



Etude de l'évolution et de la variabilité des quantités et de la qualité des eaux urbaines en temps de pluie sur la dernière décennie – Capitalisation des chroniques de l'OTHU
(Projet CHRONOTHU)



Site de Chassieu (69)

Convention 2013 2882 - Agence de l'Eau

Sylvie BARRAUD, Siao SUN, Hélène CASTEBRUNET,
Jean-Baptiste AUBIN et Pierre MARMONIER

Novembre 2015

Remerciements

Nous tenons à remercier l'OTHU et ses membres pour avoir permis l'acquisition et la validation des données que nous avons traitées et en particulier les techniciens ou assistants ingénieurs qui permettent cette acquisition des données et leur validation dans de bonnes conditions. Nous remercions notamment Nicolas Walcker du GRAIE, Antonin Vienney du LEHNA.

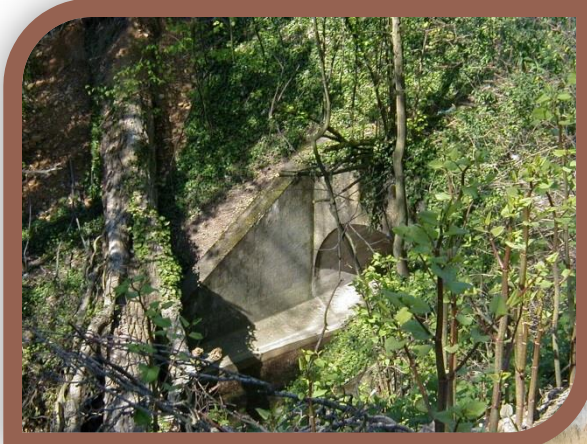
Nous remercions la Metropole de Lyon pour son soutien et la mise à disposition des sites.
L'agence de l'eau pour son soutien à l'observatoire depuis sa création.

Nous remercions enfin Flora Branger et Isabelle Braud pour leur collaboration sur Laléchère.

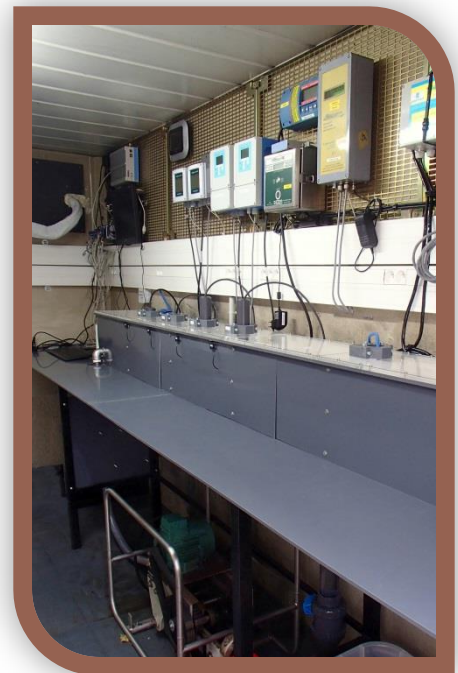
Site de l'Îlot Villeurbanne (69)



Site d'Ecully (69)



Site de Minerve (69)



Station de mesure "type" Othu

SOMMAIRE

1	Introduction	10
2	Méthodologie générale.....	12
2.1	Méthodes de base de détection des tendances (tests)	12
2.1.1	 <i>La régression linéaire</i>	12
2.1.2	 <i>Le test Mann-Kendall</i>	13
2.2	Méthode adaptée pour l'évaluation des tendances en présence d'autocorrélation	14
2.2.1	<i>Tests adaptés dans le cas de la régression linéaire</i>	14
2.2.2	 <i>Test Mann-Kendall "adapté"</i>	15
2.3	Traitement de la possible saisonnalité dans la détection de tendance	16
2.4	Synthèse de la méthodologie appliquée ..	16
3	Présentation des sites et systèmes de mesure des variables étudiées	17
3.1	Le site de Chassieu.....	18
3.2	Le site d'Ecully	19
3.3	Le site de La Léchère	19
4	Récapitulatif des familles de grandeurs étudiées	21
5	Tendance d'évolution de la pluviométrie (1986-2013)	22
5.1	Données et pré-traitement des données .	22
5.2	Analyse des tendances pluviométriques – caractéristiques annuelles	22
5.3	Analyse des tendances pluviométriques – caractéristiques mensuelles	24
5.4	Analyse des tendances pluviométriques – caractéristiques évènementielles (1986-2013)	26
5.5	Conclusion sur les tendances en matière de pluies sur la période 1986-2013	27
6	Tendance d'évolution de la température de l'air (1970 – 2014)	28
6.1	Données et pré-traitement des données .	28
6.2	Analyse des tendances de température d'air – caractéristiques annuelles (1970 – 2014)	28
6.3	Analyse des tendances de température d'air – caractéristiques mensuelles (1970 – 2014)	30
6.4	Conclusion sur les tendances en matière de températures d'air sur la période 1970-2014	31
7	Tendance d'évolution de la température d'eau en entrée du bassin (en sortie du réseau drainant le bassin versant) (2004-2011) – site Chassieu	32
7.1	Données et pré-traitement des données .	32
7.2	Analyse des tendances à l'échelle annuelle de la température d'eau en entrée du bassin de retenue (en sortie du réseau drainant le bassin versant de Chassieu) (2004-2011)	33
7.3	Analyse des tendances à l'échelle mensuelle de la température d'eau en entrée du bassin de retenue (en sortie du réseau drainant le bassin versant de Chassieu) (2004-2011)	33

7.4	Conclusion sur les tendances en matière de températures d'eau en sortie de bassin versant sur la période 2004-2011	34
8	Tendance d'évolution du niveau de nappe (2003-2014) - Chassieu	35
8.1	Données et pré-traitement des données .	35
8.2	Analyse des tendances d'évolution des hauteurs de nappe à l'échelle mensuelle	36
8.3	Corrélation temporelle des hauteurs de pluie et des hauteurs de nappe sur la période d'étude	36
8.4	Conclusion sur les tendances en matière de modification de hauteurs de nappe sur la période 2003-2014	37
9	Tendance d'évolution des températures d'eau dans la nappe (2003-2013) en amont et en aval d'un bassin d'infiltration (Chassieu)	38
9.1	Données et pré-traitement des données .	38
9.1.1	<i>Données de température en amont (capteurs SC5 et SC6)</i>	38
9.1.2	<i>Données de température en nappe à l'aval du bassin d'infiltration (SC11 et SC26)</i>	40
9.2	Analyse des tendances d'évolution des températures de nappe (series annuelles et mensuelles)	42
9.2.1	<i>.....Températures de nappe en amont</i>	42
9.2.2	<i>..... Températures de nappe en aval</i>	43
9.3	Corrélation des températures de nappe amont / aval avec d'autres variables climatiques et avec l'eau d'alimentation du bassin d'infiltration.....	44
9.4	Conclusion sur les tendances en matière de températures d'eau de nappe sur la période 2003-2013	45
10	Tendance d'évolution des quantités d'eau issues des bassins versants	46
10.1	Tendance d'évolution des quantités d'eau issues du bassin versant de Chassieu	46
10.1.1	<i>Données et prétraitement des données sur le site de Chassieu (2004-2011)</i>	46
10.1.2	<i>Analyse des tendances d'évolution des quantités d'eau sur le site de Chassieu</i>	49
10.2	Tendance d'évolution des quantités d'eau issues du bassin versant d'Ecully	52
10.2.1	<i>Données et prétraitement des données sur le site de Chassieu (2004-2011)</i>	52
10.2.2	<i>Analyse des tendances d'évolution des quantités d'eau sur le site d'Ecully</i>	57
10.3	Tendance d'évolution des quantités d'eau issues du bassin versant de La Léchère (juin 2005-décembre 2014)	58
10.3.1	<i>....Données et pré-traitement des données</i>	58
10.3.1	<i>Analyse des tendances d'évolution des hauteurs de nappe à l'échelle annuelle et mensuelle</i>	60
10.4	Conclusion sur les tendances d'évolution des quantités d'eau issues de bassins versants urbains ou péri-urbains.....	62
11	Tendance d'évolution des quantités de matières en suspension (MES) dans les eaux pluviales issues des bassins versants urbains.....	63
11.1	Données et prétraitement des données sur les sites de Chassieu et d'Ecully (2004-2011)	63

