, avec, très majoritairement, des valeurs positives en été et automne et négatives en hiver. Comme vu précédemment, cet axe décrit les paramètres bactériens et majoritairement la flore totale à 36°C. Cela peut être interprété comme une réduction significative du nombre des contaminants microbiologiques détectés en automne et en hiver.

La distribution des médianes de chaque événement des trois paramètres représentatifs sur les quatre saisons est présentée dans la Figure 5-24.

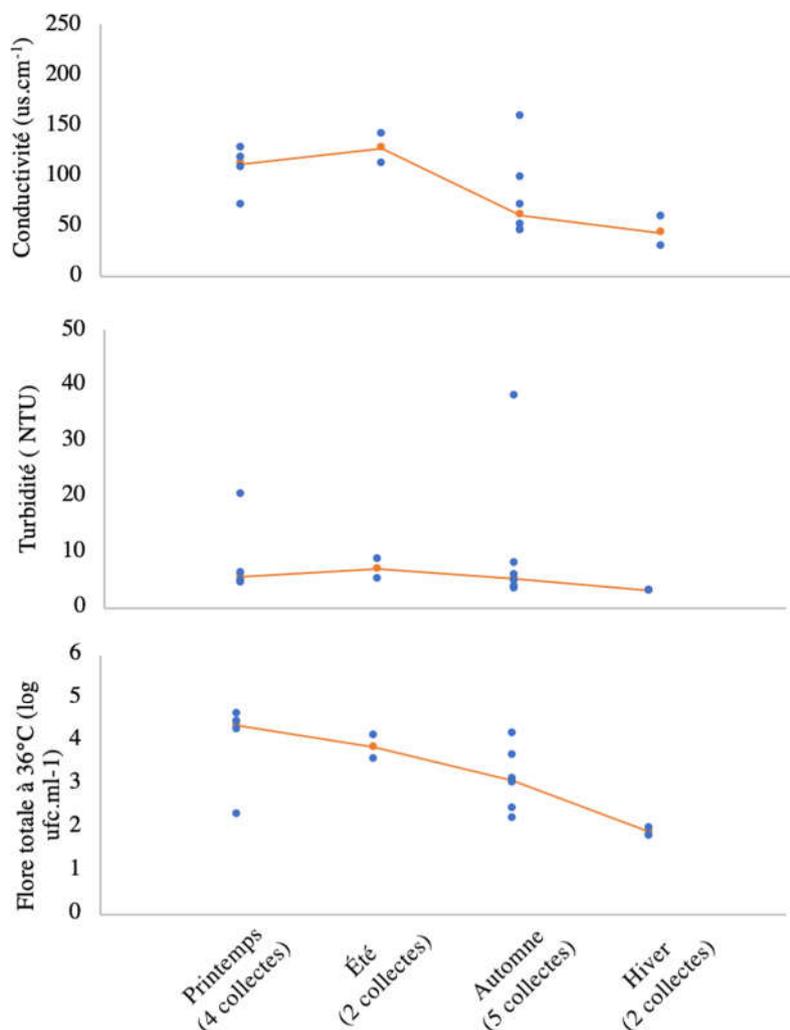


Figure 5-24. Saisonnalité des valeurs des paramètres représentatifs à Vincennes

Vincennes et Romainville sont très proches et, s'il y a un effet de saisonnalité, son impact sur la qualité de l'eau des deux endroits devrait être le même.

Concernant la turbidité, bien que les médianes d'un événement pluvieux collecté au printemps et d'un événement à l'automne soient plus élevées, les médianes des quatre saisons sont très voisines. Il n'y a pas de différence saisonnière significative. Cette conclusion est cohérente avec celle de Romainville.

Concernant la conductivité, contrairement à Romainville, la médiane du printemps et de l'été est supérieure à celle de l'automne et de l'hiver. Mais comme le nombre d'événements dans notre étude est faible, nous ne pouvons pas conclure si cette différence est significative.

Pour la flore totale à 36°C, nous voyons une tendance qui serait décroissante du printemps à l'hiver. Pour les deux sites d'étude de l'Île-de-France, la médiane hivernale est inférieure à celle des autres saisons.

En conclusion, une différence saisonnière cohérente est observée entre Vincennes et Romainville sur la contamination bactérienne. Ces résultats sont observables tant à partir des fractions collectées au travers de l'ACP qu'au travers des évolutions des trois paramètres représentatifs : conductivité, turbidité et flore totale à 36°C.

### **3.1.3 Tianjin**

Durant notre étude, 7 événements ont été collectés en été et 2 en automne à Tianjin. Étant donné que le nombre d'échantillons que nous avons prélevés était faible et que la période d'échantillonnage ne couvrait pas toute l'année, nous n'avons pas pu déterminer s'il existait un effet saisonnier à Tianjin, au travers de l'analyse des fractions collectées et de l'ACP.

Les valeurs médianes des trois paramètres représentatifs en fonction des deux saisons sont présentées dans la Figure 5-25.

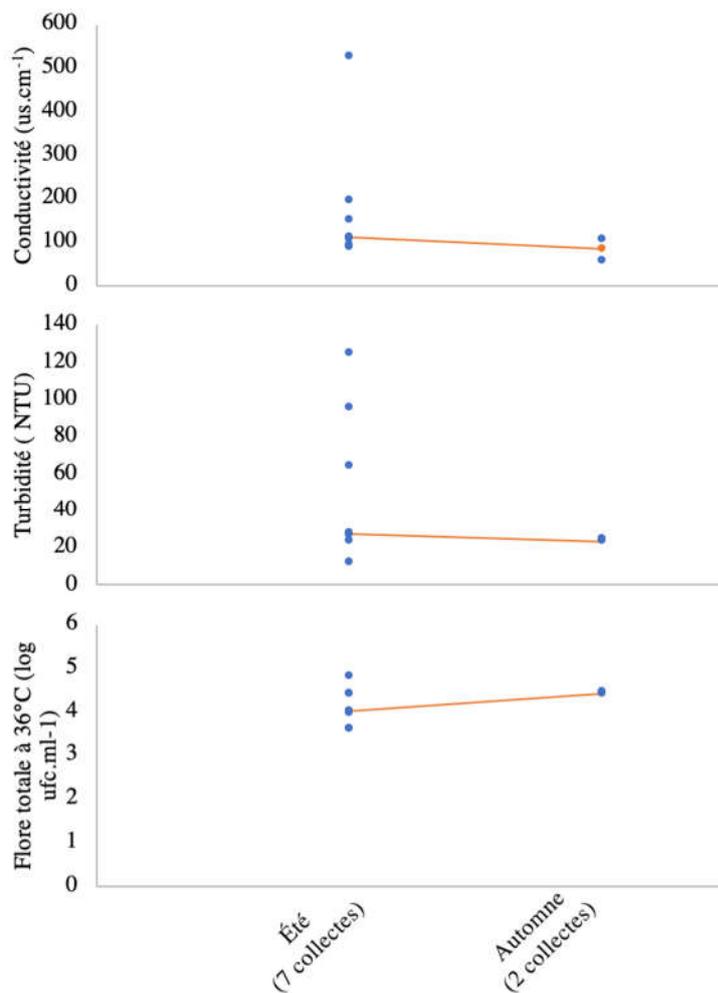


Figure 5-25. Saisonnalité des valeurs des paramètres représentatifs à Tianjin

Nous observons une grande dispersion des médianes sur l'été, plus importante que sur Romainville et Vincennes. Les médianes par saison ne montrent pas de tendance.

Par conséquent, pour les trois sites d'étude, en observant les effets de la saisonnalité sur la qualité moyenne de l'eau, on peut constater que, pour la conductivité et la turbidité, des effets de saisonnalité n'ont pas pu être mis en évidence sur la base de nos prélèvements. Bien qu'il existe des fractions dont la concentration est plus élevée dans une saison donnée, en raison du petit nombre de ces fractions, nous ne pouvons pas conclure que cela peut prouver l'existence d'effets saisonniers, et des campagnes expérimentales sur des durées plus longues seraient nécessaires. En revanche, pour la flore totale à 36°C, toutes les concentrations médianes en hiver sont inférieures à celles des autres saisons, sur les deux sites où cela peut être observé (Romainville et Vincennes) ce qui peut laisser penser à l'existence d'un l'impact de l'hiver sur la qualité microbiologique de l'eau de ruissellement de toiture.

### **3.2 Influences de la durée de temps sec précédant (ADD)**

Nous pensons qu'en plus de la saison, un autre facteur déterminant sur la qualité de l'eau de ruissellement de toiture est la durée de temps sec précédant l'évènement (ADD : *Antecedent Dry Days*). Elle est l'une des caractéristiques en lien avec la météorologie. Dans notre étude, l'ADD est définie comme la durée entre l'évènement pluvieux collecté et la pluie précédente. Ici, la notion de « l'évènement pluvieux collecté » a été définie à la section 3.1 du chapitre 3. Il commence par le premier basculement d'auget du pluviomètre après l'installation des flacons et sa fin est le dernier basculement d'auget du pluviomètre avant la récupération des échantillons. « La pluie précédente » que nous avons mentionnée ici représente la pluie avant l'évènement pluvieux collecté qui peut être mesurée par le pluviomètre avec une hauteur de pluie supérieure ou égale à 0,2mm.

Comme précédemment, nous nous basons sur les médianes de la conductivité, de la turbidité et de la flore totale à 36°C de chaque évènement pluvieux de collecte. Lorsque ces calculs sont effectués, l'ensemble de données est représenté à la Figure 5-26 et nous pouvons observer la tendance des graphiques des trois paramètres représentatifs avec l'ADD.

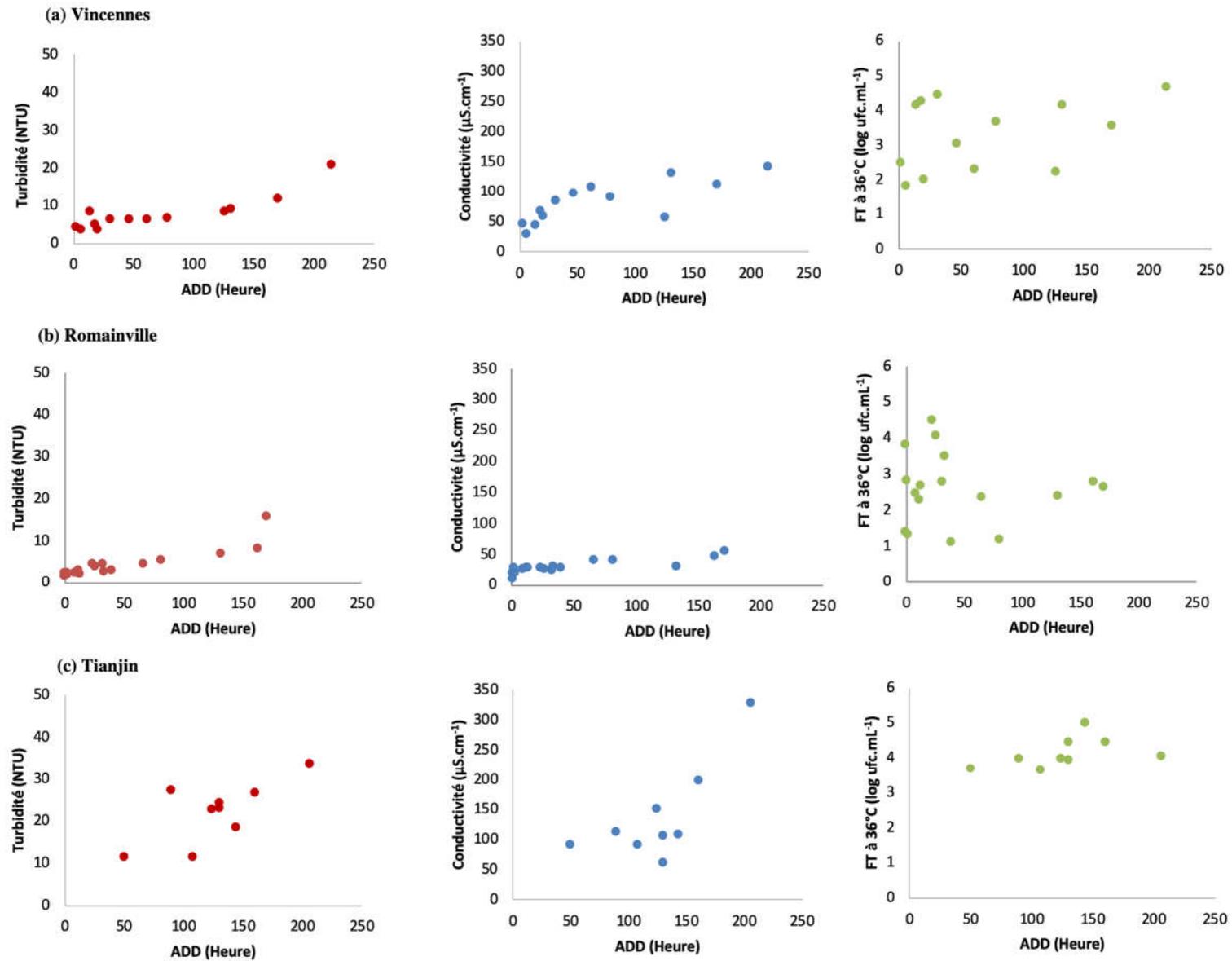
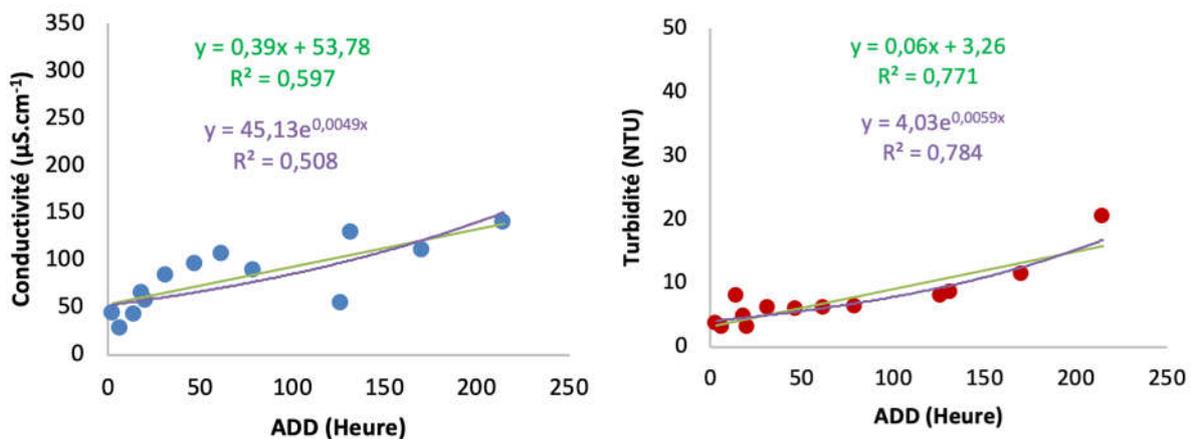


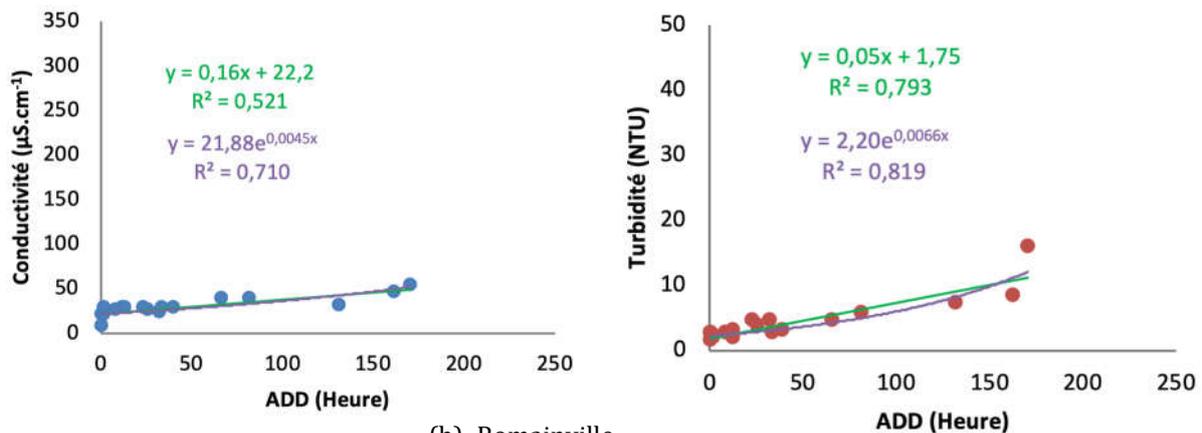
Figure 5-26. L'effet des périodes sèches précédentes sur les changements de qualité de l'eau de pluie

Nous constatons qu'il y a une tendance d'augmentation de la conductivité et de la turbidité avec l'ADD, depuis des valeurs basses, sans qu'il soit possible de considérer l'apparition d'une stabilisation asymptotique. Ces augmentations montrent une liaison entre l'ADD et l'accumulation de polluants sur la toiture. Au contraire, pour la flore totale à 36°C, nous ne constatons pas de tendance d'augmentation. Ses variations paraissent aléatoires (*via* un vecteur tels que des petits mammifères, des oiseaux ou des insectes).

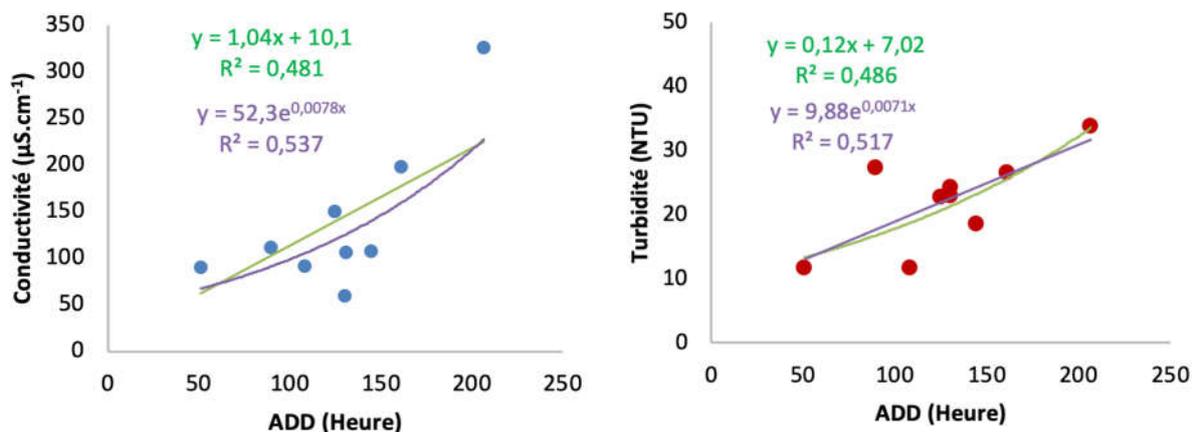
Pour la conductivité et la turbidité, ces tendances d'augmentation peuvent être ajustées à des courbes de tendance. Nous pouvons évoquer des tendances linéaires ou exponentielles sur les représentations graphiques et recherchons les ajustements correspondants (le Figure 5-27).



(a) Vincennes



(b) Romainville



(c) Tianjin

Figure 5-27. Courbes de tendance de la relation entre les périodes sèches précédentes et la conductivité et la turbidité

Les équations et les coefficients de détermination ( $R^2$ ) des courbes sont résumés dans le Tableau 5-25.

Tableau 5-25. Équations et coefficients de détermination des courbes de tendance de conductivité et de turbidité sur trois sites d'étude

	Conductivité		Turbidité	
	Linéaire	Exponentielle	Linéaire	Exponentielle
Vincennes	$y = 0,39x + 53,78$ $R^2 = 0,597$	$y = 45,13e^{0,0049x}$ $R^2 = 0,508$	$y = 0,06x + 3,26$ $R^2 = 0,771$	$y = 4,03e^{0,0059x}$ $R^2 = 0,784$
Romainville	$y = 0,16x + 22,2$ $R^2 = 0,521$	$y = 21,88e^{0,0045x}$ $R^2 = 0,710$	$y = 0,05x + 1,75$ $R^2 = 0,793$	$y = 2,20e^{0,0066x}$ $R^2 = 0,819$
Tianjin	$y = 1,04x + 10,1$ $R^2 = 0,481$	$y = 52,3e^{0,0078x}$ $R^2 = 0,537$	$y = 0,12x + 7,02$ $R^2 = 0,486$	$y = 9,88e^{0,0071x}$ $R^2 = 0,517$

En comparant les coefficients de détermination des deux types de courbes, nous pouvons observer que, sauf pour la conductivité sur Vincennes, les autres tendances sont plus conformes à la courbe exponentielle avec des coefficients de détermination plus élevés. Les coefficients de détermination sur les courbes exponentielles varient entre 0,481-0,819 ( $> 0,3$ ), ce qui signifie que la signification statistique existe. Nous pouvons l'utiliser pour estimer les dépôts de contaminants physico-chimiques sur la toiture dans la gamme d'ADD couverte par les expérimentations.

Dans le modèle exponentiel  $y = a e^{b x}$ , le coefficient « a » représente la concentration des polluants s'écoulant dans l'eau de ruissellement lorsque l'ADD est égal à 0. Dans notre étude, qu'il s'agisse de turbidité ou de conductivité, l'ordre de ce coefficient est le suivant : Tianjin > Vincennes > Romainville. Ce qui indique que l'état de la toiture sur trois endroits est différent. La toiture de Tianjin est la plus sale et celle de Romainville est la plus propre.

Par ailleurs le coefficient « b » traduit la vitesse à laquelle la contamination d'accroît en période de temps sec. Sur les trois sites d'étude, nous pouvons constater que l'ordre des taux de croissance des polluants déposés est le suivant : Tianjin > Vincennes > Romainville. Les différents environnements dans lesquels se situent les trois sites, le niveau de pollution et la nature de la toiture déterminent la vitesse à laquelle cette pollution s'accumule.

## Conclusion du chapitre 5

Dans ce chapitre, une analyse descriptive de la qualité de l'eau a d'abord été effectuée. Nous avons observé que la pollution de l'eau de pluie sur les toits à Tianjin est plus importante que celle des deux cas situés en Île-de-France avec une concentration relativement importante en comparant tous les paramètres communs. Parmi ceux-ci, la qualité physico-chimique de l'eau de Romainville est très bonne et la valeur médiane de la plupart des paramètres est proche ou inférieure à la valeur limite indiquée dans les différentes réglementations sur l'eau de distribution (alors que la concentration de la pollution microbiologique est proche des deux autres sites d'étude). Puis, nous avons analysé l'évolution des paramètres de contamination entre les 1<sup>ers</sup> et 2<sup>èmes</sup> millimètres de pluie, le cas échéant. Pour tous les paramètres physico-chimiques, les concentrations du 2<sup>ème</sup> mm de l'eau collectée montrent des réductions sensibles bien que différentes selon le paramètre (25% à 84,11%). Il en va autrement pour les paramètres microbiologiques, pour lesquels aucune tendance de réduction n'a été constatée. De sorte que la méthode d'élimination d'une partie de l'eau pour optimiser la qualité de l'eau peut réduire les matières particulaires et les produits dissous en même temps, mais n'est pas valide pour les polluants microbiologiques.

Puis, en utilisant l'ACP et en prenant en compte la faisabilité opérationnelle, nous avons effectué une réduction des paramètres et déterminé les paramètres-clés (paramètres représentatifs) afin d'étudier des influences des facteurs pertinents (saisonnalité et ADD) et l'évolution de la qualité. En considérant la qualité de représentation de chaque paramètre et en combinant l'analyse de corrélations et la facilité opérationnelle pour mesurer les différents paramètres, une hiérarchisation des paramètres a été proposée. Trois de ces paramètres sont identifiés comme prioritaires : la turbidité, la conductivité et la flore totale à 36°C.

Enfin, les influences de la saisonnalité et de la période de temps sec antérieure sont effectuées : ces deux facteurs sont considérés dans d'autres études comme ayant un impact important sur la qualité de l'eau de ruissellement de toiture (Simmons et al., 2001 ; Polkowska et al., 2002 ; Sazakli et al., 2007 ; Jordan et al., 2008). Concernant la saisonnalité, l'analyse de l'effet de saisonnalité n'a pu être effectuée car la période d'échantillonnage ne couvrait pas toute l'année à Tianjin, pour les deux sites d'étude en l'Île-de-France, il a été montré qu'il n'avait y pas d'effet de saisonnalité pour la conductivité et la turbidité, tandis que, du point de vue microbiologique, toutes les concentrations de la flore totale à 36°C en hiver sont inférieures à celles des autres saisons. Concernant l'étude de l'influence de la période de temps sec précédant l'évènement (ADD), l'observation des tendances des graphiques des trois paramètres représentatifs avec l'ADD, a permis de constater que les polluants microbiologiques n'étaient pas liés avec l'ADD alors qu'il existait une tendance d'augmentation sans atteindre d'asymptote de la conductivité et de la turbidité avec l'ADD. Il a été observé

que le taux d'accumulation des polluants déposés sur la toiture allait décroissant : Tianjin > Vincennes > Romainville.

Dans le chapitre 6, l'évolution de la qualité de l'eau de ruissellement de toiture sera au centre des recherches. Les conclusions de ce 5<sup>m</sup> chapitre sont utiles à plusieurs titres :

- L'étude de la qualité moyenne de l'eau présentée au chapitre 5 peut servir de référence. Nous pourrions discuter la façon dont la qualité de l'eau évolue.
- L'évolution de chaque paramètre peut varier et trop de paramètres empêchent d'identifier les tendances de qualité de l'eau. Les trois paramètres représentatifs identifiés dans ce chapitre 5 seront utilisés dans le chapitre 6 pour caractériser les matières particulaires, les produits dissous et les polluants microbiologiques.
- Hormis la nature des précipitations pendant la pluie (l'intensité de pluie), les deux facteurs mentionnés dans ce chapitre qui ont un impact sur la qualité de l'eau peuvent également avoir un impact sur l'évolution de la qualité, ce dont nous devons discuter au chapitre 6.

## Chapitre 6. Analyse de l'évolution de la qualité de l'eau de toiture en cours d'événement

Après l'étude de la variabilité de la qualité de l'eau, des paramètres représentatifs et de l'influence des facteurs déterminants dans le chapitre 5, ce chapitre, qui s'attache aussi à l'interprétation des résultats expérimentaux, poursuit l'objectif central de cette thèse : analyser l'évolution de la qualité de l'eau de ruissellement de toiture en cours d'événement. Cet objectif est spécifiquement traité à travers les trois étapes suivantes : (i) classification des différents types d'évolution ; (ii) identification des conditions d'une amélioration de la qualité ; et, (iii) modélisation de l'évolution pour les événements qui montrent une diminution de la contamination au cours du temps. Le chapitre est organisé en trois sections reprenant cette logique. Le schéma de l'organisation générale du chapitre 6 est présenté ci-dessous (Figure 6-1) :

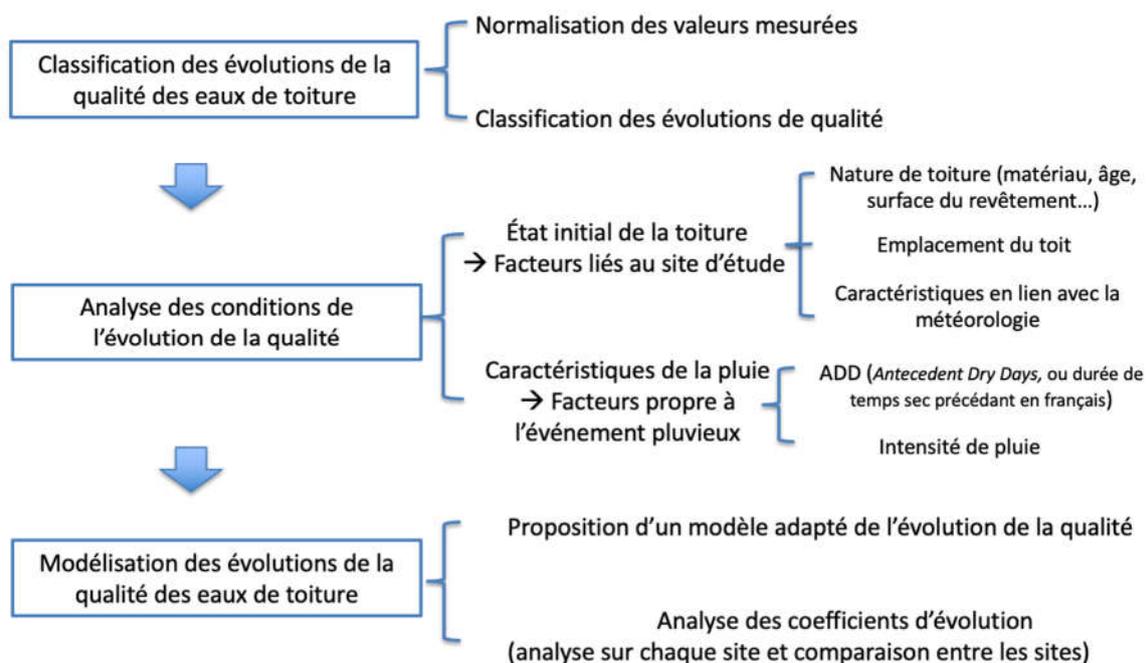


Figure 6-1. Schéma de l'organisation générale du chapitre 6

Premièrement, une étape de « prétraitement des données » est nécessaire avant d'étudier l'évolution de la qualité de l'eau. Par conséquent, la première section de ce chapitre consiste d'abord à normaliser les données afin d'assurer la comparabilité entre les différents paramètres et entre les différents événements de collecte, puis à classer les évolutions de la qualité des eaux de ruissellement en analysant les profils de changement de qualité normalisée de différents paramètres. Il convient de noter que les paramètres impliqués dans ce chapitre sont les paramètres représentatifs déterminés au chapitre 5, à savoir la turbidité, la conductivité et la flore totale à 36°C.

Deuxièmement, alors que l'impact de la période sèche précédant l'évènement sur la qualité moyenne a été mis en évidence au chapitre 5, de même, l'impact des facteurs déterminants sur l'évolution de la qualité doit être identifié dans ce chapitre. Pour l'eau de ruissellement de toiture, la caractérisation de l'évolution de la qualité est liée d'une part à l'état initial de la toiture, d'autre part aux caractéristiques de la pluie. Plus précisément, les principaux facteurs d'une part sont les facteurs liés au site d'étude tels que la nature de toiture, l'emplacement de toit et la météorologie. Ces facteurs déterminent les matières déposées sur le toit, la corrosion du toit et la charge initiale maximale de l'eau de pluie en contaminants d'origine atmosphérique. D'une autre part, ce sont des facteurs propres à l'évènement pluvieux, tels que l'intensité des précipitations et la durée de temps sec précédant (ADD). Donc, la deuxième section consiste à identifier l'impact de ces facteurs déterminants et à confirmer les conditions dans lesquelles une amélioration de la qualité des eaux de toiture en cours d'évènement est observée.

Troisièmement, pour les événements de collecte où l'amélioration de la qualité est avérée, l'idée est de tester différents types de modèles susceptibles de représenter correctement ce phénomène. Il est à noter que l'impact des facteurs déterminants doit être pris en considération pour réaliser l'évaluation de l'évolution de la qualité. C'est-à-dire, l'influence des facteurs sur les coefficients du modèle doit être analysée.

## **1. Profils d'évolution de la qualité de l'eau de toiture**

Cette section s'attache à prétraiter les données en normalisant les valeurs mesurées et classant les évolutions de la qualité en différents profils.

### **1.1 Normalisation des valeurs mesurées**

L'évolution de la qualité de l'eau ruisselée de toiture est variable entre les différents paramètres dans différents événements pluvieux de collecte. Au sein d'un même événement il n'est pas aisé de comparer l'évolution des trois variables retenues. De même, pour les événements différents, puisque la gamme de valeurs des données brutes varie largement, une interprétation claire sur les évolutions de qualité ne peut pas être apportée sans normalisation. La normalisation des valeurs permet d'ajuster les valeurs de données brutes suivant une fonction de transformation pour les rendre comparables entre différents paramètres et/ou entre différents événements de collecte.

Dans cette étude, les données mesurées correspondent à la qualité de l'eau en fonction de la hauteur de pluie cumulée collectée. Chaque série de données peut être considérée comme les données des séries chronologiques et, pour nous, il est important de collecter les tendances de ces données. Nous choisissons pour cela de les adimensionnaliser en utilisant la technique du **Min-Max Scaling**.

Pour chaque événement de collecte et chaque paramètre représentatif, on normalise les valeurs mesurées (les valeurs brutes) par les valeurs maximales et les valeurs minimales des séries de données. La gamme de variation est entre 0 et 1. La transformation se fait grâce à la formule suivante :

$$y' = \frac{y - y_{min}}{y_{max} - y_{min}} \text{ (Équation 18)}$$

Grace à la normalisation de données, nous pouvons obtenir des séries de données sur l'intervalle 0 à 1.

## 1.2 Classifications des profils d'évolution

En observant les profils d'évolutions de la qualité relatives aux valeurs normalisées de turbidité, conductivité et F.T. à 36°C variant en fonction de la hauteur de pluie cumulée collectée, 2 types de profil d'évolution sont identifiés :

- **Profil 1 : évolution décroissante** : son sens de variation est constant, sa représentation graphique sur un intervalle est une courbe qui descend constamment ;
- **Profil 2 : évolution non monotone** : son sens de variation n'est pas monotone. Sa représentation graphique sur un intervalle est une courbe avec un ou plusieurs des pic(s).

L'évolution décroissante est conforme à notre 1<sup>ère</sup> hypothèse (formulée dans le chapitre 2, section 2.1) selon laquelle l'amélioration de la qualité des eaux de toiture en cours d'évènement est susceptible d'être observée. L'évolution non monotone témoigne du fait que cette amélioration n'est pas systématique (en accord avec notre 2<sup>ème</sup> hypothèse formulée dans le chapitre 2, section 2.1).

Il convient de noter que pour les données mesurées, en raison de la précision de l'appareil, l'intervalle de confiance doit être pris en compte. De cette manière, chaque donnée mesurée est incluse dans un intervalle. Lorsque nous jugeons le type d'évolution auquel appartient un profil, si la différence entre les deux valeurs consécutives est dans l'incertitude de la mesure, cette différence n'est pas considérée significative.

Comme nous l'avons vu au chapitre 4, dans notre étude, l'incertitude sur la mesure de conductivité est égale à 1 µS/cm. De même, pour la turbidité, l'incertitude est égale à 0,1 NTU. Pour la normalisation, puisque nous changeons d'échelle, pour les nouveaux profils normalisés, les incertitudes changent également. Lors que nous passons à la valeur normalisée, pour chaque événement pluvieux de collecte, les incertitudes deviennent des incertitudes normalisées et sont calculées selon les formules ci-dessous :

incertitude normalisée  $y' = \frac{\text{incertitude } y}{y_{\max} - y_{\min}}$  (Équation 19)  $y$  représentant la conductivité ou la turbidité,

Cependant, concernant la flore totale à 36°C, le nombre de UFC (unités formant colonies) est une interprétation du nombre de colonies par une personne qualifiée. L'expérience a montré que différents techniciens peuvent et observent fréquemment des décomptes différents sur le même échantillon. Il est difficile de quantifier l'incertitude de mesure et nous ne l'afficherons pas, tout en la gardant à l'esprit.

Afin d'interpréter les deux types de profil d'évolution plus intuitivement, nous sélectionnons les résultats du 23 octobre 2016 pour donner un exemple, comme le montre la Figure 6-2 :

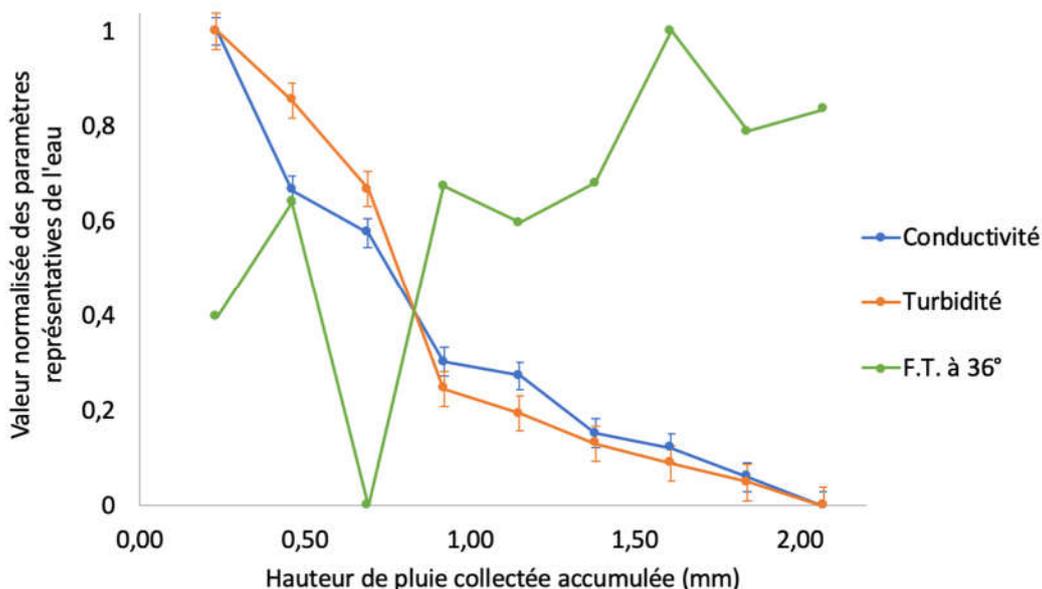


Figure 6-2. Évolution de qualité via la turbidité, conductivité et la flore totale à 36°C en fonction de la hauteur de pluie cumulée collectée

(Exemple de l'événement de collecte à Vincennes, le 23 octobre, 2016)

Nous pouvons observer que les courbes d'évolution des valeurs normalisées de la turbidité et de la conductivité présentées dans la Figure 6-2 descendent constamment. Ces profils correspondent au 1<sup>er</sup> type d'évolution --- l'évolution décroissante. Alors que le profil de la flore totale à 36°C, qui comprend trois pics, ne montre pas de comportement monotone. Il représente le 2<sup>ème</sup> type d'évolution --- l'évolution non monotone. La même analyse est effectuée sur les paramètres représentatifs de qualité de chaque événement de collecte dans les trois sites étude : en normalisant les données mesurées (y compris les incertitudes), en observant les profils d'évolution et en les classant. Selon les profils obtenus, le Tableau 6-1 synthétise les événements de collecte et le ratio des deux modes d'évolution.



Tableau 6-1. Nombre des collectes des différentes façons de l'évolution de qualité dans les sites d'étude

Site		Vincennes (13 collectes)			Romainville (17 collectes)			Tianjin (9 collectes)		
		Cond.	Turb.	F.T. à 36°C	Cond.	Turb.	F.T. à 36°C	Cond.	Turb.	F.T. à 36°C
<b>Décroissante</b>	Nombre	10	7	2	4	4	2	8	6	1
	Pourcentage	77%	54%	15%	24%	24%	12%	89%	67%	11%
<b>Non monotone</b>	Nombre	3	6	11	13	13	15	1	3	8
	Pourcentage	23%	46%	85%	76%	76%	88%	11%	33%	89%

Pour les deux paramètres physico-chimiques, nous pouvons constater que, la majorité des profils à Romainville présentent une évolution non monotone (13 des 17 événements de collecte). Cela est peut-être dû au fait que la qualité de l'eau de ruissellement collectée à Romainville est meilleure que les deux autres sites d'étude. Les concentrations de pollution particulaire et de pollution dissoute sont plus faibles que celles observées à Vincennes et à Tianjin (cf. conclusion du chapitre 5). En observant tous les profils d'évolutions de la flore totale à 36°C, nous pouvons constater que la grande majorité des évolutions sur les trois sites varient de façon non monotone (85%, 88% et 89% respectivement à Vincennes, Romainville et Tianjin).

