

1 **Étude de l'évolution de la qualité de l'eau de ruissellement de toiture au cours des événements**
2 **pluviaux**

3 **Study of the rooftop runoff quality changes during rain events**

4 **Qiao Yujie¹, de Gouvello Bernard^{1,2}, Saad Mohamed¹, Tassin Bruno¹**

5 ¹LEESU, UMR MA 102, École des Ponts, UPEC, AgroParisTech, Paris, France

6 ²CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment)

7 84, avenue Jean Jaurès – Champ sur Marne

8 77447 Marne-la-Vallée Cedex 2

9 Auteur correspondant : bernard.de-gouvello@enpc.fr

10

11 **CATEGORIE DE L'ARTICLE** : *Retour d'expérience*

12 **FORMAT DE L'ARTICLE** : *Article scientifique*

13

14 **Résumé**

15 Dans un système de la récupération et utilisation de l'eau de pluie, le premier volume de ruissellement de
16 toiture pendant l'événement pluvial est susceptible de contenir la plus grande partie des éléments polluants.
17 Pour confirmer cette assertion, il est nécessaire d'étudier la qualité initiale et l'évolution de la qualité au cours
18 de l'évènement de pluie. A cet effet, un dispositif de collecte fractionnée par succession de récipients a été
19 construit et mis en place sur des portions de toit de deux maisons situées dans différentes zones de la région
20 Île-de-France (France) et 30 évènements pluvieux ont été suivis pendant 2 ans. La qualité de l'eau de pluie a
21 été analysée au travers des paramètres suivants : pH, conductivité, MES, turbidité, COD, Entérocoques,
22 *Escherichia Coli*, Flore totale à 22 ° C et à 36 ° C. Les résultats montrent que la différence de la qualité de
23 l'eau de ruissellement de toiture entre les deux sites d'étude est importante en raison de divers facteurs (les
24 caractéristiques intrinsèques du toit, l'environnement de la collecte, les facteurs météorologiques...). Du point
25 de vue de la turbidité et de la conductivité, une part des évènements de collecte montre une tendance
26 décroissante. Cela confirme que l'amélioration de la qualité des eaux de toiture en cours d'évènement est
27 susceptible d'être observée. En revanche, les évolutions de tous les paramètres microbiologiques sont
28 hétérogènes et cela témoignent du fait que cette amélioration n'est pas systématique.

29 **Mots-clés** : Récupération de l'eau de pluie, toiture, qualité, évolution de la qualité

30 **Abstract**

31 In the rainwater harvesting system, the first contaminated volume of runoff from a rooftop after a rainfall is
32 assumed to contain most of the pollutants. Researches have shown that removing the first part of water may
33 improve the quality of stored water. It is necessary to study the initial rainfall quality and the quality changes
34 at the beginning of the rainfall event. In this study, a special harvesting system was setup in two houses located
35 in two different areas in the Île-de-France and 30 storm events for 2 years were collected. The quality of the
36 rainwater was analysed through the following parameters: pH, conductivity, TSS, turbidity, DOC, enterococci,
37 *Escherichia Coli*, total flora at 22 ° C and 36 ° C. The results show that the difference in the quality of the roof
38 runoff water between the two sites is important because of the various factors (the intrinsic characteristics of
39 the roof, the environment of the collection, the meteorological factors ...). For the turbidity and the conductivity,
40 some of the collection events show decreasing trends which means that the improvement of the roof water
41 quality during the rain can be observed. On the other hand, the changes of all the microbiological parameters
42 are heterogeneous and this testifies to the fact that this improvement is not systematic.

43 **Keywords** : Roof-Harvested rainwater, rooftop, water quality, quality changes

44 **Introduction**

45 La pénurie d'eau est l'un des nombreux problèmes graves auxquels le monde est confronté aujourd'hui. Bien
46 que de nombreuses solutions aient été proposées, il y a un grand intérêt de récupérer l'eau de pluie en aval
47 d'une toiture. La récupération et utilisation de l'eau de pluie (RUEP) est une pratique qui se développe ou
48 connaît un regain d'intérêt un peu partout dans le monde (de Gouvello et al. 2014). Elle fait partie des solutions

49 qui peuvent aider à répondre à ce problème et plus généralement à dessiner un nouveau modèle de gestion
50 durable de l'eau (Hatibu et al. 2006 ; Sturm et al. 2009).

51 Le système de RUEP consiste à collecter la pluie du toit par un système d'acheminement et un réservoir.
52 Beaucoup d'études scientifiques montrent que l'eau de ruissellement de toiture peut être utilisée à l'intérieur
53 ou à l'extérieur du bâtiment. Cependant elle ne peut pas être considérée comme une eau de qualité « potable
54 » car elle contient des concentrations importantes de polluants et présentent une forte contamination
55 microbiologique. Les polluants peuvent provenir des émissions contenues dans l'atmosphère, la combustion
56 de fossiles dans les véhicules et les activités humaines. En outre, d'autres éléments déposés sur la toiture
57 peuvent affecter la qualité de l'eau de pluie collectée, comme des solides inertes, des poussières et des dépôts
58 de matières fécales d'oiseaux. Les polluants s'accumulent sur la surface du toit pendant une période de temps
59 sec et sont érodés et lessivés au début de chaque pluie. Des études montrent que le premier volume de
60 ruissellement pendant l'événement pluvial contient la plus grande partie des éléments polluants et que la
61 qualité de l'eau peut être améliorée en enlevant cette fraction (Martinson et Thomas 2009 ; Abbott et al. 2007 ;
62 Lee et al. 2002 ; Schriewer et al. 2008 ; Zobrist et al. 2000). Par conséquent, il est nécessaire d'étudier la
63 qualité initiale de l'eau de ruissellement de toiture et l'évolution de la qualité au début de l'évènement de pluie.