11.1.1	Site de Chassieu	63
11.1.2	 Site d'Ecully	64
11.2	Analyse des tendances d'évolution des quantités de MES (2004-2011)	65
11.2.1	Site de Chassieu	65
11.2.2	 Site d'Ecully	71
11.3	Conclusion sur les tendances d'évolution des quantités de polluants sur les sites de Chassieu et d'Ecully (2004-2011)	76
12	Analyse des tendances en termes de concentrations en polluants	77
12.1	Données et prétraitement des données sur le site de Chassieu (2004-2013)	77
12.2	Analyse des tendances	78
12.3	Conclusion sur les tendances d'évolution des concentrations en métaux et HAPs (2004-2013)	79
13	Synthèse et conclusions	80
14	Références bibliographiques	83

ANNEXES

86

Liste des figures

Fig. 1 Méthodologie retenue	17
Fig. 2 Localisation des sites étudiés (www.OTHU.org)	17
Fig. 3 Photo aérienne du bassin versant de Chassieu et de l'exutoire (bassin de retenue et d'infiltration) – Google earth	18
Fig. 4 Photo aérienne du bassin versant d'Ecully - Google earth	19
Fig. 5 Photo aérienne du bassin versant d'Ecully - Google earth	21
Fig. 6 Chronique des hauteurs précipitées utilisées dans l'étude à la station de Bron, (a) à l'échelle annuelle (b) et mensuelle	22
Fig. 7 Hauteurs précipitées moyennes, médianes, minimales et maximales sur les 28 années (1986-2013) à Bron (Proximité de Chassieu).....	25
Fig. 8 Caractéristiques des évènements pluvieux (hauteur précipitée vs durée).....	26
Fig. 9 Chronique des températures annuelles : (a) moyenne et médiane, (b) minimale; (c) maximale.	28
Fig. 10 Chroniques des températures d'air mensuelles (moyennes, médianes, min et max).....	28
Fig. 11 Chroniques des températures d'air mensuelles désaisonnalisées (moyennes, médianes, min et max) ..	28
Fig. 12 Chronique des températures annuelles d'eau en entrée du bassin de retenue : (a) moyenne et médiane, (b) minimale; (c) maximale. (Chassieu)	32
Fig. 13 Chronique des températures mensuelles d'eau en entrée du bassin de retenue: (a) moyenne et médiane, (b) minimale; (c) maximale. (Chassieu)	32
Fig. 14 Evolution temporelle des températures mensuelles d'eau moyennes médianes, min et max en entrée du bassin de retenue après dessaisonalisation	33
Fig. 15 Chronique horaire du niveau de nappe en amont (upstream) et à l'aval (downstream) direct du bassin d'infiltration (2003-2014)	35
Fig. 16 Niveau mensuel de nappe : (a) en amont (b) en aval du bassin d'infiltration (2003-2014).....	35
Fig. 17 Coefficients de corrélation entre intensités de pluies et niveau de nappe	37
Fig. 18 Températures de nappe en amont de l'infiltration sur les deux piézomètres SC5 et SC6.....	39
Fig. 19 Chronique des températures annuelles moyennes, médianes, minimales et maximales à l'amont du bassin d'infiltration	39
Fig. 20 Chronique des températures mensuelles moyennes, médianes, minimales et maximales à l'amont du bassin d'infiltration	39
Fig. 21 Chronique des écarts annuels de températures entre les maximales et minimales à l'amont du bassin d'infiltration	40
Fig. 22 Température de nappe en aval du bassin d'infiltration	40
Fig. 23 Chronique des températures annuelles moyennes, médianes, minimales et maximales à l'aval du bassin d'infiltration	41
Fig. 24 Chronique des températures mensuelles moyennes, médianes, minimales et maximales à l'aval du bassin d'infiltration	41
Fig. 25 Chronique des écarts annuels de températures entre les maximales et minimales à l'aval du bassin d'infiltration	41
Fig. 26 Saisonnalité des températures de nappe en amont (écart aux moyennes mensuelles)	42
Fig. 27 Saisonnalité des température de nappe en aval du bassin d'infiltration.	44
Fig. 28 Quelques journées de temps sec typiques sur Chassieu	46

Fig. 29 Séries mensuelles des débits à l'exutoire du bassin versant de Chassieu: (a) débits moyens, 50 ^{ème} , 75 ^{ème} et 90 ^{ème} centiles; (b) 95 ^{ème} , 99 ^{ème} , 99.5 ^{ème} et 99.9 ^{ème} centiles.	47
Fig. 30 Chroniques de pluies et de débits à l'exutoire de Chassieu entre 2004 à 2011.	48
Fig. 31 Hauteurs de pluie vs volumes de ruissellement à l'exutoire entre 2004 et 2011 à Chassieu (521 évènements)	49
Fig. 32 Evolution du coefficient de ruissellement entre 2004 et 2011 à Chassieu (521 évènements)	49
Fig. 33 Evaluation sommaire de l'urbanisation sur le secteur Les modification du bâti sont en bleu pour la période 1992-2015 et en noir sur la période 2003-2015	52
Fig. 34 Séries mensuelles des débits à l'exutoire du bassin versant d'Ecully : (a) débits moyens, 25 ^{ème} , 50 ^{ème} , 75 ^{ème} ; (b) 90 ^{ème} , 95 ^{ème} , 99 ^{ème} centiles.....	53
Fig. 35 Profil journalier des débits médians et des 5 ^{ème} , 25 ^{ème} , 75 ^{ème} et 95 ^{ème} centiles à l'exutoire du bassin versant d'Ecully (2004-2011) – 1516 périodes de temps sec.....	54
Fig. 36 Caractéristiques annuelles relatives aux débits moyens, médians et aux centiles à 75 ^{ème} et 95 ^{ème} à Ecully (2004-2011) – 1516 périodes de temps sec	54
Fig. 37 Caractéristiques annuelles relatives aux débits moyens, médians et aux centiles à 75 ^{ème} et 95 ^{ème} à Ecully (2004-2011) – 1516 périodes de temps sec	55
Fig. 38 Série chronologique sur Ecully (pluie, débit total à l'exutoire, débit de temps de pluie, coefficient de ruissellement par temps de pluie) (2004-2011)	56
Fig. 39 Caractéristiques des évènements pluvieux : hauteur précipitée vs durée (Les + indiquent tous les évènements les points entourés sont les évènements retenus)	59
Fig. 40 Séries temporelles des débits de base, des coefficients de ruissellement et du lag-time (La Léchère) sur les 394 évènements.....	60
Fig. 41 Séries chronologiques donnant sur une base événementielle : (a) les concentrations moyennes par évènement (EMC) (b) et les masses associées (EL) à Chassieu – temps de pluie (2004-2011)	63
Fig. 42 Valeurs annuelles des médianes, 75 ^{ème} et 95 ^{ème} centiles des concentrations en MES – temps sec – Ecully (2004-2011)	64
Fig. 43 Valeurs mensuelles des médianes, 75 ^{ème} et 95 ^{ème} centiles des concentrations en MES – temps sec – Ecully (2004-2011)	64
Fig. 44 Séries chronologiques donnant sur une base événementielle (a) les concentrations moyennes par évènement (b) et les masses associées à Ecully – rejet unitaire de temps de pluie (2004-2011)	65
Fig. 45 Histogramme du log des concentrations moyennes événementielles de MES sur 162 évènements et la densité de probabilité normale ajustée – Chassieu (moyenne 4.48, écart type 0.70)	66
Fig. 46 Représentation des volumes d'eau vs les concentrations moyennes de MES sur chaque évènement – Chassieu	66
Fig. 47. Détection de tendance (<i>P</i> -values) en fonction du nombre d'évènements dans l'échantillon pour (a) les volumes d'eau événementiels; (b) les masses événementielles de MES	69
Fig. 48. Courbes M(V) des 162 évènements aux données complètes à Chassieu	70
Fig. 49. Séries chronologiques relatives aux quatre indicateurs calculés à partir des 162 évènements complets : (a) V20, V30; (b) Max-MV; (c) coefficient b.	70
Fig. 50 Profils journaliers des concentrations en MES à Ecully.....	71
Fig. 51 Profil journalier de concentrations médianes en MES et des débits médians de temps sec (Ecully)	71
Fig. 52 Comparaison des profils journaliers (25 ^{ème} , 50 ^{ème} et 75 ^{ème} centile) des concentrations en MES par temps sec (1124 jours) et temps de pluie (734 jours) à Ecully	72
Fig. 53 Histogramme du log des concentrations moyennes événementielles de MES sur 148 évènements et la densité de probabilité normale ajustée – Ecully (Moyenne 5.02, écart type 0.625)	73