Pour la conductivité et la turbidité à Vincennes et à Tianjin, la plupart des profils appartiennent au premier type d'évolution, à savoir l'évolution décroissante. Dans ce cas, il est possible de pousser plus loin les investigations. Étant donné que l'évolution de la qualité de l'eau est affectée à la fois par la qualité de l'eau et par les caractéristiques de l'évènement de précipitation, son étude doit prendre en compte d'une part les facteurs déterminants qui affectent la qualité de l'eau comme la saisonnalité et la durée de temps sec précédant (l'ADD), et d'autre part, l'intensité de pluie.

Dans la section suivante, nous allons déterminer la relation entre ces facteurs et l'évolution de la qualité de l'eau et étudier dans quelles conditions l'évolution de la qualité de l'eau témoigne d'un changement décroissant.

## 2. Facteurs déterminants pour l'évolution de la qualité de l'eau de ruissellement de toiture

Un grand nombre des facteurs peuvent conditionner l'évolution décroissante des deux paramètres étudiés (turbidité et conductivité) et il est nécessaire de considérer ces facteurs pour chaque situation. L'évolution de la qualité de l'eau de ruissellement de la

toiture dépend principalement de l'état initial du toit et des précipitations en temps réel. Donc, les facteurs déterminants sont principalement des facteurs pouvant affecter l'état initial du toit et la caractéristique des pluies tels que les sites d'échantillonnage, la saisonnalité, la météorologie... Parmi ces facteurs, deux sont très importants : l'intensité de pluie et la durée de temps sec précédant l'évènement (ADD).

En ce qui concerne la durée de temps sec précédant l'évènement (ADD), nous l'avons déjà définie dans le chapitre précédent (Chapitre 5-3.2) comme le temps entre le dernier basculement d'auget de la pluviométrie de l'évènement précédent et le premier basculement de l'auget concernant l'évènement pour lequel on récupère l'échantillon. On a également vérifié que l'ADD joue un rôle très important pour la turbidité et la conductivité. Plus l'ADD est long, plus la pollution particulaire et la pollution dissoute peuvent potentiellement pénétrer dans l'eau.

En ce qui concerne l'intensité de pluie, chaque évènement pluvieux collecté est différent. En outre, notre dispositif d'échantillonnage de succession de récipients détermine que la hauteur de pluie collectée de chaque fraction collectée (0,23 mm pour Vincennes, 0,115 mm pour Romainville, et 0,24 mm pour Tianjin) n'est pas cohérente avec le pas de mesure donné par le pluviomètre à auget basculeur (un basculement tous les 0,2 mm de pluie). Il est alors difficile d'utiliser directement les intensités instantanées pluviométriques pour analyser l'impact de l'intensité de pluie sur l'évolution de la qualité de l'eau. Nous proposons alors de définir deux variables : l'intensité moyenne sur un évènement pluvieux collecté et l'intensité moyenne de fraction de cet évènement (correspondant à chaque échantillon). A l'aide de ces deux variables, nous pouvons corrélérer les données du dispositif expérimental et les données pluviométriques.

## **2.1 Intensité moyenne sur un évènement pluvieux collecté ( $i_{moy.}$ ) et intensité moyenne de fraction ( $i_{moy.f.}$ )**

L'intensité moyenne de pluie sur une durée peut être définie comme la hauteur d'eau précipitée rapportée à cette durée. Cette intensité peut être calculée à l'échelle de chacun des évènements considérés : on parle alors d'*intensité moyenne d'évènement de pluie collectée*. Mais, dans l'optique qui nous intéresse d'effectuer une étude *intra-évènementielle*, le calcul peut être effectué par fraction dans un même évènement : on parle alors d'intensité moyenne de fraction (d'évènement). Cette section explique la méthode de reconstitution de ces deux intensités moyennes.

Des notions préalables doivent toutefois être clairement définies. Elles sont présentées Figure 6-3.

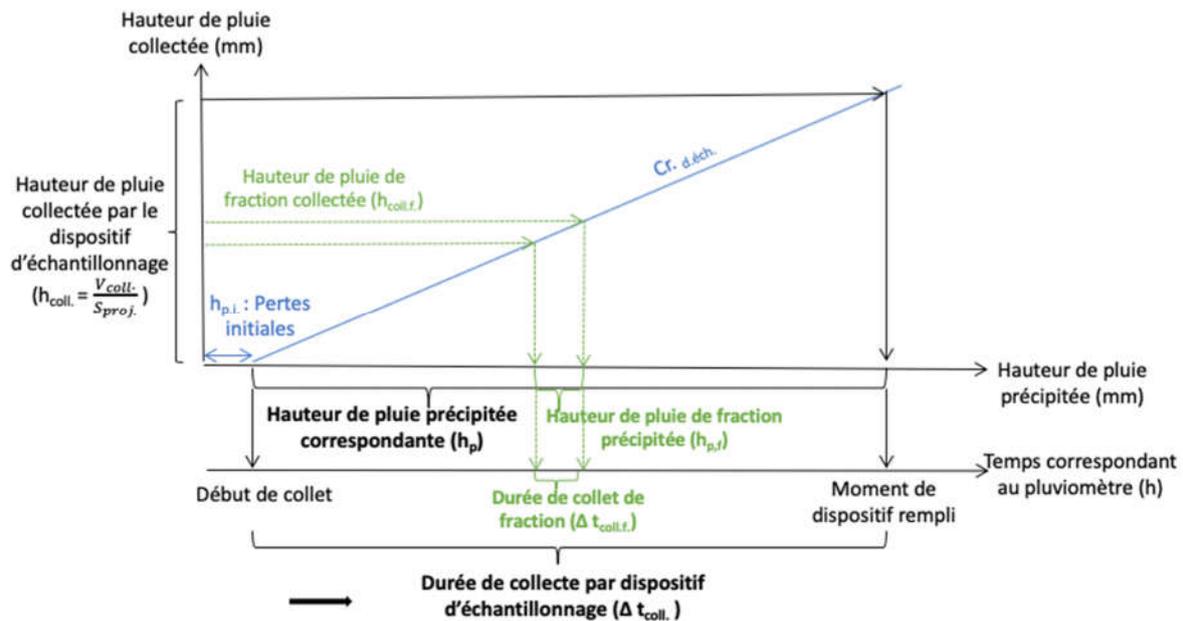


Figure 6-3. Schéma pour déterminer l'intensité moyenne sur un événement pluvieux collecté et l'intensité moyenne de fraction

Dans cette figure, la hauteur de pluie collectée ( $h_{coll.}$ ) par le dispositif d'échantillonnage est égale au volume collecté par le dispositif ( $V_{coll.}$ ) (les données du dispositif expérimental) divisé par la surface projetée de collecte ( $S_{proj.}$ ) alors que la hauteur de pluie précipitée ( $h_p$ ) correspond à l'information fournie par le pluviomètre (les données pluviométriques), pertes initiales exclues. Les deux types de hauteur de pluie apparaissent généralement être corrélées de façon linéaire, ce qui montre que le système expérimental mis en place collecte de façon proportionnelle la pluie précipitée. L'interception de cette droite de régression linéaire et de l'axe des x correspond à la perte initiale ( $h_{p,i}$ ) et la pente correspond au coefficient de récupération du dispositif d'échantillonnage ( $Cr_{d.éch.}$ ). Elles peuvent être liées au facteur de ruissellement proprement dit du toit et à un facteur d'efficacité de notre système de collecte (reflétant les pertes se produisant lors de la collecte). Pour chaque événement pluvieux collecté, nous pouvons calculer la durée de collecte par le dispositif d'échantillonnage ( $t_{coll.}$ ). De même, pour chaque fraction de hauteur de pluie collectée ( $h_{coll,f}$ ), il y a une hauteur de pluie précipitée de fraction correspondante ( $h_{p,f}$ ) et une durée de collecte de fraction correspondante ( $t_{coll,f}$ ).

Dans notre étude, **l'intensité moyenne sur un événement pluvieux collecté** sera définie comme la hauteur de pluie précipitée totale collectée par le dispositif d'échantillonnage divisée par la durée totale de la collecte. **L'intensité moyenne de fraction** est, quant à elle, définie comme la hauteur de pluie précipitée par fraction de collecte divisée par la durée correspondante à cette fraction. Ces intensités sont respectivement calculées selon les formules suivantes :

$$i_{moy.} = \frac{h_p}{t_{coll.}} \text{ (Équation 20)}$$

$$i_{moy.f.} = \frac{h_{p.f.}}{t_{coll.f.}} \text{ (Équation 21)}$$

Il existe une relation entre la hauteur de pluie collectée et la hauteur de pluie précipitée et une relation entre la hauteur de pluie de fraction collectée et la hauteur de pluie de fraction précipitée :

$$h_{coll.} = Cr_{d.éch.} \times (h_{p.i.}) \text{ (Équation 22)}$$

$$h_{coll.f.} = Cr_{d.éch.} \times h_{p.f.} \text{ (Équation 23)}$$

De plus, il y a

$$i_{moy.} = \frac{V_{coll.}}{t_{coll.} \times S_{proj.} \times Cr_{d.éch.}} + \frac{h_{p.i.}}{t_{coll.}} \text{ (Équation 24)}$$

$$i_{moy.f.} = \frac{V_{coll.f.}}{t_{coll.f.} \times S_{proj.} \times Cr_{d.éch.}} \text{ (Équation 25)}$$

Ici,  $i_{moy.}$  (mm/h) : intensité moyenne sur un événement pluvieux collecté,

$i_{moy.f.}$  (mm/h) : intensité moyenne de fraction,

$h_{coll.}$  (mm) : hauteur de pluie collectée par le dispositif d'échantillonnage,

$h_p$  (mm) : hauteur de pluie précipitée correspondante à la  $h_{coll.}$ ,

$h_{p.f.}$  (mm) : hauteur de pluie précipité de fraction,

$h_{p.i.}$  (mm) : perte initiale,

$V_{coll.}$  (L) : volume de pluie collectée par le dispositif d'échantillonnage,

$V_{coll.f.}$  (L) : volume de pluie de fraction collectée,

$t_{coll.}$  (h) : durée de collecte du dispositif d'échantillonnage,

$t_{coll.f.}$  (h) : durée de collecte de fraction,

$Cr_{d.éch.}$  : coefficient de récupération du dispositif d'échantillonnage,

$S_{proj.}$  (m<sup>2</sup>) est la surface projetée des toitures.

Selon les équations 7 et 8, pour calculer l'intensité moyenne sur un événement pluvieux collecté et l'intensité moyenne de fraction, il faut préciser le volume total de pluie collectée par le dispositif d'échantillonnage au cours de l'évènement ( $V_{coll.}$ ), la durée de collecte correspondante ( $t_{coll.}$ ), la durée de collecte de chaque fraction ( $t_{coll.f.}$ ), la perte initiale ( $h_{p.i.}$ ) et le coefficient de récupération du dispositif d'échantillonnage ( $Cr_{d.éch.}$ ).

Concernant le  $V_{coll.}$ , à cause de la variabilité de la quantité d'eau des événements pluvieux collectés, il existe des cas où la quantité d'eau de ruissellement d'évènement pluvieux

collectée est supérieure au volume rempli du dispositif d'échantillonnage. L'eau pénètre dans le bidon de PVC (où nous ne mesurons pas la qualité de l'eau) puis déborde du bidon. Il est nécessaire de clarifier le  $V_{coll.}$  dans différents cas.

La durée de collecte dont nous parlons ici est la durée correspondant au volume de pluie collectée par le dispositif d'échantillonnage. C'est-à-dire le moment où le dispositif d'échantillonnage commence à collecter jusqu'à la fin de collecte. A cause de l'absence de connaissance de la relation dans le temps entre la donnée pluviométrique et le remplissage de dispositif d'échantillonnage, le  $t_{coll.}$  est défini au travers de la perte initiale ( $h_{p.i.}$ ), de la hauteur de pluie précipitée correspondante à la  $h_{coll.}$  ( $h_p$ ), et du coefficient de récupération du dispositif d'échantillonnage ( $Cr_{d.éch.}$ ). Le  $t_{coll.f.}$  est réalisé par l'estimation de  $h_{p.f.}$  qui est calculé par le volume de pluie de fraction ( $V_{coll.f.}$ ) et le  $Cr_{d.éch.}$  et aussi par l'aide des données du pluviomètre. Donc, avant de calculer  $t_{coll.}$  et  $t_{coll.f.}$ , la perte initiale ( $V_{p.i.}$ ) et le coefficient de récupération du dispositif d'échantillonnage ( $Cr_{d.éch.}$ ) doivent être déterminés en premier.

Pour cela, il faut d'abord situer  $V_{coll.}$  par rapport au volume total d'eau de pluie collectée à chaque événement pluvieux collecté (appelé  $V_{tot.}$ ). Ensuite, il convient d'évaluer le volume des pertes initiales ( $V_{p.i.}$ ) et calculer le coefficient de récupération du dispositif d'échantillonnage ( $Cr_{d.éch.}$ ) (intégrant les pertes sur toiture, dans la gouttière et la descente et également au sein du dispositif d'échantillonnage). Enfin, il est alors possible de calculer les durées de collecte ( $t_{coll.}$  et  $t_{coll.f.}$ ) et les intensités moyennes ( $i_{moy.}$  et  $i_{moy.f.}$ ) correspondantes pour chaque événement pluvieux collecté.

### 2.1.1 Volume de pluie collectée par le dispositif d'échantillonnage ( $V_{coll.}$ )

Le schéma ci-dessous permet de situer  $V_{coll.}$  par rapport à  $V_{tot.}$  3 types d'événements sont à considérer (Figure 6-4). Il présente le diagramme schématique des systèmes expérimentaux (présentés en détail au chapitre 3). On peut observer deux types de système expérimental : l'un est un bidon seul (Figure 6-4-(a)) et l'autre comprend le dispositif d'échantillonnage de type fractionné et le bidon (Figure 6-4-(b)). Nous enregistrons le volume de l'eau de pluie collectée et la hauteur de pluie précipitée. Dans cette figure,  $V_{tot.}$  est le volume total d'eau de pluie collectée à chaque événement pluvieux collecté,  $V_{p.i.}$  correspond au volume de la perte initiale des systèmes expérimentaux ;  $V_{bidon}$  est le volume rempli du bidon seul (au maximum 80L) ;  $V_{d.éch.}$  est le volume rempli du dispositif d'échantillonnage (au maximum, 20,7 L pour le système de 9 flacons et 34,5 L pour le système de 6 flacons) ;  $t_{rempl.}$  est la durée du remplissage du dispositif d'échantillonnage.

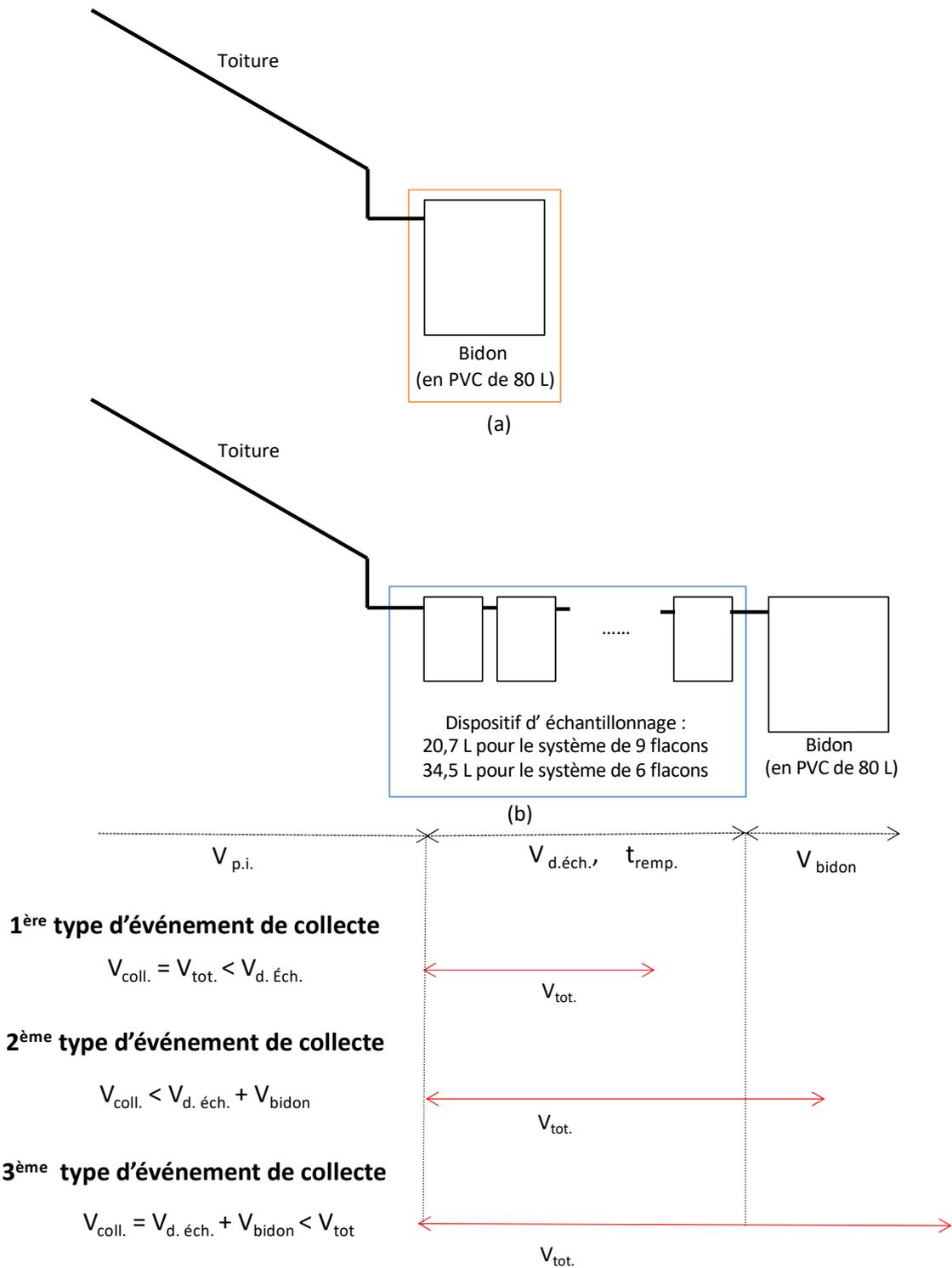


Figure 6-4. Le diagramme schématique du système expérimental.

(a) système avec bidon seul.

(b) système avec dispositif d'échantillonnage de type fractionné

Les 3 types d'évènements sont à considérer :

- 1<sup>er</sup> type : les flacons d'échantillonnage ne sont pas tous remplis, alors :

$$V_{\text{coll.}} = V_{\text{tot.}} < V_{\text{d. éch.}}$$

- 2<sup>ème</sup> type : les flacons d'échantillonnage sont remplis mais le bidon aval ne l'est que partiellement, alors :

$$V_{\text{coll.}} < V_{\text{d. éch.}} + V_{\text{bidon}}$$

- 3<sup>ème</sup> type : l'évènement va au-delà du remplissage de l'ensemble du système (flacons + bidon), alors :

$$V_{\text{coll.}} = V_{\text{d. éch.}} + V_{\text{bidon}} < V_{\text{tot}}$$

Remarque : dans le 3<sup>ème</sup> cas, le volume total n'est pas connu. Les évènements de ce type-là (qui ne concernent que 4 occurrences situées toutes à Romainville) ne peuvent pas être utilisés pour la suite des calculs. Dans le 2<sup>ème</sup> cas, dans la suite du travail, nous ne prenons en compte que l'ensemble des flacons remplis et pas le bidon partiellement rempli.

### **2.1.2 Perte initiale ( $V_{\text{p.i.}}$ ) et coefficient de récupération du dispositif d'échantillonnage ( $\text{Cr}_{\text{d.éch.}}$ )**

La perte initiale concerne une perte de l'eau causée par l'absorption, l'évaporation sur la toiture ou les autres facteurs tels le vent et la perte dans la gouttière et toute la partie du dispositif expérimental située en amont du premier flacon d'échantillonnage. Cette perte varie en fonction des sites, en raison des facteurs comme le type de matériaux, l'orientation et l'inclinaison de la toiture. Pour les trois sites d'étude différents, les pertes initiales ne sont pas les mêmes. Sur un même site d'étude, pour nos deux types de système expérimental (le système de bidon seul et de dispositif d'échantillonnage), on formule que la perte initiale est constante par site (i.e. identique d'un évènement à l'autre). Le coefficient de récupération du dispositif d'échantillonnage, à part les éléments amenant la perte initiale mentionnée ci-dessus, est lié aussi à la perte dans toute la partie du dispositif d'échantillonnage au cours de l'échantillonnage. Nous postulons qu'il est aussi constant par site. La Figure 6-5 illustre la méthode pour déterminer les différents coefficients. Les trois étapes suivantes sont utilisées :

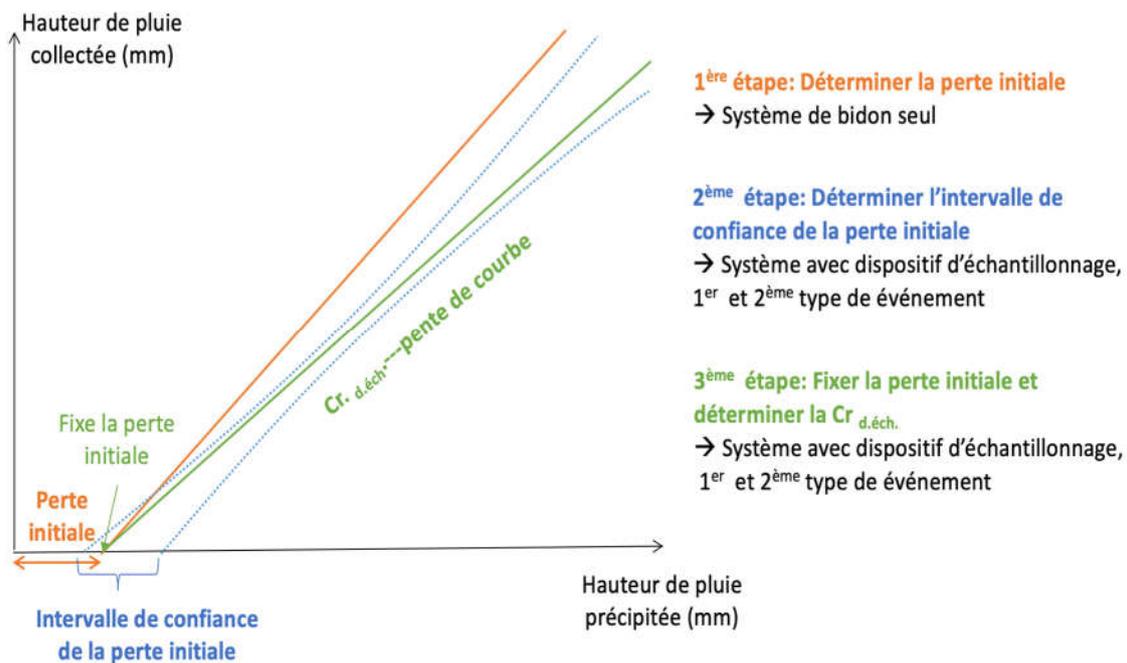


Figure 6-5. Méthode de détermination de  $V_{p.i.}$  et  $Cr_{d.éch.}$

- 1<sup>ère</sup> étape : détermination de la perte initiale ( $V_{p.i.}$ )

Dans les dispositifs d'échantillonnage, les pertes se composent de deux parties : une perte initiale causée par l'absorption, l'évaporation sur la toiture ou les autres facteurs telles que les vents violents et la perte dans la gouttière, et une perte continue due aux fuites dans le dispositif lui-même. Pour déterminer la perte initiale seule, nous utilisons les données de pluie collectées avec le système comprenant un bidon seul en aval, que nous supposons sans perte continue. Sur chaque site l'ensemble des évènements permet de tracer une droite de régression linéaire dont l'abscisse à l'origine correspond à la perte initiale.

- 2<sup>ème</sup> étape : Vérification de la perte initiale ( $V_{p.i.}$ )

Pour chaque évènement suivi avec le dispositif d'échantillonnage il est possible de représenter la hauteur d'eau collectée en fonction de la hauteur d'eau précipitée (évènements du 1<sup>ère</sup> type et du 2<sup>ème</sup> type). Nous traçons la droite de régression linéaire sur cet ensemble de point et l'intervalle de confiance à 95% correspondant. Ceci permet d'estimer l'intervalle de confiance de la perte initiale (intersection avec l'axe des abscisses). Si la perte initiale calculée à l'étape précédente se situe dans cet intervalle, nous considérons que cette première valeur peut être utilisée dans le système du dispositif d'échantillonnage. La perte initiale est considérée constante par site.

- 3<sup>ème</sup> étape : révision de droite de régression linéaire

Pour le système du dispositif d'échantillonnage, les pertes continues sont estimées en forçant la régression à avoir une abscisse à l'origine égale à la perte initiale. De cette façon, nous obtenons une droite de régression linéaire corrigée. La pente de cette droite correspond au coefficient de perte du dispositif d'échantillonnage ( $Cr_{d.éch.}$ ). On suppose que ce coefficient est constant par site. Au final, l'ensemble de cette approche permet de faire un bilan volumique de l'eau précipitée et d'estimer la hauteur de pluie précipitée avant que l'eau ne pénètre dans le dispositif (pertes initiales), la hauteur de pluie précipitée que le dispositif remplit et la hauteur de pluie précipitée de chaque fraction.

### **2.1.3 Durée de collecte correspondante à $V_{coll.}$ ( $t_{coll.}$ ) et durée de collecte de fraction ( $t_{coll.f.}$ )**

La durée de collecte est la durée entre le moment où le dispositif d'échantillonnage commence à collecter et moment de la fin de collecte par le dispositif. Comme indiqué dans la Figure 6-3, en raison de la perte initiale ( $V_{p.i.}$ ), l'instant du début de collecte correspond à l'instant de fin de la perte initiale. Il est déterminé à partir des enregistrements du pluviomètre.

Concernant le moment de la fin de collecte par le dispositif d'échantillonnage, pour le 1<sup>er</sup> type d'événement, la fin de la collecte est le dernier basculement d'auget du pluviomètre avant la récupération des échantillons. Mais pour les événements de 2<sup>ème</sup> type et 3<sup>ème</sup> type, il s'agit de l'instant de fin du remplissage du dispositif d'échantillonnage ( $t_{coll.} = t_{remp.}$ ). Nous utilisons pour cela le coefficient de récupération du dispositif d'échantillonnage ( $Cr_{d.éch.}$ ) pour estimer la hauteur de pluie correspondant au dispositif lorsqu'il est entièrement plein. Ensuite, pour chaque événement pluvieux collecté, nous pouvons déterminer le moment où le dispositif a fini de se remplir. L'écart entre le début de collecte et la fin de la collecte est la durée de collecte par le dispositif d'échantillonnage ( $t_{coll.}$ ). Donc, pour le 1<sup>er</sup> type d'événement, la  $t_{coll.}$  correspond à la durée entre le moment du commencement d'accumulation et le moment de la fin de la pluie. Pour le 2<sup>ème</sup> type et le 3<sup>ème</sup> type d'événement, la  $t_{coll.}$  correspond à la durée entre le moment du commencement d'accumulation et la fin du remplissage du dispositif.

Donc, après avoir déterminé les volumes de pluie collectée par le dispositif d'échantillonnage et les durées de collecte correspondantes pour tous les événements de collecte sur les trois sites, on peut calculer l'intensité moyenne pour chaque événement de collecte. Pour résumer, l'intensité moyenne pour les trois types d'événements s'écrit sous la forme suivante :

- Pour le 1<sup>er</sup> type d'événements :

$$i_{moy.} = \frac{V_{tot.}}{t_{coll.} \times S_{proj.} \times Cr_{d.éch.}} + \frac{h_{p.i.}}{t_{coll.}} \quad (\text{Équation 26})$$

- Pour le 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> types d'événements :

$$i_{moy.} = \frac{V_{d.éch.}}{t_{remp.} \times S_{proj.} \times Cr_{d.éch.}} + \frac{h_{p.i.}}{t_{remp.}} \quad (\text{Équation 27})$$

Pour des fractions d'événement, nous faisons la même chose. La  $t_{coll.f.}$  de chaque fraction de chaque événement peut être estimée à partir de la droite de régression linéaire (comme indiqué en couleur vert sur la Figure 6-3) et l'intensité moyenne de fraction est calculée selon l'équation 8.

## 2.2 Résultats d'intensité moyenne de collecte pour les trois sites d'étude

### 2.2.1 Données utilisées

Après la mise en place les deux types de système expérimental de collecte, nous avons recueilli un nombre de données sur les trois sites d'étude.

Le Tableau 6-2 présente le nombre d'événements de collecte sur les trois sites d'étude qui sont récupérés par différents systèmes et sont divisés en trois types selon le volume de l'eau collectée.

Tableau 6-2. Nombre d'événement de collecte sur les sites d'étude

Nombre de collecte	Système avec bidon seul	Système avec dispositif d'échantillonnage de type fractionné		
		1 <sup>ère</sup> type	2 <sup>ème</sup> type	3 <sup>ème</sup> type
Vincennes	4	11	2	0
Romainville	5	4	9	4
Tianjin	3	4	5	0

En dehors des quatre pluies de Romainville dont le volume d'eau de pluie collecté dépasse le volume total du dispositif expérimental, les collectes sont du 1<sup>er</sup> type ou du 2<sup>ème</sup> type.

### 2.2.2 Perte initiale et coefficient de récupération du dispositif d'échantillonnage

Pour les trois sites d'étude, nous calculons d'abord la perte initiale de chaque site d'étude et les vérifions, puis fixons la perte initiale et recalculons le coefficient de récupération du dispositif d'échantillonnage.

- **Perte initiale :**

Les droites de régression linéaires sont créées en utilisant les données de hauteur de pluie collectée par le système d'un bidon seul. L'interception des de régression linéaire sur l'axe x correspond la hauteur de pluie de la perte initiale. La hauteur de la perte initiale est égale au volume de la pluie de la perte initiale divisée par la surface projetée de toiture.

**a) Vincennes**

La Figure 6-6 ci-après présente pour Vincennes les corrélations linéaires entre la hauteur de pluie précipitée par collecte et la hauteur de pluie collectée. L'équation de régression et la valeur de significativité de la régression sont indiquées en haut de la figure.

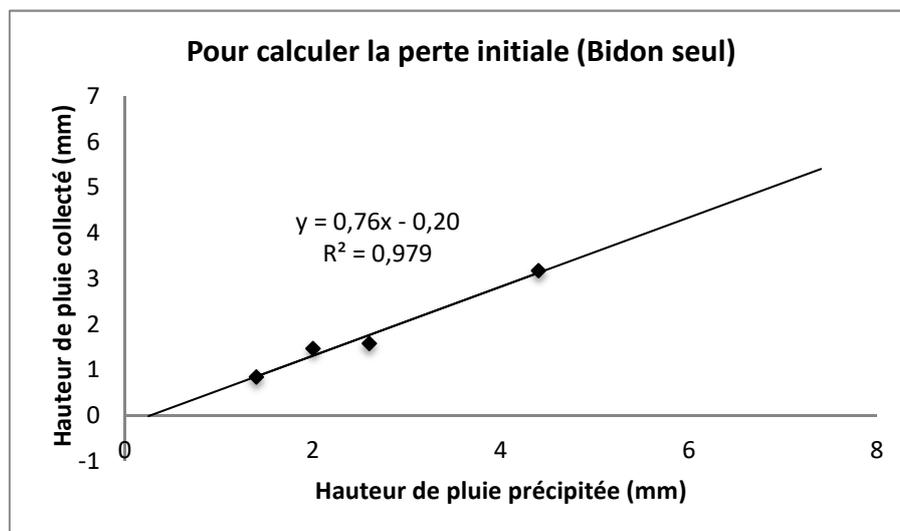


Figure 6-6. Perte initiale à Vincennes-système du bidon seul

L'interception des de régression linéaire sur l'axe x égale à 0,27, donc, la perte initiale déterminée par les données du système d'un bidon seul est de 0,27mm.

Puis, en utilisant les données du système du dispositif d'échantillonnage, la relation linéaires entre la hauteur de pluie collectée et de pluie précipitée est illustrée dans la Figure 6-7. Elle est en adéquation avec la régression. En plus des données observées et de la régression, il est également de coutume de représenter l'intervalle de confiance de 95% de la pente. L'équation du modèle est :  $y = 0,70x - 0,32$  ( $R^2 = 0,964$ ).

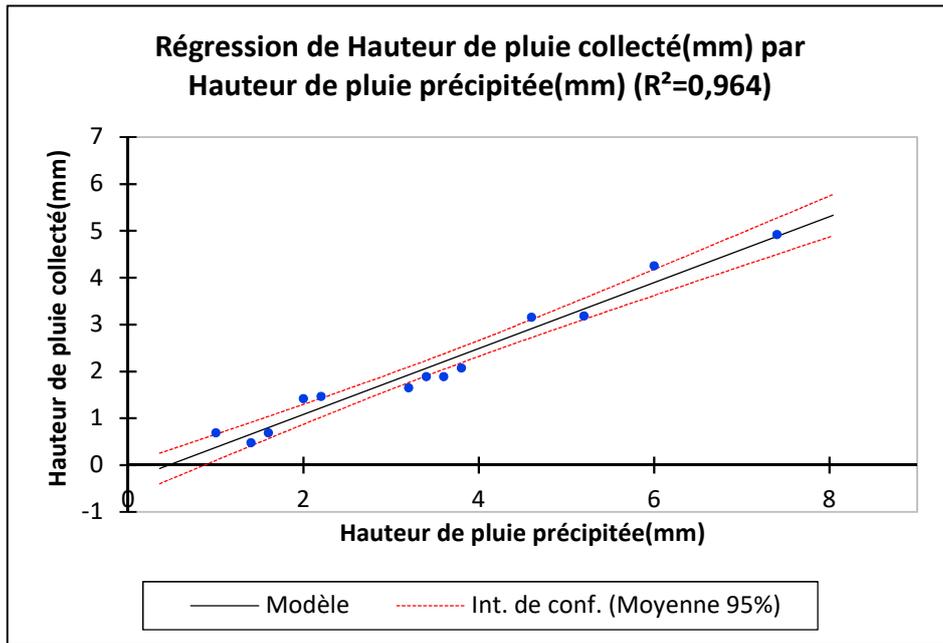


Figure 6-7. Intervalle de confiance à Vincennes-système du dispositif d'échantillonnage

Nous utilisons l'intersection de la ligne obtenue par analyse statistique et de l'axe des x pour déterminer l'intervalle de confiance. La limite inférieure de la perte initiale correspond l'intersections de l'axe des x et la courbe de limite supérieur alors que la limite supérieure de la perte correspond l'intersections de l'axe des x et la courbe de limite inférieur. L'intervalle de confiance de la perte initiale sont l'intervalle entre les deux intersections. A l'aide de la Figure 6-7, nous pouvons calculer la limite supérieure de la perte : 0,86mm (point correspondant à l'intersection de la courbe limite inférieur de l'intervalle de confiance et de l'axe des x). L'intersection de la courbe limite supérieure de l'intervalle de confiance et de l'axe x est égale à -0,03, ce qui n'a pas de sens dans notre cas. Nous supposons que la limite inférieure est supérieure à 0. Donc, l'intervalle de confiance à 95% de la perte initiale à Vincennes est de [0 ; 0,86]mm. Il contient la valeur estimée de la perte initiale de 0,27. Nous pourrions donc fixer que pour Vincennes, la perte initiale prise en considération des deux systèmes expérimentaux est de 0,27mm.

### b) Romainville

Comme à Vincennes, la Figure 6-8 ci-après représente pour Romainville l'étude des corrélations linéaires entre la hauteur de pluie précipité par collecte et la hauteur de pluie collectée. L'équation de régression et la valeur de significativité de la régression sont indiquées en haut de la figure.

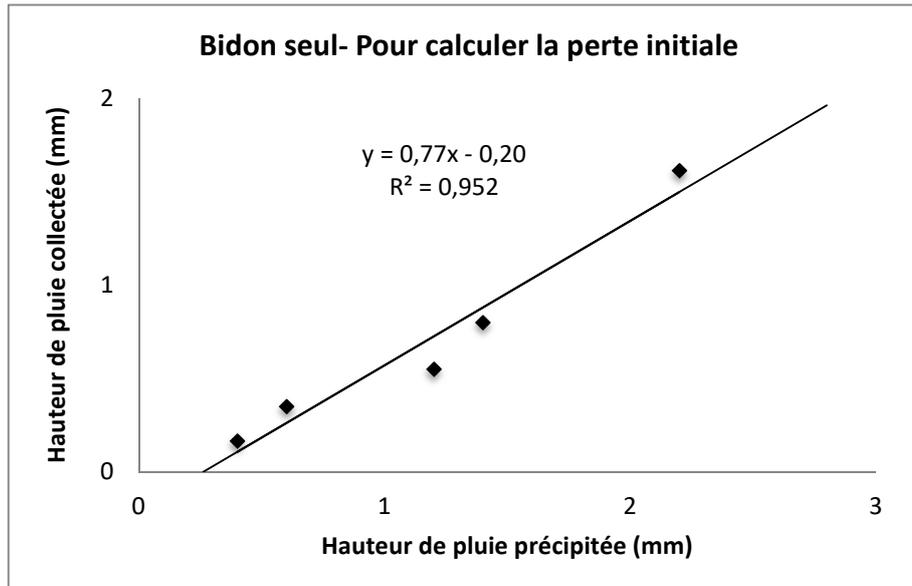


Figure 6-8. Perte initiale à Romainville-système du bidon seul

L'interception de la droite avec l'axe des x vaut 0,26mm, donc, la perte initiale déterminée par les données du système d'un bidon seul est de 0,26 mm.

La relation linéaire entre la hauteur de pluie collectée et de pluie précipitée en utilisant les données du système du dispositif d'échantillonnage est représentée dans la Figure 6-9. Les données observées, la régression et l'intervalle de confiance de 95% de la pente sont représentés dans la figure. L'équation du modèle est :  $y = 0,73x - 0,23$  ( $R^2 = 0,909$ ).

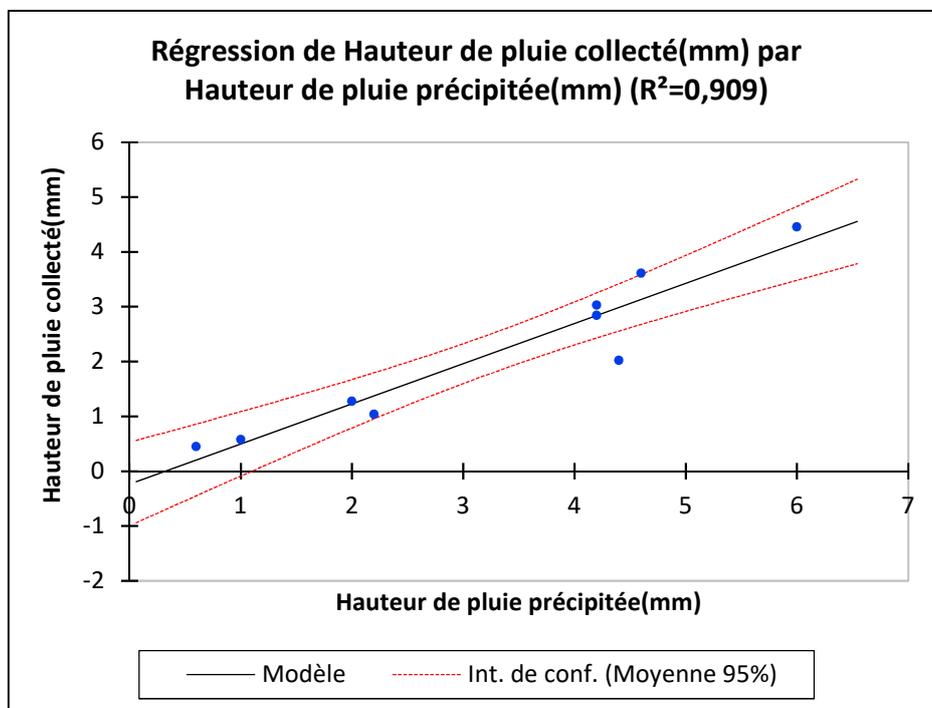


Figure 6-9. Intervalle de confiance à Romainville-système du dispositif d'échantillonnage

De même, nous utilisons l'intersection de la ligne obtenue par analyse statistique et de l'axe des x pour déterminer l'intervalle de confiance. Nous pouvons calculer que l'intersection de la limite inférieure et de l'axe des x est égale à 1,09. La limite supérieure de la perte est donc 1,09 mm. Pour la limite inférieure de la perte, l'intersection de la courbe de limite supérieure et de l'axe de x est négative. Nous supposons que la limite inférieure est supérieure à 0. L'intervalle de confiance de la perte est de [0 ;1,09] et 0,26 est dans cet intervalle. Donc, pour Romainville, la perte initiale des deux systèmes expérimentaux pourra être fixée à 0,26 mm.