64 En outre, parce que les facteurs pouvant influencer la qualité des eaux de pluie en aval de toitures sont
65 nombreux, la qualité des eaux de pluie n'est pas constante. Elle est influencée par les caractéristiques
66 intrinsèques du toit (matériau de toiture, âge de toit...), l'événement de précipitation (intensité, vent...) et
67 d'autres facteurs météorologiques (saison, temps sec antécédent...). Le poids relatif de ces facteurs d'impact
68 doit être approfondi.

69 L'objectif de cette recherche est de caractériser la qualité de l'eau de pluie inter et intra-événementielle,
70 d'analyser les dynamiques d'évolution de la qualité des eaux de toit en cours d'événement et d'identifier les
71 facteurs qui affectent l'évolution. Une analyse combinée selon des critères physico-chimiques et
72 microbiologiques permet de réaliser une étude approfondie.

73 **1. Matériels et méthodes**

74 **1.1. Présentation des caractéristiques des sites d'étude**

75 Des dispositifs d'échantillonnage ont été mis en place en aval des toitures de deux maisons situées dans la
76 région de l'Île de France (Vincennes et Romainville), présentés dans la Figure 1. Le climat de cette région est
77 de type océanique : assez chaud en été et doux en hiver avec des pluies fréquentes en toute saison. Les
78 précipitations se répartissent de manière très égale durant l'année.

79 Le premier site d'étude est une maison située au Nord de la ville de Vincennes (94), une commune située
80 dans le département du Val-de-Marne en région Île-de-France, à l'est de Paris. Il est dans une zone urbaine
81 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
82 Vincennes) et à 2,5 km de l'autoroute (A4). La toiture étudiée se situe à côté d'un petit jardin. C'est la toiture
83 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
84 beaucoup de lierre sur le mur près du toit. Des feuilles peuvent tomber sur la toiture et la gouttière. Cette

85 toiture, composé de tuiles mécaniques de 25 ans, présente une gouttière en zinc, une orientation sud et une
86 pente de 27 °. La surface projetée est de 10 m².

87 Le deuxième site d'étude est une maison située au nord de la ville de Romainville (93) qui se trouve dans le
88 département de la Seine-Saint-Denis. Elle se situe dans une zone urbaine résidentielle, à environ 1 kilomètre
89 de l'autoroute A3. Par ailleurs, aucune zone industrielle n'est à proximité du site donc on ne peut pas observer
90 de phénomènes de surconcentration en polluants. La surface retenue est la toiture d'un garage à vélos. Il y a
91 un grand arbre à côté de ce garage et les feuilles risquent de tomber sur la toiture et la gouttière. C'est une
92 toiture orientée nord et composée de tuiles en céramique de 10 ans. Sa surface projetée est de 20 m².



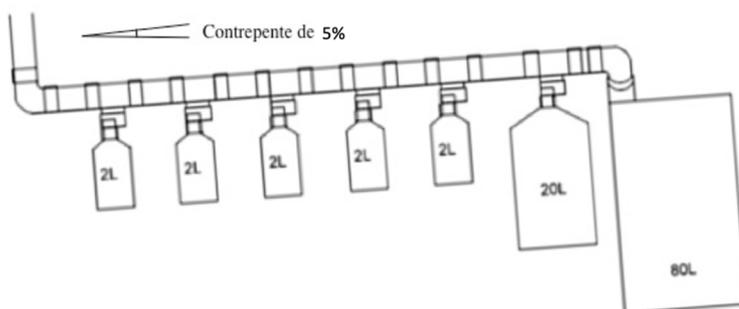
93
94 Figure 1. Localisation des sites expérimentaux

95 Pour les deux sites d'étude, un pluviomètre à auget basculeur (un basculement tous les 0.2 mm de pluie) est
96 installé. La quantité de précipitations, l'intensité de la pluie et le temps sec antécédent ont été enregistrés. A
97 Vincennes, le pluviomètre a été installé sur un tronc d'arbre à environ 3 m de haut dans le jardin. A Romainville,
98 il a été fixé sur un plateau dans un bois résistant aux intempéries et puis mis l'ensemble sur le pilier du garage
99 de vélo.

100 1.2. Conception du dispositif expérimental et échantillonnage

101 Un dispositif fractionné par succession de récipients a donc été construit et mis en place sur la descente des
102 maisons. Il se compose de trois parties : 1) une série de tuyaux en PVC pour le raccordement ; 2) plusieurs
103 bouteilles en verre brun SCHOTT DURAN qui peuvent être stérilisées facilement en autoclave. Une contre-
104 pente de 5% a été appliquée à cette partie pour empêcher l'eau de pénétrer dans les bouteilles. La première
105 pluie tombe sur le toit et remplit la première bouteille. Une fois qu'une bouteille est pleine, l'écoulement peut
106 circuler directement sur la bouteille suivante ; 3) un bidon en PVC de 80 L qui récupère la dernière proportion
107 de ruissellement. Dans cette étude, deux dispositifs de volume total différent sont conçus : le premier avait 6
108 bouteilles en verre brun (Figure 2-(a)) : cinq bouteilles de 2 L et une bouteille de 20 L. Ensuite, ce dispositif a