Fig. 54 Représentation des volumes d'eau vs les concentrations moyennes de MES sur chaque évènement – Ecully	73
Fig. 55 Courbes M(V) pour les 148 évènements avec données complètes sur Ecully.....	74
Fig. 56. Variables caractérisant la distribution intra-évènementielle des MES à Ecully	75
Fig. 57 Concentrations en HAPs au cours du temps à Chassieu (23 campagnes) Benzo (b) fluoranthène (BbF), Benzo (k) fluoranthène (BkF), Benzo (a) pyrène (BaP), Benzo (g. h. i) pérylène (Bper), Indéno (1, 2,3-c, d) pyrène (IP) et fluoranthène (Flh)	77
Fig. 58 Concentrations de Zn au cours du temps à Chassieu (33 campagnes)	78
Fig 59 Rain gauges in Greater Lyon	92
Fig. 60 Annual rainfall depths in Chassieu corrected with data from other gauges and their uncertainty intervals	95
Fig. 61 Correlation coefficients between groundwater temperature upstream and downstream the infiltration basin	96
Fig. 62 Correlation coefficients between air temperature and upstream groundwater temperature	97
Fig. 63 Correlation coefficients between air and downstream groundwater temperature	97
Fig. 64 Correlation coefficients between basin water temperature and upstream groundwater temperature...	97
Fig. 65 Correlation coefficients between basin water temperature and downstream groundwater temperature	98
Fig. 66 Correlation coefficients between rainfall depths and upstream groundwater temperature.....	98
Fig. 67 Correlation coefficients between rainfall depths and downstream groundwater temperature.....	98

Liste des tableaux

Table 1. Caractéristiques annuelles de la série pluviométrique de Chassieu et variables étudiées	23
Table 2 Analyse des tendances en matière de pluviométrie (caractéristiques annuelles) sur 1986-2013 à Bron (proximité Chassieu).....	24
Table 3 Analyse des tendances pluviométriques sur la chronique désaisonnalisée de hauteurs mensuelles précipitées à Bron	25
Table 4 Caractéristiques évènementielles des pluies	26
Table 5 Trend detection results for event-based rainfall variables	26
Table 6 Détection de tendance sur les chroniques annuelles de températures d'air	29
Table 7 Détection de tendance sur les chroniques mensuelles de températures d'air désaisonnalisées	30
Table 8 Trend detection results for annual basin water temperature time series	33
Table 9 Détection de tendance sur les chroniques mensuelles de températures désaisonnalisées (en entrée du bassin de retenue).....	34
Table 10 Détection de tendance sur les chroniques mensuelles de hauteurs de nappe	36
Table 11 Chroniques utilisées pour la température d'eau de nappe en amont et en aval	38
Table 12 Détection de tendance sur les chroniques annuelles de températures de nappe amont	42
Table 13 Détection de tendance sur les chroniques mensuelles de températures de nappe amont (désaisonnalisées)	43
Table 14 Détection de tendance sur les chroniques annuelles de températures de nappe aval.....	43
Table 15 Détection de tendance sur les chroniques mensuelles de températures de nappe aval (désaisonnalisées) 44	
Table 16 Caractéristiques statistiques des variables mensuelles étudiées pour l'estimation des tendances en termes de flux d'eau à Chassieu	47
Table 17 Caractéristiques statistiques des évènements pluvieux et de ruissellement à Chassieu entre 2004 et 2011 (521 évènements)	48
Table 18 Détection de tendance sur les chroniques mensuelles de débits à l'exutoire du bassin versant de Chassieu (2004-2011)	51
Table 19 Détection de tendance sur la pluie et les débits à l'exutoire du bassin versant de Chassieu de (2004-2011) (521 évènements)	51
Table 20 Caractéristiques statistiques des variables mensuelles étudiées pour l'estimation des tendances en termes de flux d'eau à Ecully	53
Table 21 Caractéristiques statistiques des évènements relatifs aux apports d'eau à l'exutoire du bassin versant d'Ecully (2004-2011) - (625 évènements).....	56
Table 22 Détection de tendance pour les séries mensuelles relatives aux débits unitaires à l'exutoire du bassin versant d'Ecully (2004-2011).....	57
Table 23 Détection de tendance pour les débits de temps sec à l'exutoire du bassin versant d'Ecully (2004-2011)	57
Table 24 Détection de tendance pour les quantités d'eau de temps de pluie - Ecully (2004-2011).....	58
Table 25 Caractéristiques des évènements sur le site de La Lechère (394 évènements)	59
Table 26 Résultats en termes de tendance sur les flux d'eau sur le site de La Léchère	60
Table 27 Détection de tendance pour les quantités de MES par temps de pluie - Chassieu (2004-2011)	67
Table 28 Détection de tendance sur les paramètres caractérisant la distribution intra-évènementielle des MES à Chassieu (2004-2011)	71
Table 29 Détection de tendance en matière de concentrations en MES par temps sec à Ecully (2004-2011)	72

Table 30 Détection de tendance en matière de concentrations en MES par temps sec à Ecully (2004-2011)	74
Table 31 Détection de tendance sur les variables caractérisant la distribution intra-événementielle des MES à Ecully (2004-2011)	75
Table 32 Détection de tendance en matière de concentrations moyennes événementielles en métaux lourds et HAPs à Chassieu	78
Table 33 Trend test results using linear regression with significance level of 5%.....	88
Table 34 Trend test results using Mann-Kendall based methods with significant level of 5%.....	90

Publications et présentations

Le travail réalisé a fait l'objet des publications suivantes :

PUBLIEES / PRESENTÉES

Sun S., Barraud S., Castebrunet H., Aubin J. -B., Marmonier P. (2015). Long-term stormwater quantity and quality analysis using continuous measurements in a French urban catchment. *Water Research*: 85 (2015) 432-442. DOI: [10.1016/j.watres.2015.08.054](https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.08.054)

Sun S., Castebrunet H., Barraud S., Aubin J. -B., Marmonier P. (2015). Evolution of total suspended solids (TSS) in urban storm water. *22nd European Junior Scientists Workshop 'Monitoring urban drainage systems'*, 18-22 May 2015, Chichilianne, France, 8 p.

Le travail a été présenté à la journée technique OTHU « Gestion des eaux pluviales à grandes échelles » du 17 septembre 2015 (présentations disponibles sur : www.othu.org)

EN PRÉPARATION : Sun S., Barraud S., Castebrunet H., Branger F., Braud I. Urban hydrological trend analysis based on data analysis and a conceptual rainfall-runoff model, *en préparation*

1 Introduction

La gestion des eaux pluviales en milieu urbain ou péri-urbain est aujourd'hui reconnue comme une des sources de préoccupation majeure des collectivités tant d'un point de vue technique, environnemental (pollution des milieux liés aux rejets urbains de temps de pluie, inondation, ...) qu'économique et social en raison des impacts que ces dysfonctionnements font peser sur la ville et sur ses organisations.

Si de nombreuses études et recherches s'intéressent à l'identification des facteurs provoquant ces dysfonctionnements via des observations ou des expérimentations, à leurs impacts sur les milieux, sur la société et sur les économies locales et si des recherches sont menées pour modéliser, prévoir, mesurer les effets, peu encore traitent du problème de l'évolution des phénomènes sur le long terme.