### c) Tianjin

La Figure 6-10 ci-après représente donc pour Tianjin d'étude les corrélations linéaires entre la hauteur de pluie précipité par collecte et la hauteur de pluie collectée. Nous pouvons calculer la perte initiale selon l'équation de régression.

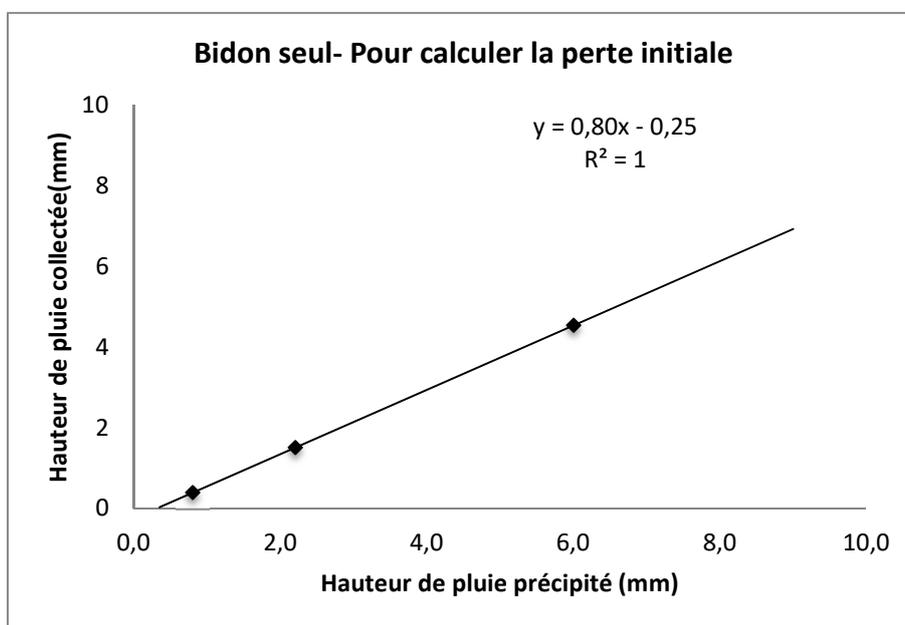


Figure 6-10. Perte initiale à Tianjin-système du bidon seul

L'interception du droit avec l'axe des x vaut à 0,31mm, donc, la perte initiale déterminée par les données du système d'un bidon seul est de 0,31 mm.

La Figure 6-11 montre la relation linéaire entre la hauteur de pluie collectée et de pluie précipitée en utilisant les données du système du dispositif d'échantillonnage. Des données observées, la régression et l'intervalle de confiance 95% sont représentés dans cette figure. L'équation du modèle est :  $y = 0,76x - 0,25$  ( $R^2 = 0,9714$ ).

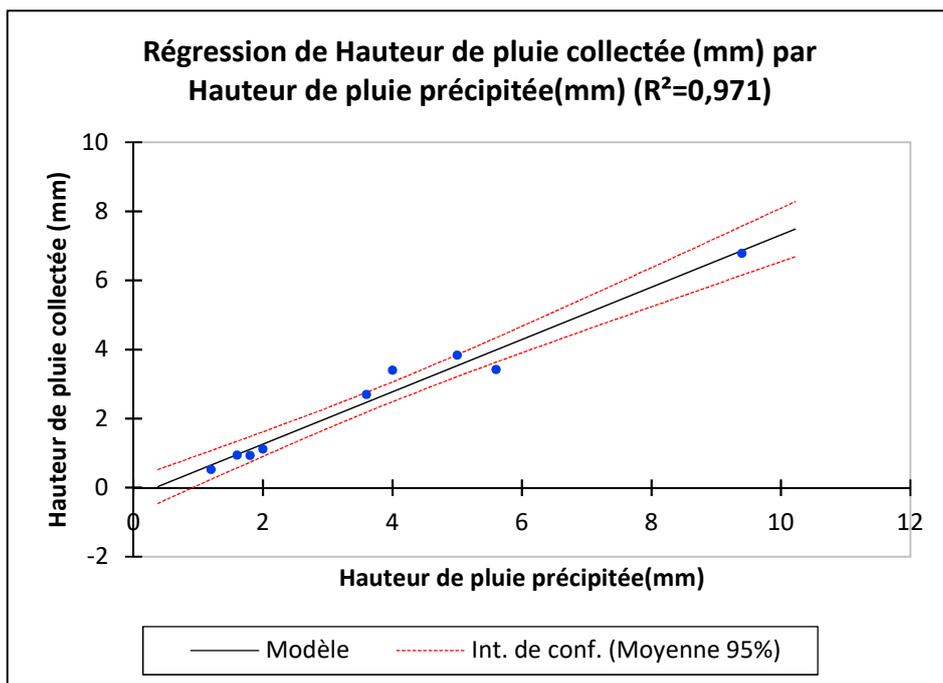


Figure 6-11. Intervalle de confiance à Tianjin-système du dispositif d'échantillonnage

Nous déterminons l'intervalle de confiance de la perte en calculant l'intersection de la courbe de l'intervalle de confiance à 95% et de l'axe des x. Ici : 0,84mm donc la limite supérieure de la perte est de 0,84mm. L'intersection de la courbe de la limite supérieure et de l'axe des x est égale à -0,4. Or elle doit être supérieure à 0. L'intervalle de confiance de la perte initiale est donc [0 ; 0,84] mm. 0,31mm étant dans l'intervalle de confiance de la perte et le système du dispositif d'échantillonnage efficace, on pourra fixer pour Tianjin, la perte initiale des deux systèmes expérimentaux à 0,31mm.

Pour les trois sites d'étude, l'interception des droites de régression linéaire sur l'axe x sont respectivement égales à 0,27mm, 0,26mm et 0,31mm pour Vincennes, Romainville et Tianjin. Le Tableau 6-3 représente la perte initiale pour les trois sites d'étude.

Tableau 6-3. Perte initiale sur les sites d'étude

	Surface projetée de toit (m <sup>2</sup> )	Perte initiale	
		Hauteur de pluie (mm)	Volume (L)
Vincennes	10	0,27	2,7
Romainville	20	0,26	5,2
Tianjin	9,23	0,31	2,9

Dans cette étude, bien que les sites d'exposition présentent des caractéristiques différentes, les pertes initiales obtenues sont sensiblement égales, les écarts observés n'excédant généralement pas 15%.

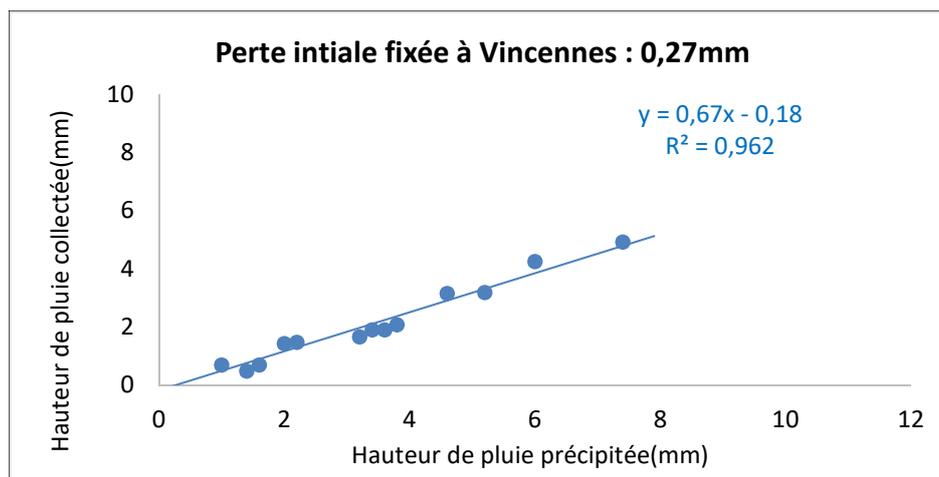
Les pertes initiales sur ces trois sites sont inférieures à celles des autres études sur des toitures : 0,4mm de perte initiale rapportée par Chapman et Salmon (1996) ; 0,84mm pour

le toit en tuile terre cuite par Farrenay et al. (2011) ; 2 mm de la perte initiale dans l'étude de Voyde et al. (2010) et 12,5mm pour le toit vert dans l'étude de Mobilia et Longobardi (2015). De nombreux facteurs affectent cette perte initiale (et le coefficient d'apport), tel que les hauteurs de pluie des événements (Hollis and Ovenden (1988)) et la pente de toiture (Pitt (1987)).

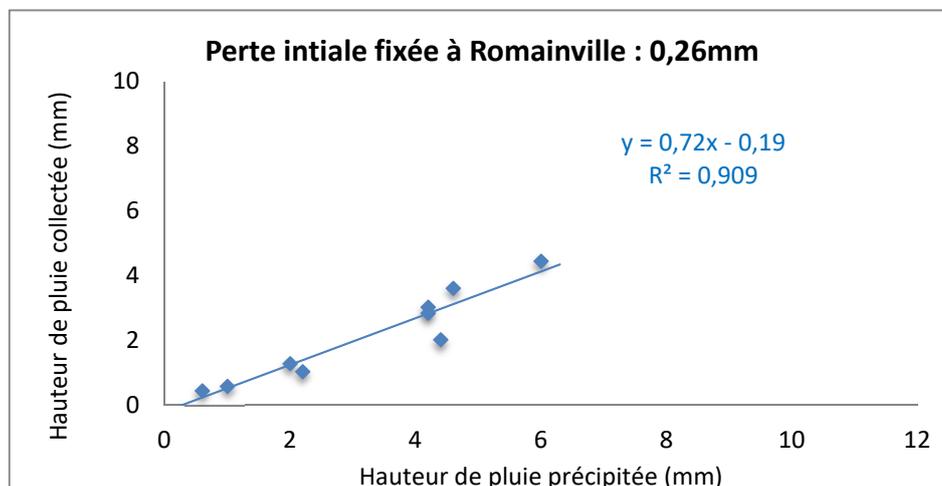
De plus, en observant la Figure 6-6, la Figure 6-8 et la Figure 6-10, nous constatons que, quel que soit le site étudié, les pentes de la courbe ne sont jamais égales à 1 (0,76 à Vincennes, 0,77 à Romainville et 0,80 à Tianjin), cela indique que nous avons aussi des pertes continues tout le temps en cours d'événement pluvieux même sur le bidon seul.

- **Coefficient de récupération du dispositif d'échantillonnage**

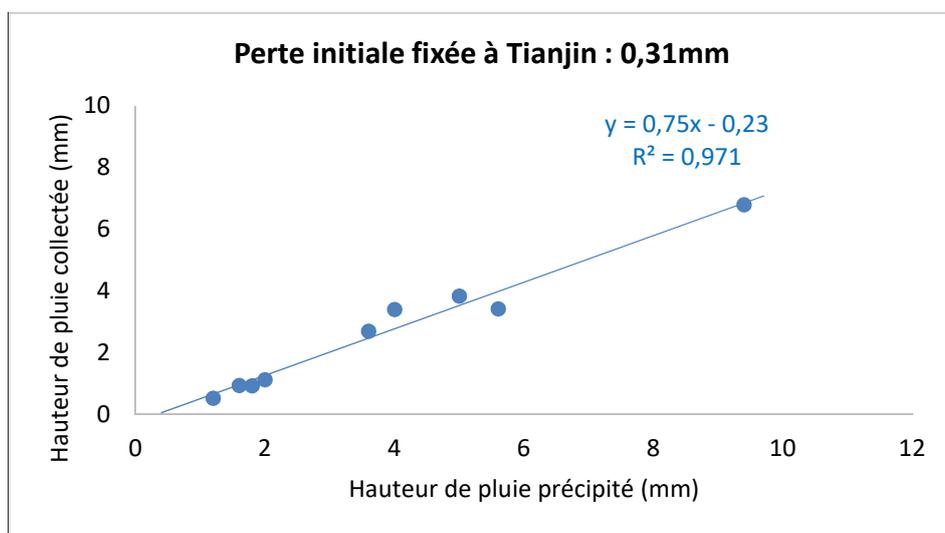
Après avoir fixé les pertes initiales selon les valeurs déterminées précédemment, nous créons sur chaque site la nouvelle droite de régression linéaire en utilisant les données acquises par le dispositif d'échantillonnage seulement (représentée en couleur bleu dans la Figure 6-12 ci-après). Les nouvelles équations de régression et valeurs de significativités de la régression sont indiquées en haut des figures. Les pentes des droites obtenues sont les coefficients de récupération du dispositif d'échantillonnage.



(a) Vincennes



(b) Romainville



(a) Tianjin

Figure 6-12. Coefficients de récupération du dispositif d'échantillonnage

Le Tableau 6-4 présente une synthèse des équations de régression linéaire pour les trois sites d'étude.

Tableau 6-4. Synthèse des équations de régressions linéaires pour les trois sites d'étude

	Perte initiale ( $V_{p.i.}$ ) (mm)	Équation	Significativité de la régression
Vincennes	0,27	$y = 0,67x - 0,18$	0,962
Romainville	0,26	$y = 0,72x - 0,19$	0,909
Tianjin	0,31	$y = 0,75x - 0,23$	0,971

Les coefficients de récupération pour les trois sites sont respectivement égaux à 0,67, 0,72 et 0,75. Ces coefficients de récupération sont inférieurs à ceux indiqués dans certains travaux que nous avons mentionnés dans la discussion précédente sur la perte initiale : 0,9 dans le travail de Chapman et Salmon (1996) et 0,95 dans le travail de Farrenay et al. (2011). Mais ils demeurent cohérents par rapport aux coefficients de ruissellement attendus (d'un toit de terre cuite avec une valeur de 0,5 dans l'étude de Vialle (2011), d'un toit en tuile de ciment avec un valeur de 0,75 dans l'étude de Houry-Nolde (2006) ; d'un toit en asphalté avec un valeur de 0,7 dans l'étude de Lindeburg, M. R. (1994)). Cela suggère que la perte liée à des fuites pourrait être relativement faible dans notre système de collecte, qui apparait donc efficace. En plus, comme on a utilisé le même système d'échantillonnage, cette valeur est plus susceptible d'être liée aux caractéristiques des sites comme les matériaux des toits, l'orientation et l'inclinaison, etc.

- **Durée de collecte par le dispositif d'échantillonnage (  $t_{coll.}$  )**

Pour calculer la durée de collecte par le dispositif d'échantillonnage, il faut déterminer le moment du début d'accumulation et le moment de la fin de collecte par le dispositif.

Pour le 1<sup>er</sup> type d'événement,  $t_{coll.}$  correspond à la durée entre le moment du commencement d'accumulation et le moment de la fin de la pluie. Pour le 2<sup>ème</sup> type et le 3<sup>ème</sup> type d'événement,  $t_{coll.}$  correspond à la durée entre le moment du commencement d'accumulation et le moment de fin de remplissage du dernier flacon d'échantillonnage. Les durées de chaque fraction peuvent aussi être estimées.

A l'aide des données du pluviomètre, nous pouvons déterminer le moment où la pluie commence à s'accumuler dans le dispositif d'échantillonnage. Le pluviomètre à auget basculeur est utilisé dans cette étude avec un basculement tous les 0,20 mm de pluie (la précision est de 5%, soit 0,01mm). Dans notre cas, nous supposons que la vitesse de précipitations est constante pendant chaque 0,20 mm de pluie. La méthode de l'interpolation linéaire est utilisée pour déterminer le moment correspondant à la perte initiale ( $t_{p.i.}$ ). Entre la hauteur de pluie cumulée collectée de 0,20 mm et 0,40 mm de coordonnées respectivement (0,20,  $t_1$ ) et (0,40,  $t_2$ ), interpolation est donnée par la formule suivante :

$$t_{p.i.} = \frac{t_2 - t_1}{0,20} ( p.i. \quad 0,20) + t_1 \text{ (Équation 28)}$$

Pour le 1<sup>er</sup> type d'événement, nous faisons l'hypothèse que le moment de la fin de collecte correspond à l'instant où l'auget du pluviomètre bascule pour la dernière fois au cours de l'événement pluvieux collecté considéré ( $t_{d.b.}$ ). Dans ce cas-là, la durée de collecte est calculée à l'aide de la formule suivant :

$$t_{coll.} = t_{d.b.} - t_{p.i.}$$

Pour le 2<sup>ème</sup> type et le 3<sup>ème</sup> type des collectes où  $V_{coll.} = V_{d.éch.}$ , le moment de la fin de collecte ( $t_{m. remp.}$ ) correspond au moment de fin de remplissage des dispositifs d'échantillonnage et est déterminé par interpolation linéaire des instants de basculements des augets du pluviomètre qui encadre l'instant où le volume précipité (corrigé des pertes initiales et continues) correspond au volume total des fractions collectées. La durée de collecte est alors de :

$$t_{coll.} = t_{m. remp.} - t_{p.i.}$$

En fait, nous négligeons la question du temps de transfert de l'aval du « bassin versant » au dispositif de collecte : la dynamique de remplissage des bidons dépend cependant aussi du temps de parcours des gouttes jusqu'à la gouttière, qui diffère selon l'endroit de la toiture où elles tombent. Il peut y avoir un décalage entre la fin de la perte initiale et le début de remplissage du premier flacon, et aussi un décalage entre la fin de la pluie et la fin du remplissage. Nous faisons l'hypothèse qu'une goutte qui entre dans la gouttière se retrouve instantanément dans le dispositif dès la perte initiale passée. De même nous considérons que les apports cessent simultanément à la fin de la précipitation.

### 2.2.3 Volume de pluie collectée par le dispositif d'échantillonnage ( $V_{coll.}$ ) et volume de pluie de fraction collectée ( $V_{coll.f.}$ )

Pour le 1<sup>er</sup> type d'événements, le  $V_{coll.}$  est le volume total de l'eau collectée de l'événement, et pour les 2<sup>èmes</sup> et 3<sup>ème</sup> types d'événements, le  $V_{coll.}$  est égal au volume rempli du dispositif d'échantillonnage. Les hauteurs de pluie précipitée de remplissage peuvent être calculées par les équations présentées dans le Tableau 6-4. Le Tableau 6-5 représente les valeurs du volume rempli du dispositif d'échantillonnage ( $V_{d. éch.}$ ) et les hauteurs de pluie précipitées de remplissage correspondantes. En utilisant la méthode de l'interpolation linéaire, les instants correspondant à la hauteur de pluie précipitée de remplissage sont déterminés.

Tableau 6-5. Hauteur de pluie précipitée de remplissage de dispositif d'échantillonnage sur sites d'étude

		Volume rempli dispositif d'échantillonnage ( $V_{d. éch.}$ )	Hauteur de pluie rempli de dispositif d'échantillonnage ( $h_{coll.}$ )	Hauteur de pluie précipitée de remplissage ( $h_{d. éch.}$ )
Vincennes	6 flacons	34,5L	3,45 mm	5,42 mm
	9 flacons	20,7L	2,07 mm	3,36 mm
Romainville		20,7 L	1,04 mm	1,71 mm
Tianjin		20,7 L	2,17 mm	3,20 mm

Puis nous calculons les intensités moyennes correspondantes pour chaque événement pluvieux collecté en utilisant l'équation 9 et l'équation 10 fournies dans la section 2.1.1.3 ci-dessus, ainsi que l'intensité moyenne de fraction pour toutes les fractions des événements pluvieux. Le Tableau 6-6 représente les valeurs du volume de pluie de chaque fraction collectée ( $V_{coll.f.}$ ), de la hauteur de pluie collectée de chaque fraction ( $h_{coll.f.}$ ), la hauteur de pluie précipité de fraction ( $h_{p. f}$ ) en cumulant.

Tableau 6-6. Hauteur de pluie précipitée des fractions sur trois sites d'étude

	$V_{coll.f.}$	$h_{coll.f.}$ (mm)	$h_{p. f}$ cumulée (mm)									
			F 1	F 2	F 3	F 4	F 5	F 6	F 7	F 8	F 9	
Vincennes (10m <sup>2</sup> )	6 flacons (2,3L*5 et 23L)	0,23 et 2,30							5,42	-		
	9 flacons (2,3L*9)	0,23	0,61	0,96	1,30	1,64	1,99	2,33	2,67	3,01	3,36	
Romainville (20m <sup>2</sup> )		0,12	0,42	0,58	0,74	0,90	1,06	1,22	1,38	1,54	1,70	

Tianjin (9,53m <sup>2</sup> )		0,24	0,63	0,95	1,27	1,59	1,91	2,23	2,55	2,87	3,19
----------------------------------	--	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Pour chaque fraction d'un événement pluvieux collecté, nous pouvons utiliser la méthode de l'interpolation linéaire pour estimer leurs durées de collecte de fraction et puis calculer l'intensité moyenne par fraction par l'équation 8.

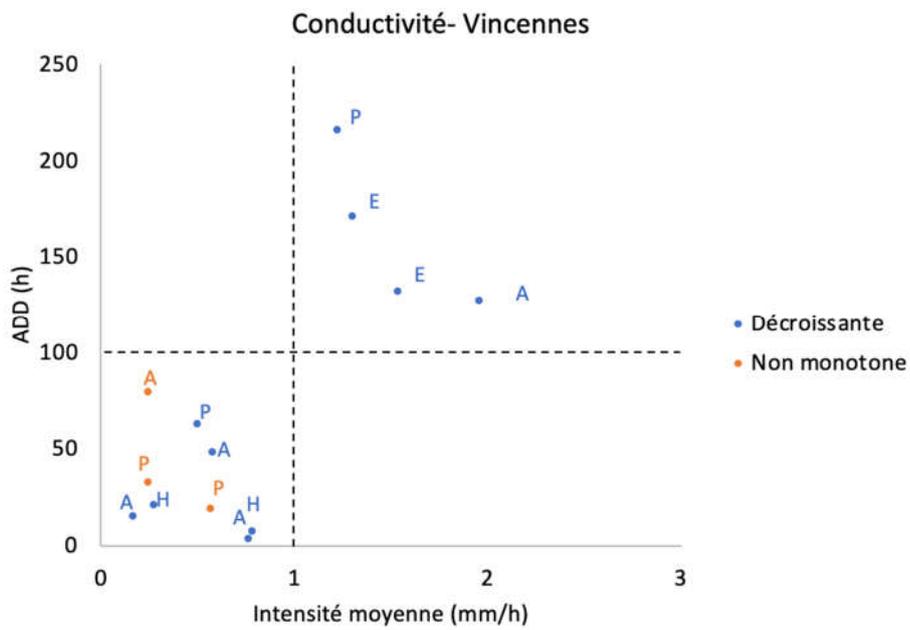
### 3. Interprétation- relation entre facteurs déterminants et l'évolution de la qualité.

Les facteurs qui sont susceptibles d'influer sur l'évolution de la qualité sont, d'une part, les facteurs liés au site d'étude, d'autre part, les facteurs propres à événement pluvieux. La nature et l'emplacement du toit, les météorologie, l'ADD, et l'intensité de pluie jouent des rôles importants. Dans cette section, nous devons d'abord déterminer l'impact de ces facteurs sur les types d'évolution de la qualité.

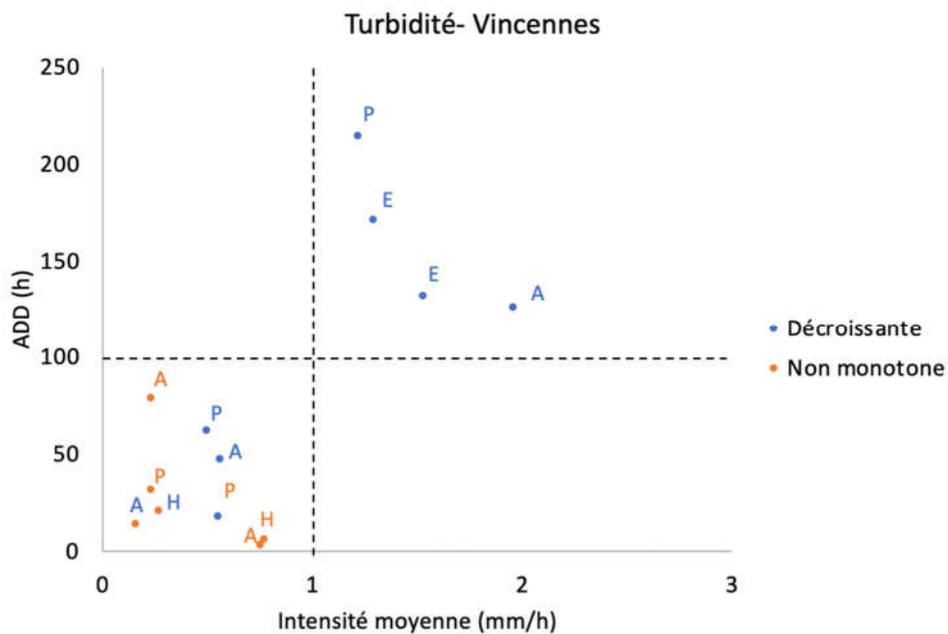
Pour chaque événement de collecte, il existe une durée de temps sec précédant l'évènement (ADD) et une intensité moyenne correspondante. Pour l'étude de l'évolution de la qualité de l'eau, nous avons vu qu'il existe deux types d'évolution : évolution décroissante et évolution non monotone. Les figures qui suivent permettent d'avoir un aperçu de l'influence relative de ces différents facteurs. Pour un site et un indicateur donné (conductivité ou turbidité), les distributions des différents événements de collecte en termes d'intensité moyenne sur un événement de collecte en fonction de l'ADD sont présentées dans les figures ci-dessous. Les points en bleu correspondent alors aux collectes avec une évolution décroissante, les points en rouge à une évolution non monotone. La saison de chaque collecte est également indiquée *via* une lettre : P pour printemps, E pour été, A pour automne et H pour hiver. Dans cette section, nous choisissons de présenter les résultats dans l'ordre Vincennes, Tianjin puis Romainville, ce dernier cas ayant des caractéristiques spécifiques.

#### 3.1.1 Vincennes

La Figure 6-13 ci-après présente les distributions des collectes à Vincennes.



(a) Distribution des collectes sur la turbidité à Vincennes



(b) Distribution des collectes sur la conductivité à Vincennes

Figure 6-13. Distribution des collectes en termes d'intensité moyennes d'événement de collecte et de durée de temps sec précédant à Vincennes

Sur les 13 collectes prélevées à Vincennes, il y a 7 collectes relatives à la turbidité et 10 collectes relatives à la conductivité qui montrent des évolutions décroissantes. On peut observer que, quelle que soit la saison, pour des pluies avec de fortes intensités, des évolutions décroissantes ont été observées. La saison n'est pas un facteur explicatif. De

plus, plus l'intensité est faible, moins les bidons se remplissent vite et moins la dynamique d'évolution de la contamination est monotone. En prenant en compte pour tous les événements les deux paramètres, lorsque l'intensité moyenne de la pluie est supérieure à 1mm/h et la période sèche est supérieure à 100 h, on n'observe que des évolutions décroissantes. Les collectes montrant des évolutions non monotones se présentent principalement pour des pluies avec une faible intensité d'événement et une période sèche courte ; il y a aussi quelques évolutions décroissantes dans ce secteur ( $i_{\text{moy}} \leq 1\text{mm/h}$  et  $\text{ADD} \leq 100\text{h}$ ).

Nous résumons l'ADD, l'intensité moyenne de collecte, les valeurs maximum et médiane sur la conductivité et la turbidité de chaque collecte dans le Tableau 6-7.

Tableau 6-7. Grandeurs de conductivité et turbidité correspondant aux différents types d'évolution à Vincennes  
(Évolutions décroissante et non monotone avec différentes ADD et intensités moyennes)

Conductivité ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )														
Décroissante											Non monotone			
Valeurs de l'ADD et de l'intensité	ADD $\geq$ 100 h et intensité $\geq$ 1, 00 mm/h				ADD $\leq$ 100 h et intensité $\leq$ 1, 00 mm/h							ADD $\leq$ 100 h et intensité $\leq$ 1, 00 mm/h		
Date	13/05/2016	22/06/2015	26/07/2015	23/10/0016	18/05/2015	14/09/2015	17/11/2016	20/11/2016	20/12/2016	12/01/2017	19/05/2015	31/05/2015	23/09/2015	
ADD (h)	214,8	170,7	131,7	126,3	61,7	14,1	2,8	47	6,3	20,5	18,1	31,5	78,9	
Intensité (mm/h)	1,22	1,3	1,53	1,96	0,5	0,16	0,76	0,57	0,78	0,27	0,56	0,24	0,24	
Cond. Max	211	135	188	187	125	69	110	110	122	156	91	90	115	

Turbidité (NTU)														
Décroissante								Non monotone						
Valeurs de l'ADD et de l'intensité	ADD $\geq$ 100 h et intensité $\geq$ 1, 00 mm/h				ADD $\leq$ 100 h et intensité $\leq$ 1, 00 mm/h				ADD $\leq$ 100 h et intensité $\leq$ 1, 00 mm/h					
Date	13/05/2016	22/06/2015	26/07/2015	23/10/2016	18/05/2015	19/05/2015	20/11/2016	31/05/2015	14/09/2015	23/09/2015	17/11/2016	20/12/2016	12/01/2017	
ADD (h)	214,8	170,7	131,7	126,3	61,7	18,1	47	31,5	14,1	78,9	2,8	6,3	20,5	
Intensité (mm/h)	1,22	1,3	1,53	1,96	0,5	0,56	0,57	0,24	0,16	0,24	0,76	0,78	0,27	
Turb. Max	27,1	20,3	12,1	12,6	9,9	9,8	9,2	7,9	6,6	8,5	5,7	4,6	6,6	

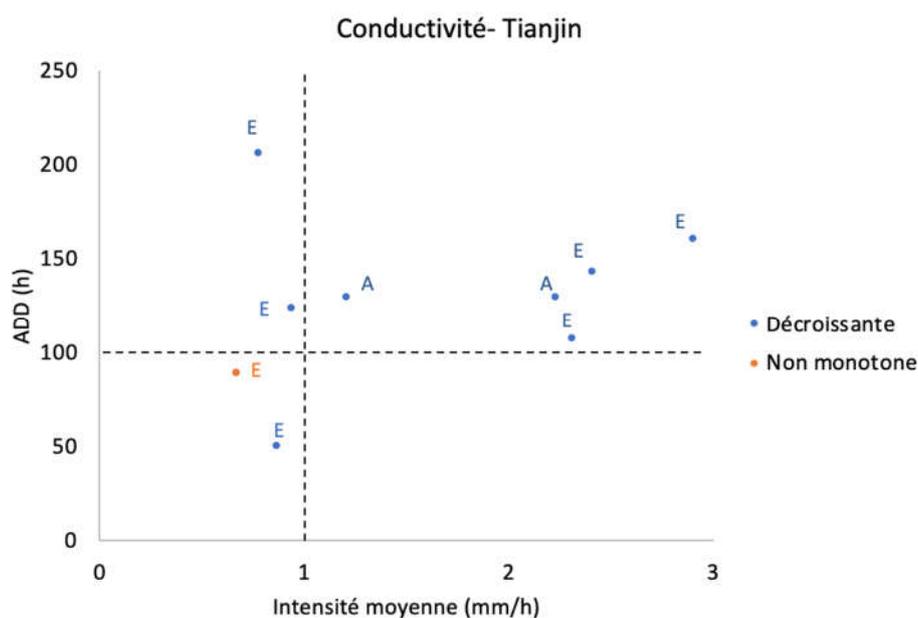
On peut observer que sauf pour la conductivité sur la collecte du 23 septembre 2015, les épisodes pour lesquels les évolutions sont décroissantes montrent des maximums de turbidité et de conductivité supérieurs aux épisodes d'évolution non monotone. Pour ces épisodes les concentrations maximales sont observées au début de l'évènement. Les raisons de ces concentrations élevées peuvent être diverses ; l'ADD et l'intensité moyenne de collecte peuvent vraisemblablement jouer un rôle important. Cela est cohérent avec les résultats sur les médianes des épisodes pluvieux présentés au chapitre 5 (Figure 5-27).

Toutefois, pour les collectes dont l'ADD est inférieure à 100h, et l'intensité moyenne inférieure à 1mm/h, il n'y a pas de comportement systématique. Toutefois, lorsque la turbidité et conductivités sont élevées, alors il y a un comportement décroissant. Ainsi, pour les collectes du 17 novembre 2016 et du 20 décembre 2016, alors que les ADD sont faibles (2,8 heures et 6,3 heures), mais les valeurs maximales de la conductivité élevées, égales à  $110 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  et à  $122 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  respectivement, l'évolution des deux collectes varie de manière décroissante, alors que pour la turbidité, l'évolution n'est pas monotone.

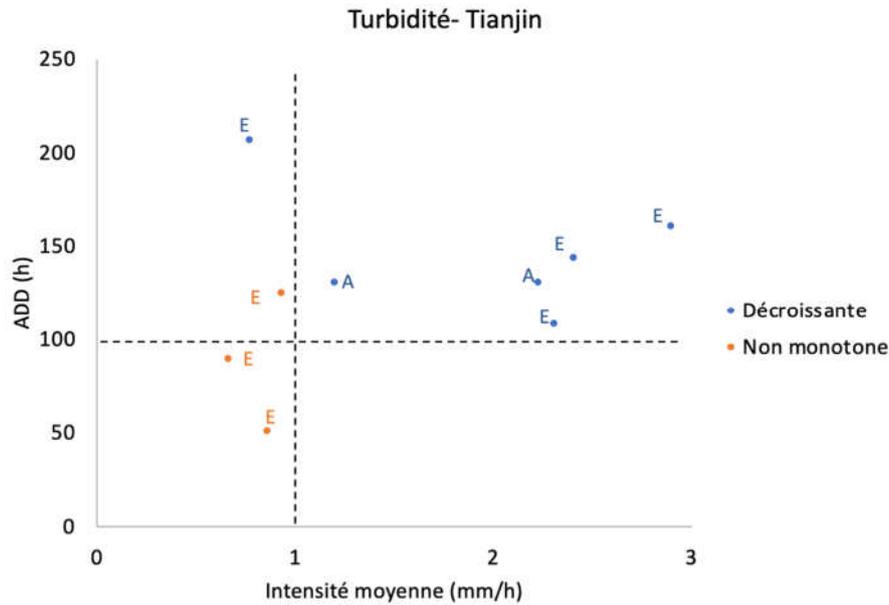
Concernant l'intensité moyenne sur un événement de collecte, nous constatons que lorsque l'intensité de la pluie est supérieure à 1 mm/h, l'évolution de la qualité des collectes est en fonction décroissante et lorsque l'intensité de la pluie est inférieure à 1mm/h, certaines évolutions de la qualité sont décroissantes mais d'autres ne le sont pas.

### 3.1.2 Tianjin

Comme à Vincennes, on fait la même analyse pour les collectes à Tianjin. La Figure 6-14 présente les distributions des collectes en termes de l'ADD et de l'intensité moyenne.



(a) Distribution des collectes sur la conductivité à Tianjin



(b) Distribution des collectes sur la turbidité à Tianjin

Figure 6-14 . Distribution des collectes en termes d'intensité moyennes d'événement de collecte et de durée de temps sec précédant à Tianjin

Nous observons que sur les 9 collectes prélevées à Tianjin, il y a 8 collectes pour la turbidité et 6 collectes pour la conductivité qui montrent des évolutions décroissantes. Les collectes d'évolution non monotones se présentent principalement avec pluie d'une faible intensité moyenne et une période sèche courte ( $i_{moy} \leq 1 \text{ mm/h}$  et  $ADD \leq 100 \text{ h}$ ). Pour les précipitations d'intensité élevée et une période sèche courte, et les précipitations avec une faible intensité de pluie et une période sèche importante, à la fois la turbidité et la conductivité montrent des évolutions également décroissantes. De plus, les saisons semblent n'avoir aucun effet sur la distribution. Comme vu sur Vincennes, lorsque la première fraction collectée est très contaminée, alors la dynamique d'évolution de la contamination est monotone et décroissante. Le Tableau 6-8 ci-dessous montre les grandeurs de conductivité et turbidité correspondantes aux différents types d'évolution à Tianjin, l'ADD et l'intensité moyenne de collecte.