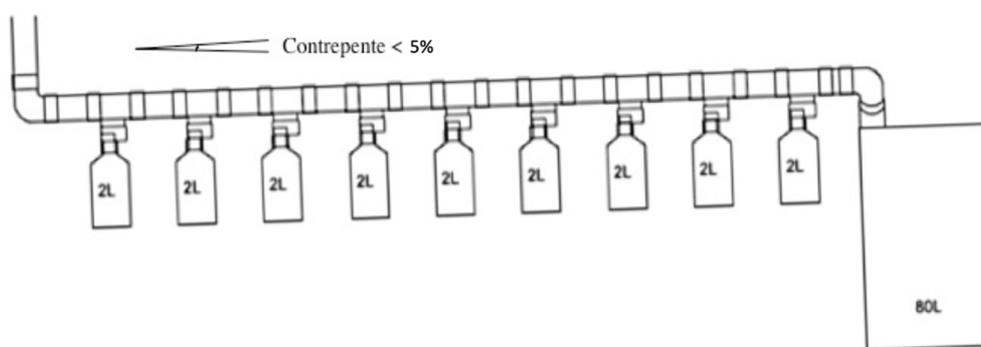
109 été optimisé pour assurer que les mesures tendent vers une constante, donc le deuxième avait 9 bouteilles
110 en verre brun de 2 L (Figure 2-(b)).



111

112

(a) Dispositif 6 échantillons



113

114

(b) Dispositif 9 échantillons

115

Figure 2. Schéma du dispositif d'échantillonnage

116 Tous les flacons stériles ont été mis en place moins d'un jour avant chaque événement pluvial. La collecte des
117 fractions a été effectuée dans les 24 h suivants la première précipitation et les analyses des échantillons ont
118 été effectuées dans les 24 h après le prélèvement.

119 Pour Vincennes, depuis l'année de 2015, 6 événements pluvieux ont été collectés par le premier dispositif. 2
120 événements ont été collectés dans la continuité de cette première série, puis 5 événements ont été collectés
121 fin 2016 et début 2017 par le deuxième dispositif. Sur ces 13 événements pluvieux collectés, 2 événements
122 ont eu une hauteur totale dépassant 5,4 mm, qui correspond à la capacité du dispositif d'échantillonnage. Pour
123 ces 2 événements, les échantillons collectés correspondent uniquement au début de la pluie. Par ailleurs, 3
124 événements ont eu une intensité moyenne supérieure à 30 mm/h.

125 Pour Romainville, 17 événements ont été collectés par le deuxième dispositif de la fin de 2015 au début de
126 2016. 4 de ces événements ont eu une hauteur de pluie inférieure à la capacité du dispositif d'échantillonnage
127 (1,8 mm). En outre l'intensité de précipitation de la plupart des événements est plus faible que celles observées
128 à Vincennes.

129 Le choix de ces paramètres physico-chimiques et microbiologiques s'est basé sur la littérature scientifique
130 (Yaziz et al. 1989; Lee et al. 2012 ; Vialle et al. 2011) et l'ensemble des analyses a été effectué au laboratoire

131 selon les normes de référence. Les méthodes sont résumées dans le Tableau 1 qui précise également la
132 méthode de détermination utilisée dans cette étude et indique la norme de référence correspondante.

133 **1.3. Analyse des résultats**

134 Trois types d'analyse ont été réalisés pour caractériser la qualité de l'eau de ruissellement de la toiture : 1) le
135 test U de Mann-Whitney a été utilisé pour déterminer les différences de concentrations entre les deux sites et
136 évaluer les comparaisons ; 2) les statistiques descriptives pour l'ensemble de données ont été utilisées pour
137 apprécier la qualité et comparer avec les limites de qualité des eaux destinées à la consommation humaine ;
138 3) les profils de la concentration des polluants en fonction de la hauteur de pluie ont été réalisés pour décrire
139 les variations du polluant pendant les événements. Les analyses statistiques ont été effectuées en utilisant
140 des tests non paramétriques, parce que la majorité des données n'a pas respecté l'hypothèse de normalité.

141 **2. Résultats et discussion**

142 **2.1. Différences de qualité de l'eau de ruissellement de toiture dans les deux sites**

143 Le test U de Mann-Whitney a indiqué que les différences de la qualité d'eau de pluie collectée entre les deux
144 sites sont significatives pour tous les paramètres ($p < 0,05$) à l'exception de *E. coli*. ($p = 0,316$) (Tableau 2). Il
145 est proposé que, pour la qualité de l'eau de pluie récupérée, la condition locale de l'emplacement du système
146 soit un facteur plus important par rapport au matériau de construction de toiture. L'impact de l'emplacement
147 sur *E. coli* est faible par rapport à celui sur les autres paramètres. Ce fait peut être interprété comme *E. coli*
148 détecté est très faible à Vincennes et à Romainville.

149 **2.2. Statistiques descriptives des paramètres**

150 On a utilisé les statistiques des paramètres pour comparer les valeurs mesurées avec les limites de qualité
151 des eaux brutes destinées à la consommation humaine (arrêté du 11 janvier 2007). Les Tableau 3 et Tableau
152 4 présentent les maximums, les minimums, les moyennes, les médianes et les écart-types de tous les
153 paramètres à Vincennes et à Romainville.

154 **2.2.1. Paramètres physico-chimiques**

155 L'étude de la qualité en termes de comparaison entre les deux sites est faite à travers cinq paramètres physico-
156 chimiques : pH, conductivité, turbidité, MES et COD (Tableau 3).