Pour appréhender les effets des rejets urbains de temps de pluie, beaucoup de travaux sont menés sur les dynamiques courtes (principalement à l'échelle de l'évènement pluvieux) mais peu ont encore exploré l'évolution sur le long terme pour comprendre si des inflexions ou instationnarités sont présentes notamment en lien avec des effets potentiels des changements globaux.

Si peu de recherches existent dans ce domaine, c'est en raison du peu de chroniques longues et continues qui existent dans le domaine de l'hydrologie urbaine.

L'OTHU (Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine- www.othu.org) est un laboratoire hors murs d'observation des rejets urbains et de leurs impacts sur les milieux récepteurs - notamment par temps de pluie. Son intérêt réside justement dans l'acquisition des chroniques de données sur le long terme permettant d'estimer (i) la dynamique d'un phénomène, nécessitant des mesures à des pas de temps courts, et (ii) son évolution au cours du temps sur de longues périodes.

Dans le cadre de l'OTHU, de longues chroniques sont acquises depuis plus de 10 ans sur des données diverses (e.g. intensité de pluie, débit, pH, conductivité électrique, température, turbidité transformée en concentration en matière en suspension à l'exutoire d'un réseau ; température, hauteur de nappe, oxygène dissous, conductivité de nappe ; mesure de concentrations en polluants lors de campagnes de mesure, etc).

Certaines grandeurs sont acquises en continu. C'est le cas par exemple des intensités de pluie, ou des débits à l'exutoire de bassins versants suivis avec des pas temps de 1 à 2 min, ou bien les hauteurs et températures de nappe avec un pas de temps horaire. Certaines autres grandeurs sont acquises de manière discrète dans le temps lors de campagnes de mesures ponctuelles (concentrations en différents polluants par exemple).

Ce projet vise à étudier la tendance en termes d'évolution à long terme de variables caractérisant la quantité et la qualité des eaux transitant dans le milieu urbain. Il est basé presque exclusivement sur les données collectées et mesurées dans l'OTHU sur deux sites principaux : Chassieu, Ecully et un troisième de manière plus anecdotique (Yzeron – La Léchère).

La première partie du rapport permet d'établir la méthodologie générale d'analyse de tendance en relation avec les spécificités des variables d'intérêt que nous avons étudiées.

La deuxième présente les sites d'étude et les moyens de mesure sur lesquels sont basées les chroniques acquises et exploitées.

Les parties 3 et 4 analysent les tendances en termes climatiques (pluie et température d'air) ; la partie 4 la température des eaux à l'exutoire d'un réseau.



Les parties 6 à 7 analysent les tendances en termes d'évolution des caractéristiques des eaux souterraines (hauteur de nappe, température) et étudie l'influence à long terme des apports d'un bassin d'infiltration des eaux pluviales.

Les parties suivantes 8 à 11 sont relatives au fonctionnement des bassins versants et de leur rejet (tendance en termes d'évolution des flux d'eau et de polluants (en MES, métaux et HAPs).

Chaque partie fait l'objet de conclusions faisant le lien entre tendances observées sur différentes parties et sont repérables facilement par des encadrés.

Le rapport se termine par une conclusion en forme de synthèse. Des conclusions opérationnelles y sont données quand cela s'y prête.

2 Méthodologie générale

Disposant de séries chronologiques de différentes grandeurs d'intérêt, l'objectif de l'étude est d'en détecter une possible tendance d'évolution dans le temps (trend). Les séries peuvent être continues ou discrètes, présenter des lacunes, des saisonnalités et plus généralement des autocorrélations temporelles c'est-à-dire des liaisons statistiques entre valeurs d'une fraction de temps à l'autre.

Les grandeurs d'intérêt étudiées ont été examinées au préalable graphiquement et la tendance que nous cherchons à identifier est de type : évolution à la hausse ou à la baisse sans chercher les ruptures. Il s'agit donc de rechercher des tendances plutôt monotoniques.

2.1 Méthodes de base de détection des tendances (tests)

Parmi l'ensemble des méthodes d'analyse de tendance au cours du temps, deux méthodes sont le plus souvent utilisées. La première est basée sur la régression linéaire, la deuxième exploite un test non paramétrique (le test de Mann-Kendall). Ce sont celles que nous avons utilisées.

2.1.1 La régression linéaire

Cette méthode est très souvent employée pour les variables climatiques en lien avec l'hydrologie quantitative ou qualitatives des flux d'eau issus de bassins versants ou hydrogéologiques (e.g. Hess et al., (2001) and Jhajharia et al. (2012), Lopez et al (2011)). Cette méthode peut en effet être utilisée pour estimer une tendance linéaire d'une grandeur en ajustant un modèle du type :

$$x_t = a + bt + \varepsilon_t \quad (1)$$

où t indique le temps, x_t la valeur de la variable d'intérêt prise au temps t , a et b respectivement l'ordonnée à l'origine et la pente et de la droite (paramètres de régression) et ε_t le terme d'erreurs ou de fluctuations. Dans la méthode on suppose que les erreurs ε_t sont gaussiennes de moyenne nulle et qu'elles sont non corrélées entre elles et avec le temps t (bruit blanc).

La méthode consiste classiquement à tester l'hypothèse H_0 (hypothèse dite nulle) selon laquelle la pente b est nulle $H_0 : b=0$ (absence de tendance).

La pente b peut être estimée à l'aide de la méthode des moindres carrés et son écart type σ_b déduit de considérations statistiques.

On montre que si H_0 est vraie la variable aléatoire $S = b / \sigma_b$ suit une loi de Student à $n-2$ degrés de liberté (n étant le nombre de valeurs x_t de la série). Ainsi si on suppose que S suit la loi de Student, on peut calculer la probabilité (P -value) pour que $S \geq S^*$ (S^* valeur de S calculée sur la série). L'hypothèse nulle H_0 est non rejetée si la P -value calculée est supérieure à une valeur fixée (5% dans cette étude) sinon elle sera rejetée.

Ainsi

- Si $P\text{-value} < 5\%$ on supposera qu'il y a une tendance soit à la hausse ou la baisse
- Si $P\text{-value} \geq 5\%$ on supposera qu'il n'y a pas de tendance

Evidemment s'il existe une tendance à la hausse ou à la baisse non linéaire, la méthode ne la détectera pas forcément.

2.1.2 Le test Mann-Kendall

C'est un test non paramétrique également très usité le domaine de l'hydrologie (e.g. Aziz and Burn, 2006; Partal and Kahya, 2006). Il est généralement moins sensible aux influences des valeurs extrêmes que le test précédent.

L'hypothèse nulle H_0 (pas de tendance) exprime le fait que les données de la série forment un échantillon de n valeurs indépendantes identiquement distribuées.

Si H_0 n'est pas rejetée, on montre que S telle que définie ci-dessous présente une moyenne nulle, une variance constante et que z (distribution normée de S) peut être supposée Normale lorsque la série comprend un nombre important de valeurs ($n \geq 30$).

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (2)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{si } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{si } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{si } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{var}(S) = \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^m E_p(E_p-1)(2E_p+5) \right] / 18 \quad (5)$$

n : nombre d'éléments dans la série, E_p : nombre d'égalités identifiées dans la série impliquant p valeurs, m nombre de cas de jeux de valeurs ex-aequo.

Dans le test bilatéral on ne rejette pas H_0 si $|z| \leq z_{\alpha/2}$ au niveau de signification α ($\alpha=5\%$ dans cette étude).

De même que précédemment la P -value peut être évaluée sur z .

L'hypothèse nulle H_0 n'est pas rejetée si la P -value calculée est supérieure à une valeur fixée (5% dans cette étude) sinon elle sera rejetée.