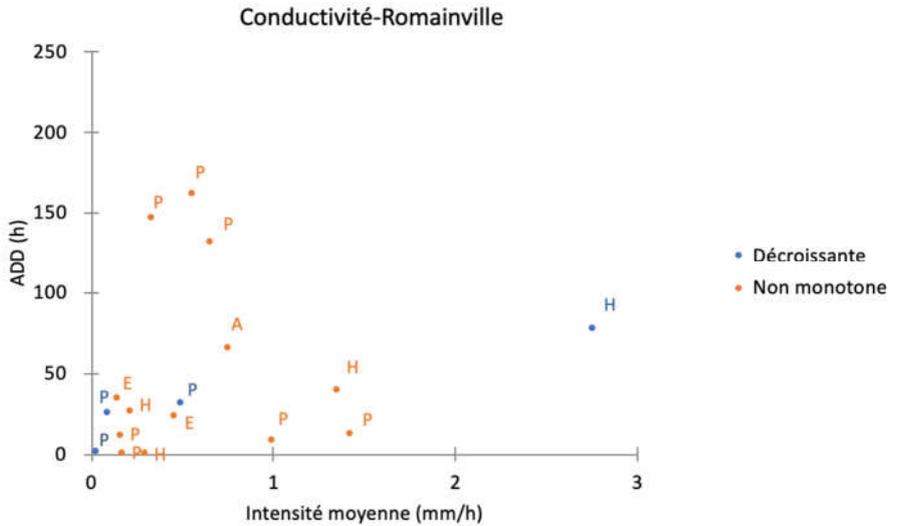
Tableau 6-8. Grandeurs de conductivité et turbidité correspondantes aux différents types d'évolution à Tianjin  
(Évolution décroissante et non monotone avec différentes ADD et intensités moyennes)

Conductivité ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )									
Décroissante									Non-monotone
Valeurs de l'ADD et de l'intensité	ADD $\geq$ 100 h et intensité $\geq$ 1, 00 mm/h					ADD $\geq$ 100 h et intensité $\leq$ 1, 00 mm/h		ADD $\leq$ 100 h et intensité $\leq$ 1, 00 mm/h	ADD $\leq$ 100 h et intensité $\leq$ 1, 00 mm/h
Date	20/07/2016	08/08/2016	09/12/2016	28/10/2016	22/10/2016	12/07/2016	02/08/2016	14/07/2016	25/07/2016
ADD (h)	160,8	144,1	108	130,2	130,45	206,7	124,67	50,56	89,6
Intensité (mm/h)	2,9	2,41	2,31	2,23	1,21	0,78	0,94	0,87	0,67
Cond. Max	344	301	190	340	506	440	646	372	172
Turbidité (NTU)									
Décroissante						Non-monotone			
Valeurs de l'ADD et de l'intensité	ADD $\geq$ 100 h et intensité $\geq$ 1, 00 mm/h					ADD $\geq$ 100 h et Intensité $\leq$ 1, 00 mm/h	ADD $\geq$ 100 h et Intensité $\leq$ 1, 00 mm/h	ADD $\leq$ 100 h et intensité $\leq$ 1, 00 mm/h	
Date	20/07/2016	08/08/2016	09/12/2016	28/10/2016	22/10/2016	12/07/2016	02/08/2016	14/07/2016	25/07/2016
ADD (h)	160,8	144,1	108	130,2	130,45	206,7	124,67	50,56	89,6
Intensité (mm/h)	2,9	2,41	2,31	2,23	1,21	0,78	0,94	0,87	0,67
Turb. Max	42,2	65,1	23,6	49,8	68,8	70,8	36,6	31,2	33,4

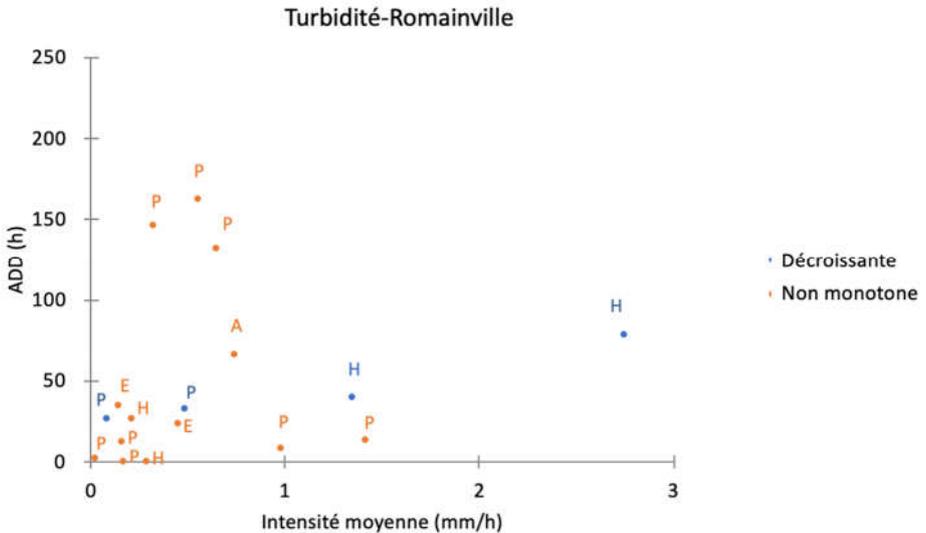
Par rapport aux résultats de Vincennes, on observe que la majorité des évolutions varient de manière monotone (89% pour la conductivité et 67% pour la turbidité). Ceci est principalement dû à des valeurs élevées de contamination dans la première fraction stockée, en liaison avec la différence d'environnement entre Tianjin et Vincennes. Le niveau de pollution de l'air à Tianjin est plus élevé, et les polluants qui peuvent être déposés dans l'eau également.

### 3.1.3 Romainville

La Figure 6-15 et le Tableau 6-9 permettent de caractériser le cas de Romainville.



(a) Distribution des collectes sur la conductivité à Romainville



(b) Distribution des collectes sur la turbidité à Romainville

Figure 6-15. Distribution des collectes en termes d'intensité moyennes d'événement de collecte et de période sèche antécédentes à Romainville

On peut observer que contrairement aux collectes obtenues à Vincennes et à Tianjin, la plupart des évènements sont caractérisés par une évolution non monotone. Sur 17 collectes, seulement 4 collectes en termes de la turbidité et 4 collectes en termes de la conductivité montrent des évolutions décroissantes. En effet, qu'il s'agisse de particules en suspension ou de matières dissoutes, la concentration de polluants à Romainville est trop faible par rapport aux deux autres sites d'étude. La qualité de l'eau de pluie collectée à Romainville est meilleure que celle récupérée à Vincennes et Tianjin. Parmi les évènements où l'un des deux facteurs (ADD ou intensité) est important, seuls deux évènements (conductivité et la turbidité du 2 février 2016 et l'évolution et turbidité du 12 septembre 2015) évoluent de manière décroissante. Toutes les autres collectes montrent pour les deux paramètres des évolutions non monotones même celles dont les conditions d'échantillonnage se rapprochent de celles des deux évènements précités.

Le Tableau 6-9 montre les valeurs maximums et médianes de conductivité et turbidité pour chaque collecte. Les conditions de collecte en termes de l'ADD et de l'intensité moyenne de collecte sont également présentées dans ce tableau.

Tableau 6-9. Grandeurs de la conductivité et la turbidité correspondantes aux différents types d'évolution à Romainville  
(Évolution décroissante et non monotone avec différente ADD et l'intensité moyenne)

		<b>Conductivité (<math>\mu\text{S.cm}^{-1}</math>)</b>																
		<b>Décroissante</b>				<b>Non-monotone</b>												
Valeurs de l'ADD et de l'intensité	ADD $\leq$ 100 h et Intensité $\geq$ 1, 00 mm/h	ADD $\leq$ 100 h et Intensité $\leq$ 1, 00 mm/h			ADD $\geq$ 100 h et Intensité $\leq$ 1, 00 mm/h			ADD $\leq$ 100 h et Intensité $\geq$ 1, 00 mm/h	ADD $\leq$ 100 h et Intensité $\leq$ 1, 00 mm/h									
Date	02/02/ 2016	05/11/ 2015	24/04 /2016	19/05 /2016	01/03/ 2016	09/05 / 2016	18/05 / 2016	09/12/ 2015	29/05 / 2016	25/11/ 2015	31/01 / 2016	23/02 / 2016	25/04 / 2016	10/05 / 2016	22/05 / 2016	12/06 / 2016	14/06/ 2016	
ADD (h)	78,1	26,1	32,2	1,9	146,6	162,3	131,9	39,5	12,9	66,2	0,3	26,4	12,0	8,6	0,3	23,4	34,7	
Intensité (mm/h)	2,75	0,09	0,48	0,02	0,32	0,55	0,65	1,35	1,41	0,74	0,17	0,21	0,16	0,98	0,29	0,45	0,14	
Cond. Max	37	38	32	31	62	52	45	65	53	51	21	28	45	41	11	41	55	
		<b>Turbidité (NTU)</b>																
		<b>Décroissante</b>				<b>Non-monotone</b>												
Valeurs de l'ADD et de l'intensité	ADD $\leq$ 100 h et Intensité $\geq$ 1, 00 mm/h	ADD $\leq$ 100 h et intensité $\leq$ 1, 00 mm/h			ADD $\geq$ 100 h et Intensité $\leq$ 1, 00 mm/h			ADD $\leq$ 100 h et Intensité $\geq$ 1, 00 mm/h	ADD $\leq$ 100 h et Intensité $\leq$ 1, 00 mm/h									
Date	09/12/ 2015	02/02/ 2016	05/11/ 2015	24/04/ 2016	01/03 / 2016	09/05/ 2016	18/05/ 2016	29/05/ 2016	25/11/ 2015	31/01/ 2016	23/02/ 2016	25/04/ 2016	10/05/ 2016	19/05/ 2016	22/05/ 2016	12/06/ 2016	14/06 /2016	
ADD (h)	39,5	78,1	26,1	32,2	146,6	162,3	131,9	12,9	66,2	0,3	26,4	12,0	8,6	1,9	0,3	23,4	34,7	
Intensité (mm/h)	1,35	2,75	0,09	0,48	0,32	0,55	0,65	1,41	0,74	0,17	0,21	0,16	0,98	0,02	0,29	0,45	0,14	
Turb. Max	7,1	8,4	8,0	7,4	11,0	15,9	8,4	3,8	8,2	2,1	2,2	8,0	3,0	2,7	3,8	5,4	8,3	

D'après ce tableau, on peut observer que, contrairement aux résultats des deux autres sites, la forme de l'évolution n'est pas liée aux valeurs de turbidité et de conductivité maximales. Certaines collectes ayant une conductivité et une turbidité plus élevées que des épisodes monotones varient de façon non monotone. Cela est dû vraisemblablement à la très faible contamination des eaux collectées sur Romainville, toutes les valeurs de turbidité et conductivité sont inférieures à celles mesurées sur Vincennes et Tianjin. Pour la conductivité, les valeurs de collecte du 1<sup>er</sup> mars 2016 et du 9 mai 2016 sont maximales sur Romainville ( $62 \mu\text{S.cm}^{-1}$  et  $52 \mu\text{S.cm}^{-1}$  respectivement), mais elles sont toujours inférieures au minimum des deux autres sites d'étude ( $69 \mu\text{S.cm}^{-1}$  à Vincennes et  $172 \mu\text{S.cm}^{-1}$  à Tianjin).

Par conséquent, pour l'observation des distributions de collecte et les analyses des relations entre les conditions de prélèvement et les formes d'évolution sur les trois sites d'étude, il apparaît que la concentration de polluants dans l'eau de pluie récupérée a une grande influence sur la dynamique d'évolution. Plus la concentration de polluants est élevée, plus son évolution est susceptible d'être décroissante. Plus la concentration de polluants est faible, plus il est difficile de déterminer si la collecte varie de manière décroissante ou non monotone.

En considérant les trois sites expérimentaux, on peut observer que les résultats obtenus dans les trois sites sont différents. L'environnement et les caractéristiques des toits sont différents, de sorte que la concentration de polluants dans les eaux de pluie récupérée varie considérablement. En plus, l'ADD et l'intensité moyenne de collecte affectent aussi cette concentration des polluants récupérés dans l'eau de pluie. En général, plus l'ADD est longue et plus l'intensité est forte, plus la dynamique de décroissance de la concentration est visible et prononcée. Nous pouvons construire un modèle basé sur cette conclusion pour discuter plus en détail de la relation entre la concentration et la dynamique d'évolution.

#### **4. Modélisation de l'évolution de la qualité dans le cas d'un profil décroissant**

Plusieurs essais de modélisation des évolutions de la qualité ont été menés, utilisant les données relatives aux conditions correspondantes. Ce travail a été effectuée pour les trois sites d'étude. Cette partie se focalise sur les résultats obtenus à Vincennes et Tianjin seulement. En effet, pour Romainville, seule une faible fraction des événements pluvieux collectés se caractérise par une évolution décroissante (4 des 17 événements pour la conductivité et pour la turbidité). Comme cela a été évoqué auparavant dans ce chapitre, lorsque la concentration en polluants est faible, le niveau de pollution est insuffisant au regard des incertitudes générées par les instruments de mesure et les conditions de prélèvements. De même, pour la flore totale à  $36^\circ\text{C}$ , en effet, très peu de tendance nette

de décroissance a été observée (2 événements par 13 à Vincennes, 2 par 17 à Romainville et 1 par 9 à Tianjin). En conséquence, cette partie repose sur les résultats de la conductivité et de la turbidité obtenus à Vincennes et à Tianjin.

#### **4.1 Proposition d'un modèle adapté à l'évolution de qualité**

Pour un événement pluvieux collecté, deux phénomènes peuvent être observés sur la toiture : le phénomène d'accumulation de matière et le phénomène de lessivage.

Ici, l'évolution décroissante que nous analysons dans cette section porte essentiellement sur le phénomène de lessivage. Dès le début de la pluie, les matières sur le toit commencent à être emportées. L'état initial de la toiture est essentiel pour l'effet de lessivage. C'est-à-dire que la charge initiale sur le toit avant la pluie peut expliquer les niveaux de pollution emportée dans l'eau de ruissellement. De plus, la variabilité de la qualité au cours de l'événement sera affectée par les caractéristiques de la pluie : durée de pluie, hauteur de pluie et intensité de la pluie. En considérant l'impact de ces deux aspects (charge initiale et caractéristiques de la pluie), il paraît possible d'estimer les polluants emportés via un modèle.

L'idée est donc de tester différents modèles, tous assez simples et considérant comme nul le temps de concentration à l'échelle de fraction de toiture considérée.

- **Modèle 1 --- Modèle en fonction du temps de pluie**

Ce premier modèle de dynamique simple décrit l'évolution de la concentration en fonction de la durée de pluie. Il s'agit d'une équation très simple :  $C = f(t)$ .

Considérant les résultats précédents, les polluants écoulés dans l'eau de ruissellement au cours de temps de pluie, l'amélioration de la qualité des eaux a été avérée. Les concentrations diminueront progressivement jusqu'à atteindre une valeur proche de zéro selon une équation exponentielle négative en relation avec le temps de pluie.

$$C = C_0 \times e^{-k_1 t} \text{ (Équation 29)}$$

Ici, C correspond à la concentration de polluant emportée dans l'eau ;  $C_0$  est la charge initiale qui représente la charge maximale déposée sur la toiture pouvant être lavée dans l'eau en cours d'événement de pluie ;  $k_1$  est le coefficient de l'évolution de ce 1<sup>er</sup> modèle ; t est la durée de pluie précipitée cumulée (h). Pour tous les événements de collecte, on peut obtenir une équation et un coefficient  $k_1$ .

- **Modèle 2 --- Modèle en fonction de la hauteur de pluie**

De la même manière, la deuxième équation utilisée calcule les polluants emportés en fonction de la hauteur de pluie. Il s'agit d'une équation simple :  $C = f(h)$ . C'est une équation reliant par une exponentielle négative la concentration des polluants à la hauteur de précipitation correspondante :

$$C = C_0 \times e^{-k_2 h_p} \text{ (Équation 30)}$$

Ici,  $k_2$  est le coefficient de l'évolution de ce 2<sup>ème</sup> modèle,  $h$  est la hauteur de pluie précipitée ( $h_p$ ) cumulée (mm).

Selon l'équation 4 dans la section 2.1 de ce chapitre, à l'échelle du remplissage du flacon, nous avons,

$$p.f = i_{moy.f.} \times t_{coll.f.} \text{ (Équation 31)}$$

Avec :  $h_{p.f}$  est la hauteur de pluie précipitée de la fraction  $f$  (mm) ;  $t_{coll.f.}$  est la durée de collette de cette fraction (h) ;  $i_{moy.f.}$  l'intensité moyenne de la pluie sur cette durée de collette de cette fraction (mm/h) ; et, Donc, par rapport au premier modèle qui ne prend en compte que les séries chronologiques, le 2<sup>ème</sup> modèle intègre l'effet de l'intensité des précipitations sur l'évolution de la qualité. C'est un modèle qui décrit l'évolution de la concentration en fonction de la durée de pluie et de la dynamique de pluie.

Considérant les résultats précédents, l'intensité de pluie joue un rôle très important sur l'évolution de la qualité. Donc, pour cette équation, nous supposons que l'intensité de pluie peut affecter l'évolution à travers  $k_2$ .

## **4.2 Interprétation des résultats de l'évolution de la qualité de l'eau de ruissèlement de toiture à Vincennes et à Tianjin**

Les résultats présentés ici concernent la conductivité et la turbidité à Vincennes et à Romainville.

### **4.2.1 Modèle 1**

Le système d'échantillonnage dans cette étude est constitué par les dispositifs fractionnés par succession de bouteilles. Nous postulons que, au sein de chaque fraction, la valeur de l'indicateur de pollution (conductivité ou turbidité) est constante. Les lignes bleues sur les figures qui suivent représentent la concentration moyenne de chaque fraction. Les points rouges représentent la médiane du temps de chaque fraction. Ce sont ces points qui sont considérés comme les observations sur lesquelles caler le modèle, ce qui suppose que pour chaque fraction, nous considérons que la vitesse de remplissage du flacon est constante. En ajoutant les courbes exponentielles aux points rouges, pour chaque événement pluvieux collecté, nous pouvons obtenir une équation caractérisant l'évolution de la qualité de l'eau. Le critère d'évaluation de la performance du modèle est le coefficient de détermination  $R^2$  qui est une expression de la somme des écarts quadratiques entre valeurs simulées et valeurs mesurées.

La Figure 6-16 et la Figure 6-17 présentent les relations entre les concentrations de polluants (respectivement conductivité et turbidité) et la durée de pluie précipitée cumulée à Vincennes alors que la Figure 6-18 et la Figure 6-19 présentent ces relations dans le cas de Tianjin.

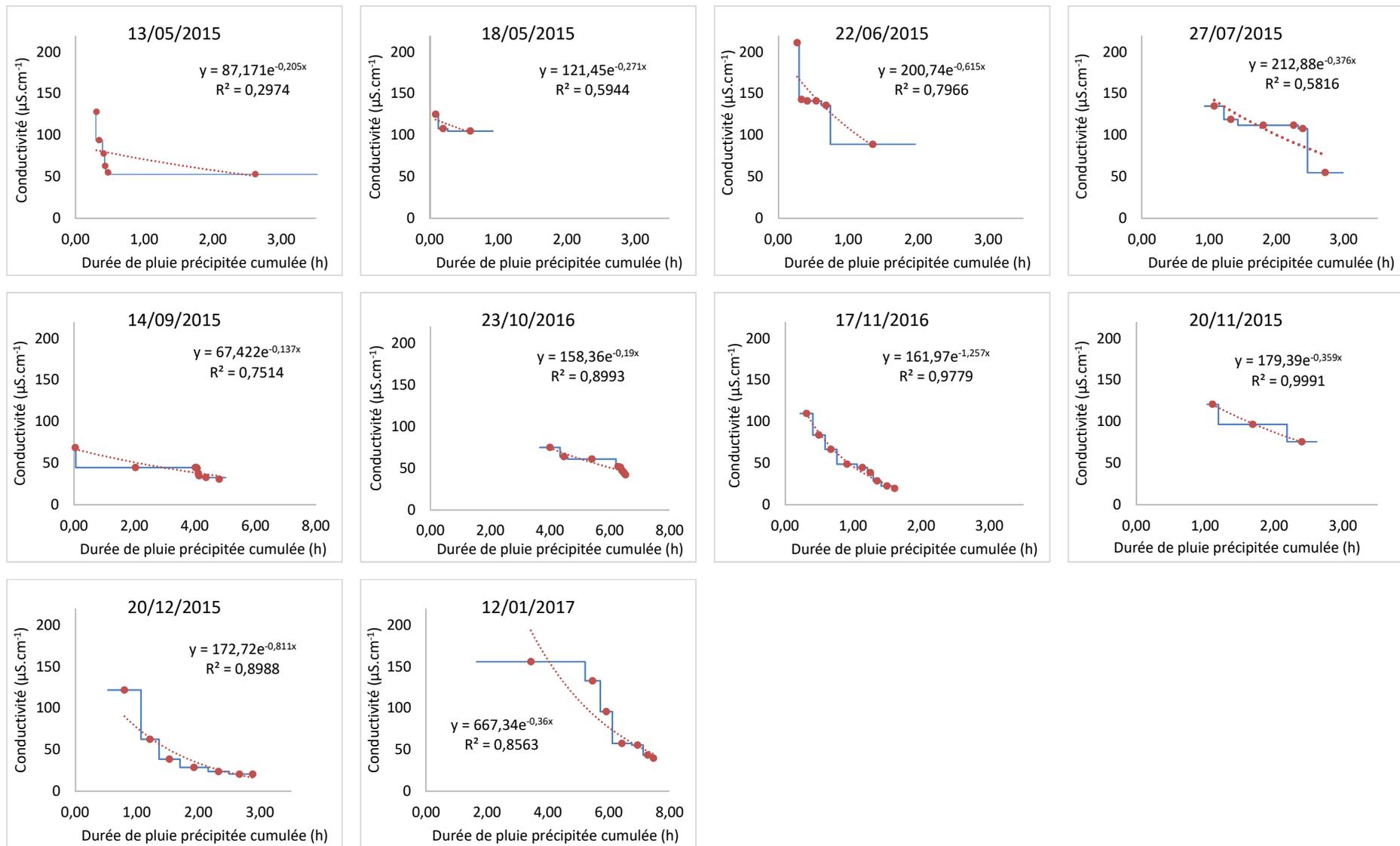


Figure 6-16. Relation entre la conductivité et la hauteur de pluie précipitée cumulée à Vincennes

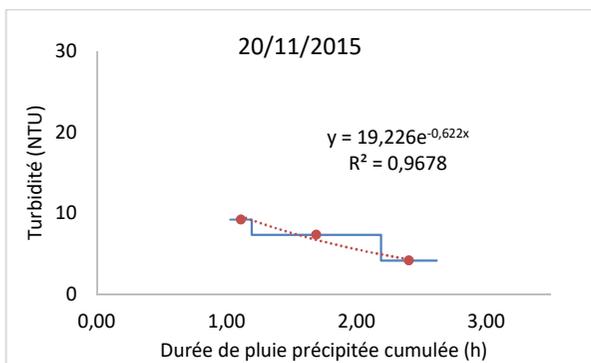
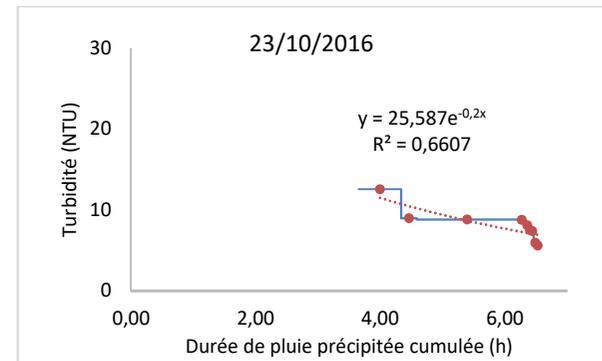
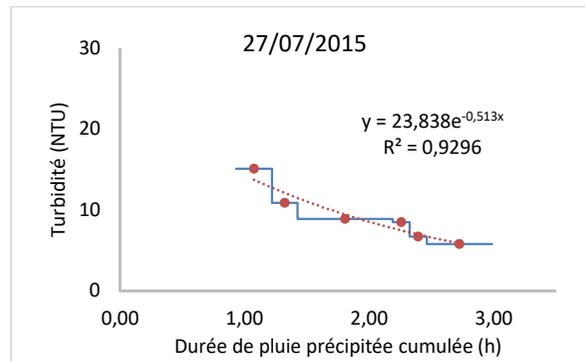
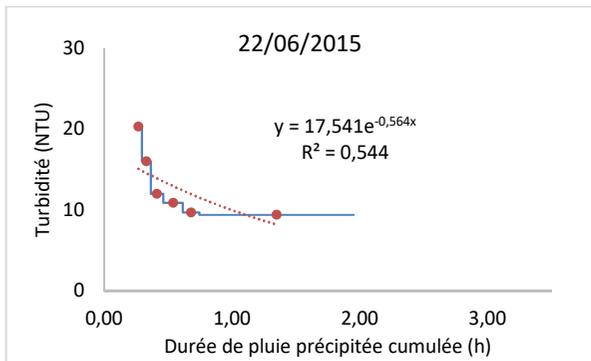
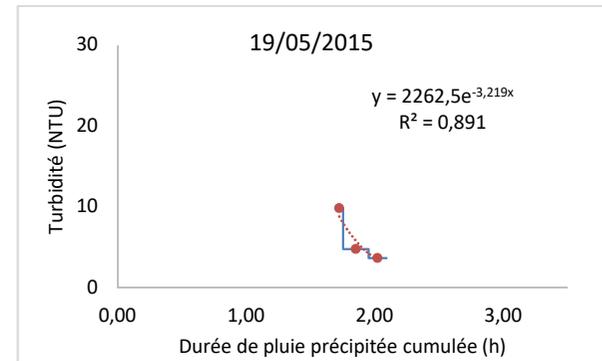
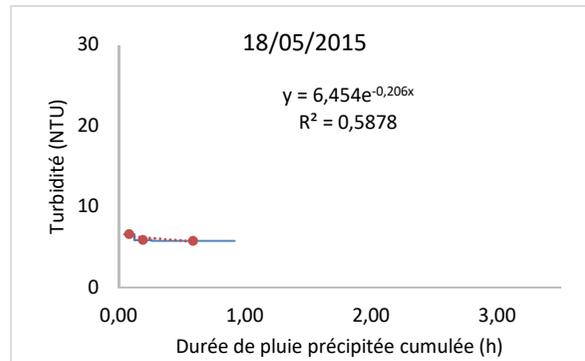
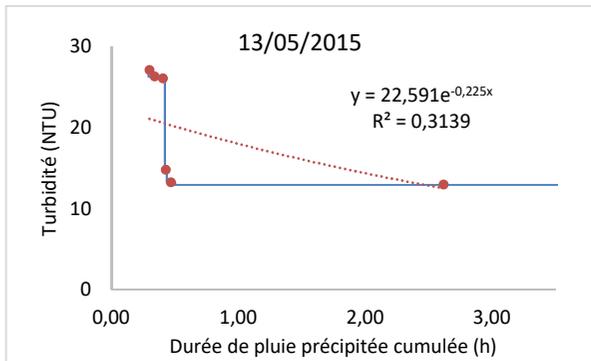
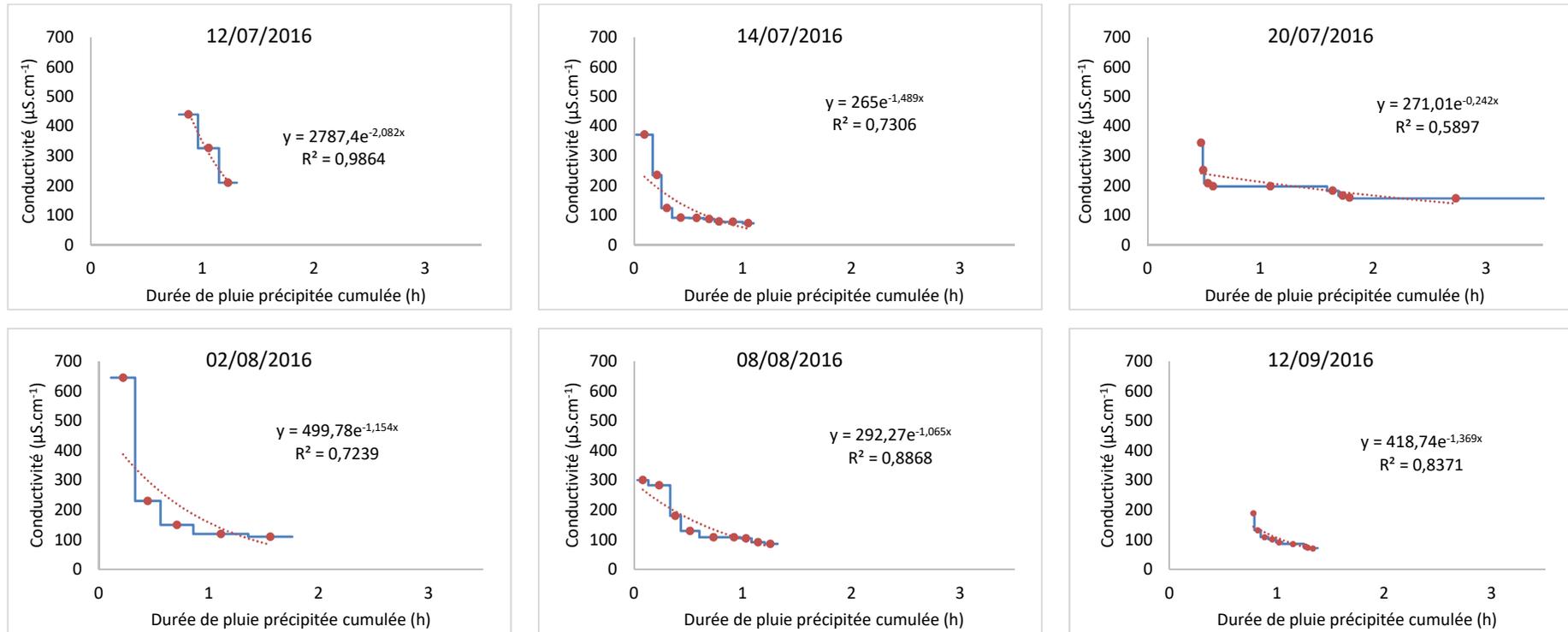


Figure 6-17. Relation entre la turbidité et la durée de pluie précipitée cumulée à Vincennes



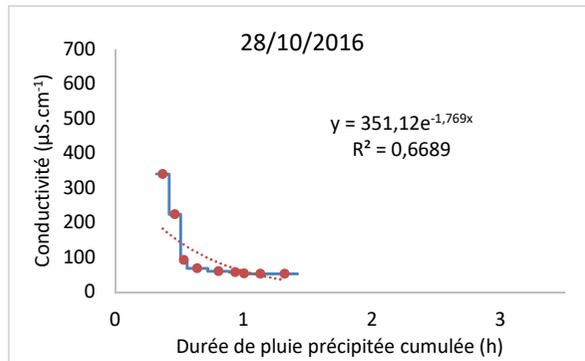
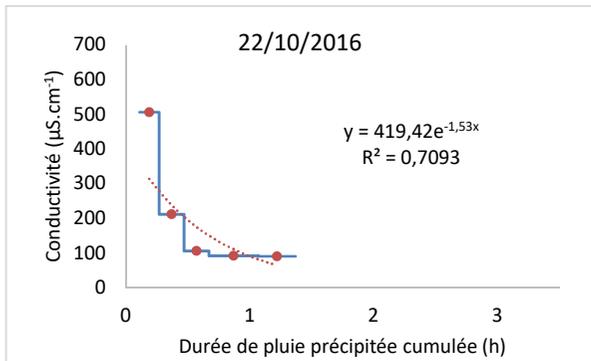
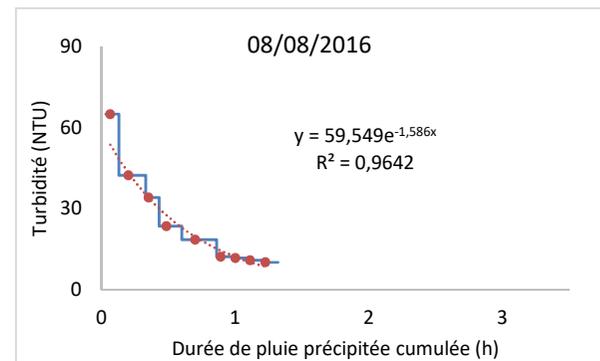
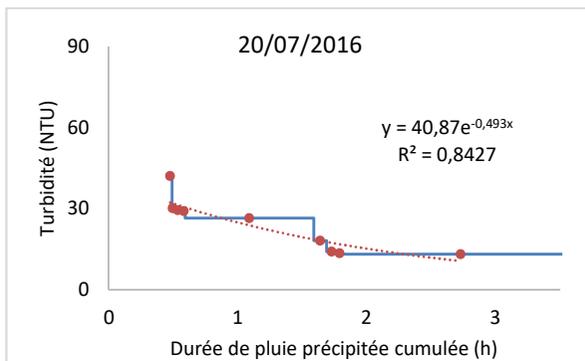
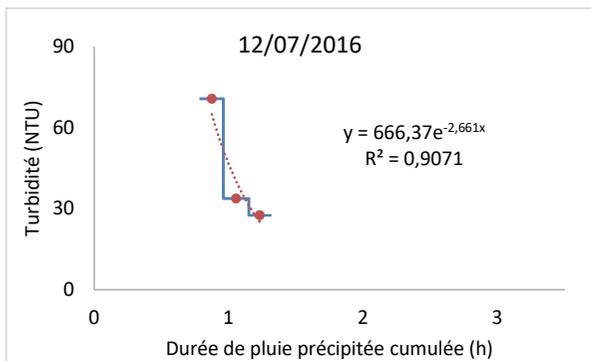


Figure 6-18. Relation entre la conductivité et la durée de pluie précipitée cumulée à Tianjin



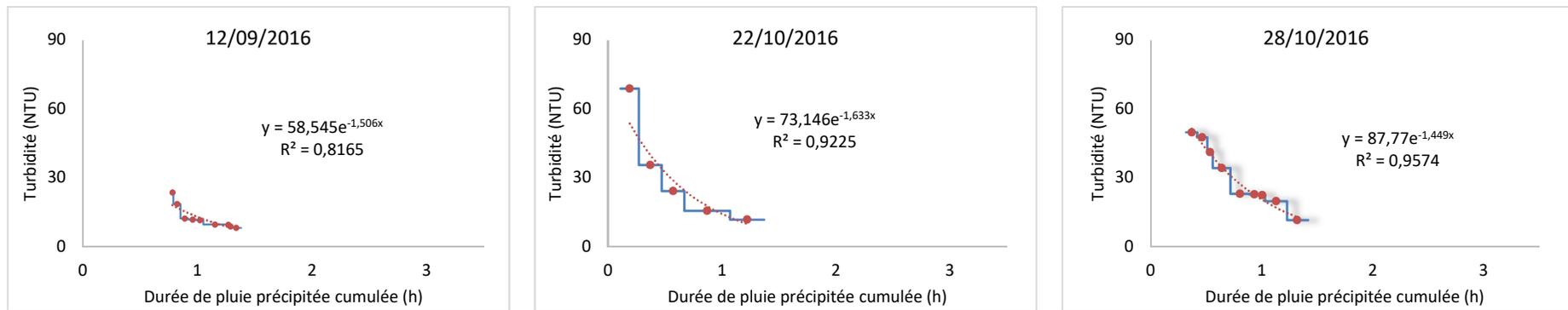


Figure 6-19. Relation entre la turbidité et la durée de pluie précipitée cumulée à Tianjin

En analysant les résultats sur les figures précédentes, nous observons que le modèle exponentiel ne fonctionne que si l'intensité de la pluie varie peu (les points rouges distribués plus uniformément en cours d'événement). Pour les événements pluvieux avec des changements importants de l'intensité de pluie, par exemple, à Vincennes le 13 mai 2015, les coefficients de détermination ne sont faibles. Cela indique qu'il n'est pas efficace de décrire l'évolution de la qualité de l'eau en prenant en compte uniquement la durée de pluie précipitée cumulée. Le Tableau 6-10 regroupe pour chacun des deux sites pour la conductivité et la turbidité, les coefficients de calage obtenus (charge initiale  $C_0$  et coefficient de l'évolution  $k_1$ ) ainsi que les coefficients de détermination ( $R^2$ ) correspondants pour l'évaluation de la décroissance de la concentration de polluants ruisselée dans l'eau de toiture en fonction de la durée de pluie précipitée.

Tableau 6-10. Coefficients de calage ( $C_0$  et  $k_1$ ) et le  $R^2$  du modèle 1 sur Vincennes et Tianjin

	Vincennes				Tianjin			
	Date	$C_0$	$k_1$	$R^2$	Date	$C_0$	$k_1$	$R^2$
<b>Conductivité</b>	13/05/2015	87	0,205	0,2974	12/07/2016	2787	2,082	0,9864
	18/05/2015	121	0,271	0,5944	14/07/2016	265	1,489	0,7306
	22/06/2015	201	0,615	0,7966	20/07/2016	271	0,242	0,5897
	26/07/2015	213	0,376	0,5816	02/08/2016	500	1,154	0,7239
	14/09/2015	67	0,137	0,7514	08/08/2016	292	1,065	0,8868
	23/10/2016	158	0,190	0,8993	12/09/2016	418	1,369	0,8371
	17/11/2016	162	1,257	0,9779	22/10/2016	419	1,530	0,7093
	20/11/2016	179	0,359	0,9991	28/10/2016	351	1,769	0,6689
	20/12/2016	173	0,811	0,8988				
	12/01/2017	667	0,360	0,8563				
<b>Turbidité</b>	13/05/2015	22,6	0,225	0,3139	12/07/2016	666,4	2,661	0,9071
	18/05/2015	6,5	0,206	0,5878	20/07/2016	40,9	0,493	0,8427
	19/05/2015	2262,5	3,219	0,8910	08/08/2016	59,5	1,577	0,9667
	22/06/2015	17,5	0,564	0,5440	12/09/2016	58,5	1,506	0,8165
	26/07/2015	23,8	0,513	0,9296	22/10/2016	73,1	1,633	0,9225
	23/10/2016	25,6	0,200	0,6607	28/10/2016	87,8	1,449	0,9574
	20/11/2016	19,2	0,622	0,9678				

■ :  $R^2 < 0,5$  ; ■ :  $0,5 < R^2 < 0,7$  ; ■ :  $0,7 < R^2 < 0,9$  ; ■ :  $R^2 > 0,9$

Nous pouvons observer que, fréquemment, la corrélation entre la concentration de l'indicateur de pollution et la durée de pluie précipitée cumulée est importante. Certaines équations ont des coefficients de détermination ( $R^2$ ) supérieurs à 0,90 (29% des cas) alors que la plupart des coefficients de détermination sont supérieurs à 0,7 (71% des cas). Mais il reste encore quelques valeurs très basses, pour les deux équations du 13 mai 2015 à Vincennes, où ces coefficients sont inférieurs à 0,5, ce qui met en évidence que la concentration en polluants de l'eau est mal représentée par ce modèle. En observant les figures correspondantes de cet événement, nous constatons que la durée de chaque fraction varie énormément : au début, les durées sont très courtes avec des intensités importantes, mais dans la sixième fraction, la durée est longue. En cas de changements brusques d'intensité de pluie lors d'événement de pluie précipitée, le coefficient de détermination est faible, donc le modèle représente mal le processus observé. De la même manière, pour le cas où la durée de chaque fraction est proche pendant l'événement de pluie (intensité de pluie est stable), le coefficient de déterminations est plus élevé.

De plus, pour chaque événement pluvieux collecté, nous pouvons estimer une charge initiale ( $C_0$ ) qui correspond à la quantité déposée sur le toit avant la pluie. Ce paramètre, qui est lié à l'ADD et affecté par la nature de la pluie et l'environnement local, peut être utilisé pour analyser le phénomène de dépôt (accumulation de matière) et le phénomène de lessivage. En général, plus l'ADD est longue, plus les matières déposées sur le toit sont importantes ainsi que la quantité de polluants qui peut s'écouler dans l'eau de ruissellement. Cependant, d'autres facteurs peuvent également intervenir comme les caractéristiques de la pluie (cas de tempêtes) ou des changements brusques dans l'environnement (une pollution atmosphérique élevée, des vents violents, des travaux...).

Nous utilisons des représentations en boîte à moustaches pour analyser les charges initiales des deux indicateurs sur les deux sites d'études. La boîte à moustaches est un moyen de représentations graphiques de données statistiques quantitative. Pour chaque boîte, les données situées respectivement en-dessous et au-dessus des extrémités inférieure et supérieure des moustaches peuvent être considérées comme hors-normes. Ces données « atypiques » sont des données qui se trouvent en dehors de  $1,5 * IQR$  (où IQR, la « écart interquartile » est la différence entre les premiers et troisièmes quartiles des données et la méthode présentée dans la section 3.1 dans le chapitre 4). En observant la Figure 6-20, nous pouvons déterminer s'il existe des données « atypiques » de  $C_{0, cond.}$  et  $C_{0, turb.}$  (respectivement pour la conductivité et la turbidité) de manière à juger de la performance du modèle.