157 Les valeurs de pH ne montrent pas de variation manifeste. Les écart-types sont respectivement 0,8 et 0,7 à
158 Vincennes et à Romainville. Les valeurs de pH à Vincennes varient entre 6,5 et 9,5, tandis qu'elles varient
159 entre 6,1 et 9,7 à Romainville. Les valeurs moyennes sont respectivement de 7,6 et 7,1 et il n'y a pas de
160 différence apparente entre les deux sites. Bien que les valeurs moyennes du pH soient dans le cadre des
161 limites de qualité (6,5-9,5), certaines valeurs dépassent les limites (la valeur maximum à Romainville est égale
162 à 9,7). Les valeurs de pH sont légèrement plus basiques que celles rapportées dans la littérature: 5,8-8
163 (Schriewer et al. 20084), 6,4-7,7 (Doyle 2008). Toutefois, une valeur très basique (pH=10) a également été
164 mesurée dans l'étude de Vialle et al. (2011).

165 Les maximums de conductivité sont 211 $\mu\text{S/cm}$ à Vincennes et 140 $\mu\text{S/cm}$ à Romainville, tandis que les
166 minimums sont respectivement 20 $\mu\text{S/cm}$ et 8 $\mu\text{S/cm}$. Les valeurs moyennes sont 82 $\mu\text{S/cm}$ et 32 $\mu\text{S/cm}$.
167 Toutes les valeurs de conductivité sont inférieures à celles représentées dans les limites de qualité et ces
168 faibles valeurs traduisent la faible minéralisation des eaux de pluie. Et elles sont supérieures à celles trouvées
169 dans l'étude de Doyle (2008) (22 $\mu\text{S/cm}$ en aval d'un toit en tôle métallique et 14 $\mu\text{S/cm}$ en aval d'un toit en
170 tuile).

171 La gamme des valeurs de turbidité varie de 2,2 NTU à 38,3 NTU avec une valeur moyenne de 7,1 NTU à
172 Vincennes et varie de 1,2 NTU à 47 NTU avec une valeur moyenne de 3,2 NTU à Romainville. Toutes les
173 valeurs à Vincennes sont supérieures à celles mentionnées dans les limites de qualité, mais il existe des
174 valeurs qui sont inférieures à Romainville. Les gammes de MES sont 2 mg/L à 133,5 mg/L à Vincennes et 0,7
175 mg/L à 122,9 mg/L à Romainville. Les moyennes de MES sont respectivement de 21,1 mg/L et 6,2 mg/L. Les
176 valeurs de COD varient de 0,6 mgC/L à 44,4 mgC/L à Vincennes et varient de 0,3 mgC/L à 16,6 mgC/L à
177 Romainville. Les valeurs mesurées à Vincennes sont beaucoup plus élevées que celles mesurées à
178 Romainville.

179 **2.2.2. Paramètres microbiologiques**

180 Concernant les paramètres microbiologiques, la flore totale à 22 °C et à 36 °C sont utilisées comme indicateurs
181 de contamination microbiologique globale et l'*E. coli* et les entérocoques comme indicateur de contamination
182 fécale (Tableau 4).

183 *Entérocoques et E. coli*. La concentration des entérocoques a montré un niveau plus haut à Vincennes avec
184 une valeur maximale de 2900 ufc/100mL et une valeur médiane de 320 ufc/100mL. Par contre, ce paramètre
185 est non détectable ou seulement présent rarement à Romainville avec une valeur médiane de 0 ufc/100mL.
186 Cette différence pourrait être expliquée par des facteurs environnementaux (plus d'oiseaux parce que le toit
187 de Vincennes est en proximité de Bois de Vincennes). Pour *E. coli*, les valeurs mesurées sont faibles. 54% à
188 Vincennes et 74% à Romainville des valeurs sont en deçà du seuil de détection (on note 0 dans ce cas). Les
189 valeurs maximales sont de 260 ufc/100mL à Vincennes et 140 ufc/100 mL à Romainville. Les concentrations
190 des entérocoques sont beaucoup plus élevées que celles des *E. coli*. Ce fait relève que le paramètre
191 entérocoques est plus sensible que *E. coli*. pour l'eau de pluie.

192 *Flore totale à 22 °C et 36 °C*. Les valeurs de flore totale à 22 °C varient de 0 log ufc/ml à 5,2 log ufc/mL avec
193 une valeur médiane de 3,8 log ufc/mL à Vincennes et elles varient de 0 log ufc/mL à 5,4 log ufc/mL avec une
194 valeur médiane de 3,2 log ufc/mL à Romainville. Pour flore totale à 36 °C, les valeurs varient de 0 à 5,0 log
195 ufc/mL à Vincennes et de 0 à 5,2 ufc log/mL à Romainville. Les valeurs médianes sont 2,7 ufc log/mL à
196 Vincennes et 2,5 log ufc/mL à Romainville. Pour la plupart des résultats, les valeurs de flore totale à 22 °C
197 sont supérieurs que ceux de flore totale à 36 °C. Donc, la température plus basse favorise la croissance de
198 flore totale, ce qui est cohérent avec la conclusion de Martin et al. (2010)

199 Les paramètres microbiologiques n'ont pas été précisés dans les limites de qualité françaises. On peut
200 comparer les valeurs obtenues avec les valeurs dans la directive européenne 98/83/CE (3 novembre 1998).
201 Cette directive exige une eau potable pour les « usages domestiques ». On peut observer que la qualité

202 microbiologique de l'eau de pluie collectée ne correspond pas à la directive d'eau potable européenne. Les
203 systèmes de désinfection doivent être mis en œuvre pour attendre la qualité d'eau potable.