Ainsi

- Si $P\text{-value} < 5\%$ on supposera qu'il y a une tendance
- Si $P\text{-value} \geq 5\%$ on supposera qu'il n'y a pas de tendance

S'il y a une tendance, on peut la caractériser par une pente estimée par l'index non paramétrique proposé par Sen (1968) que l'on nommera pente de Sen :

$$\beta = \text{Mediane} \left[\frac{(X_j - X_i)}{j - i} \right]_{i < j} \quad (6)$$

2.2 Méthode adaptée pour l'évaluation des tendances en présence d'autocorrélation

La régression linéaire et le test de Mann-Kendall sont conçus pour des données sans autocorrélation. Lorsque ce n'est pas le cas, il est nécessaire d'adapter les méthodes. C'est l'objet des paragraphes qui suivent.

2.2.1 Tests adaptés dans le cas de la régression linéaire

Deux approches ont été testées.

La première consiste à isoler dans l'ajustement un terme d'autocorrélation. Ici nous n'avons considéré, compte tenu de nos données et après vérification, qu'une autocorrélation d'un pas de temps à l'autre (one-lag-autocorrelation).

$$x_t = a + bt + rx_{t-1} + \varepsilon_t \quad (7)$$

où r est le coefficient d'autocorrélation à un pas, x_{t-1} la valeur de la variable d'intérêt prise au temps $t-1$ (au pas d'avant), ε_t terme d'erreurs supposé être un bruit blanc.

L'ensemble des paramètres a , b , r peuvent être estimés par moindres carrés. Le raisonnement sur b (pente potentielle de la tendance) peut faire l'objet des mêmes considérations que la régression simple présentée au paragraphe 2.1. L'hypothèse nulle H_0 (pente b nulle) peut donc être testée et la P -value estimée.

La seconde approche cherche une autocorrélation à un pas sur le terme des résidus ε_t selon l'équation suivante :

$$\varepsilon_t = c\varepsilon_{t-1} + w_t \quad (8)$$

où c est le coefficient d'autocorrélation à un pas (one-lag autocorrelation coefficient) des résidus et w_t le terme résiduel est supposé être un bruit blanc.

Si c est connu, que l'on pose $y_t = x_t - cx_{t-1}$ et que l'on combine l'Eq 8 dans l'Eq 1 nous obtenons la relation suivante :

$$y_t = a(1-c) + bt' + w_t \text{ avec } t' = t - c(t-1) \quad (9)$$

On peut alors par moindres carrés trouver les paramètres dont la pente b .

Cependant ε_t n'est généralement pas connu *a priori* et donc c pas déductible non plus.

Pour résoudre, on utilise, comme proposé par Cochrane and Orcutt (1949), la procédure suivante : (i) on ajuste a et b à l'aide de l'Eq 1, ce qui permet d'estimer les ε_t (ii) on calcule c puis (iii) on ajuste par moindres carrés la relation de l'Eq 9 pour estimer les nouveaux paramètres a et b finaux.

L'efficacité des différentes approches de détection des tendances présentant différent degrés d'autocorrélation est discutée à l'annexe 1 sur la base de données synthétiques. Cette analyse montre que l'une comme l'autre des méthodes pour prendre en compte l'autocorrélation n'est pas idéale.

En présence d'autocorrélation nous utiliserons une méthode « adaptée » que nous présentons ci-après.

2.2.2 Test Mann-Kendall "adapté"

Pour le test Mann-Kendall, il a été également montré qu'il n'était plus adapté dès lors que de l'autocorrélation était présente dans la série temporelle (e.g., Yue et al., 2002). Une corrélation positive mène généralement à accroître la détection des faux positifs.

Une des solutions est de pratiquer un pré-traitement des données (pre-whitening method) puis d'appliquer le test de Mann-Kendall test (e.g. Von Storch and Navarra, 1995; Burn et al., 2002; Partal and Kahya, 2006; Gocic and Trajkovic, 2013). Cependant cette phase préalable de nettoyage de l'autocorrélation peut aussi réduire la fiabilité de la détection de tendance (e.g., Yue et al., 2002; Sang et al., 2014).

Deux approches ont été testées et sont discutées à l'annexe 1. La première consiste à appliquer la méthode de régression linéaire d'abord puis à soustraire cette tendance linéaire et appliquer le test de Mann-Kendall. La seconde consiste à supprimer le terme d'autocorrélation en utilisant Eq. (7) puis à appliquer le test de Mann-Kendall.

Les tests réalisés à l'annexe 1 sur des séries synthétiques montrent que la seconde méthode donne de meilleurs résultats en termes de puissance¹. C'est la raison pour laquelle nous utiliserons ultérieurement cette approche.

2.3 Traitement de la possible saisonnalité dans la détection de tendance

La saisonnalité qui est une forme d'autocorrélation particulière est traitée ici de manière spécifique.

Pour désaisonnaliser la série temporelle qui présenterait une saisonnalité, nous soustrayons à chaque valeur de la série la moyenne des valeurs. Pour désaisonnaliser une série de 20 ans de mesures d'une variable définie sur une base mensuelle, nous soustrayons à chaque valeur d'un mois donné (janvier par exemple) la moyenne des mois de janvier obtenue sur 20 ans et ce pour tous les mois des 20 ans.

Si une série est définie avec un pas de temps Δt présentant N périodes de périodicité $I_T \Delta t$, les valeurs désaisonnalisées x'_t s'expriment comme suit :

$$x'_t = x_t - \overline{x_{k \cdot \Delta t}} = x_{[(j-1) \cdot I_T + k] \Delta t} - \overline{x_{k \cdot \Delta t}} \quad \text{pour } j=1 \text{ à } N, \quad k=1 \text{ à } I_T \quad \text{avec} \quad (10)$$

$$\overline{x_{k \cdot \Delta t}} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_{k \cdot \Delta t + i \cdot I_T \Delta t} \quad (11)$$

2.4 Synthèse de la méthodologie appliquée

La méthodologie complète retenue est celle donnée à la figure ci-dessous.

¹ Un test est dit puissant si la probabilité β pour que H_0 ne soit pas rejetée alors que H_1 son alternative est vraie est faible. La puissance est $1-\beta$.

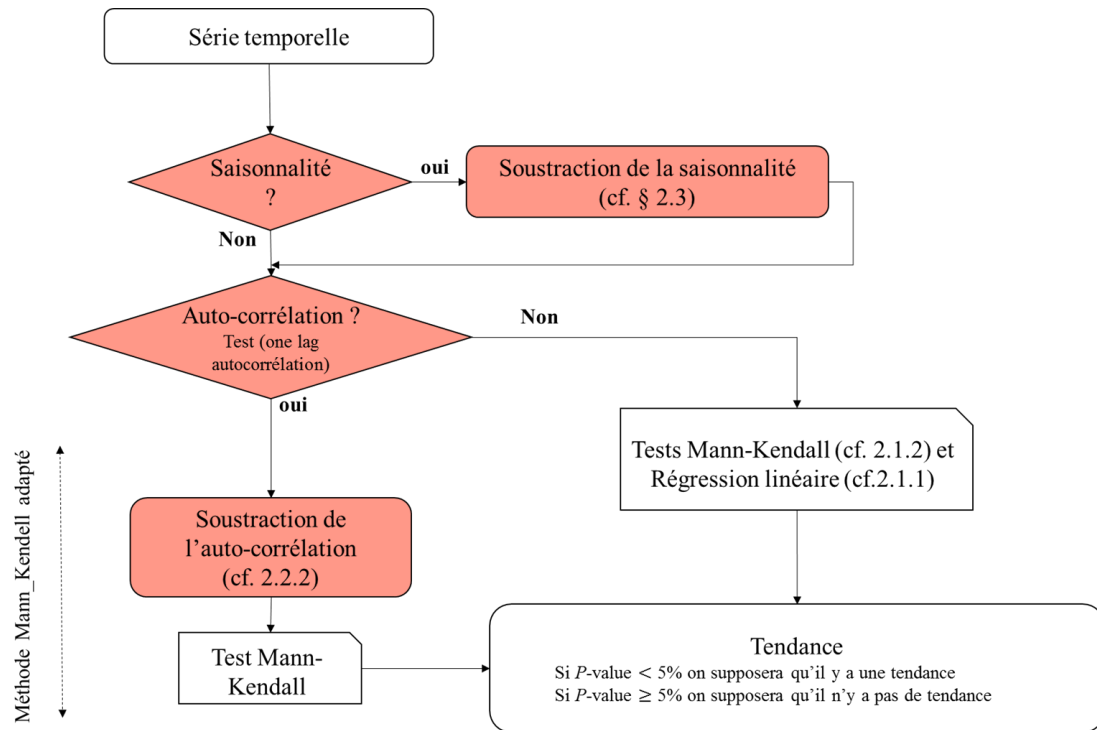


Fig. 1 Méthodologie retenue

3 Présentation des sites et systèmes de mesure des variables étudiées

Les sites étudiés sont des sites de l'OTHU. Ce sont principalement les sites de Chassieu et d'Ecully. Le site de La Léchère a été étudié également pour mesurer la transposabilité de l'approche à un site particulier péri-urbain uniquement pour l'évolution des flux d'eau.