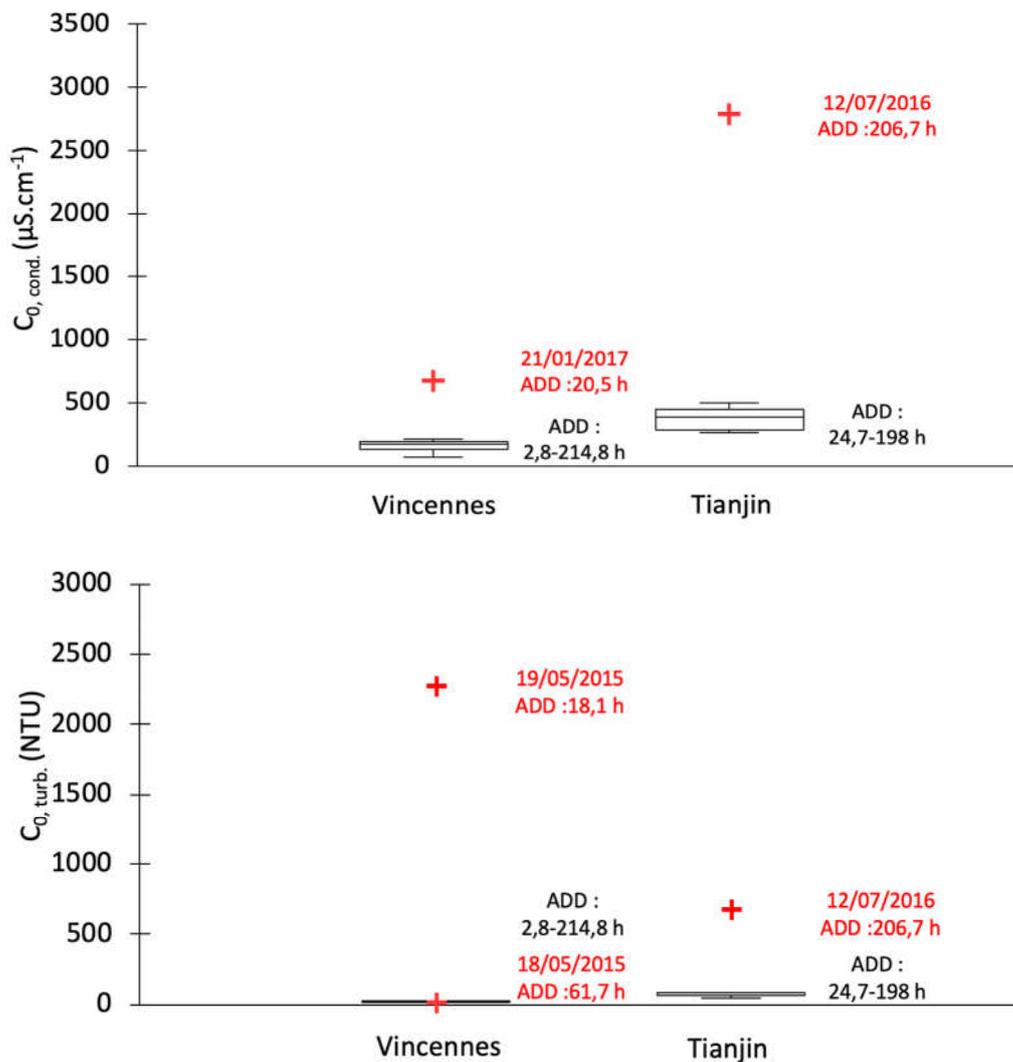


Figure 6-20. Boite à moustache --  $C_{0, \text{cond.}}$  et  $C_{0, \text{turb.}}$  estimées à partir de modèle 1 sur la conductivité et la turbidité aux deux sites d'étude

(Les croix rouges représentent des données extrêmes qui se trouvent en dehors de  $1,5 * \text{IQR}$ )

Cependant, selon le Tableau 6-10 et la Figure 6-20, cinq valeurs estimées sont des valeurs extrêmes (indiquées en couleur rouge). Le  $C_{0, \text{cond.}}$  estimée du 12 juillet 2016 à Tianjin est de  $2787,45 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  et le  $C_{0, \text{turb.}}$  estimées du 19 mai 2015 à Vincennes est de  $2262,5 \text{ NTU}$ . Ces valeurs sont environ 10 fois plus grandes que celles des autres événements sur le même site d'étude. En regardant la nature des deux pluies et l'environnement des sites expérimentaux, il n'y a pas de facteur explicatif. Pour les autres trois valeurs extrêmes de la conductivité et de la turbidité aucune explication ne peut être trouvée. Nous pensons que ces estimations extrêmes sont liées à une conception inappropriée du modèle.

Le système expérimental mis en place ne permet d'avoir accès à la variable temps, qui est celle du modèle que de manière très indirecte et peu précise. Les incertitudes qui en résultent dans la description temporelle de l'évolution de la qualité des eaux récoltées ne

permet pas d'avoir des jeux de données rendant possible un calage satisfaisant des paramètres du modèle 1.

En conclusion le temps n'est pas la bonne variable pour expliquer la variabilité des qualités et l'intensité joue sans doute un rôle important. Il est donc nécessaire de passer au deuxième modèle basé sur la variation de la qualité de l'eau en fonction de la hauteur de pluie, qui prend en compte l'intensité de pluie et est présentée dans la section suivante.

#### **4.2.2 Modèle 2**

Notre système d'échantillonnage ayant été conçu pour capter une succession de fractions de volume fixe, les hauteurs de pluie de chaque fraction sont fixes. Pour le même site d'étude, la hauteur de pluie de la perte initiale est également constante. En utilisant le deuxième modèle, nous n'avons pas besoin d'estimer l'heure exacte à laquelle l'eau commence à s'accumuler dans les fractions du dispositif, nous pouvons donc réduire l'erreur en réduisant une étape intermédiaire.

L'Équation 13 à la page 241 présente la concentration des polluants ruisselés dans l'eau en fonction de la hauteur de pluie précipitée cumulée. La Figure 6-21 et la Figure 6-22 présentent les résultats de conductivité et de turbidité à Vincennes et la Figure 6-23 et la Figure 6-24 présentent celles à Tianjin avec ce second modèle. Les lignes bleues sur les figures représentent la concentration moyenne de chaque fraction. Les points rouges sont les points situés au milieu de chaque segment bleu correspondent à la hauteur moyenne de chaque fraction. Pour chaque fraction, nous considérons que la vitesse de remplissage du flacon est constante. Les courbes exponentielles résultats de la modélisation sont superposées aux points rouges. Pour chaque événement pluvieux collecté, nous obtenons une équation caractérisant l'évolution de la qualité de l'eau.

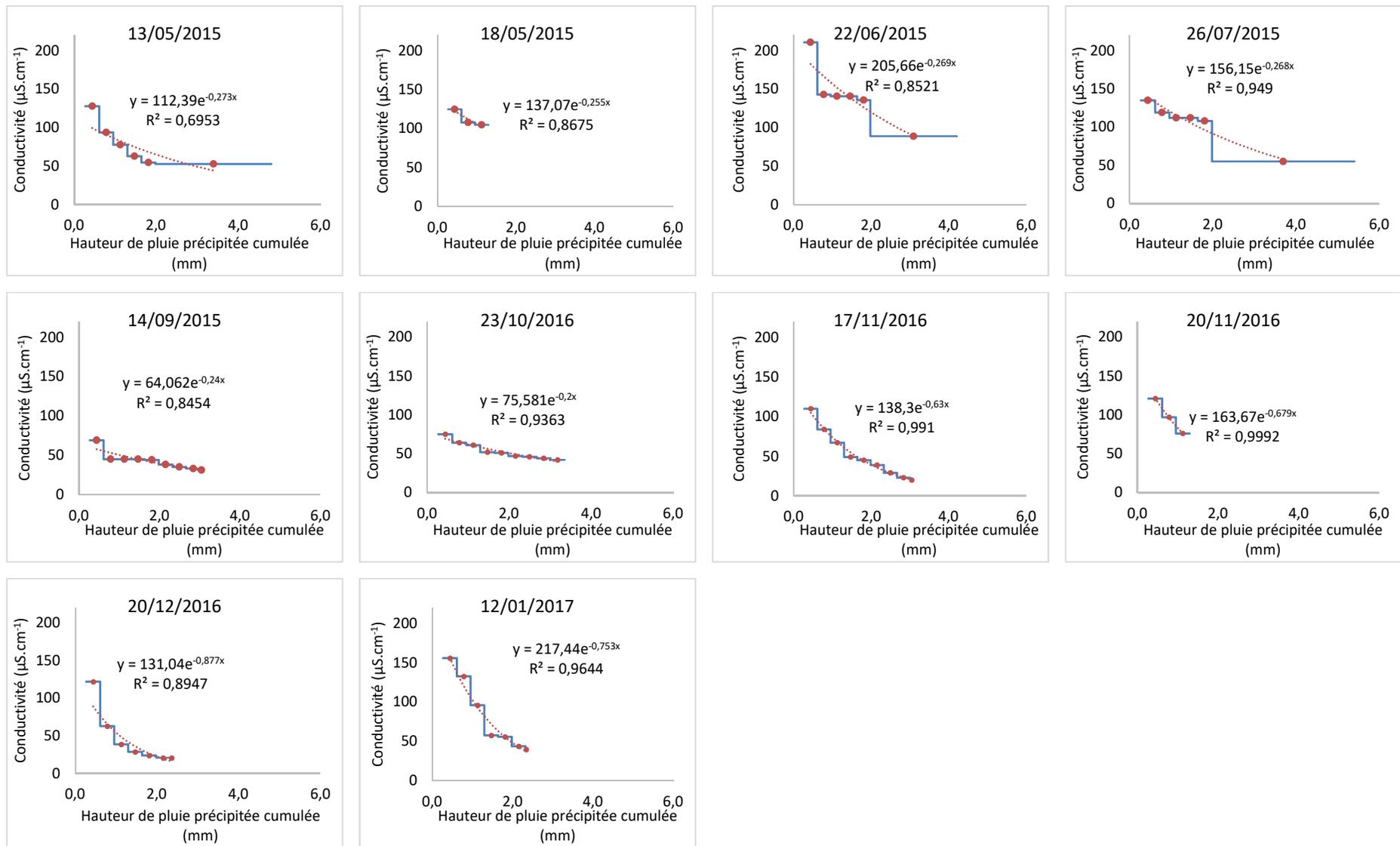


Figure 6-21. Relation entre la conductivité et la hauteur de pluie précipitée cumulée à Vincennes

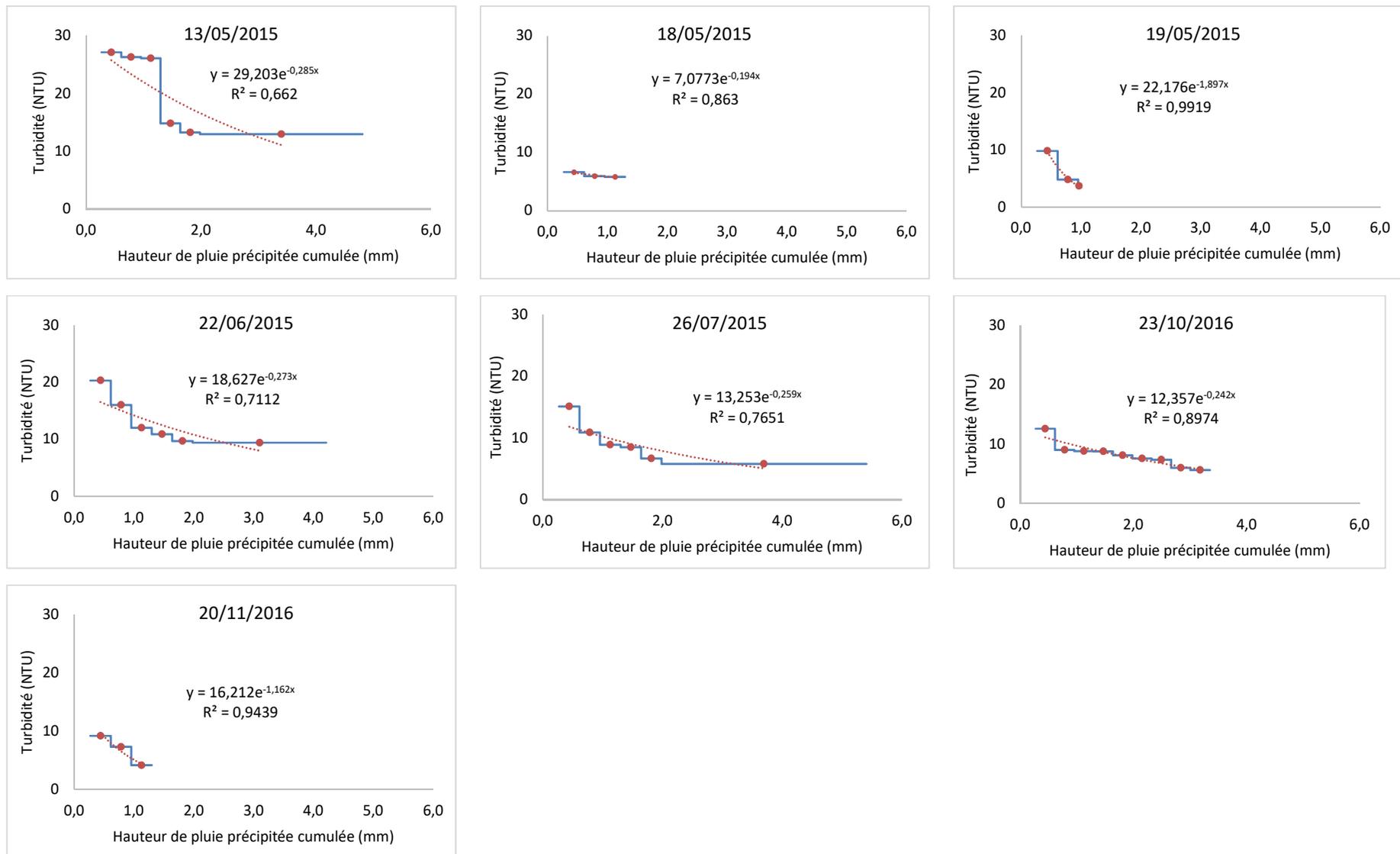


Figure 6-22. Relation entre la turbidité et la hauteur de pluie précipitée cumulée à Vincennes

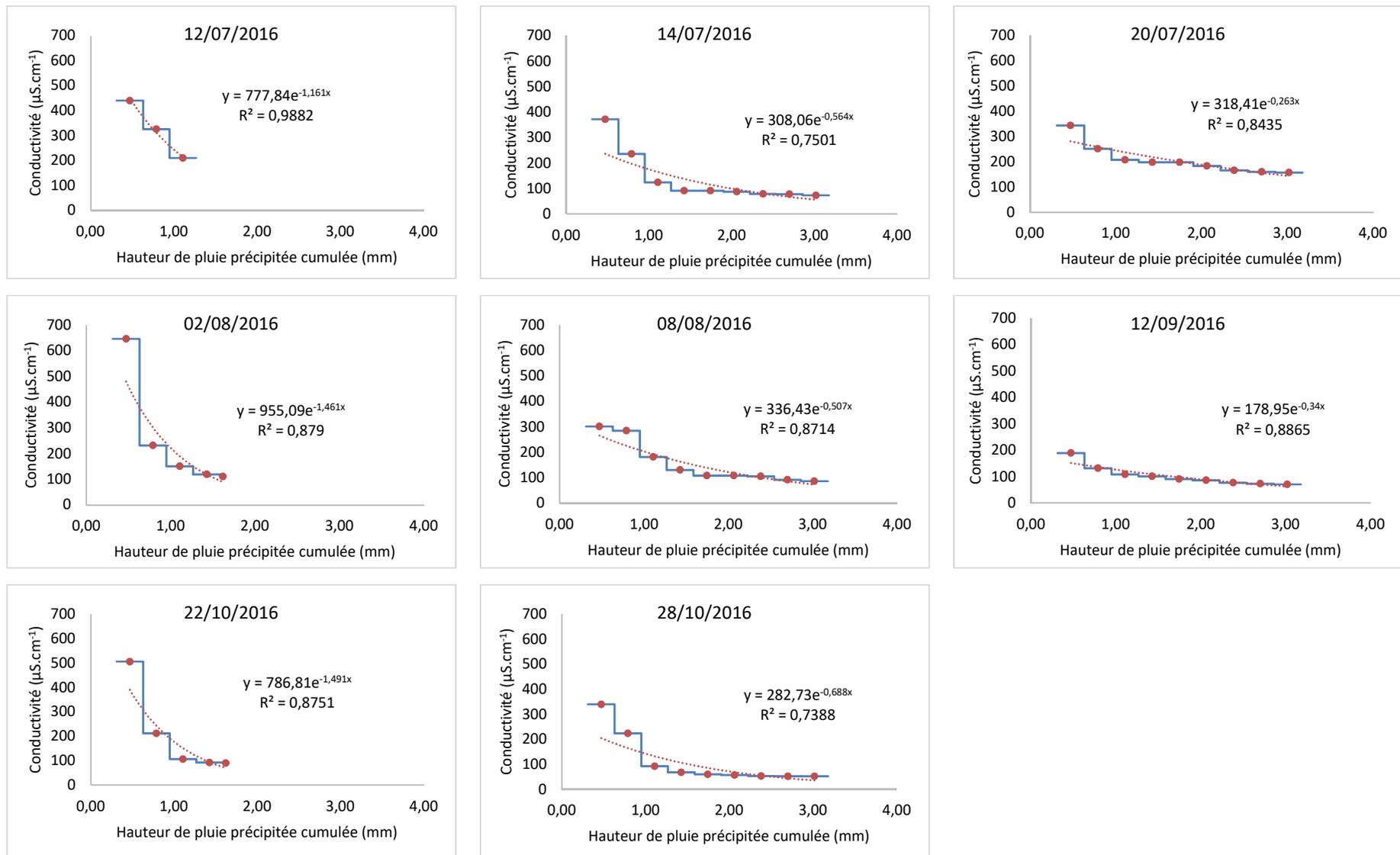


Figure 6-23. Relation entre la conductivité et la hauteur de pluie précipitée cumulée à Tianjin

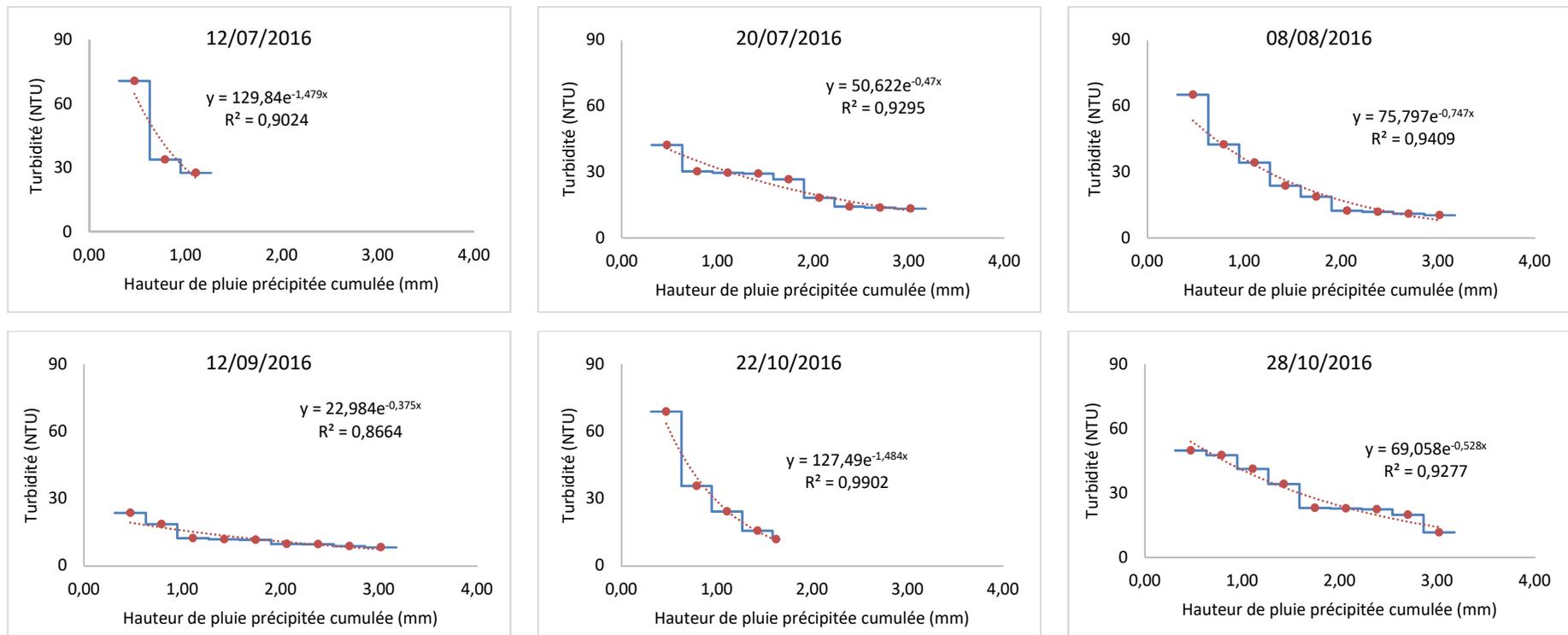


Figure 6-24. Relation entre la turbidité et la hauteur de pluie précipitée cumulée à Tianjin

Au vu des résultats, nous observons que lorsque la taille du dernier échantillon est important (le volume du dernier flacon du premier dispositif sur Vincennes est de 23L), les modèles sont moins satisfaisants. Pour cette dernière fraction, l'hypothèse de vitesse de remplissage constante d'un flacon s'avère fautive et donc le positionnement du point rouge représentant l'ensemble de l'échantillon « mal situé » et n'intègre pas la décroissance pré-supposée de la contamination au cours de l'évènement. Cette hypothèse acceptable tant que le volume des fractions est petit, s'avère incorrecte lorsque le volume d'une fraction devient plus important.

Le Tableau 6-11 rapporte coefficients de calage obtenus (charge initiale  $C_0$  et coefficient de l'évolution  $k_2$ ) ainsi que les coefficients de détermination ( $R^2$ ) associés pour chacun des deux sites pour la conductivité et la turbidité.

Tableau 6-11. Coefficients de calage ( $C_0$  et  $k_2$ ) et le  $R^2$  du modèle 2 sur Vincennes et Tianjin

	Vincennes				Tianjin			
	Date	$C_0$	$k_2$	$R^2$	Date	$C_0$	$k_2$	$R^2$
<b>Conductivité</b>	13/05/2015	112	0,273	0,6953	12/07/2016	778	1,161	0,9882
	18/05/2015	137	0,255	0,8675	14/07/2016	308	0,564	0,7501
	22/06/2015	206	0,269	0,8521	20/07/2016	318	0,263	0,8435
	26/07/2015	156	0,268	0,9490	02/08/2016	955	1,461	0,8790
	14/09/2015	64	0,240	0,8454	08/08/2016	336	0,507	0,8714
	23/10/2016	76	0,200	0,9363	12/09/2016	179	0,340	0,8865
	17/11/2016	138	0,630	0,9910	22/10/2016	787	1,491	0,8751
	20/11/2016	164	0,679	0,9992	28/10/2016	283	0,688	0,7388
	20/12/2016	131	0,877	0,8947				
	12/01/2017	217	0,753	0,9644				
<b>Turbidité</b>	13/05/2015	29,2	0,285	0,6620	12/07/2016	129,8	1,479	0,9024
	18/05/2015	7,1	0,194	0,8630	20/07/2016	50,6	0,470	0,9295
	19/05/2015	22,2	1,897	0,9919	08/08/2016	75,8	0,747	0,9409
	22/06/2015	18,6	0,273	0,7112	12/09/2016	23,0	0,375	0,8664
	26/07/2015	13,3	0,259	0,7651	22/10/2016	127,5	1,484	0,9902
	23/10/2016	12,4	0,242	0,8974	28/10/2016	69,1	0,528	0,9277
	20/11/2016	16,2	1,162	0,9439				

■ :  $R^2 < 0,5$  ; ■ :  $0,5 < R^2 < 0,7$  ; ■ :  $0,7 < R^2 < 0,9$  ; ■ :  $R^2 \geq 0,9$

Nous observons que par rapport au premier modèle, tous les coefficients de détermination de ce modèle sont plus élevés. Il n'y a pas de valeur inférieure à 0,5. En dehors des deux valeurs du 13 mai 2015 qui sont déjà beaucoup plus élevées que celles du premier modèle (0,2974 pour la conductivité et 0,3139 pour la turbidité), toutes les autres sont supérieures à 0,70. Parmi elles, 39% des valeurs sont supérieures à 0,9. Les valeurs les plus faibles correspondent aux événements utilisant le 1<sup>er</sup> dispositif avec dernier flacon de grand volume, donc correspondants aux cas où le dispositif ne permet pas de bien représenter les processus qui se produisent. Les valeurs de coefficients de détermination élevées indiquent que le modèle 2 permet de mieux décrire que le modèle 1 les évolutions de la qualité de l'eau de chaque événement de collecte.

Concernant la charge initiale de conductivité et de turbidité ( $C_{0, \text{cond.}}$  et  $C_{0, \text{turb.}}$ ), nous traitons également les résultats estimés en utilisant une représentation en boîte à moustache pour vérifier l'existence éventuelle de valeurs extrêmes et des conditions dans lesquelles ces valeurs existent (Figure 6-25).

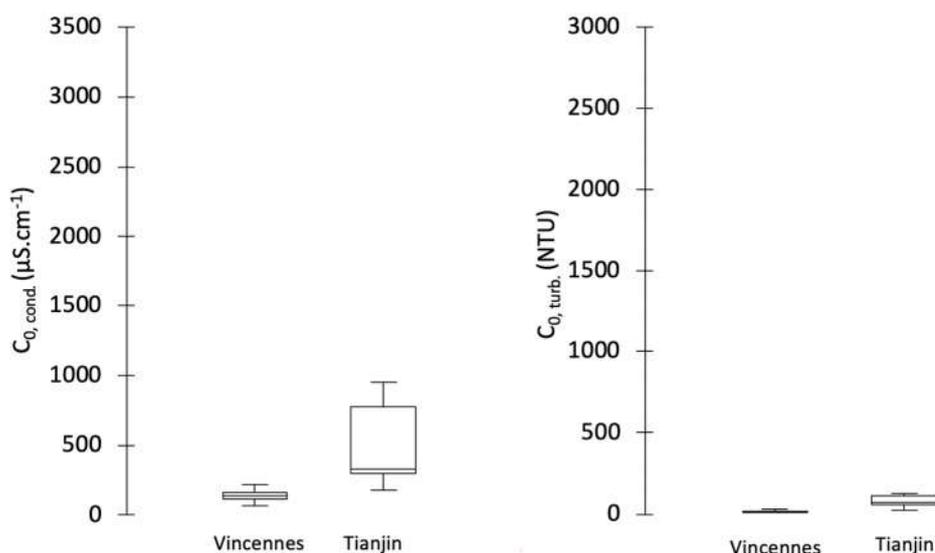


Figure 6-25. Boîte à moustache --  $C_{0, \text{cond.}}$  et  $C_{0, \text{turb.}}$  estimées à partir de modèle 2 sur la conductivité et la turbidité aux deux sites d'étude

Sur la Figure 6-25, nous observons qu'il n'y a pas de valeurs extrêmes de la charge initiale estimée ( $C_0$ ). La valeur de  $C_{0, \text{cond.}}$  varie de 64 à 217  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  à Vincennes et de 179 à 955  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  à Tianjin.  $C_{0, \text{turb.}}$  est de 7,1 à 29,2 NTU à Vincennes et 23,0 à 129,8 NTU à Tianjin. Nous savons que les différents sites d'étude présentent des climats différents et des conditions de pollution atmosphérique différentes. Pour les événements pluvieux collectés sur les deux sites d'étude, l'intensité de pluie varie considérablement alors que les valeurs moyennes de PM 2,5 et le PM 10 à Tianjin sont 5,5 fois plus élevées que celles de Paris. Cela est cohérent avec les valeurs de  $C_0$  estimées : la valeur médiane de  $C_{0, \text{turb.}}$  de Tianjin est 4,5 fois supérieure à celle de Vincennes et la valeur médiane de  $C_{0, \text{cond.}}$  est de 2,4 fois plus grande.

### 4.3 Analyse des paramètres du modèle d'évolution

Il existe deux paramètres dans le modèle 2 qui varient en fonction de décroissance exponentielle : le coefficient d'évolution  $k_2$  et la charge initiale  $C_0$ . Dans notre étude,  $k_2$  est constant pour chaque événement pluvieux. Il caractérise la tendance d'évolution de la qualité de l'eau de ruissèlement de toiture en montrant la vitesse de réduction de contaminants : plus  $k_2$  est grand, plus les contaminants sont réduits rapidement et l'effet d'optimisation de la qualité de l'eau est meilleur. Alors que  $C_0$  caractérise le dépôt de contaminants sur le toit avant l'événement de pluie : plus  $C_0$  est grand, plus la quantité de contaminants déposés avant la pluie est importante.

Les résultats présentent une variabilité de valeurs de  $k_2$  et de  $C_0$  entre les événements pluvieux collectés. Par la suite  $k_2$  et  $C_0$  sont comparés pour les deux sites ayant fait l'objet d'une modélisation. La relation entre  $C_0$  et l'ADD et la relation entre  $k_2$  et l'intensité pluviométrique moyenne des fractions pour déterminer le modèle d'évolution.

#### 4.3.1 Comparaison des paramètres de modèle d'évolution entre sites d'étude

Le Tableau 6-12 rapporte les grandeurs statistiques des coefficients d'évolution  $k_2$  et des charges initiales  $C_0$  pour la conductivité et la turbidité. Les minimums, les maximums et les médianes sont représentés.

Tableau 6-12. Résumé des paramètres des équations de modèle 2 pour la conductivité

Conductivité		Coefficient d'évolution $k_{2, \text{cond.}}$ ( $\text{mm}^{-1}$ )		$C_{0, \text{cond.}}$ ( $\mu\text{S.cm}^{-1}$ )	
		Gamme	Médiane	Gamme	Médiane
	Vincennes	0,200-0,877	0,271	64-217	138
Tianjin	0,263 -1,491	0,626	179-955	327	
Turbidité		Coefficient d'évolution $k_{2, \text{turb.}}$ ( $\text{mm}^{-1}$ )		$C_{0, \text{turb.}}$ (NTU)	
		Gamme	Médiane	Gamme	Médiane
	Vincennes	0,194-1,897	0,273	7,1-29,2	16,2
Tianjin	0,375-1,484	0,638	23,0-129,8	72,4	

Pour une observation plus aisée, l'étape suivante consiste à illustrer de manière graphique en montrant les  $k_2$  et les  $C_0$  de chaque événement pluvieux collecté pour les deux paramètres dans les deux sites d'étude (Figure 6-26 et Figure 6-27). Les points bleus correspondent aux  $k_2$  et  $C_0$  de la conductivité de chaque événement pluvieux collecté, les

points verts sont pour la turbidité et les croix en couleur rouge correspondent aux valeurs médianes des  $k_2$  et des  $C_0$  pour les deux paramètres.

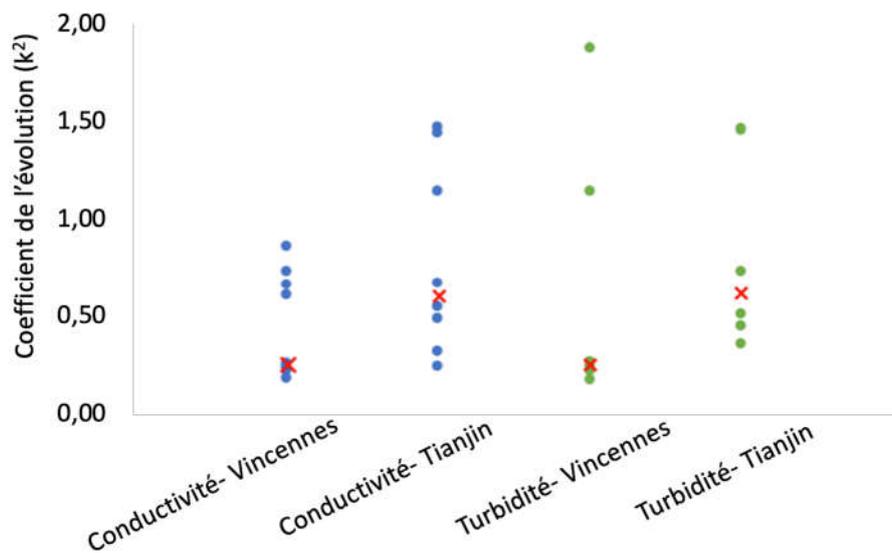


Figure 6-26 . Coefficient de l'évolution de conductivité et de turbidité à Vincennes et à Tianjin

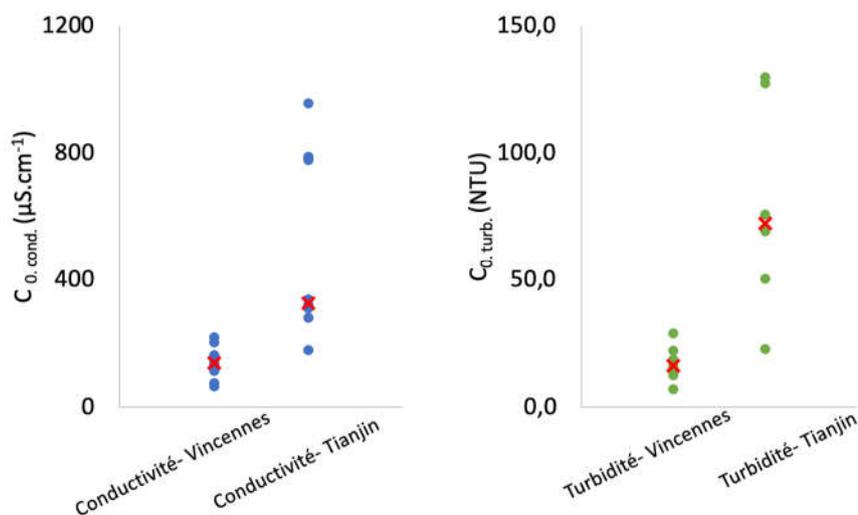


Figure 6-27. Charge initiale estimée de conductivité et de turbidité à Vincennes et à Tianjin

Le Tableau 6-13 représente les valeurs de p de test U de Mann-Whitney des  $k_2$  et le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** celles des  $C_0$  entre Vincennes et Tianjin.

Tableau 6-13. Valeurs de p de test U de Mann-Whitney pour les coefficients de l'évolution  $k_2$

	Conductivité-Vincennes	Turbidité- Vincennes	Conductivité- Tianjin
Turbidité- Vincennes	0,906 (non)		
Conductivité- Tianjin	0,101(non)	-	

Turbidité- Tianjin	-	0,138(non)	0,852 (non)
--------------------	---	------------	-------------

Tableau 6-14. Valeurs de p de test U de Mann-Whitney pour les charges initiales estimées C0

	Conductivité-Vincennes	Turbidité- Vincennes
Conductivité- Tianjin	0,001(***)	-
Turbidité- Tianjin	-	0,004(**)

Selon les résultats obtenus, nous pouvons observer que :

Pour un même site d'étude, les différences de coefficient d'évolution  $k_2$  entre les deux paramètres ne sont pas significatives. Les valeurs p utilisées pour mesurer la différence entre la conductivité et la turbidité sont 0,906 à Vincennes et 0,852 à Tianjin (supérieur à 0,05). Pour Vincennes, la médiane de coefficient d'évolution de conductivité  $k_{2, \text{cond.}}$  est de  $0,271 \text{ mm}^{-1}$  et celle de turbidité  $k_{2, \text{turb.}}$  est de  $0,273 \text{ mm}^{-1}$ , alors que pour Tianjin, le  $k_{2, \text{cond.}}$  est de  $0,626 \text{ mm}^{-1}$  et  $k_{2, \text{turb.}}$  est de  $0,638 \text{ mm}^{-1}$ . Cela indique que, quel que soit le site d'étude, les matières particulaires (turbidité) et les polluants dissous (conductivité) dans l'eau collectée évoluent de manière similaire et les vitesses de réduction en cours d'événement de pluie sont similaires. C'est-à-dire que les efficacités d'élimination des polluants dissous et particulaires en déviant une même fraction en début d'événement seront proches pour chacun des deux sites.

Toutefois, en observant le Tableau 6-12 et la Figure 6-26, pour le même paramètre, on observe que la gamme de variation de  $k_2$  entre les événements pluvieux collectés est supérieure à la différence de médianes entre les deux sites d'étude. Concernant la turbidité, la gamme de  $k_{2, \text{turb.}}$  à Vincennes est de  $0,194\text{-}1,897 \text{ mm}^{-1}$  (la différence est égale à  $1,703 \text{ mm}^{-1}$ ) et de  $0,375\text{-}1,484 \text{ mm}^{-1}$  à Tianjin (la différence est égale à  $1,109 \text{ mm}^{-1}$ ), alors que la différence des médianes entre les deux sites est de  $0,365 \text{ mm}^{-1}$ . De même, pour la conductivité, la gamme de  $k_{2, \text{cond.}}$  à Vincennes est de  $0,200\text{-}0,877 \text{ mm}^{-1}$  (différence égale à  $0,677 \text{ mm}^{-1}$ ) et  $0,263\text{-}1,491 \text{ mm}^{-1}$  à Tianjin (différence égale à  $1,228 \text{ mm}^{-1}$ ), et la différence des médianes est de  $0,355 \text{ mm}^{-1}$ . On peut conclure que les valeurs de  $k_2$  montrent une variation beaucoup plus grande entre les pluies différentes qu'entre les deux toits et leur localisation.

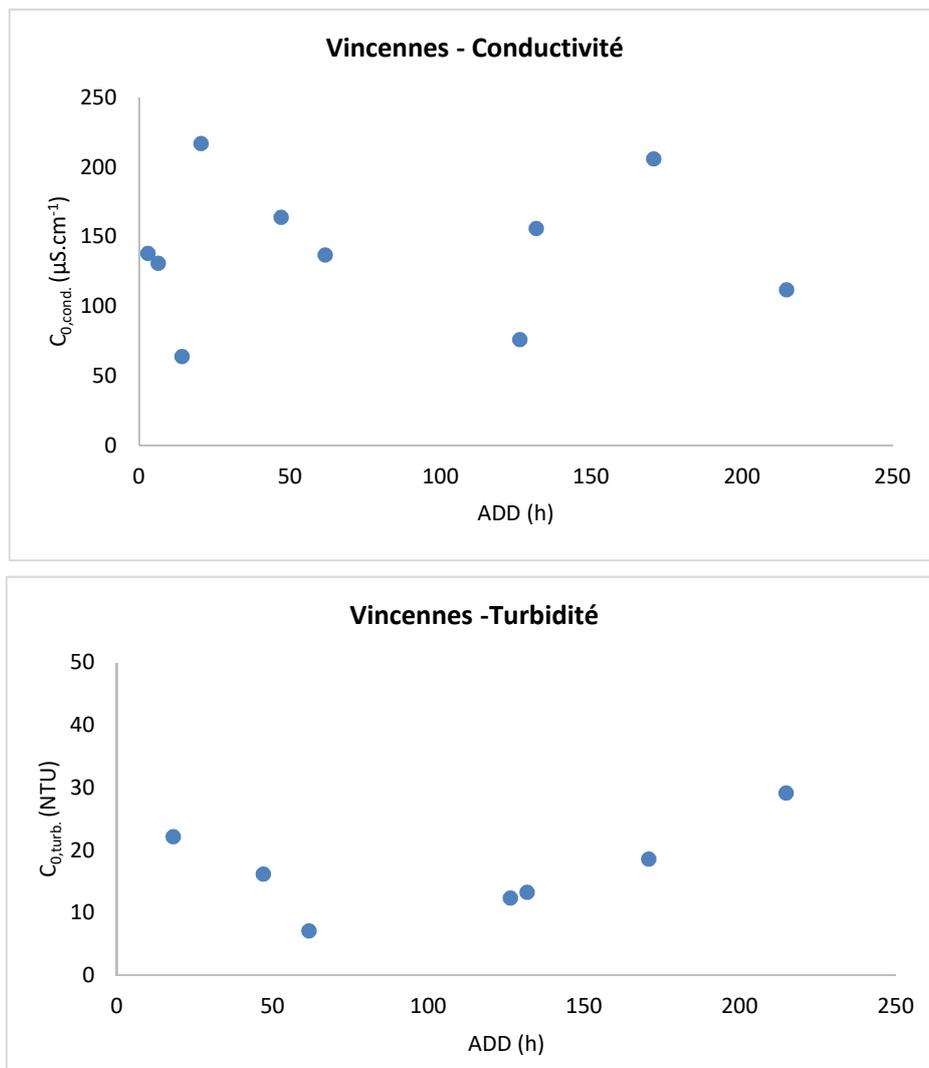
Concernant la charge initiale  $C_0$ , les différences entre Vincennes et Tianjin sont importantes et les valeurs de p sont respectivement de 0,001 pour conductivité et 0,004 pour la turbidité ( $< 0,05$ ). Comme nous l'avons mentionné dans la section précédente, ces différences sont dues à la grande différence des conditions de pollution atmosphérique. De plus, en observant les points dans la Figure 6-27 qui représentent les charges initiales de chaque événement pluvieux collecté, nous pouvons voir que la dispersion de  $C_0$  est plus grande à Tianjin qu'à Vincennes. La gamme de  $C_{0, \text{Turb}}$  ( $23,0\text{-}129,8 \text{ NTU}$ ) et la gamme de  $C_{0, \text{cond.}}$  ( $179\text{-}955 \mu\text{S.cm}^{-1}$ ) à Tianjin sont supérieures aux différences des médianes

respectives (56,2 NTU et 189  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ). C'est-à-dire que la valeur  $C_0$  est très différente entre les localisations et aussi différente entre les événements de pluie.