204 **2.2.3. Corrélation entre les différents paramètres**

205 Les corrélations de Spearman ont été appliquées aux toutes les données physico-chimiques et
206 microbiologiques. A Vincennes, 84 échantillons et 712 valeurs sont utilisés pour établir ces corrélations, alors
207 que 144 échantillons et 1296 valeurs sont utilisés à Romainville. Le Tableau 5 présente les résultats de
208 l'analyse de corrélation avec les coefficients de corrélations entre les différents paramètres mesurés (r) et les
209 niveaux de significativité (p). Les valeurs marquées en rouge dans ce tableau représentent des paramètres
210 fortement corrélés ($r > 0,6$ et $p < 0,05$).

211 Les résultats de ces deux endroits sont similaires. Parmi toutes ces corrélations, celle entre turbidité et MES
212 apparaît la plus significative (r égale à 0,770 à Vincennes et à 0,850 à Romainville), indiquant que ces deux
213 paramètres sont très liés. La conductivité est fortement corrélée avec COD aux deux sites d'étude. Les
214 coefficients de corrélation sont respectivement égaux à 0,751 ($p < 0,001$) à Vincennes et à 0,634 ($p < 0,001$) à
215 Romainville. Concernant les deux contaminants microbiologiques globaux, la flore totale à 22°C et à 36°C, la
216 corrélation entre eux est forte avec un coefficient de corrélation de 0,612 ($p < 0,001$) à Vincennes et de 0,634 (p
217 $< 0,001$) à Romainville. Les mesures de la turbidité et des MES renseignent tous deux sur la qualité concernant
218 les matières particulaires (les MES comprenant également les matières décantables à la différence de la
219 turbidité). Elles sont très fortement corrélées. Aussi, dans une optique opérationnelle visant à avoir un
220 protocole de suivi allégé, il est possible de se limiter à la mesure d'un seul de ces deux paramètres. La mesure
221 de la turbidité étant opérationnellement plus simple (utilisation d'une sonde), ce paramètre peut donc être
222 utilisé comme indicateur pour représenter la pollution particulaire. Il en va de même pour la conductivité et le
223 COD qui renseignent sur la pollution dissoute. Dans l'optique opérationnelle précédemment évoquée, il est
224 possible de se limiter à la mesure de la conductivité (utilisation d'une sonde) pour caractériser cette pollution
225 dissoute.

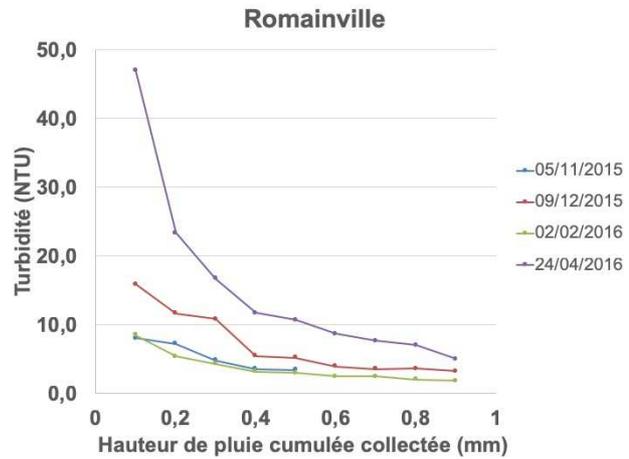
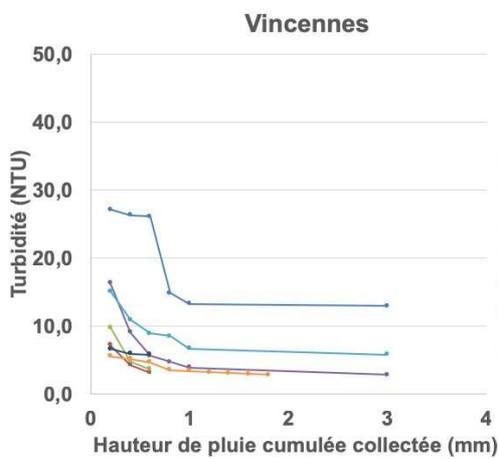
226 La corrélation entre *E. coli* et entérocoques n'est pas significative. Les coefficients de corrélation sont
227 respectivement égaux à 0,011 à Vincennes et à 0,060 à Romainville. La différence est à souligner entre cette
228 faible valeur et celles trouvées dans la littérature (Vialle, 2010 ; Wilkes et al., 2011). Cela peut s'expliquer par
229 le fait que les entérocoques, tout comme *E. coli*, sont incapables de se reproduire dans l'eau, mais ont une
230 plus grande capacité à survivre. A Vincennes, pour les entérocoques, une seule valeur mesurée des 84
231 échantillons est de 0, mais la détection de *E. coli* dans l'eau collectée est faible avec un taux de détection de
232 46%. A Romainville, les taux de détection pour les deux contaminants fécaux sont 48% pour les entérocoques
233 et 26% pour les *E. coli*. Leurs différences de concentration rendent leur corrélation faible.

234 **2.3. Profils d'évolution de la qualité de l'eau de toiture**

235 Pour raconter les évolutions de la qualité de l'eau de ruissellement de toiture au cours des événements
236 pluviaux, on a créé des courbes sur lesquelles les valeurs mesurées des indicateurs de qualité varient en
237 fonction de hauteur de pluie cumulée collectée.