Leur localisation est donnée à la Fig. 2.

Fig. 2 Localisation des sites étudiés (www.OTHU.org)

3.1 Le site de Chassieu

Ce site est constitué d'un bassin versant à dominante industrielle drainé par un réseau séparatif dont la partie pluviale a pour exutoire un bassin de retenue/décantation suivi d'un bassin d'infiltration situé au-dessus d'une nappe dont le toit est à 13 m de profondeur. L'ensemble est situé dans la plaine de l'Est lyonnais dont le substratum est composé de dépôts fluvio-glaciaires.

Le bassin versant a une surface totale de 185 ha, de coefficient d'imperméabilisation d'environ 0.75 et de coefficient de ruissellement volumétrique de l'ordre de 0,35. Il est plutôt plat (pente moyenne de 4‰ dans le sens Est-Ouest).

Le réseau séparatif pluvial reçoit des eaux de temps sec « théoriquement » propres issues de process industriels de la zone (eaux de refroidissement par exemple).

L'ensemble des eaux reçues est conduit respectivement dans un bassin de retenue de 32 000 m³ puis dans un bassin d'infiltration de 61 000 m³ (Cf. Fig. 3).



Fig. 3 Photo aérienne du bassin versant de Chassieu et de l'exutoire (bassin de retenue et d'infiltration) – Google earth

Ce site est instrumenté en continu en sortie du bassin versant (entrée du bassin de retenue) et en sortie du bassin de retenue (entrée du bassin d'infiltration). Les grandeurs acquises au pas de temps de 2min sont : le débit, la turbidité, le pH, la température de l'eau, la conductivité.

La nappe est également contrôlée en continu au pas de temps horaire en amont et en aval de l'infiltration à l'aide de piézomètres plongeant à différentes profondeurs. Les grandeurs acquises sont la température, la hauteur d'eau, la conductivité et de manière plus sporadique l'oxygène dissous.

La pluviométrie au pas de temps de la minute complète le dispositif. Un solarimètre est également présent mais n'est pas implanté depuis longtemps (2010). La mesure de la température de l'air est obtenue à partir de données de météo France.

Enfin de manière discrète dans le temps, des campagnes de mesures chimiques et biologiques sont également réalisées sur l'ensemble des compartiments par temps de pluie et par temps sec.

On trouvera plus de détails dans (Barraud et al, 2002).

3.2 Le site d'Ecully

Le bassin versant du site d'Ecully a une superficie de 245 ha, une urbanisation résidentielle moyennement dense et un coefficient d'imperméabilisation de 0.42 (Cf. Fig. 4). Sa pente est de l'ordre de 2 %. Il est drainé par un réseau d'assainissement unitaire. Il est muni en outre d'un déversoir d'orage principal (déversoir du Valvert) situé à l'exutoire et qui est instrumenté. Le déversoir Valvert rejette les effluents de temps de pluie dans le ruisseau des Planches.

Un dispositif métrologique équivalent à celui de Chassieu est placé à l'exutoire du bassin versant. Les mesures de débit, turbidité, pH, température de l'eau, conductivité sont ainsi réalisées ainsi que des mesures pluviométriques.



Fig. 4 Photo aérienne du bassin versant d'Ecully - Google earth

3.3 Le site de La Léchère

Le bassin versant de type péri-urbain couvre une superficie de 410 ha composée à 53% de surfaces urbaines drainées, à 45% de surfaces agricoles et à 3% de forêts (Braud et al., 2013). La partie urbaine est équipée de

réseaux unitaires comportant des déversoirs d'orage (DO) se rejetant dans la rivière Chaudanne. La surface contributrice est de l'ordre de 120 ha.

La Chaudanne reçoit également des apports issus des surfaces naturelles venant de zones rurales (pour plus de détails voir Jankowsky et al. (2014)).

La pluie est acquise au moyen de pluviomètres. Les débits dans la Chaudanne sont également acquis avec un pas de temps variable compris entre 2 min à 1 h.

4 Récapitulatif des familles de grandeurs étudiées

La figure ci-dessous récapitule les familles des grandeurs qui ont été explorées ainsi que les périodes sur lesquelles elles ont été étudiées. Ces périodes sont dictées par la disponibilité ou la qualité des données.