En résumé, pour notre équation d'évolution de la qualité de l'eau, la charge initiale  $C_0$  varie énormément d'un site à l'autre et aussi entre les événements de pluie. La différence des coefficients de l'évolution  $k_2$  entre la conductivité et la turbidité n'est pas significative pour un même site d'étude. Le  $k_2$  varie plus entre les pluies qu'entre les toits et les localisations, ce qui montre que la valeur  $k_2$  est liée à la caractéristique des précipitations. La section suivante s'attachera à l'influence de l'intensité sur le coefficient de l'évolution.

#### 4.3.2 Influence de l'ADD sur $C_0$

La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** représente la relation entre  $C_0$  et l'ADD pour la conductivité et la turbidité à Vincennes et Tianjin.



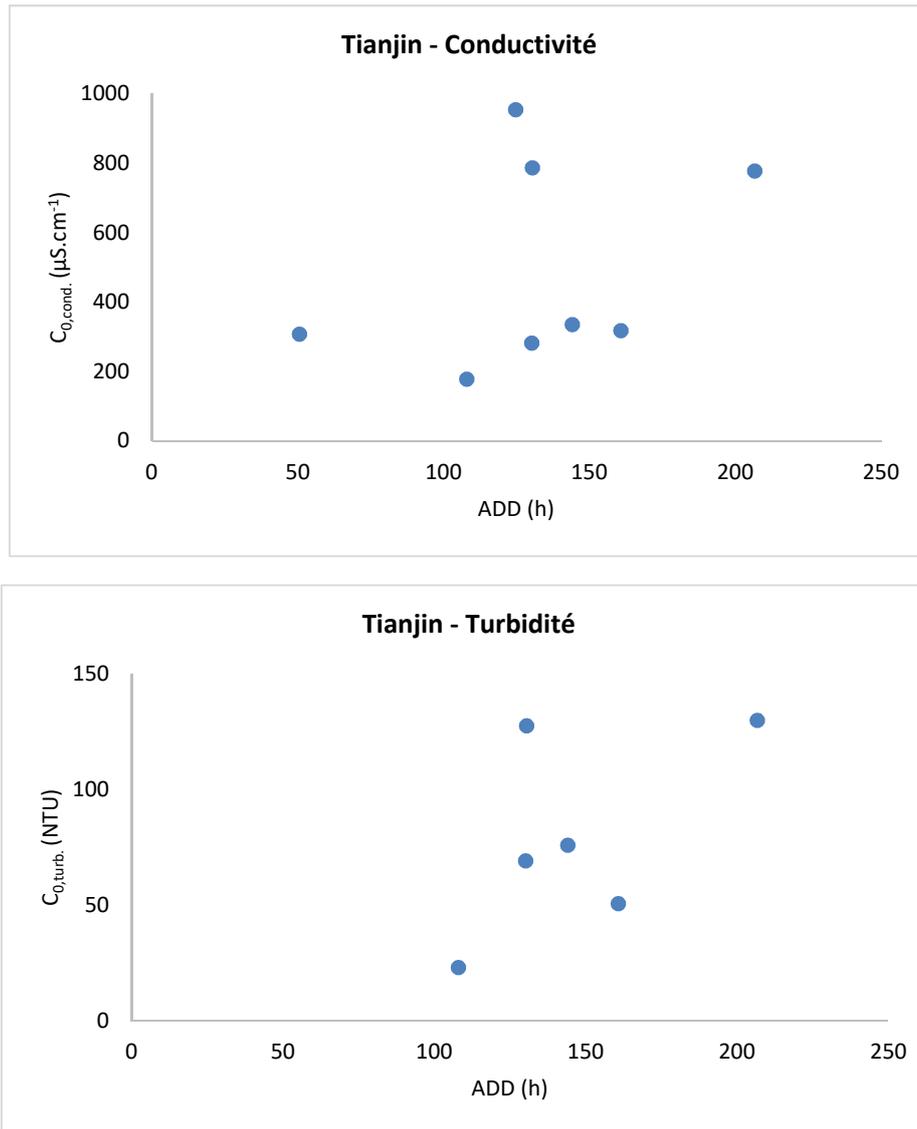


Figure 6-28. Relation entre  $C_0$  et l'ADD pour la conductivité et la turbidité à Vincennes et Tianjin

Nous constatons que la charge initiale  $C_0$  n'est pas seulement différente d'un site à l'autre, mais elle varie également beaucoup d'une pluie à l'autre et n'apparaît pas corrélée significativement à l'ADD.

#### 4.3.3 Influence de l'intensité de pluie ( $i_{moy.}$ et $i_{moy.f.}$ ) sur $k_2$

Pour le modèle à l'échelle de l'évènement pluvieux (une échelle de temps très courte), comme la caractéristique de pluie, l'état de toiture et l'environnement locale sont variées, les évolutions de qualité de l'eau ruisselée sur la toiture de chaque évènement pluvieux collecté sont variables. Les résultats précédents mettent en évidence qu'il paraît impossible de modéliser l'évolution de la qualité de l'eau à l'aide d'une formule commune. Les coefficients de l'évolution  $k_2$  ne sont pas significativement différents d'un site à l'autre,

mais la différence entre chaque événement pluvieux collecté est élevée (77,2% sur la conductivité et 82,4% sur la turbidité à Vincennes, 89,8% sur la conductivité et 74,5% sur la turbidité à Tianjin). Afin d'expliciter ce paramètre, nous recherchons une relation entre  $k_2$  et l'intensité de pluie.

$$k_2 = f(i)$$

D'après la section 0 de ce chapitre, nous confirmons que l'intensité moyenne sur un événement pluvieux collecté ( $i_{moy.}$ ) joue un rôle très important sur la dynamique d'évolution, nous testons d'abord la relation entre  $k_2$  et  $i_{moy.}$ . Puis, le modèle 2 étant établi en fonction de la hauteur de pluie précipitée par fraction ( $h_{p.f.}$ ), nous testons aussi la relation entre  $k_2$  et l'intensité moyenne par fraction ( $i_{moy.f.}$ ) (voir Tableau 6-6 Figure 6-3 dans ce chapitre).

Le Tableau 6-15 et le Tableau 6-16 indiquent le  $k_2$ , le  $i_{moy.}$  de chaque événement et le minimum et le maximum de  $i_{moy.f.}$  de chaque événement ( $i_{moy.f.min}$  et  $i_{moy.f.max}$ ) à Vincennes alors que le Tableau 6-17 et le Tableau 6-18 représentent les résultats à Tianjin. Toutes les valeurs  $k_2$  de la conductivité et de la turbidité sont présentées par ordre croissant et affichées dans les tableaux. De cette façon, nous pouvons observer la relation entre le  $k_2$ ,  $i_{moy.}$  et  $i_{moy.f.}$ .

Tableau 6-15. Relation entre le  $k_2$  et l'intensité de pluie- conductivité à Vincennes

	$k_2$	$i_{moy.}$ (mm/h)	$i_{moy.f.}$ (mm/h)		Description
			Min	Max	
23/10/2016	<b>0,200</b>	1,96	0,20	<b>11,79</b>	Intensité forte ( $i_{moy.f.max} > 4\text{mm/h}$ )
14/09/2015	<b>0,240</b>	0,16	0,09	<b>32,44</b>	
18/05/2015	<b>0,255</b>	0,50	0,50	<b>6,03</b>	
26/07/2015	<b>0,268</b>	1,53	0,43	<b>6,21</b>	
22/06/2015	<b>0,269</b>	1,30	1,76	<b>6,09</b>	
13/05/2015	<b>0,273</b>	1,22	0,04	<b>58,67</b>	
17/11/2016	<b>0,63</b>	0,76	1,10	<b>3,90</b>	Intensité faible ( $i_{moy.f.max} < 4\text{mm/h}$ )
20/11/2016	<b>0,679</b>	0,57	0,33	<b>1,97</b>	
12/01/2017	<b>0,753</b>	0,27	0,09	<b>1,14</b>	
12/20/2016	<b>0,877</b>	0,78	0,61	<b>1,11</b>	

Tableau 6-16. Relation entre le  $k_2$  et l'intensité de pluie-turbidité à Vincennes

	$k_2$	$i_{moy.}$ (mm/h)	$i_{moy.f.}$ (mm/h)		Description
			Min	Max	
18/05/2015	<b>0,194</b>	0,50	0,50	<b>6,03</b>	Intensité forte ( $i_{moy.f.max} > 4\text{mm/h}$ )
23/10/2016	<b>0,242</b>	1,96	0,20	<b>11,79</b>	
26/07/2015	<b>0,259</b>	1,53	0,43	<b>6,21</b>	
22/06/2015	<b>0,273</b>	1,30	1,76	<b>6,09</b>	
13/05/2015	<b>0,285</b>	1,22	0,04	<b>58,67</b>	

20/11/2016	<b>1,162</b>	0,57	0,33	<b>1,97</b>	Intensité faible ( $i_{moy.f.max} < 4$ mm/h)
19/05/2015	<b>1,897</b>	0,56	0,20	<b>1,33</b>	

Tableau 6-17. Relation entre le  $k_2$  et l'intensité de pluie- conductivité à Tianjin

	$k_2$	$i_{moy.}$ (mm/h)	$i_{moy.f.}$ (mm/h)		Description
			Min	Max	
14/07/2016	<b>0,564</b>	2,90	1,77	<b>5,31</b>	Intensité forte ( $i_{moy.f.max} > 4$ mm/h)
12/09/2016	<b>0,340</b>	2,31	1,59	<b>29,75</b>	
08/08/2016	<b>0,507</b>	2,41	1,22	<b>4,55</b>	
20/07/2016	<b>0,263</b>	0,87	0,22	<b>31,85</b>	
28/10/2016	<b>0,688</b>	2,23	1,59	<b>6,37</b>	
12/07/2016	<b>1,161</b>	0,78	0,12	<b>1,06</b>	Intensité faible ( $i_{moy.f.max} < 4$ mm/h)
02/08/2016	<b>1,461</b>	0,94	0,17	<b>1,45</b>	
22/10/2016	<b>1,491</b>	1,21	0,15	<b>3,18</b>	

Tableau 6-18. Relation entre le  $k_2$  et l'intensité de pluie - Turbidité à Tianjin

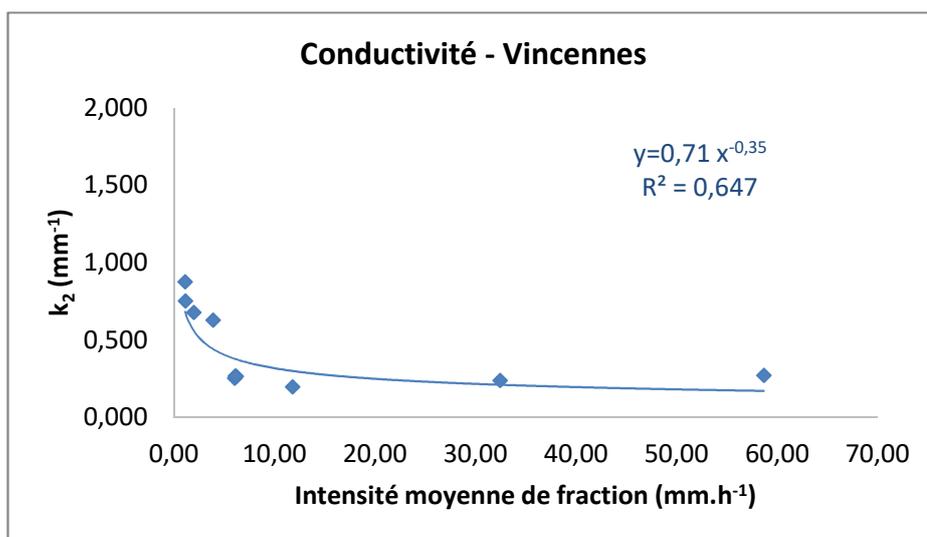
	$k_2$	$i_{moy.}$ (mm/h)	$i_{moy.f.}$ (mm/h)		Description
			min	max	
12/09/2016	<b>0,375</b>	2,31	1,59	<b>29,75</b>	Intensité forte ( $i_{moy.f.max} > 4$ mm/h)
20/07/2016	<b>0,470</b>	0,87	0,22	<b>31,85</b>	
28/10/2016	<b>0,528</b>	2,23	1,59	<b>6,37</b>	
08/08/2016	<b>0,747</b>	2,41	1,22	<b>4,55</b>	
12/07/2016	<b>1,479</b>	0,78	0,12	<b>1,06</b>	Intensité faible ( $i_{moy.f.max} < 4$ mm/h)
22/10/2016	<b>1,484</b>	1,21	0,15	<b>3,18</b>	

D'après ces tableaux, nous pouvons observer que pour tous les événements pluvieux collectés qui montrent des évolutions décroissantes, les distributions des valeurs  $k_2$  pour la turbidité et la conductivité sur les deux sites d'étude sont divisées en deux groupes (La Figure 6-26 dans la section précédente montre également le même résultat).

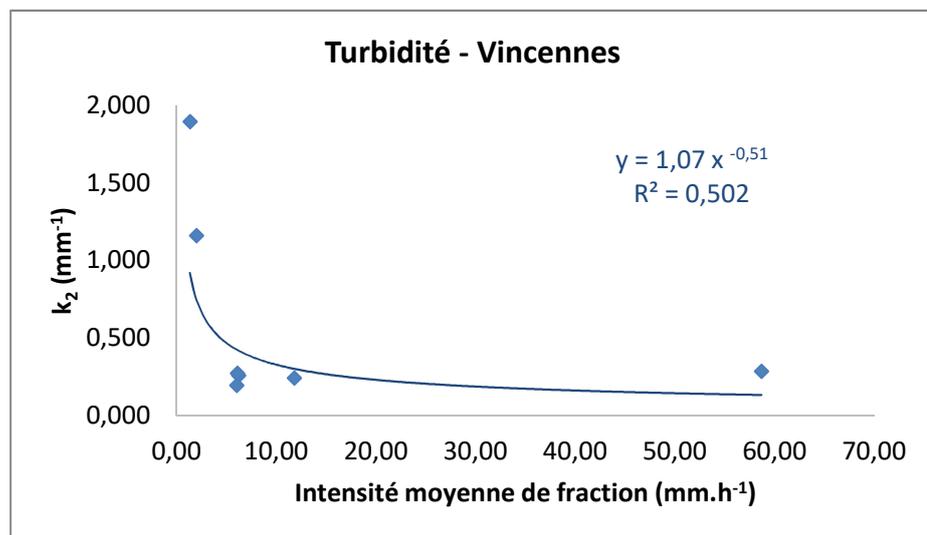
Pour la conductivité à Vincennes,  $k_2$  est compris entre 0,2 à 0,3  $mm^{-1}$  ou 0,6 à 0,9  $mm^{-1}$ . En observant le  $i_{moy.}$ , nous n'avons trouvé aucune relation. En regardant le  $i_{moy.f.}$ , ces deux groupes peuvent correspondre respectivement à une intensité de pluie moyenne de fraction forte ou faible. Lorsque le  $i_{moy.f.max.}$  est supérieur à 4mm/h, les  $k_2$  sont inférieurs à 0,3  $mm^{-1}$ , alors que lorsque  $i_{moy.f.max.}$  est inférieur à 4mm/h, les  $k_2$  sont supérieurs à 0,6  $mm^{-1}$ . De même, pour la turbidité à Vincennes, ces deux groupes couvrent respectivement les intervalles de 0,1 à 0,3  $mm^{-1}$  et de 1,1 à 1,9  $mm^{-1}$ . Pour la conductivité à Tianjin, ils sont de 0,2 à 0,7  $mm^{-1}$  et de 1,1 à 1,5  $mm^{-1}$ . Pour la turbidité à Tianjin, ils sont de 0,3 à 0,8  $mm^{-1}$  et de 1,4 à 1,5  $mm^{-1}$ , avec un même seuil de  $i_{moy.f.max.}$  de 4 mm/h. Lorsque l'intensité de pluie moyenne de fraction est élevée,  $k_2$  est faible et lorsque l'intensité est faible,  $k_2$  est grand. Cela peut être dû au fait que, pour une fraction d'eau de pluie collectée, si l'intensité de pluie moyenne sur cette fraction est élevée, le temps de remplissage est faible et

insuffisant pour permettre de laver les dépôts fixés sur le toit et moins de polluants s'écoulent alors. En conséquence, la vitesse de réduction des contaminants est plus lente ( $k_2$  plus faible). En revanche, pour une faible intensité de pluie moyenne de fraction, la pluie pourra plus facilement générer des polluants dans cette fraction, ce qui entraîne une décroissance plus rapide ( $k_2$  plus grand).

Nous avons ensuite essayé d'établir une relation fonctionnelle entre  $k_2$  et  $i_{\text{moy.f.max}}$ . Nous choisissons des décroissances en fonction puissance compte tenu de l'allure des courbes des points. La Figure 6-29 et la Figure 6-30 représentent les courbes d'ajustement et affichent les équations et les coefficients de détermination sur les graphiques.

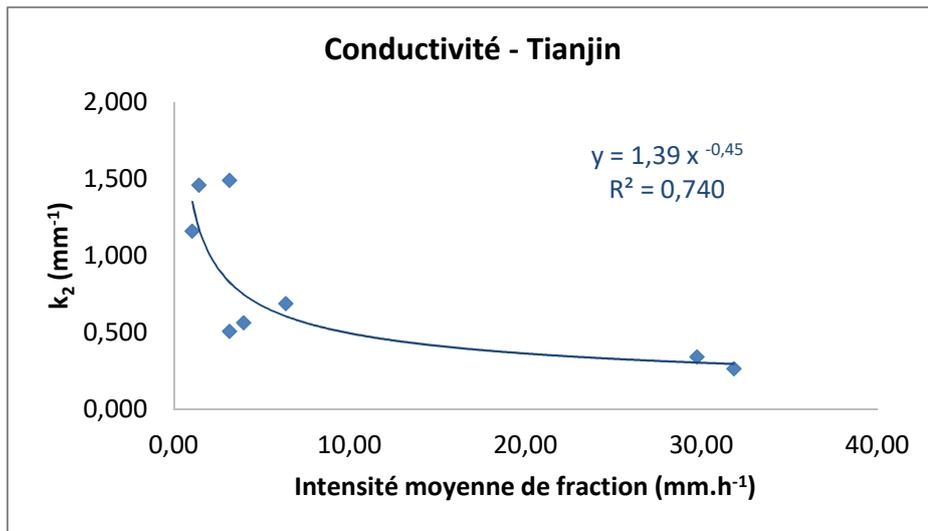


(a) Conductivité à Vincennes

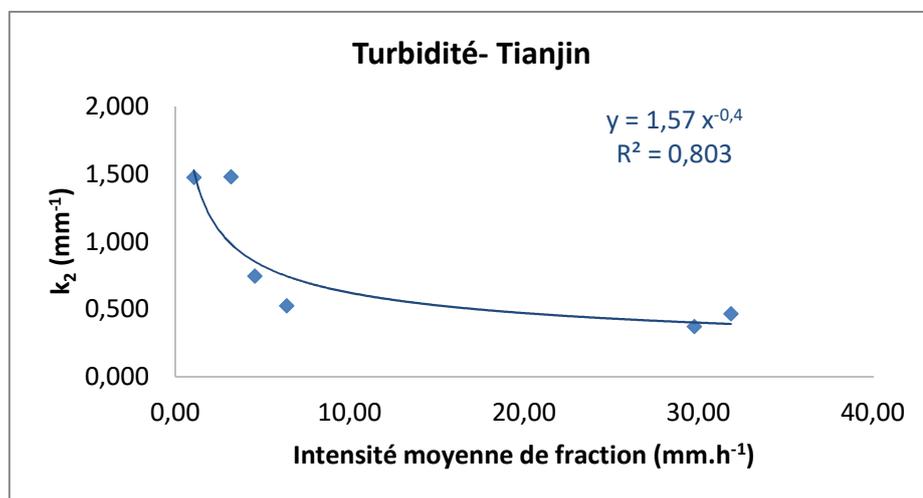


(b) Turbidité à Vincennes

Figure 6-29. Relation entre  $k_2$  et l'intensité de pluie moyenne de fraction à Vincennes



(a) Conductivité à Tianjin



(b) Turbidité à Tianjin

Figure 6-30. Relation entre  $k_2$  et l'intensité de pluie moyenne de fraction à Tianjin

Le Tableau 6-19 représente les paramètres de corrélation type puissance des deux paramètres à Vincennes et à Tianjin.

Tableau 6-19. Paramètre de corrélation type puissance entre les coefficients de l'évolution et les intensités de pluie moyenne de fraction

	Équation	Coefficient de détermination ( $R^2$ )
Vincennes- Conductivité	$y = 0,71 x^{-0,35}$	$R^2 = 0,647$
Vincennes- Turbidité	$y = 1,07 x^{-0,51}$	$R^2 = 0,502$
Tianjin- Conductivité	$y = 1,39 x^{-0,45}$	$R^2 = 0,740$
Tianjin -Turbidité	$y = 1,57 x^{-0,4}$	$R^2 = 0,803$

En regardant ces figures et le tableau, les résultats montrent que les équations puissance reproduisent assez fidèlement la relation entre les  $k_2$  et l'intensité moyenne de fraction. La corrélation existe bien, même si certains points ont tendance à s'écarter des courbes de régression (les coefficients de détermination sont seulement compris entre 0,52 et 0,81), mettant en évidence que  $k_2$  est influencé par d'autres paramètres, tels que la nature de la toiture, les changements brusques de l'environnement (une pollution atmosphérique élevée, des vents violents, des travaux...) qui affectent la taille des particules de sédiment déposés sur la toiture.

## Conclusion du chapitre 6

Ce chapitre s'est intéressé à l'analyse de l'évolution de la qualité de ruissellement de toiture en cours d'événement. Après une étape de prétraitement des données, en analysant les profils d'évolution de la qualité des paramètres représentatifs, deux types de profils ont été identifiés : les profils en évolution décroissante et les profils en évolution non monotone. Pour la conductivité et la turbidité, la plupart des profils à Vincennes et à Tianjin appartiennent à une évolution décroissante alors que la majorité de profils à Romainville présentent une évolution non monotone. La plupart des profils d'évolutions de la flore totale à 36°C sur les trois sites d'étude varient en fonction non monotone.

Nous avons d'abord déterminé la relation entre les facteurs déterminants et l'évolution de la qualité de l'eau et, ensuite, étudié dans quelles conditions l'évolution de la qualité de l'eau témoigne d'un changement décroissant. Deux facteurs sont très importants : l'intensité de pluie et la durée de temps sec précédant l'évènement pluvieux (l'ADD). Nous avons proposé la définition de l'intensité de pluie qui convient mieux à notre étude, à savoir : l'intensité moyenne sur un évènement pluvieux collecté. Pour calculer cette intensité, une méthode pour définir le volume de pluie collectée par le dispositif d'échantillonnage et la durée de collecte correspondante a été réalisée. La perte initiale de chaque site d'étude et le coefficient de perte du dispositif d'échantillonnage ont été pris en compte. Sur la base de l'intensité moyenne et de l'ADD, nous avons pu observer les conditions dans lesquelles les deux types d'évolution existaient. Pour Romainville, la contamination est trop faible et il n'y est jamais (ou presque) observé de tendance décroissante. Dans les cas de Vincennes et de Tianjin, lorsque l'ADD est supérieure à 100h et l'intensité moyenne est supérieure à 1mm/h, des évolutions décroissantes de la contamination ont été observées systématiquement. Cet effet peut être dû aux différences de concentration de polluants dans l'eau. L'ADD et l'intensité moyenne entraînent indirectement cette différence de concentration.

Pour les profils d'évolution en fonction décroissante, deux essais de modélisation des évolutions de la qualité ont été menés, en utilisant les données relatives aux conditions correspondantes. La première tentative de modélisation réalisée ne tenait compte que de la durée de pluie précipitée. A cause des faibles coefficients de détermination de certains évènements et de l'impossibilité d'une détermination précise des instants de remplissage des flacons du système expérimental, il apparaît que ce 1<sup>er</sup> type de modèle n'est pas performant pour prédire l'évolution de la qualité pour chaque période. Le second modèle, représentant la concentration des polluants ruisselés dans l'eau en fonction de la hauteur de pluie précipitée cumulée, reproduit plus fidèlement les évolutions de la qualité de l'eau de ruissellement de la toiture.

En analysant les paramètres du modèle 2, concernant les coefficients de l'évolution  $k_2$ , nous avons pu montrer que les différences de coefficient d'évolution  $k_2$  entre les différents paramètres n'étaient pas significatives pour un même site d'étude. De plus, les valeurs  $k_2$

ont montré une variation beaucoup plus grande entre les pluies différentes qu'entre les toits et les localisations. Concernant la charge initiale  $C_0$ , elle s'est révélée très différente entre les localisations et également entre les événements de pluie. *In fine*, les essais de modélisation menés dans le cadre de ce travail ont montré que l'estimation de l'évolution de la qualité de l'eau par une formule commune était impossible, mais nous avons pu évaluer les évolutions en établissant une relation entre  $k_2$  et l'intensité de pluie moyenne de fraction.

**CONCLUSION GENERALE : Synthèse des résultats**  
**et perspectives**

Les recherches basées sur la collaboration entre LEESU (France) et TAES (Chine), dans le cadre de cette thèse, avaient pour objectif l'étude de l'évolution de la qualité de l'eau de pluie en aval de toiture, en vue d'utiliser de l'eau de toiture collectée et de proposer des préconisations sur la façon de dévier la première partie de l'eau. Ainsi, des expérimentations concrètes ont été menées pour fournir des données scientifiques. Un dispositif de collecte fractionnée par une succession de flacons a été construit et mis en place à l'aval de portions de toit de deux maisons situées dans différentes zones de la région Île-de-France (France) et d'une maison à Tianjin (Chine). Une analyse de la qualité a été réalisée durant un an et demi.

Cette conclusion générale comprend trois sections : la première est de rappeler les objectifs et la démarche d'interprétation des résultats ; la seconde est la synthèse des résultats expérimentaux ; et la dernière présente les perspectives de ce travail tant scientifiques qu'opérationnelles.

### Rappel des objectifs et de la méthodologie de la thèse

Ce travail a permis d'atteindre l'objectif proposé d'analyser les dynamiques d'évolution de la qualité des eaux de toit en cours d'évènement. Cet objectif se décomposait en trois volets :

- analyser l'évolution de la qualité de l'eau de toiture au cours des évènements pluviaux ;
- identifier les facteurs déterminants de l'évolution de la qualité de l'eau de toiture ;
- modéliser l'évolution de la qualité de l'eau de toiture.

La Figure 6-1 présente le schéma général de la méthodologie mise en place.

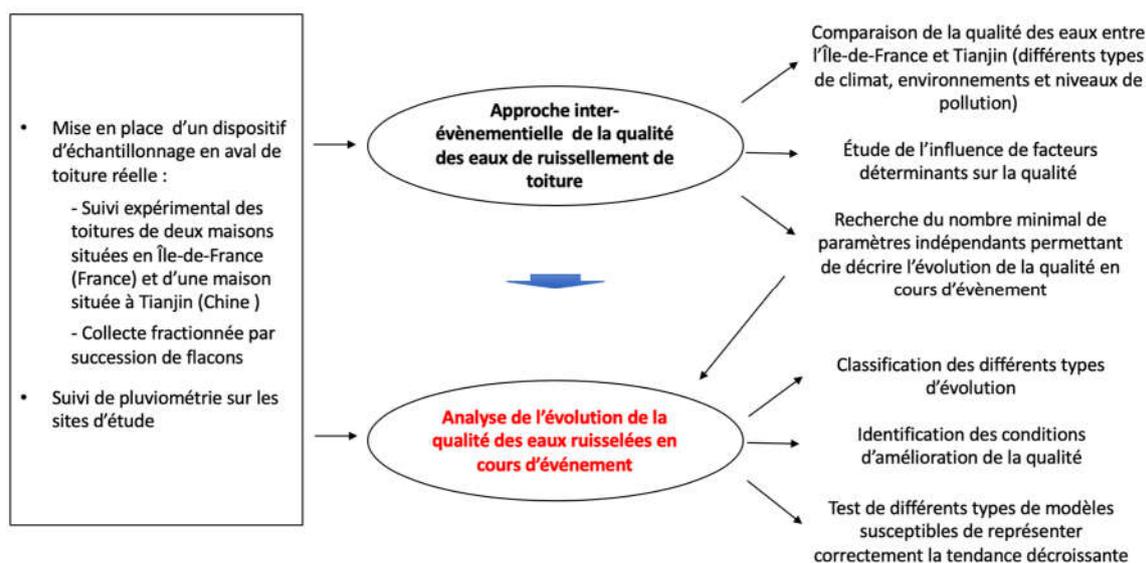


Figure 6-1. Schéma de synthèse de la méthodologie suivie

Cette étude repose sur un travail mené à partir de deux approches principales : une approche inter-événementielle de la qualité des eaux de toiture et une analyse de l'évolution de la qualité en cours d'évènement. Ce schéma ( Figure 6-1) présente les travaux effectués pour atteindre les objectifs. Nous notons particulièrement que :

sur la première approche de cette étude, le fait que les toitures instrumentées soient de dimensions différentes, alors que le dispositif d'échantillonnage restait le même, conduit à ce que chaque fraction collectée corresponde à une hauteur d'eau précipitée différente. Pour réaliser la comparaison de la qualité moyenne d'une même quantité d'eau de pluie collectée entre les différents sites, nous avons proposé une méthode basée sur la recombinaison des fractions et reconstitution des cumuls millimétriques ;

la qualité est estimée au travers de paramètres de natures diverses (9 paramètres en France et 13 paramètres en Chine). Sur la première approche, en plus des études de la qualité de l'eau de pluie collectée sur les trois sites et l'étude de l'influence des facteurs déterminants, une recherche du nombre minimum de paramètres à même de représenter l'échantillon a permis de décrire de manière simple l'évolution de la qualité en cours d'évènement dans la deuxième approche ;

la limite du système d'échantillonnage est l'absence de connaissances de la relation précise dans le temps entre la hauteur d'eau précipitée, mesurée par le pluviomètre et les instants de début et de fin d'accumulation de l'eau dans des flacons. Nous avons ainsi proposé une méthode pour calculer le coefficient de récupération du dispositif d'échantillonnage et estimer la perte d'eau initiale, et pallier à la limite du système.

### **Principaux résultats obtenus**

Résumons maintenant les principaux résultats de cette étude au travers de deux sections correspondant à nos deux approches de travail.

#### *Qualité moyenne des eaux collectés ruisselées.*

Concernant la qualité moyenne des eaux collectées ruisselées, nous avons d'abord établi une évaluation de la valeur de chaque paramètre pour le 1<sup>er</sup> mm (et 2<sup>ème</sup>) de pluie par un calcul des valeurs médianes correspondant aux fractions composant ce 1<sup>er</sup> mm (et, le cas échéant, le 2<sup>ème</sup>). Puis les analyses ont été effectuées au travers de la comparaison de la qualité du 1<sup>er</sup> mm de l'eau de pluie collectée entre les trois sites et les paramètres de qualité des cumuls millimétriques consécutifs sur le même site (seulement pour Vincennes et Tianjin). Cette étape est basée sur des représentations graphiques de boîtes à moustaches et d'utilisation des tests U de Mann-Whitney qui évaluent les différences entre des cumuls millimétriques. En comparant la qualité de tous les 1<sup>ers</sup> mm d'eau, nous avons constaté que la pollution de l'eau de pluie sur les toits à Tianjin était plus importante que celle observée en Île-de-France avec une concentration plus importante sur tous les paramètres communs sauf le pH. Pour le pH, les différences entre les cumuls millimétriques ne sont pas significatives. Hormis le 1<sup>er</sup> mm d'eau de pluie cumulée du 31

mai 2015 à Vincennes où le pH médian est supérieur à 9, les valeurs du pH sont comprises dans les limites de valeurs indiquées dans les critères français (entre 6,5 et 9) et critères chinois (entre 6 et 9) requis pour les eaux destinées à la consommation humaine. En regardant les autres paramètres communs, nous constatons que la conductivité de Tianjin ( $230 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) est presque le double de celle de Vincennes ( $106 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) alors que la valeur médiane de Vincennes est le triple de celle de Romainville ( $33 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) ; la turbidité de Tianjin (33,0 NTU) est environ 5 fois plus élevée que celle de Vincennes (6,1 NTU) et près de 9 fois plus élevée que celle de Romainville (3,7 NTU) ; les MES de Tianjin ( $90,0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) sont 5 fois plus élevées que celles de Vincennes ( $17,6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) et 12 fois plus élevées que celles de Romainville ( $7,5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) ; le COD de Tianjin ( $20,0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) est 3,4 fois plus élevé que celui de Vincennes ( $5,9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) et 9,5 fois plus élevé que celui de Romainville ( $2,1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) ; enfin, la flore totale à  $36^\circ\text{C}$  de Tianjin ( $4,5 \log \text{ ufc}\cdot\text{ml}^{-1}$ ) est de 1,2 log supérieure à celle de Vincennes ( $3,3 \log \text{ ufc}\cdot\text{ml}^{-1}$ ) et de 1,9 log supérieure à celle de Romainville ( $2,6 \log \text{ ufc}\cdot\text{ml}^{-1}$ ), alors que la différence entre les deux sites en Île-de-France est de 0,7 log. La valeur médiane du 1<sup>er</sup> mm d'eau à Romainville est proche ou inférieure à la valeur limite indiquée dans les critères sur tous les paramètres (arrêté ou norme pour l'eau destinée à la consommation humaine). Il faut noter que la différence entre les deux pays est plus importante qu'entre les deux sites de l'Île-de-France. Cette différence peut être causée par l'environnement local : à Tianjin, la pollution de l'air est plus importante (notamment, les valeurs moyennes de PM 2,5 et le PM 10 à Tianjin sont 5,5 fois plus élevées que celles de Paris), ce qui peut entraîner davantage de dépôts sur le toit et de poussières dans l'atmosphère. En observant la qualité de cumuls millimétriques consécutifs sur le même site, nous constatons que pour tous les paramètres physico-chimiques, les concentrations du 2<sup>ème</sup> mm de l'eau collectée connaissent des réductions sensibles bien que différentes selon le paramètre (de 25% à 84,11%). Il en va autrement pour les paramètres microbiologiques, pour lesquels aucune tendance claire de réduction n'a été constatée.

Au travers de cette approche, la représentation globale de la qualité a été réalisée via 9 paramètres en France et 13 paramètres en Chine. En vue d'exploiter les résultats de manière efficace, le nombre de paramètres a été réduit en intégrant le maximum de l'information et en retenant des paramètres faciles à mesurer du point de vue opérationnel. Cette procédure de réduction des paramètres a été réalisée *via* l'ACP. En considérant la qualité de représentation de chaque paramètre (résultats de l'ACP) et en combinant l'analyse de corrélations et la facilité opérationnelle pour mesurer les différents paramètres, une hiérarchisation des paramètres utilisés pour l'étude de l'évolution de la qualité a été proposée pour les trois sites d'étude. Trois paramètres ont été identifiés comme prioritaires : la turbidité, la conductivité et la flore totale à  $36^\circ\text{C}$ . Nous avons vérifié par régression linéaire multiple que ces trois paramètres concentraient la majorité des informations relatives à la qualité. Nous les avons donc considérés comme paramètres représentatifs dans cette étude.

L'influence des facteurs déterminants sur la qualité moyenne a ensuite été étudiée. Parmi les facteurs variables qui affectent la qualité de l'eau ruisselée de toiture, de nombreux

travaux ont montré que la saisonnalité et la durée de temps sec précédant la précipitation (ADD : *Antecedent Dry Days*) avaient un impact important (Jordan et al., 2008 ; Despins et al., 2009 ; Baffaut et Delleur, 1990 ; Chen et Adams, 2007). Concernant la saisonnalité, sur chaque site d'étude, nous avons d'abord présenté toutes les fractions collectées dans le plan de composantes principales puis montré les distributions des médianes de chaque événement pluvieux collecté des trois paramètres représentatifs selon les différentes saisons. Selon les résultats observés, il est apparu qu'il n'existait pas d'effet de saisonnalité pour la conductivité et la turbidité alors que toutes les concentrations de la flore totale à 36°C en hiver sont inférieures à celles des autres saisons. Concernant l'influence de l'ADD, il a été montré que les polluants microbiologiques n'étaient pas liés avec l'ADD alors qu'il existait une tendance d'augmentation de la conductivité et de la turbidité avec l'ADD. De plus, ces tendances d'augmentation ont pu être ajustées aux courbes exponentielles et aussi linéaires. Qu'il s'agisse de la conductivité ou de la turbidité, le taux de croissance des polluants déposés sur la toiture est le suivant : Tianjin > Vincennes > Romainville. Les différents environnements dans lesquels se situent les trois sites, le niveau de pollution et la nature de la toiture déterminent la vitesse à laquelle cette pollution s'accumule.

#### *Évolution de la qualité des eaux de ruissellement de toiture en cours d'événement*

L'évolution de la qualité des eaux de ruissellement de toiture en cours d'événement a été ensuite analysée. L'analyse des profils d'évolution des paramètres représentatifs de la qualité a permis d'identifier deux types de profils : les profils en évolution décroissante et les profils en évolution non monotone. En synthétisant les événements de collecte et le ratio de ces deux modes d'évolution, nous avons constaté que la plupart des profils d'évolutions de la flore totale à 36°C varient en fonction non monotone (85% à Vincennes, 88% à Romainville et 89% à Tianjin) alors que la plupart des profils de la conductivité et de la turbidité à Vincennes et à Tianjin connaissent une évolution décroissante (54% à 79%). Sur Romainville, quel que soit le paramètre, la majorité des profils présente une évolution non monotone. Cela est peut-être dû au fait que la qualité de l'eau de ruissellement collectée à Romainville est meilleure que les deux autres sites d'étude. Les concentrations de pollution dissoute sont plus faibles que celles observées à Vincennes et à Tianjin. Cela indique aussi qu'une évolution de la qualité en cours d'évènement est d'autant moins observable dans la mesure où la qualité moyenne de l'eau de ruissellement est bonne.