238 Concernant les paramètres microbiologiques, les variations sont irrégulières et il y a un ou plusieurs pic(s) sur
 239 les courbes. Le changement de la hauteur de pluie cumulée collectée n'affecte pas les concentrations, donc
 240 il est impossible d'étudier l'évolution de la qualité *via* les indicateurs microbiologiques.

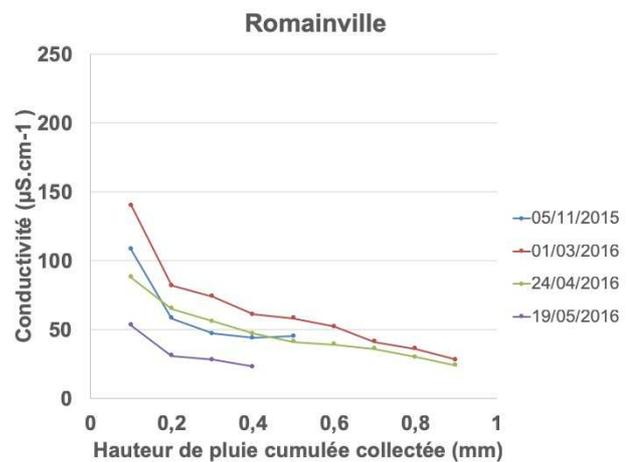
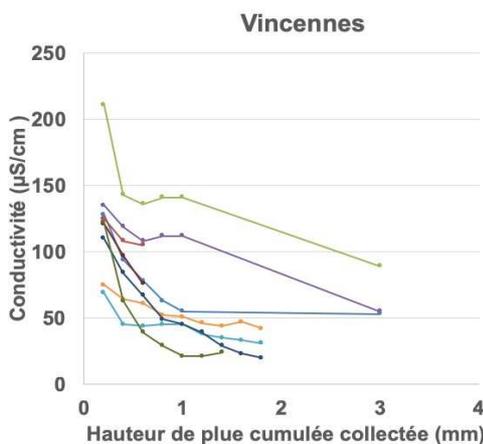
241 Concernant les paramètres physico-chimiques, la turbidité a été utilisée pour représenter les matières
 242 particulaires et la conductivité pour représenter les polluants dissous. Pour les courbes de l'évolution de la
 243 turbidité et conductivité, les évolutions décroissantes (sa représentation graphique sur un intervalle est une
 244 courbe qui descend constamment) et les évolutions irrégulières (sa représentation graphique sur un intervalle
 245 est une courbe présentant un ou plusieurs pic(s)) sont tous les deux observées. L'évolution décroissante
 246 prouve que l'amélioration de la qualité des eaux de toiture en cours d'évènement est susceptible d'être
 247 observée. Parmi les 13 collectes à Vincennes, 7 collectes pour la turbidité et 10 collectes pour la conductivité
 248 montrent des évolutions décroissantes, alors que 4 par 17 collectes montrent des évolutions décroissantes
 249 pour les deux indicateurs à Romainville (Figure 3 et Figure 4).



(a) Collectes à Vincennes

(b) Collectes à Romainville

Figure 3. Profil de la turbidité en fonction de la hauteur de pluie cumulée collectée



(a) Collectes à Vincennes

(b) Collectes à Romainville

Figure 4. Profil de la conductivité en fonction de la hauteur de pluie cumulée collectée

256 A Vincennes, les valeurs de turbidité diminuent de 34,3% en moyenne en enlevant le premier mm d'eau de
257 pluie et diminuent de 69,1% en enlevant 2 mm (Figure 3-(a)). Cela montre qu'en écartant les deux premiers
258 millimètres d'eau, une proportion importante (plus du tiers) des matières particulaires peut être efficacement
259 éliminée. En ce qui concerne la conductivité, la valeur moyenne diminue respectivement 49,4% et 79,8% en
260 enlevant le 1^{er} mm et le 2^{ème} mm de l'eau de ruissellement (Figure 4-(a)). La conductivité moyenne du 2^{ème}
261 mm ($64,9 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) est réduite de plus de la moitié par rapport au 1^{er} millimètre ($128,3 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) et celle du
262 3^{ème} mm ($31 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) est aussi réduite de plus de la moitié par rapport au 2^{ème} mm. Cette observation
263 corrobore, pour la conductivité, l'analyse de Martinson et Thomas (2009) : la charge de contamination est
264 réduite de moitié par mm écarté jusqu'à atteindre une valeur minimale. A Romainville, la turbidité diminue de
265 87,3% pour la première fraction de 0.8 mm de précipitation (Figure 3-(b)), tandis que la conductivité diminue
266 de 77,3% (Figure 4-(b)).