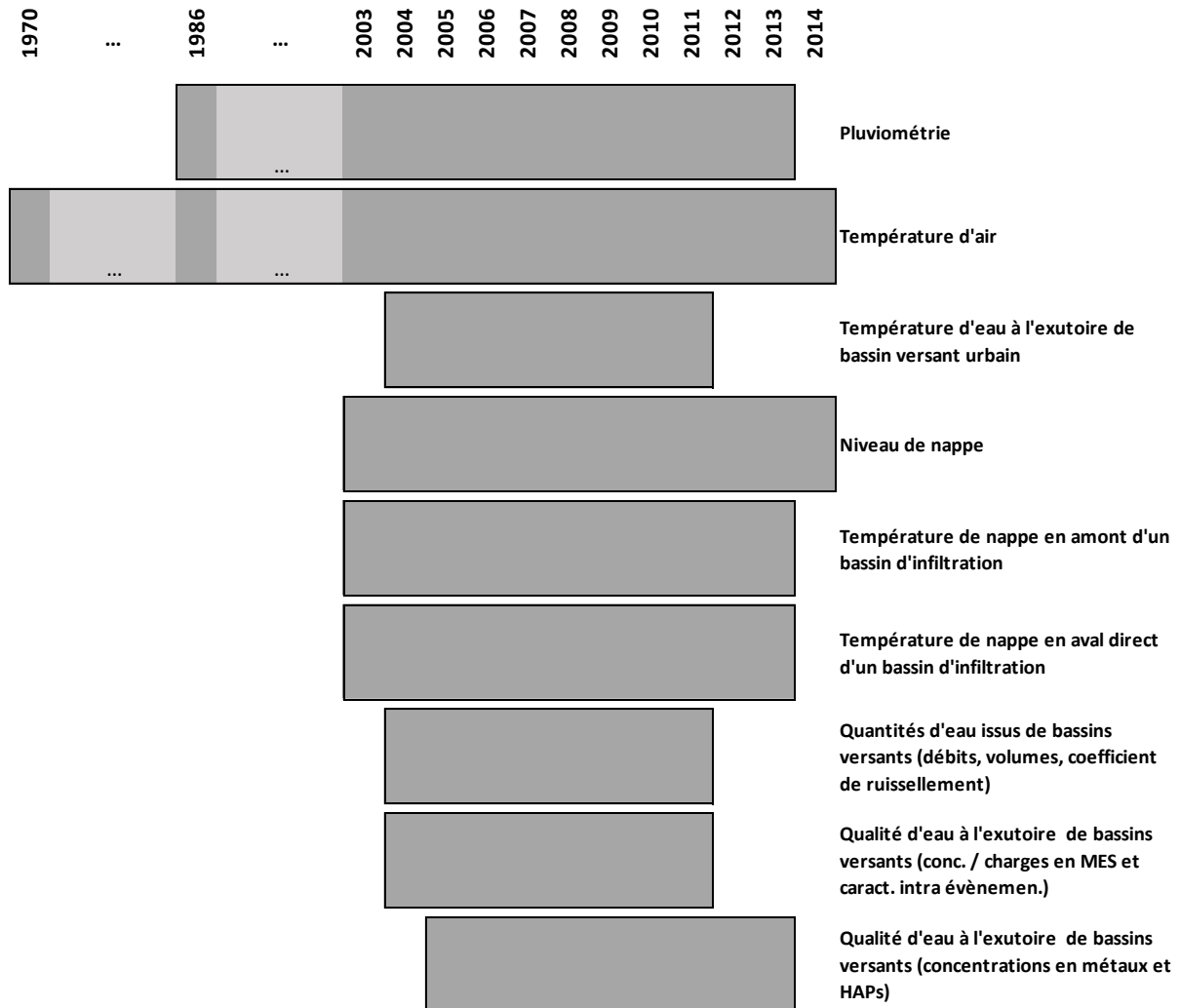


Fig. 5 Périodes effectives utilisées pour l'étude

5 Tendance d'évolution de la pluviométrie (1986-2013)

5.1 Données et pré-traitement des données

A Chassieu comme à Ecully les données ont été exploitées sur la période de 1986 à 2013 (28 ans). Nous présentons ici les caractéristiques des données de Chassieu. Elles sont acquises sur la station pluviométrique de Bron du réseau Grand Lyon très proche du site de Chassieu au pas de temps de 6 min.

Par mesure d'homogénéité nous n'avons pas utilisés les données acquises sur le site OTHU de Chassieu en raison d'une longueur de chronique plus faible (à partir de 2003 au lieu de 1986 pour la station de Bron). Les chroniques de Bron présentent des lacunes (environ 7.4% d'intensités manquantes). Elles ont été comblées par Krigeage à l'aide de 3 stations environnantes (Cf. Annexe 2).

La figure ci-dessous (Fig. 6) montre les chroniques de hauteurs précipitées aux échelles annuelles et mensuelles.

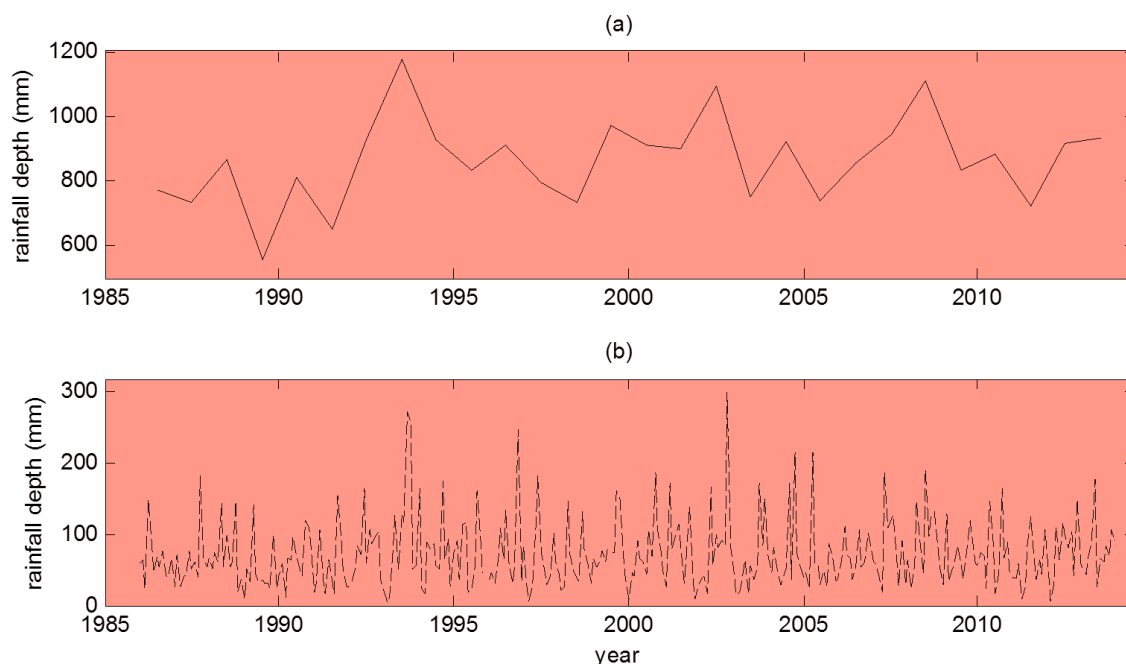


Fig. 6 Chronique des hauteurs précipitées utilisées dans l'étude à la station de Bron, (a) à l'échelle annuelle (b) et mensuelle

Nous avons également analysé les données sur de plus courtes périodes et sur les données de l'OTHU à Chassieu, Ecully et La Léchère (2004-2011) essentiellement pour statuer sur la stationnarité de la pluie vis-à-vis d'autres variables comme les débits produits par les bassins versants, ou les quantités de matières en suspension apportées ou encore la température de l'eau dans différents compartiments mesurées sur de plus courtes périodes. Ces résultats seront présentés au moment de l'étude de ces autres variables.

5.2 Analyse des tendances pluviométriques – caractéristiques annuelles

Les variables analysées à l'échelle annuelle, étudiées sur une population de $n=28$ années, sont données à la

Table 1 ainsi que la moyenne, le minimum, le maximum et l'écart type pour chaque variable.
Le tableau (

Table 2) donne les résultats obtenus après application de la méthode de détection de tendance.
L'autocorrélation n'a pas été trouvée significative et la saisonnalité non prise en compte à l'échelle annuelle.

Table 1. Caractéristiques annuelles de la série pluviométrique de Chassieu et variables étudiées

Variables		Moyenne [min- max]	Ecart type
Hauteur annuelle précipitée (mm)		854 [533-1169]	135
Hauteur précipitée chaque mois de l'année	Janvier (mm)	48 [8.2- 150]	28.1
	Février (mm)	45 [4.2- 115]	24.3
	Mars (mm)	49 [6- 172]	36.5
	Avril (mm)	77 [9.6- 215]	49.3
	Mai (mm)	87 [17- 187.6]	46.0
	Juin (mm)	71 [15.6- 181.6]	39.8
	Juillet (mm)	72 [16.6- 193.2]	40.0
	Aout (mm)	68 [16- 172.6]	35.9
	Septembre (mm)	88 [26- 274.6]	58.6
	Octobre (mm)	103 [23.2, 258.2]	59.2
	Novembre (mm)	91 [18.4, 300.2]	69.6
	Décembre (mm)	56 [7.6, 153]	30.9
Période de temps de pluie	Nombre annuel de jours (j)	103.6 [80, 123]	12.2
	Durée de temps de pluie (heures)	253.4 [178.6, 311.1]	32.7
Hauteur maximale annuelle précipitée (en valeur glissante)	en 0.5 heure (mm)	18.1 [7.2, 38.6]	8.1
	en 1 heure (mm)	23.4 [10.8, 51.0]	9.2
	en 2 heures (mm)	28.8 [13.0, 57.2]	9.5
	en 4 heures (mm)	37.1 [21.4, 59.2]	9.2
	en 8 heures (mm)	49.0 [30.3, 79.0]	14.0
	en 12 heures (mm)	57.1 [33.2, 114.2]	18.4
	en 24 heures (mm)	68.5 [41.2, 134.6]	20.0

Table 2 Analyse des tendances en matière de pluviométrie (caractéristiques annuelles) sur 1986-2013 à Bron (proximité Chassieu)

Variables		Régression linéaire		Mann-Kendall	
		P-value (%)	Présence de tendance	P-value	Présence de tendance
Hauteur annuelle précipitée (mm)		16.1	Non	16.1	Non
Hauteur précipitée chaque mois de l'année	Janvier (mm)	40.7	Non	85.0	Non
	Février (mm)	74.9	Non	98.5	Non
	Mars (mm)	3.6	Oui	18.8	Non
	Avril (mm)	74.9	Non	79.5	Non
	Mai (mm)	34.2	Non	17.2	Non
	Juin (mm)	82.6	Non	93.9	Non
	Juillet (mm)	40.1	Non	28.4	Non
	Aout (mm)	28.0	Non	15.3	Non
	Septembre (mm)	92.0	Non	75.5	Non
	Octobre (mm)	44.1	Non	50.0	Non
	Novembre (mm)	21.5	Non	39.4	Non
	Décembre (mm)	9.5	Non	11.7	Non
Période de temps de pluie	Nombre annuel de jours (j)	81.0	Non	88.6	Non
	Durée de temps de pluie (heures)	70.4	Non	47.2	Non
Hauteur maximale annuelle précipitée (en valeur glissante)	en 0.5 heure (mm)	93.6	Non	89.6	Non
	en 1 heure (mm)	81.0	Non	96.0	Non
	en 2 heures (mm)	87.3	Non	82.9	Non
	en 4 heures (mm)	79.5	Non	77.8	Non
	en 8 heures (mm)	26.3	Non	28.7	Non
	en 12 heures (mm)	33.2	Non	25.0	Non
	en 24 heures (mm)	37.4	Non	22.2	Non

L'analyse statistique ne montre aucune tendance au seuil de 5% sur la P-value hormis pour la régression linéaire et pour la hauteur d'eau précipitée pour les mois de mars.