Dans cette approche, nous avons étudié les facteurs apparaissant comme particulièrement importants pour expliquer l'évolution de la qualité de l'eau de ruissellement de toiture. Parmi tous les facteurs qui peuvent affecter l'état initial du toit et les caractéristiques des pluies tels que les sites d'échantillonnage, la saisonnalité, la météorologie, deux sont très importants : l'intensité de pluie et la durée de temps sec précédant l'évènement (ADD). L'intensité de pluie a été ici définie comme l'intensité moyenne sur un événement pluvieux collecté, soit la hauteur de pluie précipitée totale

collectée par le dispositif d'échantillonnage divisée par la durée totale de la collecte. Nous avons déterminé la relation entre ces facteurs et l'évolution de la qualité de l'eau et étudié dans quelles conditions l'évolution de la qualité de l'eau témoignait d'une évolution décroissante. A Romainville, dont les concentrations des matières particulaires et des polluants dissous sont faibles, il n'a presque jamais été observé de tendance décroissante. Alors que dans les cas de Vincennes et Tianjin, lorsque l'ADD est supérieure à 100 h (environ 4 jours) et l'intensité moyenne est supérieure à 1mm/h, l'évolution de la qualité de l'eau est systématiquement décroissante pour la turbidité et la conductivité. C'est-à-dire que plus la concentration de polluants dans l'eau de ruissellement est élevée, plus l'ADD est longue et plus l'intensité est forte, plus la dynamique de décroissance de la concentration est visible et prononcée.

Enfin, dans les cas où une évolution décroissante a été observée, des essais de modélisation ont été entrepris, selon le principe d'une diminution progressive des concentrations jusqu'à l'atteinte d'une valeur proche de zéro selon une équation exponentielle décroissante en relation avec les caractéristiques de la pluie. La première tentative de modélisation ne tient compte que de la durée de pluie précipitée. Cependant, l'existence de valeurs extrêmes sur les charges initiales estimées et les faibles coefficients de détermination sur les courbes de régression ont conduit à la conclusion qu'un tel modèle n'était pas performant pour prédire l'évolution de la qualité pour chaque période. Cela peut être dû au fait que le système expérimental mis en place ne permet d'avoir accès que de manière très indirecte et peu précise à la variable temps, qui est celle du modèle. Un second modèle, représentant la concentration des polluants ruisselée dans l'eau en fonction de la hauteur de pluie précipitée cumulée, a été testé. Celui-ci a permis une reproduction plus fidèle des évolutions de la qualité de l'eau de ruissellement de la toiture par évènement. En étudiant les coefficients de décroissance (appelés  $k_2$ ) par le test U de Mann-Whitney, nous avons constaté que pour un même site d'étude, les différences de coefficient entre conductivité et turbidité n'étaient pas significatives et que, pour un même paramètre, la différence entre les trois sites n'étaient pas significatives non plus. Cependant, en observant les  $k_2$  de chaque évènement pluvieux collecté, les valeurs ont montré une variation beaucoup plus grande entre les différentes pluies qu'entre les toits et les localisations. Dans ce cas, nous avons davantage discuté de l'influence de l'intensité de chaque pluie sur le  $k_2$ . Nous avons constaté que l'intensité moyenne sur l'évènement pluvieux collecté ( $i_{moy.}$ ) n'était pas liée à  $k_2$  alors que l'intensité de fraction ( $i_{moy.f.}$ ) avait un effet sur lui. En particulier, quand le maximum de l'intensité de fraction ( $i_{moy.f.max}$ ) est supérieur à 4mm/h, le  $k_2$  est plus petit ( $<0,273$  pour la conductivité à Vincennes,  $<0,285$  pour la turbidité à Vincennes,  $<0,688$  pour la conductivité à Tianjin,  $<0,747$  pour la turbidité à Tianjin), alors que lorsque le maximum de l'intensité de fraction ( $i_{moy.f.max}$ ) est inférieur à 4mm/h, le  $k_2$  est plus grand ( $>0,63$  sur la conductivité à Vincennes,  $>1,162$  sur la turbidité à Vincennes,  $>1,161$  sur la conductivité à Tianjin,  $>1,484$  sur la turbidité à Tianjin).

## Perspectives

Plusieurs perspectives de travail sont envisageables pour compléter ces travaux. Cette partie est organisée en deux sous-sections : l'une concerne les perspectives en matière de recherche, l'autre du point de vue opérationnel.

### *Perspectives de recherche*

Dans l'objectif d'aller plus loin en termes de modélisation des évolutions décroissantes, plusieurs actions peuvent être entreprises.

En premier lieu, le retour d'expérience de notre dispositif nous apprend qu'il est souhaitable d'apporter des améliorations à celui-ci afin de disposer de données plus précises. En particulier, tant la perte initiale de chaque site d'étude que le moment où chaque fraction était remplie ont dû être estimés indirectement. De tels résultats comportent certaines incertitudes. Dans la perspective de ce travail, nous pouvons améliorer le système expérimental d'une part en ajoutant un dispositif de détection pour déterminer le moment de début d'accumulation d'eau dans le dispositif d'échantillonnage, d'autre part en réalisant le suivi en continu. Ce suivi en continu aujourd'hui est faisable pour la conductivité et la turbidité. Ce résultat peut être combiné avec l'intensité de pluie instantanée pour faire un nouvel essai de modélisation.

Comme il n'a pu être établi de formules communes pour estimer l'évolution de qualité, nous devons étudier en profondeur s'il existe d'autres éléments affectant l'évolution (âge et matériau de la toiture et des gouttières, pente de la toiture, nature et intensité de la végétation environnante...). Après étude, les éléments pertinents pourraient être ajoutés au modèle en tant que facteurs complémentaires. Dans cette perspective, des essais sur le terrain à long terme à Tianjin pourraient être envisagés dans le futur. En effet, c'est sur ce site que le phénomène de décroissance a le plus été mis en évidence.

En plus, nous avons étudié l'effet d'amélioration de la qualité en cours d'événement (effet dit de *first flush*) dans cette étude. Dans le prolongement, une étude visant à croiser cette approche avec l'optimisation hydrologique pourrait être menée. Aujourd'hui, il existe des modèles dans la littérature permettant de simuler la performance du système de récupération selon divers usages (Fewkes, 2000). Ces modèles visent un niveau d'optimisation quantitatif de l'eau stockée dans la cuve de stockage. Ils tiennent compte des fluctuations spatiales et temporelles de la pluviométrie et permettent de prédire le comportement du système, en termes de taux de recouvrement, pour différentes combinaisons de la surface du toit, de la demande en eau, de l'(des) usage(s) (intérieur(s) ou extérieur(s)), du volume de stockage et du niveau des précipitations. En combinant ce type de modèle avec notre travail, il serait possible d'évaluer l'impact de la mise en place de modalités de déviation d'une fraction de l'eau selon différentes conditions du système de récupération d'origine sur la quantité d'eau de pluie utilisée. Dans cette perspective un outil d'aide au dimensionnement du contenant de *first flush* et de son impact sur l'efficacité du système de récupération et créé les modèles simulant la performance a été

réalisé au LEESU dans le cadre d'un stage en 2017 (Alamou, 2017). Cet outil permet de faire varier le volume du *first flush* et ses conditions de vidange. Or, l'intérêt d'installer une citerne de récupération d'eau de pluie est de pouvoir réutiliser, dans le cadre de la réglementation en vigueur, une grande partie des volumes d'eau précipitée. Donc au-delà de l'évolution quantitative du *first flush*, l'estimation qualitative du seuil de *first flush* serait aussi intéressante à intégrer dans le modèle. Dans ce contexte, des simulations des conséquences des valeurs des paramètres de qualité (plutôt la turbidité et la conductivité) en termes de quantité d'eau récupérée pourraient être effectuées.

#### *Perspectives au niveau opérationnel*

A l'heure actuelle, de nombreux guides étrangers relatifs à la récupération de l'eau de pluie en aval de toiture recommandent la mise en place d'un déviateur de *first flush* en amont du stockage afin de garantir une bonne qualité d'eau (Australie, Canada, Georgia, Hawaï, Pays-Bas, Oregon, Texas ...). Ces guides stipulent l'existence de l'effet de *first flush*. Selon certains auteurs, le déviateur de *first flush* est capable d'éliminer à la fois les polluants particuliers et les polluants dissous (Martinson, B. et T. Thomas 2009). Abbott et al (2006); Lee et al (2002, 2012); Schriewer et al (2008). Cependant, que ce soit en Chine ou en France, ni les réglementations actuelles (l'arrêté du 21 août 2008 en France et l'arrêté du 11 janvier 2007 en Chine) ni les normes en vigueur (NF EN 16941-1 en France et GB/T 18920-2002 en Chine) ne font mention de ce type de solutions. Le guide technique français de l'ASTEE (2015) indique seulement en remarque que « l'évacuation des premières eaux vers le réseau d'eau pluviale permet de diminuer l'apport de matières non désirables mais présente l'inconvénient de diminuer les volumes collectés ».

Dans une perspective opérationnelle, nous estimons que les résultats de la thèse sont susceptibles d'apporter des éléments pour proposer un protocole de conception, d'utilisation et d'entretien d'un déviateur de *first flush*. Il est possible d'envisager l'élaboration d'une méthode opérationnelle reposant sur : la mesure en temps réel de la turbidité et de la conductivité ; et, la déviation d'une fraction pertinente de l'eau de pluie de toiture visant à maximiser la quantité d'eau stockée dans la cuve respectant des seuils de qualité.

La Figure 6-2 représente les préconisations de gestion du déviateur de flux de contaminants pour atteindre ces objectifs sur la base de nos résultats expérimentaux.

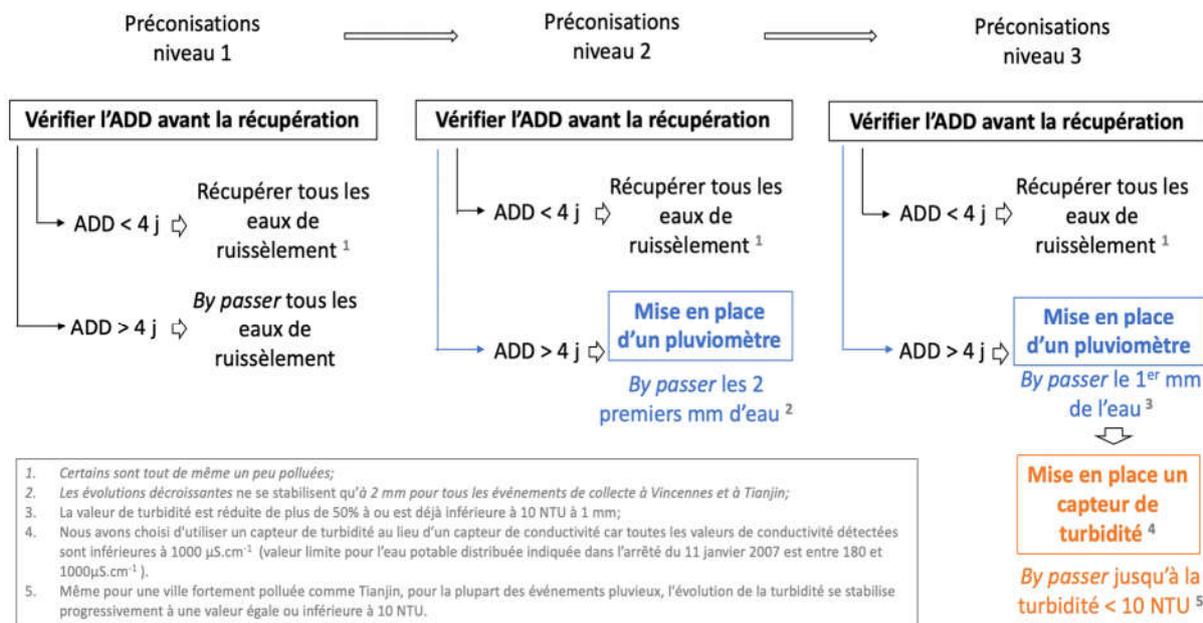


Figure 6-2. Les trois niveaux de préconisations de gestion du déviateur de flux de contaminants

En regardant ce schéma, nous proposons une organisation des préconisations de gestion de déviateurs en trois niveaux, qui permettent progressivement d'orienter vers la cuve plus d'eau collectée sur les toitures.

- Premier niveau : dans notre recherche, nous avons constaté que, lorsque l'intensité moyenne de la pluie est supérieure à 1mm/h et la période sèche est supérieure à 100 h, nous n'observons que des évolutions décroissantes de la qualité. Donc le premier niveau de préconisations de gestion du déviateur est de vérifier l'ADD de l'événement pluvieux avant la récupération de l'eau de pluie. Ce premier niveau consiste à récupérer toutes les eaux de ruissellement quand l'ADD est inférieure à 4j et *by passer* toutes les eaux de ruissellement quand l'ADD est supérieur à 4j. Cependant, en laissant des événements pluvieux intégralement de côté, cela peut entraîner une diminution importante de la quantité totale d'eau collectée.
- Deuxième niveau : lorsque l'ADD est inférieure à 4j, comme pour le premier niveau, toutes les eaux de pluie sont récupérées. Mais lorsque l'ADD est supérieure à 4j, seuls les deux premiers millimètres des eaux sont *by passés*, le reste de l'évènement étant récupéré. Nous choisissons « 2mm » comme une limite car nos résultats montrent que, pour tous les événements de collecte à Vincennes et à Tianjin dont les évolutions de qualité varient de manière décroissante, quelle que soit la concentration de contaminant de la première fraction de l'eau collectée, l'évolution de la qualité est stable après les deux premiers millimètres. Comparé au premier niveau de préconisation, ce deuxième nous permet de récupérer plus de l'eau de pluie.
- Il faut toutefois noter que, dans ce niveau, un pluviomètre est nécessaire pour s'assurer que la hauteur de pluie soit enregistrée. Il est également nécessaire

d'insérer un déviateur de *first flush* dont le volume est réglé en fonction de la surface de toiture collectrice et qui est *by passé* lorsque l'ADD est inférieur à 4 jours. Remarque : le régime de pluie pouvant entraîner de fortes variations de la qualité de l'eau, la mise en place du pluviomètre dans ce cadre nous fournit une information non seulement sur la quantité mais également la qualité de l'eau collectée.

- Troisième niveau : comme les deux premiers niveaux, toutes les eaux de ruissellement lorsque l'ADD est inférieur à 4 jours sont récupérées. Pour les événements de pluie avec un ADD supérieur à 4 jours, le 1<sup>er</sup> mm des eaux est by passé. Puis, à partir de la mesure de la turbidité en temps réel, la collecte des eaux est activée ou non : l'eau est récupérée lorsque la turbidité est inférieure à 10 NTU. Le seuil de 10 NTU de turbidité a été choisi car, dans notre recherche, pour tous les événements de collecte, on observe en enlevant le 1<sup>er</sup> mm d'eau : à Vincennes une valeur de la turbidité inférieure à 10 NTU ; et, à Tianjin, une valeur réduite de plus de 50%, qui peut être supérieure à 10 NTU mais qui a une dynamique de décroissance telle que la turbidité paraît se stabiliser ensuite progressivement à une valeur égale ou inférieure à 10 NTU.

Il faut noter que, à ce niveau, en plus du pluviomètre, un turbidimètre en temps réel est nécessaire. Cette méthode fait le choix de mesurer la turbidité au lieu de la conductivité, car, dans notre recherche, toutes les valeurs de conductivité détectées dans notre étude sont inférieures à  $1000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  (valeur limite pour l'eau potable distribuée indiquée dans l'arrêté du 11 janvier 2007 est entre 180 et  $1000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ). Cela montre que pour les usages intérieurs ou extérieurs des bâtiments, la conductivité n'est pas suffisante comme un critère pour juger s'il faut récupérer de l'eau de ruissellement de toiture ;

Le recours à un niveau de préconisation plutôt qu'à un autre va dépendre d'une part des moyens techniques disponibles localement, et d'autre part de considérations économiques en termes de coût au regard des économies d'eau réalisées : coût d'investissement, mais aussi coûts d'exploitation et d'entretien du dispositif mis en œuvre.

Par ailleurs, les eaux collectées en suivant ces préconisations sont plutôt pour les usages extérieurs comme l'arrosage, le lavage de voiture ou des usages intérieurs de la maison pour des usages comme l'alimentation des chasses d'eau de toilettes, le lavage des sols, et, le lavage du linge. L'usage douches et les usages récréatifs extérieurs pour lesquels l'eau entre directement en contact avec l'homme ne doivent pas être pris en compte car ils peuvent présenter des risques sanitaires. Cela est dû aux raisons suivantes : i) pour les eaux de ruissellement que nous avons collectées lorsque l'ADD est inférieur à 4 jours, parce que l'intensité de pluie ou les autres facteurs de conditions météorologiques peuvent entraîner de forte variation de la qualité de l'eau, les eaux de pluie collectées de certains événements sont tous de même polluées ; ii) les valeurs critiques dans les normes sont de 2 NTU à France (valeur de référence sur l'eau distribuée dans l'arrêté du 11 janvier 2007) et 5 NTU à Chine (valeur de référence dans la norme de qualité de l'eau pour

la consommation d'eau distribuée en milieu urbain), valeurs que les préconisations indiquées (quel que soit le niveau considéré) ne permet pas de garantir ; iii) nos résultats prouvent que la flore totale à 36°C ne s'améliore pas en cours d'événement, l'objectif d'optimisation des indicateurs microbiologiques ne peut donc être atteint.

Bien que le risque ne soit malgré tout jamais éliminé, la collecte des eaux suivant ces préconisations, associée à de fréquents nettoyages du système de RUEP et des toits peuvent atténuer sensiblement les risques sanitaires.

Au-delà des préconisations de gestion du déviateur flux de contaminants qui ont été présentées ci-dessus, la conception de ce déviateur combinée avec l'optimisation hydraulique constitue une piste aux retombées opérationnelles prometteuse pour des travaux futurs, dont l'objectif serait d'optimiser la conception finale d'un dispositif de *first flush* devant assurer le stockage de l'eau de pluie de manière quantitative et qualitative.

## Référence bibliographique

Anderson, James L., Brooke C. Asleson, Lawrence A. Baker, Andrew J. Erickson, John S. Gulliver, Raymond M. Hozalski, Omid Mohseni, et al. 2008. "Assessment of Stormwater Best Management Practices." Report. University of Minnesota. <http://conservancy.umn.edu/handle/11299/181358>.

Cui, Yan, Ying Liu, and Zhuo Tian. 2015. "Comparative Review of Microbial Indexes of Chinese and Foreign Water Quality Standards." *Journal of Food Safety and Quality*. [http://www.chinafoodj.com/ch/reader/create\\_pdf.aspx?file\\_no=20150303001&flag=1&journal\\_id=spzljcxb](http://www.chinafoodj.com/ch/reader/create_pdf.aspx?file_no=20150303001&flag=1&journal_id=spzljcxb).

Doyle, Kelly C. 2008. "Sizing the *First flush* and Its Effect on the Storage-Reliability-Yield Behavior of Rainwater Harvesting in Rwanda."

Feng, Jingyang, Jun Luo, and Ningfang Li. 2003. "彩色沥青瓦." 彩瓦与路砖. [http://file01.ixueshu.com/1000000216505011/fulltext?sign=5f535bf49f08c87ef8619a4d408c11f4&user=xs\\_1498085373995&water=1&t=1498085373995&title=%E5%BD%A9%E8%89%B2%E6%B2%A5%E9%9D%92%E7%93%A6](http://file01.ixueshu.com/1000000216505011/fulltext?sign=5f535bf49f08c87ef8619a4d408c11f4&user=xs_1498085373995&water=1&t=1498085373995&title=%E5%BD%A9%E8%89%B2%E6%B2%A5%E9%9D%92%E7%93%A6).

Förster, Jürgen. 1999. "Variability of Roof Runoff Quality." *Water Science and Technology* 39 (5): 137-44. doi:10.1016/S0273-1223(99)00095-5.

GB 11893-89. 1990. "Water Quality-Determination of Total Phosphorus-Ammonium Molybdate Spectrophotometric Method." [http://kjs.mep.gov.cn/hjbhzb/bzwb/shjbh/sjcgfffbz/199007/t19900701\\_67131.htm](http://kjs.mep.gov.cn/hjbhzb/bzwb/shjbh/sjcgfffbz/199007/t19900701_67131.htm).

GB 11901-89. 1990. "Water Quality-Determination of Suspended Substance-Gravimetric Method." [http://kjs.mep.gov.cn/hjbhzb/bzwb/shjbh/sjcgfffbz/199007/t19900701\\_67165.htm](http://kjs.mep.gov.cn/hjbhzb/bzwb/shjbh/sjcgfffbz/199007/t19900701_67165.htm).

GB 13580.3-92. 1993. "Methods for Determination of Specific Conductance in the Wet Precipitation." [http://kjs.mep.gov.cn/hjbhzb/bzwb/dqhjbh/jcgfffbz/199303/t19930301\\_67555.shtml](http://kjs.mep.gov.cn/hjbhzb/bzwb/dqhjbh/jcgfffbz/199303/t19930301_67555.shtml).

GB/T 5750.4-2006. 2006. "Standard Examination Methods for Drinking Water." [http://www.moh.gov.cn/open/web\\_edit\\_file/20070618124709.pdf](http://www.moh.gov.cn/open/web_edit_file/20070618124709.pdf).

GB/T 13580.4-92. 1993. "Determination of PH Value of the Wet Precipitation—Glass Electrode Method." [http://kjs.mep.gov.cn/hjbhzb/bzwb/dqhjbh/jcgfffbz/199303/t19930301\\_67565.shtml](http://kjs.mep.gov.cn/hjbhzb/bzwb/dqhjbh/jcgfffbz/199303/t19930301_67565.shtml).

GB/T 13580.7-92. 1993. "Determination of Nitrite in the Wet Precipitation-N-(1-Naphthyl)-1,2-Diaminoethane Dihydrochloride Spectrophotometry." [http://kjs.mep.gov.cn/hjbhzbz/bzwb/dqhjbh/jcgfffbz/199303/t19930301\\_67549.shtml](http://kjs.mep.gov.cn/hjbhzbz/bzwb/dqhjbh/jcgfffbz/199303/t19930301_67549.shtml).

GB/T 13580.11-92. 1993. "Determination of Ammonium in the Wet Precipitation." [http://kjs.mep.gov.cn/hjbhzbz/bzwb/dqhjbh/jcgfffbz/199303/t19930301\\_67572.shtml](http://kjs.mep.gov.cn/hjbhzbz/bzwb/dqhjbh/jcgfffbz/199303/t19930301_67572.shtml).

HJ 501-2009. 2009. "Water Quality—Determination of Total Organic Carbon—Combustion Oxidation Nondispersive Infrared Absorption Method." <http://kjs.mep.gov.cn/hjbhzbz/bzwb/shjbh/sjcgfffbz/200911/W020111114550884155342.pdf>.

HJ 636-2012. 2012. "Alkaline Potassium Persulfate Digestion UV Spectrophotometric Method." <http://kjs.mep.gov.cn/hjbhzbz/bzwb/shjbh/sjcgfffbz/201203/W020120410336075623072.pdf>.

HJ/T 347-2007. 2007. "Water Quality-Determination of Fecal Coliform-Manifold Zymotechnics and Filter Membrane." <http://www.anystandards.com/hjt/27572.html>.

Jiun-Shiu Ma, Joo-Hyon Kang, Masoud Kayhanian, and Michael K. Stenstrom. 2009. "Sampling Issues in Urban Runoff Monitoring Programs: Composite versus Grab." *Journal of Environmental Engineering* 135 (3): 118–27. doi:10.1061/(ASCE)0733-9372(2009)135:3(118).

Lee, Ju Young, Gippeum Bak, and Mooyoung Han. 2012. "Quality of Roof-Harvested Rainwater – Comparison of Different Roofing Materials." *Environmental Pollution* 162 (March): 422–29. doi:10.1016/j.envpol.2011.12.005.

Martinson, D.Brett. 2008. "Improving the Viability of Roofwater Harvesting in Low-Income Countries."

Mendez, Carolina B., J. Brandon Klenzendorf, Brigit R. Afshar, Mark T. Simmons, Michael E. Barrett, Kerry A. Kinney, and Mary Jo Kirisits. 2011. "The Effect of Roofing Material on the Quality of Harvested Rainwater." *Water Research* 45 (5): 2049–59. doi:10.1016/j.watres.2010.12.015.

Méthode d'analyse et de surveillance de l'eau et des eaux usées. 2002. "Method of Analysis and Monitoring of Water and Waste Water." <http://files.instrument.com.cn/FilesCenter/20070727/49566.pdf>.

NF EN 872. 2005. "Qualité de l'eau - Dosage Des Matières En Suspension - Méthode Par Filtration Sur Filtre En Fibres de Verre." <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-872/qualite-de-l-eau-dosage-des-matieres-en-suspension-methode-par-filtration-sur-filtre-en-fibres-de-verre/article/722523/fa135090>.

NF EN 1484. 1997. "Analyse de l'eau - Lignes Directrices Pour Le Dosage Du Carbone Organique Total (TOC) et Carbone Organique Dissous (COD)." <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-1484/analyse-de-l-eau-lignes-directrices-pour-le-dosage-du-carbone-organique-total-toc-et-carbone-organique-dissous-cod/article/780803/fa038177>.

NF EN 27888. 1994. "Qualité de l'eau - Détermination de La Conductivité Électrique." <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-27888/qualite-de-l-eau-determination-de-la-conductivite-electrique/article/667869/fa026625>.

NF EN ISO 6222. 1999. "Dénombrement Des Micro-Organismes Revivifiables."

NF EN ISO 7899-1. 1999. "Recherche et Dénombrement Des Entérocoques Intestinaux Dans Les Eaux de Surface et Résiduaires."

NF EN ISO 9308-3. 1999. "Recherche et Dénombrement Des Escherichia Coli et Des Bactéries Coliformes Dans Les Eaux de Surface et Résiduaires."

NF T 90-008. 2001. "Qualité de l'eau - Détermination Du PH." <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-t90-008/qualite-de-l-eau-determination-du-ph/article/739091/fa111554>.

Robert-Sainte, Pauline. 2009. "Contribution of Roofing Materials to the Metal Contamination of Runoff." Theses, Université Paris-Est. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00539932>.

Schriewer, A., H. Horn, and B. Helmreich. 2008. "Time Focused Measurements of Roof Runoff Quality." *Corrosion Science* 50 (2): 384–91. doi:10.1016/j.corsci.2007.08.011.

Yaziz, M. I., H. Gunting, N. Sapari, and A. W. Ghazali. 1989. "Variations in Rainwater Quality from Roof Catchments." *Water Research* 23 (6): 761–65. doi:10.1016/0043-1354(89)90211-X.

Zobrist, J., S. R. Müller, A. Ammann, T. D. Bucheli, V. Mottier, M. Ochs, R. Schoenenberger, J. Eugster, and M. Boller. 2000. "Quality of Roof Runoff for Groundwater Infiltration." *Water Research* 34 (5): 1455–62. doi:10.1016/S0043-1354(99)00290-0.

# Liste des figures

## CHAPITRE 1 :

FIGURE 1-1. DIFFERENTES PARTIES DU SYSTEME DE RUEP .....	32
FIGURE 1-2. UTILISATION DES DIFFERENTES FAMILLES DE MATERIAUX DE COUVERTURE DANS LE QUARTIER DE L'ÎLE-DE FRANCE (PAULINE SAINTE, 2010).....	34
FIGURE 1-3. VOIES DE CONTAMINATIONS DES EAUX DE TOITURE .....	38
FIGURE 1-4. CARTE DES VOLUMES DES PRECIPITATIONS TOTALES PAR DEPARTEMENT EN FRANCE METROPOLITAINE EN 2016 (EN MILLIONS DE M <sup>3</sup> ) (SOURCE : <a href="http://www.cartograph.eaufrance.fr/donnees/1710522/2016">HTTP://WWW.CARTOGRAPH.EAUFRANCE.FR/DONNEES/1710522/2016</a> ) .....	51
FIGURE 1-5. PRECIPITATIONS MOYENNES EN CHINE (SOURCE : WIKIPEDIA, 2019) .....	53
FIGURE 1-6. STRUCTURE DE PRECIPITATION (SOURCE : METEO-FRANCE ET <a href="http://www.cma.gov.cn/en2014/">HTTP://WWW.CMA.GOV.CN/EN2014/</a> ).....	55

## CHAPITRE 2 :

FIGURE 2-1. EXEMPLES DE POLLUTOGRAMME (D'APRES SAGET ET AL., 1996) .....	66
FIGURE 2-2. DEPOT ET LESSIVAGE DE MATIERES SUR LA TOITURE (D'APRES MARTINSON ET AL., 2008).....	68
FIGURE 2-3. DESCRIPTION SCHEMATIQUE D'UN PROCESSUS DU RUISSELLEMENT LORS D'UN EVENEMENT DE PLUIE (D'APRES MARTINSON, 2009) .....	72
FIGURE 2-4. DEVIATEUR DE <i>FIRST FLUSH</i> MANUEL (D'APRES LEE ET VISSHER, 1992) .....	81
FIGURE 2-5. DEVIATEUR DU <i>FIRST FLUSH</i> A VOLUME FIXE (DOUG, 2006).....	82
FIGURE 2-6. DEVIATEUR DE <i>FIRST FLUSH</i> EN UTILISANT UNE BASCULE (D'APRES LEE AND VISSCHER, 1992) .....	82
FIGURE 2-7. DEVIATEUR DU <i>FIRST FLUSH</i> DU DEBIT D'ECOULEMENT (DOUG, 2006) .....	83
FIGURE 2-8. DEMARCHE SCIENTIFIQUE DE LA THESE .....	86

## CHAPITRE 3 :

FIGURE 3-1. DISPOSITIF D'ECHANTILLONNAGE DES EAUX RUISSELEES DE TOITURE DE YAZIZ ET AL. (1989) .....	93
FIGURE 3-2. (A) DISPOSITIF PRELIMINAIRE ; (B) BALLE DE PINGPONG ET JOINT ; (C) EMBOUT DE TUYAU.....	93
FIGURE 3-3. EXPERIMENTATION SUR LES EFFETS EVENTUELS DE MELANGE SUR LA QUALITE DE L'EAU DE CHAQUE FRACTION.....	94
FIGURE 3-4. SCHEMAS DES DEUX PLANS POUR REDUIRE LES MELANGES D'EAUX DANS LES BOUTEILLES .....	95
FIGURE 3-5. PHOTOGRAPHIES MONTRANT L'OBSTRUCTION DES INTERSTICES DES REDUCTIONS 80 - 40 MM PAR DU CIMENT PEINT ET LE COLLIER DE SERRAGE FIXE AUX BOUTEILLES .....	96
FIGURE 3-6. SCHEMA DU DISPOSITIF D'ECHANTILLONNAGE .....	98
FIGURE 3-7. PHOTOGRAPHIES DE DISPOSITIF D'ECHANTILLONNAGE DE ROMAINVILLE .....	99
FIGURE 3-8. LOCALISATION DU 1ER SITE D'ETUDE (VUE SATELLITE) (2017) .....	103
FIGURE 3-9. PHOTOGRAPHIES DE LA TOITURE DE VINCENNES.....	104
FIGURE 3-10. LOCALISATION DU 2ERE SITE D'ETUDE (VUE SATELLITE) (2017) .....	105
FIGURE 3-11. PHOTOGRAPHIES DE LA TOITURE DE ROMAINVILLE .....	106
FIGURE 3-12. PHOTOGRAPHIES DE LA TOITURE EXPERIMENTALE DE ROMAINVILLE .....	106
FIGURE 3-13. LOCALISATION DU 3EME SITE D'ETUDE (2017) .....	107
FIGURE 3-14. LOCALISATION DE 3EME SITE D'ETUDE EN VUE SATELLITE (2016) .....	108
FIGURE 3-15. PHOTOGRAPHIES DE LA TOITURE EXPERIMENTALE DE TIANJIN .....	108

FIGURE 3-16. PHOTOGRAPHIES DES DISPOSITIFS D'ÉCHANTILLONNAGE DU PREMIER SITE D'ÉTUDE (VINCENNES) .....	109
FIGURE 3-17. PHOTOGRAPHIE DU PLUVIOMETRE DU PREMIER SITE D'ÉTUDE .....	110
FIGURE 3-18. PHOTOGRAPHIE DU DISPOSITIF SUR LE DEUXIEME SITE D'ÉTUDE (ROMAINVILLE).....	110
FIGURE 3-19. PHOTOGRAPHIES DU PLUVIOMETRE ET DU PLATEAU DU PLUVIOMETRE DU SITE DE ROMAINVILLE .....	111
FIGURE 3-20. PHOTOGRAPHIE DU DISPOSITIF AU LE PREMIER SITE D'ÉTUDE (TIANJIN). .....	111
FIGURE 3-21. LE PLUVIOMETRE ET LA CENTRALE D'ACQUISITION DE DONNEES ASSOCIEE SUR LE SITE DE TIANJIN .....	112

#### CHAPITRE 4 :

FIGURE 4-1. PREPARATION DE MICROPLAQUES .....	131
FIGURE 4-2. FLORE TOTALE A 36°C (COLONIES CARACTERISTIQUE DES TROIS DILUTIONS).....	131
FIGURE 4-3. ILLUSTRATION DE LA BOITE A MOUSTACHES DE TUKEY .....	133
FIGURE 5-1. DIVISION DES CUMULS MILLIMETRIQUES DE L'EAU COLLECTEE .....	144

#### CHAPITRE 5 :

FIGURE 5-2. VALEURS DE PH DANS LES EAUX DE PLUIE COLLECTEE DU TROIS SITES D'ÉTUDE .....	150
FIGURE 5-3. VALEURS DE CONDUCTIVITE DANS LES EAUX DE PLUIE COLLECTEE DES TROIS SITES D'ÉTUDE .....	151
FIGURE 5-4. VALEURS DE TURBIDITE DANS LES EAUX DE PLUIE COLLECTEE DES TROIS SITES D'ÉTUDE .....	153
FIGURE 5-5. VALEURS DE MES DANS LES EAUX DE PLUIE COLLECTEE DU TROIS SITES D'ÉTUDE .....	154
FIGURE 5-6. VALEURS DE COD DANS LES EAUX DE PLUIE COLLECTEES DES TROIS SITES D'ÉTUDE .....	156
FIGURE 5-7. VALEURS DES INDICATEURS NUTRIMENTS (AZOTE) DANS LES EAUX DE PLUIE COLLECTEE A TIANJIN .....	157
FIGURE 5-8. VALEURS DE PHOSPHORE TOTAL DANS LES EAUX DE PLUIE COLLECTEE A TIANJIN .....	158
FIGURE 5-9. CONCENTRATION EN FLORE TOTALE A 36°C SUR LES TROIS SITES D'ÉTUDE .....	160
FIGURE 5-10. CONCENTRATION EN FLORE TOTALE A 22°C OBTENUES SUR LES DEUX SITES FRANCILIENS .....	162
FIGURE 5-11. CONCENTRATIONS EN <i>ESCHERICHIA COLI</i> ET ENTEROCOQUES OBTENUES SUR VINCENNES ET ROMAINVILLE .....	163
FIGURE 5-12. CONCENTRATIONS EN COLIFORMES FECAUX ET COLIFORMES TOTAUX OBTENUS SUR TIANJIN .....	164
FIGURE 5-13. REPRESENTATION GRAPHIQUE DES MES EN FONCTION DE LA TURBIDITE.....	168
FIGURE 5-14. ACP SUR LA MATRICE DE DONNEES DE LA QUALITE DE L'EAU A TIANJIN-CERCLE DES CORRELATIONS SELON LES AXES PC1 ET PC2 .....	171
FIGURE 5-15. ACP SUR LA MATRICE DE DONNEES DE LA QUALITE DE L'EAU A TIANJIN-CERCLE DES CORRELATIONS SELON LES AXES PC1 ET PC3 .....	172
FIGURE 5-16. ACP SUR LA MATRICE DE DONNEES DE LA QUALITE DE L'EAU A VINCENNES-CERCLE DES CORRELATIONS SELON LES AXES PC1 ET PC2 .....	179
FIGURE 5-17. ACP SUR LA MATRICE DE DONNEES DE LA QUALITE DE L'EAU A VINCENNES-CERCLE DES CORRELATIONS SELON LES AXES PC1 ET PC3 .....	180
FIGURE 5-18. ACP SUR LA MATRICE DE DONNEES DE LA QUALITE DE L'EAU A ROMAINVILLE- AXES PC1 ET PC2 .....	184
FIGURE 5-19. ACP SUR LA MATRICE DE DONNEES DE LA QUALITE DE L'EAU A ROMAINVILLE-AXES PC1 ET PC3 .....	185
FIGURE 5-20. HIERARCHISATION ET SELECTION DES PARAMETRES D'ÉTUDE.....	188
FIGURE 5-21. REPRESENTATION DES DONNEES DE LA QUALITE DE L'EAU COLLECTEE A ROMAINVILLE SELON LA SAISON, DANS LE PLAN DES AXES PC1/PC2 ET PC1/PC3.....	191
FIGURE 5-22. SAISONNALITE DES VALEURS DES PARAMETRES REPRESENTATIFS A ROMAINVILLE .....	192
FIGURE 5-23. REPRESENTATION DES DONNEES DE LA QUALITE DE L'EAU COLLECTEE A VINCENNES SELON LA SAISON, DANS LE PLAN DES AXES PC1/PC2 ET PC2/PC3 .....	194

FIGURE 5-24. SAISONNALITE DES VALEURS DES PARAMETRES REPRESENTATIFS A VINCENNES .....	195
FIGURE 5-25. SAISONNALITE DES VALEURS DES PARAMETRES REPRESENTATIFS A TIANJIN .....	197
FIGURE 5-26. L'EFFET DES PERIODES SECHES PRECEDENTES SUR LES CHANGEMENTS DE QUALITE DE L'EAU DE PLUIE .....	200
FIGURE 5-27. COURBES DE TENDANCE DE LA RELATION ENTRE LES PERIODES SECHES PRECEDENTES ET LA CONDUCTIVITE ET LA TURBIDITE .....	202