267 **Conclusion**

268 Cet article a présenté les résultats de la qualité de l'eau de pluie en aval de toitures en analysant des
269 paramètres physico-chimiques et microbiologiques. Les résultats peuvent être résumés dans les trois points
270 suivants :

- 271 – Le test de Mann-Whitney U a indiqué que les différences entre les deux sites sont significatives pour
272 tous les paramètres mesurés sauf *E. coli*. Concernant les paramètres physico-chimique, toutes les
273 valeurs mesurées à Vincennes sont beaucoup plus élevées que celles mesurées à Romainville. Les
274 valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques de Vincennes sont plusieurs fois supérieures à
275 celles de Romainville (2,6 fois pour la conductivité, 2,2 fois pour la turbidité, 3,4 fois pour les MES et
276 3 fois pour le COD). Les différences entre les deux sites sont également significatives sur les
277 paramètres microbiologiques, sauf pour *E. coli*. où elles sont partout faibles (en grande majorité en
278 deçà du seuil de détection). L'explication de cette différence réside dans une différence entre les deux
279 sites en termes de l'état de la toiture (sensiblement plus sale à Vincennes) et de l'environnement
280 immédiat (présence d'arbres plus importante en proximité du dispositif de Vincennes). Ces deux
281 facteurs impactent la qualité de l'eau récupérée par le système de récupération de l'eau de pluie.
- 282 – La corrélation entre la turbidité et les MES et la corrélation entre la conductivité et le COD sont très
283 significatives. Cela permet d'envisager un protocole simplifié pour caractériser les matières dissoutes
284 et les matières particulaires au travers des seuls paramètres turbidité et conductivité.
- 285 – La turbidité et la conductivité montrent une décroissance pour la majorité des événements de pluie à
286 Vincennes et une minorité à Romainville. Les évolutions de ces paramètres montrent clairement que
287 l'amélioration de la qualité des eaux de toiture en cours d'évènement est susceptible d'être observée
288 pour les paramètres physico-chimiques. Nous pourrions utiliser ces paramètres pour établir des
289 modèles fiables pour caractériser de ruissellement de la toiture dans l'étude après. Les effets de
290 l'intensité des précipitations et de la période antérieure de jours secs ont besoin d'une étude plus
291 approfondie.

292 – Tous les paramètres microbiologiques montrent des évolutions irrégulières. Cette conclusion est
293 cohérente avec d'autres travaux indiquant que la contamination microbiologique n'est pas forcément
294 concentrée en début d'évènement.

295 En termes de perspectives, cette étude va être complétée par un suivi d'une année sur un dispositif
296 comparable mis en œuvre à Tianjin en Chine. Au-delà de l'acquisition de données propres à ce nouveau site,
297 il sera possible d'analyser et de comparer l'effet des différences sensibles de climats sur l'évolution de la
298 qualité des eaux de toiture en début d'évènement en comparant ces nouveaux résultats avec ceux acquis en
299 l'Île-de-France (France).

300

301 **Bibliographie**

302 Abbott, S., Caughley, B., Ward A. (2007). An Evaluation of Measures for Improving the Quality of Roof-
303 Collected Rainwater. *Rainwater and Urban Design*.

304 AFNOR (1999). Qualité de l'eau-Dénombrement des micro-organismes revivifiables-comptage des colonies
305 par ensemencement dans un milieu de culture nutritif gélosé. NF EN ISO-6222. Paris: AFNOR,

306 de Gouvello B., Gerolin A., Le Nouveau N. (2014) Rainwater harvesting in urban areas: how can foreign
307 experiences enhance the French approach? *Water Science and Technology: Water Supply*, 14 (4): 569-576.

308 Doyle, K. C. (2008). Sizing the First Flush and Its Effect on the Storage-Reliability-Yield Behavior of Rainwater
309 Harvesting in Rwanda. MIT, 151p

310 Hatibu, N., Mutabazi, K., Senkondo, E. M., Msangi, A. S. K. (2006). Economics of Rainwater Harvesting for
311 Crop Enterprises in Semi-Arid Areas of East Africa. *Agricultural Water Management* 80(1-3). Special Issue on
312 Water Scarcity: Challenges and Opportunities for Crop Science Selected Plenary and Symposia Papers from
313 the theme "Crop Science Addressing Water Scarcity" presented at the Fourth International Crop Science
314 Congress, Brisbane, Australia, 26 September to 1 October 2004: 74-86.

315 JOCE (Journal officiel des communautés européennes). Directive 98/83/CE du conseil du 3 novembre 1998
316 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine., le 3 novembre 1998. 23p.

317 Lee, J. H., Bang, K. W., Ketchum Jr., L. H, Choe, .J. S., Yu, M. J. (2002). First Flush Analysis of Urban Storm
318 Runoff. *Science of The Total Environment* 293(1-3): 163-175.

319 Lee, J. Y., Bak, G., Han, M. (2012). Quality of Roof-Harvested Rainwater – Comparison of Different Roofing
320 Materials. *Environmental Pollution* 162: 422-429.

321 Martin, A.R., Coombes, P.J., Harrison, T.L., Dunstan, R.H. (2010). Changes in Abundance of Heterotrophic
322 and Coliform Bacteria Resident in Stored Water Bodies in Relation to Incoming Bacterial Loads Following Rain
323 Events. *Journal of Environmental Monitoring* (12): 255-260.

- 324 Martinson, D.B., Thomas, T.H. (2009). Quantifying the First-Flush Phenomenon: Effects of First-Flush on Water
325 Yield and Quality. 14th International Rainwater Catchment Systems Conference, August 2009, Kuala Lumpur.
- 326 Ministère de la santé et des solidarités. Arrêté du 11 janvier 2007 relatif au limites et références de qualité de
327 eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées au articles R.1321-2,R.1321-3,
328 R.1321-7 et R. 1321-38 du code de la santé publique. Journal officiel de la république française, le 11janvier
329 2007.
- 330 Schriewer, A., Horn, H., et Helmreich, B. (2008). Time Focused Measurements of Roof Runoff Quality.
331 Corrosion Science 50(2): 384–391.
- 332 Sturm, M., Zimmermann, M., Schütz, K., Urban, W., Hartung, H. (2009). Rainwater Harvesting as an Alternative
333 Water Resource in Rural Sites in Central Northern Namibia. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C
334 34(13–16). 9th WaterNet/WARFSA/GWP-SA. Symposium: Water and Sustainable Development for Improved
335 Livelihoods: 776–785
- 336 Vialle, C., Sablayrolles, C., Lovera, M. (2011). Monitoring of Water Quality from Roof Runoff: Interpretation
337 Using Multivariate Analysis. Water Research 45(12): 3765–3775.
- 338 Wilkes A, Shiping W, Tennigkeit T, Jiexi F. 2011. Agricultural Monitoring and Evaluation Systems: What can we
339 learn for the MRV of agricultural NAMAs? ICRAF Working Paper No. 126. ICRAF, Nairobi.
- 340 Yaziz, M. I., Gunting, H., Sapari, N., Ghazali, A. W. (1989). Variations in Rainwater Quality from Roof
341 Catchments. Water Research 23(6): 761–765.
- 342 Zobrist, J., Müller, S. R., Ammann, A. (2000). Quality of Roof Runoff for Groundwater Infiltration. Water
343 Research 34(5): 1455–1462.
- 344

345 **Tableaux**

Paramètre	Méthode d'analyse et appareil de mesure	Norme de référence
Paramètre physico-chimique		
pH	Sonde (Multi 340iWT®)	NF T 90-008
Conductivité (µS/ cm)	Sonde (Multi 340iWT®)	NF EN 27888
Turbidité (NTU)	Turbidimètre (2100P Turbidimeter HACH®)	NF EN ISO 7027
MES (mg/ L)	Filtration GF/F (Verrerie Sartorius® et filtre)	NF EN 872
COD (mgC/ L)	COT-mètre (TOC-Vcsn SHIMADZU®)	NF EN 1484
Paramètres microbiologique		
Entérocoques (ufc/100mL)	Microplate MUG/EC BIORAD®	NF EN ISO 7899-1
<i>E. coli</i> (ufc/100mL)	Microplate MUG/SF BIOerRAD®	NF EN ISO 9308-3
Flore totale à 22°C (log ufc. mL ⁻¹)	Culture sur gélose PCA	NF EN ISO-6222
Flore totale à 36°C (log ufc. mL ⁻¹)	Culture sur gélose PCA	NF EN ISO-6222

346 Tableau 1. Résumé des méthodes d'analyse

347

	pH	Conductivité	Turbidité	MES	COD	Entérocoques	<i>E. coli</i>	Flore totale à 22°C	Flore totale à 36°C
Valeur de <i>p</i>	0.023	< 0.0001	0,0026	0.006	0.0008	< 0.0001	0.316 non	< 0.0001	< 0.0001

348 *p* > 0,05 : pas de différence statistique significative entre les deux échantillons

349 Tableau 2 . Les résultats de test U de Mann-Whitney pour les deux sites

350

		pH	Conductivité (µS /cm)	Turbidité (NTU)	MES (mg/l)	COD(mg C/l)
Vincennes	Maximum	9,5	211	38,3	133,5	44,4
	Minimum	6,5	20	2,2	2,0	0,6
	Médiane	7,3	70	4,9	9,9	3,4
	Moyenne	7.6	82	7,1	21,1	6,3
	Écart-types	0,8	42	6,1	28,1	7,1
Romainville	Maximum	9,7	140	47,0	122,9	16,6
	Minimum	6,1	8	1,2	0,7	0,3
	Médiane	7,3	36	4,5	10,8	2,8
	Moyenne	7,1	32	3,2	6,2	2,1

Écart-types	0,7	21	6,0	19,3	2,4
Limites de qualité de l'eau à la consommation humaine	6,5- 9,5	180-1000	2	-	2 mg C/L

351 Arrêté du 11 janvier 2007 (les limites de qualité des eaux brutes destinée à la consommation humaine) ; - :
352 n'été pas mentionné.

353 Tableau 3. Grandeurs statistiques pour les paramètres physico-chimiques

354

		Entérocoques (ufc/100ml)	<i>E. coli</i> (ufc/100ml)	Flore totale à 22°C (log ufc/ml)	Flore totale à 36°C (log ufc/ml)
Vincennes	Maximum	2900	260	5,2	5,0
	Minimum	0	0	0	0
	Médiane	320	0	3,8	2,7
	Écart-types	583	50	0,8	1,1
Romainville	Maximum	1900	140	5,4	5,2
	Minimum	0	0	0,0	0,0
	Médiane	0	0	3,2	2,5
	Écart-types	257	27	1,0	1,1
Limites de qualité de l'eau à la consommation humaine		-	0/100mL 0/250mL ^a	- 100/mL ^a	- 20/mL ^a

355 Arrêté du 11 janvier 2007 (les limites de qualité des eaux brutes destinée à la consommation humaine) ; - :
356 n'été pas mentionné. a : Directive européenne 98/83/CE.

357 Tableau 4. Grandeurs statistiques pour les paramètres microbiologiques

358

		pH	Cond.	Turb.	MES	COD	<i>E. coli</i>	Entero.	F.T. à 22°C
Vincennes	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	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)
	pH	Cond.	Turb.	MES	COD	E. coli	Entero.	FT à 22°C

Romainville	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)

359 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
360 (forte) , 0.4-0.6 (modérée), 0.2-0.4 (faible), 0.0-0.2 (très faible ou pas de corrélation). Niveaux de
361 significativité : * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$

362 Tableau 5. Corrélation entre les différents paramètres mesurés dans les fractions collectées