## CHAPITRE 6 :

FIGURE 6-1. SCHEMA DE L'ORGANISATION GENERALE DU CHAPITRE 6 .....	206
FIGURE 6-2. ÉVOLUTION DE QUALITE VIA LA TURBIDITE, CONDUCTIVITE ET LA FLORE TOTALE A 36°C EN FONCTION DE LA HAUTEUR DE PLUIE CUMULEE COLLECTEE .....	209
FIGURE 6-3. SCHEMA POUR DETERMINER L'INTENSITE MOYENNE SUR UN EVENEMENT PLUVIEUX COLLECTE ET L'INTENSITE MOYENNE DE FRACTION.....	213
FIGURE 6-4. LE DIAGRAMME SCHEMATIQUE DU SYSTEME EXPERIMENTAL.....	216
FIGURE 6-5. METHODE DE DETERMINATION DE $V_{p,i}$ ET $CR_{d,ech}$ .....	218
FIGURE 6-6. PERTE INITIALE A VINCENNES-SYSTEME DU BIDON SEUL .....	221
FIGURE 6-7. INTERVALLE DE CONFIANCE A VINCENNES-SYSTEME DU DISPOSITIF D'ECHANTILLONNAGE .....	222
FIGURE 6-8. PERTE INITIALE A ROMAINVILLE-SYSTEME DU BIDON SEUL .....	223
FIGURE 6-9. INTERVALLE DE CONFIANCE A ROMAINVILLE-SYSTEME DU DISPOSITIF D'ECHANTILLONNAGE .....	223
FIGURE 6-10. PERTE INITIALE A TIANJIN-SYSTEME DU BIDON SEUL .....	224
FIGURE 6-11. INTERVALLE DE CONFIANCE A TIANJIN-SYSTEME DU DISPOSITIF D'ECHANTILLONNAGE .....	225
FIGURE 6-12. COEFFICIENTS DE RECUPERATION DU DISPOSITIF D'ECHANTILLONNAGE .....	227
FIGURE 6-13. DISTRIBUTION DES COLLECTES EN TERMES D'INTENSITE MOYENNES D'EVENEMENT DE COLLECTE ET DE DUREE DE TEMPS SEC PRECEDANT A VINCENNES .....	231
FIGURE 6-14 . DISTRIBUTION DES COLLECTES EN TERMES D'INTENSITE MOYENNES D'EVENEMENT DE COLLECTE ET DE DUREE DE TEMPS SEC PRECEDANT A TIANJIN .....	235
FIGURE 6-15. DISTRIBUTION DES COLLECTES EN TERMES D'INTENSITE MOYENNES D'EVENEMENT DE COLLECTE ET DE PERIODE SECHE ANTECEDENTES A ROMAINVILLE.....	238
FIGURE 6-16. RELATION ENTRE LA CONDUCTIVITE ET LA HAUTEUR DE PLUIE PRECIPITEE CUMULEE A VINCENNES .....	243
FIGURE 6-17. RELATION ENTRE LA TURBIDITE ET LA DUREE DE PLUIE PRECIPITEE CUMULEE A VINCENNES .....	245
FIGURE 6-18. RELATION ENTRE LA CONDUCTIVITE ET LA DUREE DE PLUIE PRECIPITEE CUMULEE A TIANJIN .....	246
FIGURE 6-19. RELATION ENTRE LA TURBIDITE ET LA DUREE DE PLUIE PRECIPITEE CUMULEE A TIANJIN .....	247
FIGURE 6-20. BOITE A MOUSTACHE -- $C_{0, COND.}$ ET $C_{0, TURB.}$ ESTIMEES A PARTIR DE MODELE 1 SUR LA CONDUCTIVITE ET LA TURBIDITE AUX DEUX SITES D'ETUDE .....	250
FIGURE 6-21. RELATION ENTRE LA CONDUCTIVITE ET LA HAUTEUR DE PLUIE PRECIPITEE CUMULEE A VINCENNES .....	252
FIGURE 6-22. RELATION ENTRE LA TURBIDITE ET LA HAUTEUR DE PLUIE PRECIPITEE CUMULEE A VINCENNES .....	253
FIGURE 6-23. RELATION ENTRE LA CONDUCTIVITE ET LA HAUTEUR DE PLUIE PRECIPITEE CUMULEE A TIANJIN .....	254
FIGURE 6-24. RELATION ENTRE LA TURBIDITE ET LA HAUTEUR DE PLUIE PRECIPITEE CUMULEE A TIANJIN .....	255
FIGURE 6-25. BOITE A MOUSTACHE -- $C_{0, COND.}$ ET $C_{0, TURB.}$ ESTIMEES A PARTIR DE MODELE 2 SUR LA CONDUCTIVITE ET LA TURBIDITE AUX DEUX SITES D'ETUDE .....	257
FIGURE 6-26 . COEFFICIENT DE L'EVOLUTION DE CONDUCTIVITE ET DE TURBIDITE A VINCENNES ET A TIANJIN .....	259
FIGURE 6-27. CHARGE INITIALE ESTIMEE DE CONDUCTIVITE ET DE TURBIDITE A VINCENNES ET A TIANJIN .....	259
FIGURE 6-28. RELATION ENTRE $C_0$ ET L'ADD POUR LA CONDUCTIVITE ET LA TURBIDITE A VINCENNES ET TIANJIN .....	262

FIGURE 6-30. RELATION ENTRE $K_2$ ET L'INTENSITE DE PLUIE MOYENNE DE FRACTION A VINCENNES .....	265
FIGURE 6-31. <b>RELATION ENTRE <math>K_2</math> ET L'INTENSITE DE PLUIE MOYENNE DE FRACTION A TIANJIN</b> .....	266
FIGURE 6-1. SCHEMA DE SYNTHESE DE LA METHODOLOGIE SUIVIE .....	271
FIGURE 6-2. LES TROIS NIVEAUX DE PRECONISATIONS DE GESTION DU DEVIATEUR DE FLUX DE CONTAMINANTS .....	278

**ANNEXE :**

FIGURE A1-1. QUALITE DE L'AIR ( $NO_2$ ) EN SEINE-SAINT-DENIS A GAUCHE ET EN VAL-DE-MARNE A DROITE .....	291
FIGURE A1-2. QUALITE DE L'AIR ( $PM_{10}$ ) EN SEINE-SAINT-DENIS A GAUCHE ET EN VAL-DE-MARNE A DROITE.....	292
FIGURE A1-3. QUALITE DE L'AIR ( $PM_{2,5}$ ) EN SEINE-SAINT-DENIS A GAUCHE ET EN VAL-DE-MARNE A DROITE .....	292
FIGURE A1-4. QUALITE DE L'AIR (BENZENE) EN SEINE-SAINT-DENIS A GAUCHE ET EN VAL-DE-MARNE A DROITE.....	293

# Liste des tableaux

## CHAPITRE 1 :

TABLEAU 1-1. CARACTERISATION DES DIFFERENTES TYPES DE TOIT (MARTINSON 2007) .....	33
TABLEAU 1-2. PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DANS LES EAUX DE RUISSELLEMENT DE TOITURE .....	- 40 -
TABLEAU 1-3. MICROORGANISMES DANS LES EAUX DE RUISSELLEMENT DE TOITURE .....	- 41 -
TABLEAU 1-4. PRINCIPAUX TYPES DE TAMIS EN AMONT DE STOCKAGE (ASTEE, 2015).....	48
TABLEAU 1-5. QUALITE DE L'AIR A TIANJIN ET A PARIS (2013-2016) (SOURCE : AIRPARIF ET SITE WWW.AQISTUDY.CN).....	56

## CHAPITRE 2 :

TABLEAU 2-1. CADRE REGLEMENTAIRE ET REFERENTIEL RELATIF AU <i>FIRST FLUSH</i> DANS DIFFERENTS PAYS.....	75
TABLEAU 2-2. VOLUMES DE <i>FIRST FLUSH</i> PROPOSE DANS DIFFERENTES PUBLICATIONS.....	80

## CHAPITRE 3 :

TABLEAU 3-1. SYSTEMES EXPERIMENTAUX UTILISES DANS DES ETUDES SUR LA VARIATION DE LA QUALITE DES EAUX DE TOITURE.....	91
TABLEAU 3-2. CARACTERISTIQUES DES DISPOSITIFS DANS LES TROIS SITES.....	112
TABLEAU 3-3. DESCRIPTION DES EVENEMENTS PLUVIEUX COLLECTES A VINCENNES.....	115
TABLEAU 3-4. DESCRIPTION DES EVENEMENTS PLUVIEUX COLLECTES A ROMAINVILLE.....	116
TABLEAU 3-5. DESCRIPTION DES EVENEMENTS PLUVIEUX COLLECTES A TIANJIN.....	117

## CHAPITRE 4 :

TABLEAU 4-1. INDICATEURS DE QUALITE DES EAUX DE RUISSELLEMENT DE TOITURE UTILISEE DANS LES PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES.....	119
TABLEAU 4-2. FONCTION(S) DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES POUVANT ETRE ETUDIES.....	121
TABLEAU 4-3. FONCTION(S) DES PARAMETRES MICROBIOLOGIQUES POUVANT ETRE ETUDIES.....	122
TABLEAU 4-4. PARAMETRES DE QUALITE MICROBIOLOGIQUES POUR LA FRANCE ET LA CHINE.....	124
TABLEAU 4-5. RESUME DES METHODES D'ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE.....	126
TABLEAU 4-6. RESUME DES METHODES D'ANALYSE MICROBIOLOGIQUE.....	126

## CHAPITRE 5 :

TABLEAU 5-1. CARACTERISTIQUES DES DISPOSITIFS D'ECHANTILLONNAGE ET HAUTEUR DE PLUIE RECUEILLIE.....	142
TABLEAU 5-2. GRANDEURS STATISTIQUES POUR LES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DES CUMULS MILLIMETRIQUES CONSECUTIVES DE L'EAU SUR LES TROIS SITES.....	146
TABLEAU 5-3. GRANDEURS STATISTIQUES POUR LES PARAMETRES MICROBIOLOGIQUES DES CUMULS MILLIMETRIQUES CONSECUTIVES DE L'EAU SUR LES TROIS SITES.....	147
TABLEAU 5-4. GRANDEURS STATISTIQUES POUR LES PARAMETRES SUPPLEMENTAIRES DES DIFFERENTES CUMULS MILLIMETRIQUES DE L'EAU A TIANJIN.....	148
TABLEAU 5-5. RESULTAT DU TEST U DE MANN-WHITNEY SUR LE PH POUR LES 1 <sup>ERS</sup> MM ET 2 <sup>EME</sup> MM DE L'EAU COLLECTEE.....	150
TABLEAU 5-6. RESULTAT DU TEST U DE MANN-WHITNEY SUR LA CONDUCTIVITE POUR 1 <sup>ER</sup> MM ET 2 <sup>EME</sup> MM DE L'EAU COLLECTEE ..	151
TABLEAU 5-7. RESULTAT DU TEST U DE MANN-WHITNEY SUR LA TURBIDITE POUR 1 <sup>ER</sup> MM ET 2 <sup>EME</sup> MM DE L'EAU COLLECTEE.....	153

TABLEAU 5-8. RESULTAT DU TEST U DE MANN-WHITNEY SUR LES MES POUR 1 <sup>ER</sup> MM ET 2 <sup>EME</sup> MM DE L'EAU COLLECTEE.....	154
TABLEAU 5-9. RESULTAT DU TEST U DE MANN-WHITNEY SUR LE COD POUR 1 <sup>ER</sup> MM ET 2 <sup>EME</sup> MM DE L'EAU COLLECTEE .....	156
TABLEAU 5-10. RESULTAT DU TEST U DE MANN-WHITNEY SUR LES INDICATEURS NUTRIMENTS .....	158
TABLEAU 5-11. POURCENTAGE DE REDUCTION DE LA CONCENTRATION DES POLLUANTS EN ENLEVANT LE 1 <sup>ER</sup> MM D'EAU .....	159
TABLEAU 5-12. RESULTAT DU TEST U DE MANN-WHITNEY SUR LA FLORE TOTALE A 36°C POUR 1 <sup>ER</sup> MM ET 2 <sup>EME</sup> MM DE L'EAU COLLECTEE.....	160
TABLEAU 5-13. RESULTAT DU TEST U DE MANN-WHITNEY SUR LA FLORE TOTALE A 22°C POUR 1 <sup>ER</sup> MM ET 2 <sup>EME</sup> MM DE L'EAU COLLECTEE.....	162
TABLEAU 5-14. RESULTAT DU TEST U DE MANN-WHITNEY SUR <i>E. COLI</i> ET ENTEROCOQUES POUR 1 <sup>ER</sup> MM ET 2 <sup>EME</sup> MM DE L'EAU COLLECTEE EN L'ÎLE-DE-FRANCE.....	163
TABLEAU 5-15. RESULTAT DU TEST U DE MANN-WHITNEY SUR COLIFORMES TOTAUX ET COLIFORMES FECAUX POUR 1 <sup>ER</sup> MM ET 2 <sup>EME</sup> MM DE L'EAU COLLECTEE A TIANJIN .....	165
TABLEAU 5-16. RESULTATS D'ACP SUR LA PROPORTION, LA MATRICE DE CORRELATION ET LES CONTRIBUTIONS DES PARAMETRES ISSUE DE QUALITE L'EAU RUISSELEE DE TOITURE A TIANJIN.....	169
TABLEAU 5-17. CORRELATION ENTRE LES DIFFERENTS PARAMETRES MESURES DANS LES FRACTIONS COLLECTEES A TIANJIN.....	174
TABLEAU 5-18. COEFFICIENTS DE CALAGE (A, B ET C) ET LE R <sup>2</sup> D'EQUATION DE REGRESSION LINEAIRE A TIANJIN .....	177
TABLEAU 5-19. RESULTATS D'ACP SUR LA PROPORTION CUMULEE, LA MATRICE DE CORRELATION ET LES CONTRIBUTIONS DES PARAMETRES ISSUE DE QUALITE L'EAU RUISSELEE DE TOITURE A VINCENNES .....	178
TABLEAU 5-20. CORRELATION ENTRE LES DIFFERENTS PARAMETRES MESURES DANS LES FRACTIONS COLLECTEES A VINCENNES.....	181
TABLEAU 5-21. COEFFICIENTS DE CALAGE (A, B ET C) ET LE R <sup>2</sup> D'EQUATION DE REGRESSION LINEAIRE A VINCENNES .....	182
TABLEAU 5-22. RESULTATS D'ACP SUR LA PROPORTION CUMULEE, LA MATRICE DE CORRELATION ET LES CONTRIBUTIONS DES PARAMETRES ISSUE DE QUALITE L'EAU RUISSELEE DE TOITURE A ROMAINVILLE .....	183
TABLEAU 5-23. CORRELATION ENTRE LES DIFFERENTS PARAMETRES MESURES DANS LES FRACTIONS COLLECTEES A ROMAINVILLE ...	186
TABLEAU 5-24. COEFFICIENTS DE CALAGE (A, B ET C) ET LE R <sup>2</sup> D'EQUATION DE REGRESSION LINEAIRE A ROMAINVILLE .....	187
TABLEAU 5-25. ÉQUATIONS ET COEFFICIENTS DE DETERMINATION DES COURBES DE TENDANCE DE CONDUCTIVITE ET DE TURBIDITE SUR TROIS SITES D'ETUDE .....	202

## CHAPITRE 6 :

TABLEAU 6-1. NOMBRE DES COLLECTES DES DIFFERENTES FAÇONS DE L'ÉVOLUTION DE QUALITE DANS LES SITES D'ETUDE .....	211
TABLEAU 6-2. NOMBRE D'ÉVENEMENT DE COLLECTE SUR LES SITES D'ETUDE.....	220
TABLEAU 6-3. PERTE INITIALE SUR LES SITES D'ETUDE.....	225
TABLEAU 6-4. SYNTHÈSE DES ÉQUATIONS DE RÉGRESSIONS LINEAIRES POUR LES TROIS SITES D'ETUDE .....	227
TABLEAU 6-5. HAUTEUR DE PLUIE PRÉCIPITÉE DE REMPLISSAGE DE DISPOSITIF D'ÉCHANTILLONNAGE SUR SITES D'ETUDE.....	229
TABLEAU 6-6. HAUTEUR DE PLUIE PRÉCIPITÉE DES FRACTIONS SUR TROIS SITES D'ETUDE.....	229
TABLEAU 6-7. GRANDEURS DE CONDUCTIVITE ET TURBIDITE CORRESPONDANT AUX DIFFERENTS TYPES D'ÉVOLUTION A VINCENNES (ÉVOLUTIONS DÉCROISSANTE ET NON MONOTONE AVEC DIFFÉRENTES ADD ET INTENSITÉS MOYENNES).....	233
TABLEAU 6-8. GRANDEURS DE CONDUCTIVITE ET TURBIDITE CORRESPONDANTES AUX DIFFERENTS TYPES D'ÉVOLUTION A TIANJIN (ÉVOLUTION DÉCROISSANTE ET NON MONOTONE AVEC DIFFÉRENTES ADD ET INTENSITÉS MOYENNES .....	236
TABLEAU 6-9. GRANDEURS DE LA CONDUCTIVITE ET LA TURBIDITE CORRESPONDANTES AUX DIFFERENTS TYPES D'ÉVOLUTION A ROMAINVILLE .....	239
TABLEAU 6-10. COEFFICIENTS DE CALAGE (C <sub>0</sub> ET K <sub>1</sub> ) ET LE R <sup>2</sup> DU MODÈLE 1 SUR VINCENNES ET TIANJIN.....	248
TABLEAU 6-11. COEFFICIENTS DE CALAGE (C <sub>0</sub> ET K <sub>2</sub> ) ET LE R <sup>2</sup> DU MODÈLE 2 SUR VINCENNES ET TIANJIN.....	256

TABLEAU 6-12. RESUME DES PARAMETRES DES EQUATIONS DE MODELE 2 POUR LA CONDUCTIVITE.....	258
TABLEAU 6-13. VALEURS DE P DE TEST U DE MANN-WHITNEY POUR LES COEFFICIENTS DE L'EVOLUTION $K_2$ .....	259
TABLEAU 6-14. VALEURS DE P DE TEST U DE MANN-WHITNEY POUR LES CHARGES INITIALES ESTIMEES $C_0$ .....	260
TABLEAU 6-15. RELATION ENTRE LE $K_2$ ET L'INTENSITE DE PLUIE— CONDUCTIVITE A VINCENNES .....	263
TABLEAU 6-16. RELATION ENTRE LE $K_2$ ET L'INTENSITE DE PLUIE—TURBIDITE A VINCENNES.....	263
TABLEAU 6-17. RELATION ENTRE LE $K_2$ ET L'INTENSITE DE PLUIE— CONDUCTIVITE A TIANJIN .....	264
TABLEAU 6-18. RELATION ENTRE LE $K_2$ ET L'INTENSITE DE PLUIE — TURBIDITE A TIANJIN .....	264
TABLEAU 6-19. PARAMETRE DE CORRELATION TYPE PUISSANCE ENTRE LES COEFFICIENTS DE L'EVOLUTION ET LES INTENSITES DE PLUIE MOYENNE DE FRACTION .....	266

**ANNEXE :**

TABLEAU A3-1. LES DONNEES PLUVIOMETRIQUES GLOBALES DES COLLECTES A VINCENNES.....	296
TABLEAU A3-2. LES DONNEES PLUVIOMETRIQUES GLOBALES DES COLLECTES A TIANJIN.....	297
TABLEAU A3-3. LES DONNEES PLUVIOMETRIQUES GLOBALES DES COLLECTES A ROMAINVILLE.....	298

## Annexe :

### Annexe I Les retombées atmosphériques en région parisienne (2015)

Les retombées en Seine-Saint-Denis et en Val-de-Marne sont indiquées sur les figures suivantes :

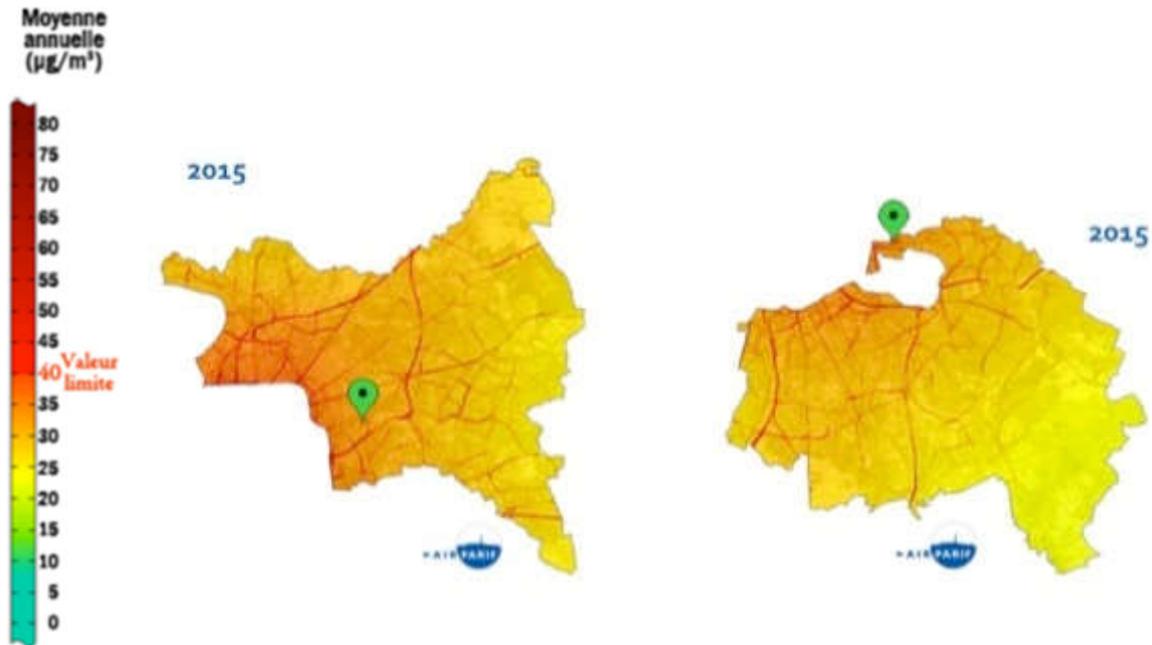


Figure A1-1. Qualité de l'air (NO<sub>2</sub>) en Seine-Saint-Denis à gauche et en Val-de-Marne à droite

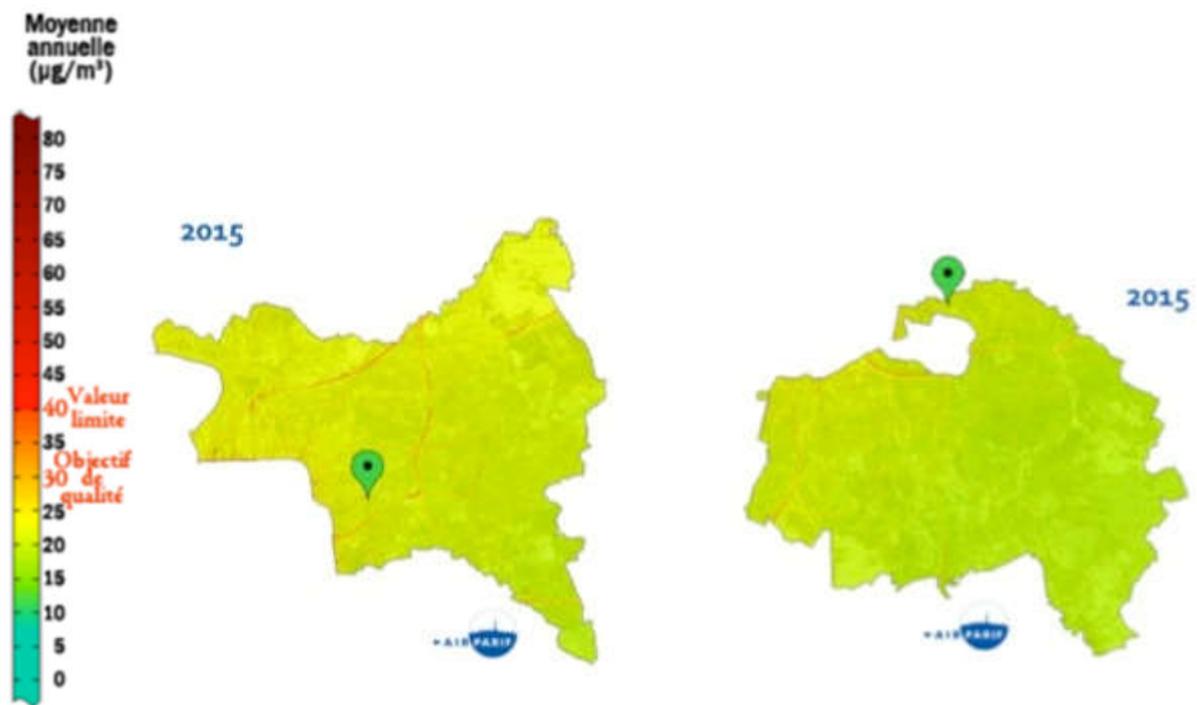


Figure A1-2. Qualité de l'air (PM10) en Seine-Saint-Denis à gauche et en Val-de-Marne à droite

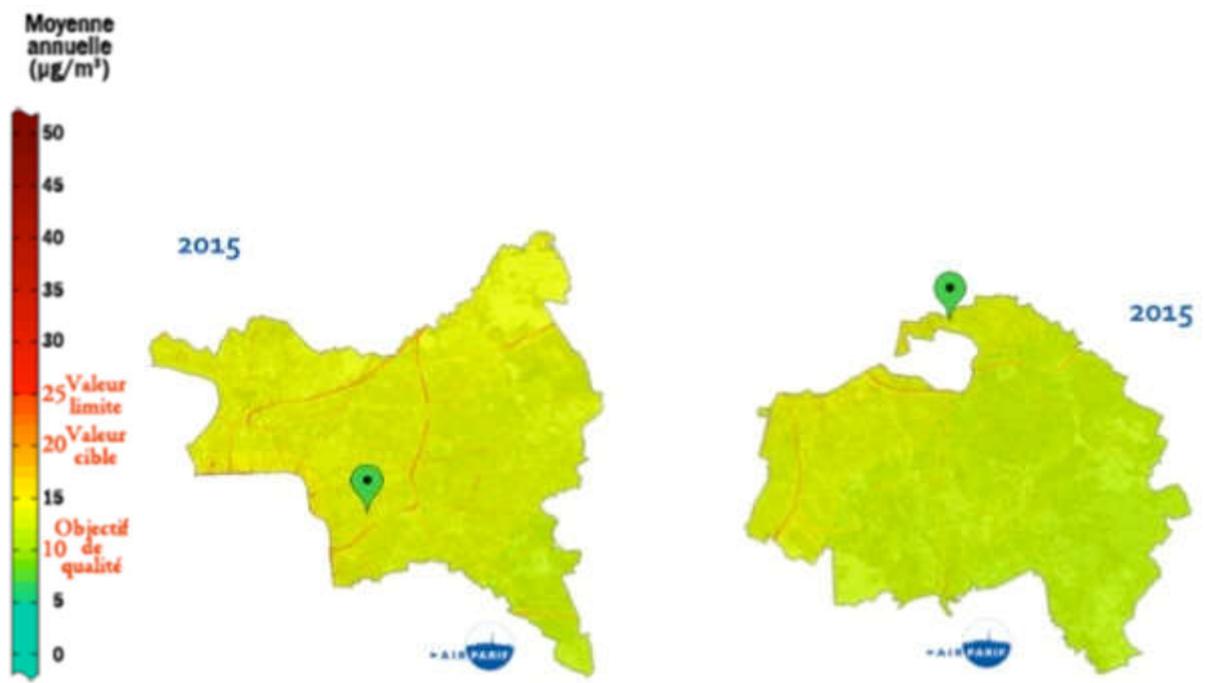


Figure A1-3. Qualité de l'air (PM 2,5) en Seine-Saint-Denis à gauche et en Val-de-Marne à droite

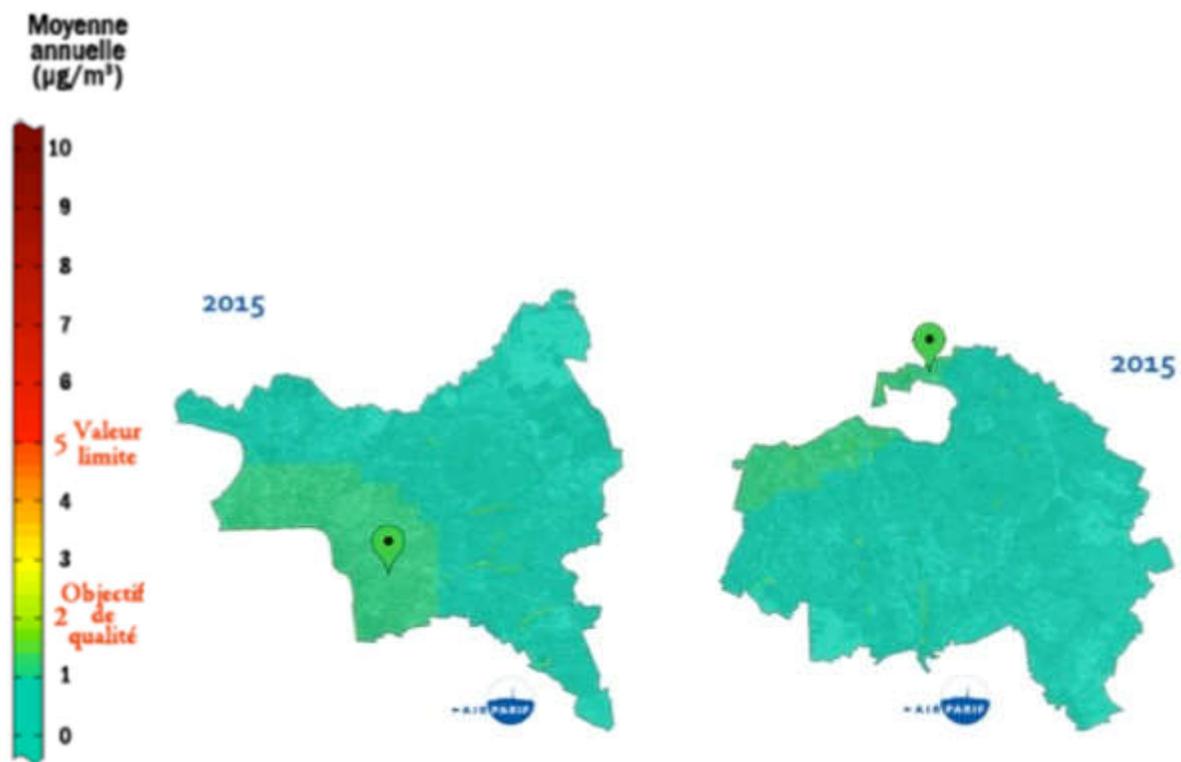
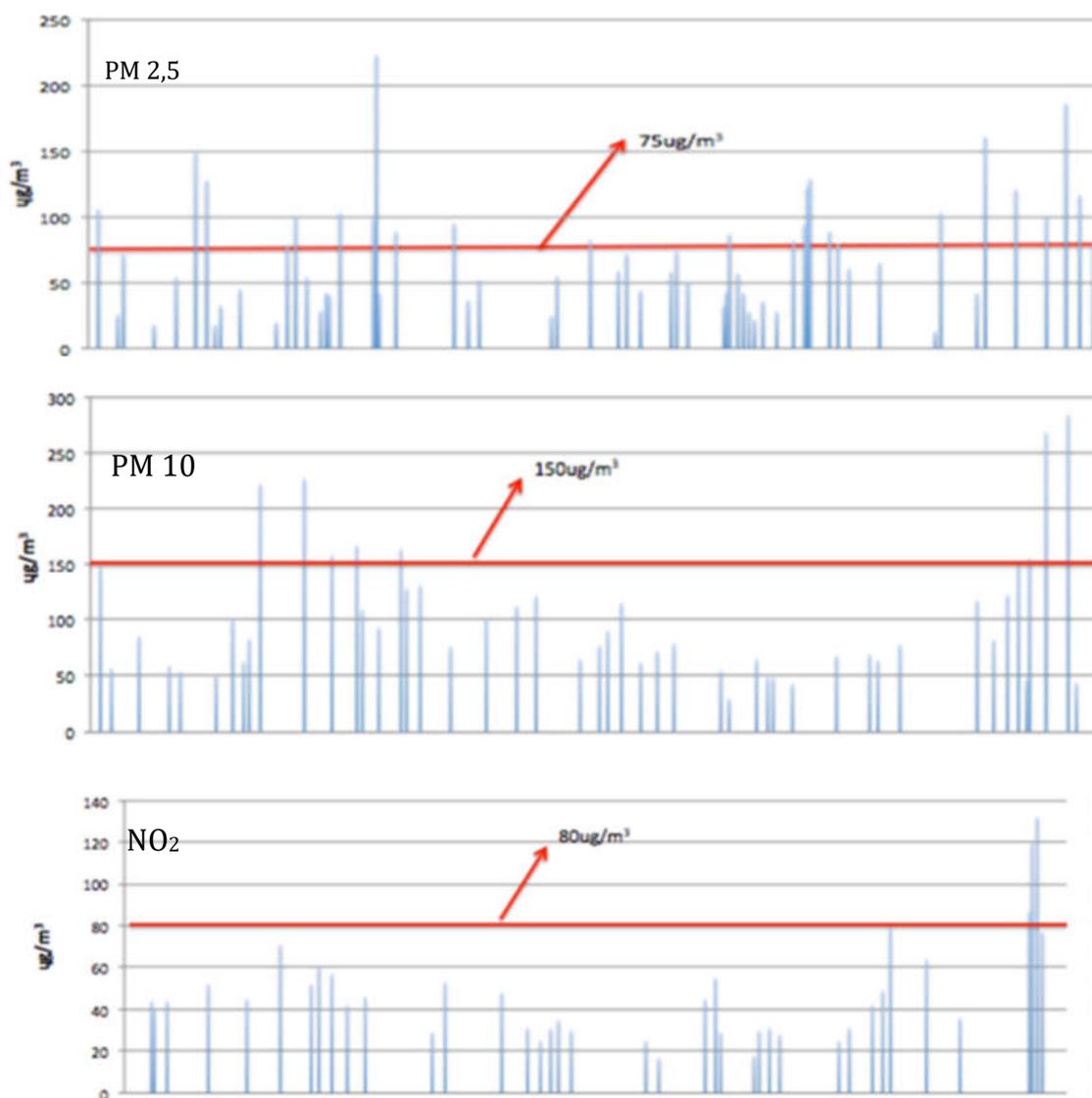


Figure A1-4. Qualité de l'air (Benzène) en Seine-Saint-Denis à gauche et en Val-de-Marne à droite

## Annexe II Données historiques de l'indice de qualité de l'air par jour (2016)

Les lignes rouges correspondent aux limites de concentration pour les quartiers du catalogue 2 (Les zones résidentielles, quartier commercial, le quartier culturel) dans la norme de la qualité de l'air GB 3095—2012.



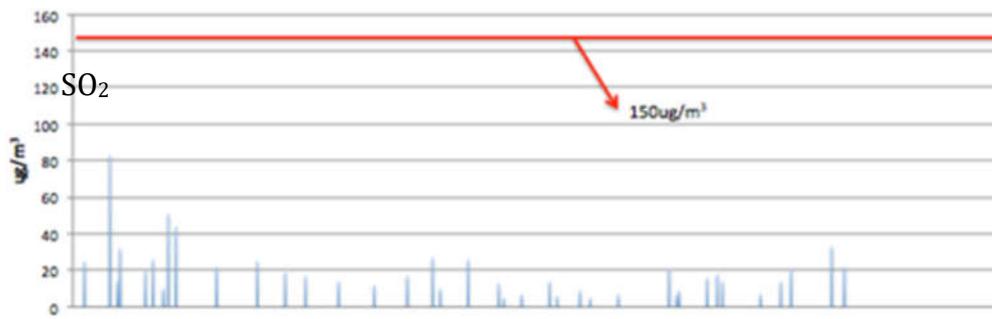


Figure A2-1. Les valeurs des polluants d'air à Tianjin 2016. Respectivement PM2.5, PM10, NO2, SO2  
(Manque les données depuis le 18 novembre 2016 pour le SO2)

### Annexe III Détail des données pluviométriques globales de chaque collecte

Tableau A3-1. Les données pluviométriques globales des collectes à Vincennes

	Date de début de collecte	Durée de temps sec précédent (h)	Hauteur totale pluie précipitée (mm)	Volume total estimé de pluie précipitée (L)/ Surface (m <sup>2</sup> )	Hauteur de pluie collectée (mm)	Volume total de pluie (L) et nombre de fraction collectée
<b>Dispositif 6 échantillons</b>	13/05/2015	214,8	5,2	52	30,5	30,5 (6 fractions dont 1 incomplète)
	18/05/2015	61,7	1,6	16	0,69	6,9 (3 fractions complètes)
	19/05/2015	18,1	1,4	14	0,48	4,8 (3 fractions dont 1 incomplète)
	31/05/2015	31,5	3,2	32	1,51	15,5 (6 fractions dont 1 incomplète)
	22/06/2015	170,7	4,6	46	2,65	26,5 (6 fractions dont 1 incomplète)
	26/07/2015	131,7	7,6	76	4,9	49 (6 fractions complètes) Grand bidon : 15,5 L
<b>Dispositif 6 échantillons</b>	14/09/2015	14,1	3,6	36	1,89	18,9 (9 fractions dont 1 incomplète)
	23/09/2015	78,9	6,0	60	3,25	32,5 (9 fractions complètes) Grand bidon : 11,8 L
	23/10/2016	126,3	3,6	36	1,89	18,9 (9 fractions dont 1 incomplète)
	17/11/2016	2,8	4,0	40	2,07	20,7 (9 fractions complètes) Grand bidon vide
	20/11/2016	47,0	1,6	16	6,9	6,9 (3 fractions complètes)
	12/20/2016	6,3	2,4	24	1,43	14,3 (7 fractions 1 incomplète)
	12/01/2017	20,5	2,2	22	1,4	14 (7 fractions 1 incomplète)

Tableau A3-2. Les données pluviométriques globales des collectes à Tianjin

<b>Date de début de collecte</b>	<b>Durée de temps sec précédant (h)</b>	<b>Hauteur totale pluie précipitée (mm)</b>	<b>Volume total estimé de pluie précipitée (L)/ Surface (m2)</b>	<b>Hauteur de pluie collectée (mm)</b>	<b>Volume total de pluie (L) et nombre de fraction collectée</b>
<b>12/07/2016</b>	206,7	1,2	5,7	0,5	13,2 (2 fractions complets, 1,1 L dans le 3 <sup>ème</sup> )
<b>14/07/2016</b>	160,76	5,6	37,6	3,4	61,2 (9 fractions complets, 16,9 L dans grand bidon)
<b>19/07/2016</b>	50,56	9,4	74,6	6,8	103,4 (9 fractions complets, 53,9 L dans grand bidon)
<b>25/07/2016</b>	137,68	2,0	12,3	1,1	22,0 (5 fractions complet, 0,8 L dans 6 <sup>ème</sup> )
<b>02/08/2016</b>	24,67	1,8	10,2	0,9	19,8 (4 fractions complets, 1 L dans 5 <sup>ème</sup> )
<b>08/08/2016</b>	144,14	4,0	37,4	3,4	44,0 (9 fractions complets, 16,7 L dans grand bidon)
<b>12/09/2016</b>	197,98	5,0	42,1	3,8	55,0 (9 fractions complet, 21,4 L dans grand bidon)
<b>22/10/2016</b>	30,45	1,6	10,3	0,9	17,6 (4 fractions, 1,1 L dans 5 <sup>ème</sup> )
<b>28/10/2016</b>	130,23	3,6	29,6	2,7	39,6 (9 fractions complet, 8,9 L dans grand bidon)

Tableau A3-3. Les données pluviométriques globales des collectes à Romainville

<b>Date de début de collecte</b>	<b>Durée de temps sec précédant (h)</b>	<b>Hauteur totale pluie précipitée (mm)</b>	<b>Volume total estimé de pluie précipitée (L)/ Surface (m2)</b>	<b>Hauteur de pluie collectée (mm)</b>	<b>Volume total de pluie (L) et nombre de fraction collectée</b>
05/11/2015	26,15	1,0	20	0,58	11,5 (5 fractions complètes)
25/11/2015	66,17	10,2	204	4,91	98,1 (9 fractions complètes) Grand bidon : 77,4 L
07/12/2016	81,45	11,0	220	5,14	102,8 (9 fractions complètes) Grand bidon : 82,1 L
31/01/2016	0,33	2,2	44	1,04	20,7 (9 fractions complètes) Grand bidon : Vide
02/02/2016	39,47	2,0	40	1,28	25,5 (9 fractions complètes) Grand bidon : 4,8 L
23/02/2016	26,41	7,2	144	--	9 fractions complètes Grand bidon : Débord
01/03/2016	170,53	4,2	84	2,84	56,9 (9 fractions complètes) Grand bidons : 36,2 L
24/04/2016	32,12	4,2	84	3,03	60,5 (9 fractions complètes) Grand bidons : 39,8 L
25/04/2016	11,98	4,6	92	3,61	72,1 (9 fractions complètes) Grand bidons : 51,4 L
09/05/2016	162,23	6,0	120	4,45	89 (9 fractions complètes) Grand bidons : 68,3 L
10/05/2016	8,61	11,8	236	--	9 fractions complète Grand bidon : Débord
18/05/2016	131,93	11	220	--	9 fractions complète Grand bidon : Débord
19/05/2016	1,87	0,6	12	0,45	8,9(4 fractions incomplètes)
22/05/2016	0,27	29,8	596	--	9 fractions complète Grand bidon : Débord

<b>29/05/2016</b>	13,72	12	240	4,76	95,1 (9 fractions complètes) Grand bidons : 74,4 L
<b>12/06/2016</b>	34,74	9,6	192	--	9 fractions complètes Grand bidon : Débord
<b>14/06/2016</b>	23,44	4,4	88	1,72	34,4 (9 fractions complètes) Grand bidons : 13,7 L