Globalement au vu des séries annuelles analysées et sur la période de 28 ans, la pluviométrie ne montre pas d'évolution en termes de caractéristiques annuelles.

5.3 Analyse des tendances pluviométriques – caractéristiques mensuelles

Nous avons analysé ensuite l'évolution possible des hauteurs précipitées sur la chronique mensuelle permettant de travailler sur une population plus nombreuses d'observations ($n=28 * 12 \text{ mois} = 336 \text{ mois}$).

L'autocorrélation de la série n'a pas été trouvée significative mais la série présente bien évidemment une saisonnalité marquée (Cf. Fig. 6(b)). Les moyennes, médianes, minimales et maximales sont données à la Fig. 7. Elle montre sans surprise deux périodes pluvieuses (avril à juin puis de Août à octobre).

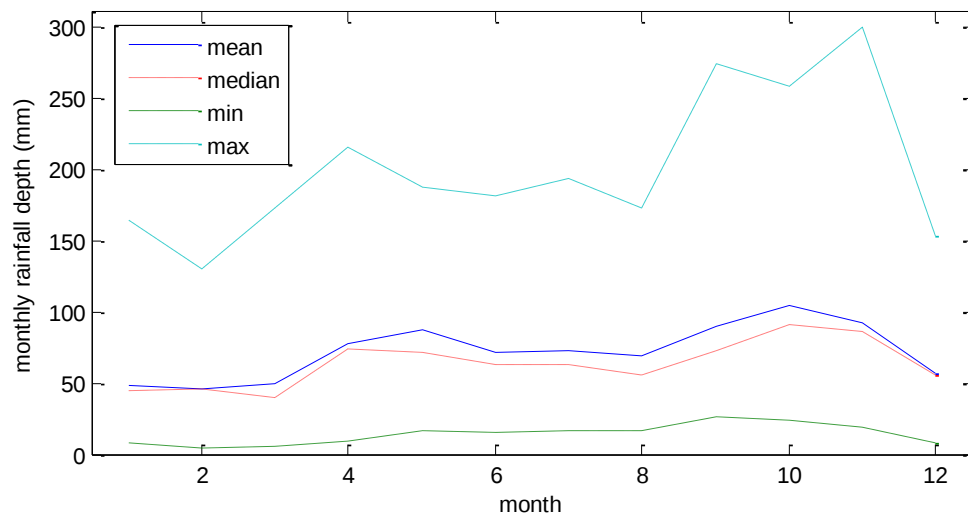


Fig. 7 Hauteurs précipitées moyennes, médianes, minimales et maximales sur les 28 années (1986-2013) à Bron (Proximité de Chassieu)

Les résultats des tests de tendance sont reportés à la Table 3. Ils ne montrent là encore aucune tendance.

Table 3 Analyse des tendances pluviométriques sur la chronique désaisonnalisée de hauteurs mensuelles précipitées à Bron

Variable	Méthode	P-value	Présence de tendance
Hauteur précipitée désaisonnalisée	Mann-Kendall Adapté	9.8%	Non

5.4 Analyse des tendances pluviométriques – caractéristiques évènementielles (1986-2013)

Sur la période 1986-2013 et sur les données de Bron, nous nous sommes ensuite intéressés à l'analyse des variables statistiques liées aux caractéristiques des évènements pluvieux. Un évènement est défini comme présentant une hauteur totale précipitée supérieure ou égale à 1 mm sur au moins 30 min séparé de l'évènement précédent par au moins 4h.

Au total la population étudiée fait apparaître $n = 2215$ évènements de ce type sur les 28 années de 1986 à 2013.

La figure ci-dessous (Fig. 8) donne les caractéristiques des évènements étudiés en termes de hauteurs précipitées et de durées. Ces deux variables Hauteur et Durée sont corrélées avec un coefficient de corrélation linéaire de 0.84.

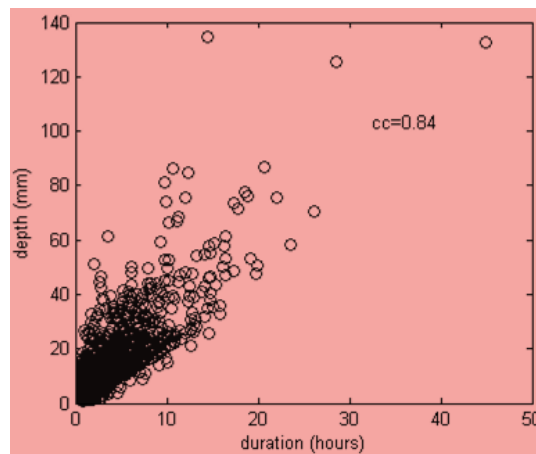


Fig. 8 Caractéristiques des évènements pluvieux (hauteur précipitée vs durée)

Les tableaux suivants (Table 4 et Table 5) donnent respectivement les caractéristiques des variables liées à la pluie et les résultats de l'analyse de tendance sur 3 variables évènementielles : la hauteur totale de pluie précipitée, la durée totale de l'évènement et l'intensité moyenne de pluie.

Table 4 Caractéristiques évènementielles des pluies

Variable	Median [min- max]	Mean (standard deviation)
Hauteur précipitée (mm)	5.4 [1.01 - 134.6]	9.83 (12.31)
Durée (h)	1.8 [0.7 - 44.9]	2.88 (3.13)
Intensité moyenne de pluie (mm/h)	2.57 [0.57-26.6]	3.41 (2.41)

Table 5 Trend detection results for event-based rainfall variables

Variable	Méthode	<i>P-value</i>	Trend presence
hauteur précipitée (mm)	Régression linéaire	11.2	Non
	Mann-Kendall	17.7	Non
Durée (h)	Régression linéaire	59.6	Non
	Mann-Kendall	81.5	Non
Intensité moyenne de pluie (mm/h)	Mann-Kendall adapté	9.61	Non

Comme pour les données annuelles ou mensuelles, aucune tendance n'a pu être détectée pour aucune des variables étudiées sur la période.

5.5 Conclusion sur les tendances en matière de pluies sur la période 1986-2013



Sur la période étudiée, il s'avère que les caractéristiques de pluies, que ce soit sur des séries mensuelles, annuelles ou évènementielles, ne montrent pas de tendance d'évolution. La période est peut-être trop courte pour identifier une quelconque inflexion. Les séries sont donc stationnaires sur la période.

6 Tendances d'évolution de la température de l'air (1970 – 2014)

6.1 Données et pré-traitement des données

La température d'air issue des données de Météo France ont été exploitées de 1970 à 2014 à la station de Bron avec un pas de temps de 3h. Les caractéristiques statistiques de cette température (moyenne, médiane, min et max) annuellement et mensuellement sont représentées ci-dessous (Cf. Fig. 9 and Fig. 10). Là encore et très logiquement, les données mensuelles présentent une saisonnalité marquée. La série désaisonnalisée est donnée à la Fig. 10

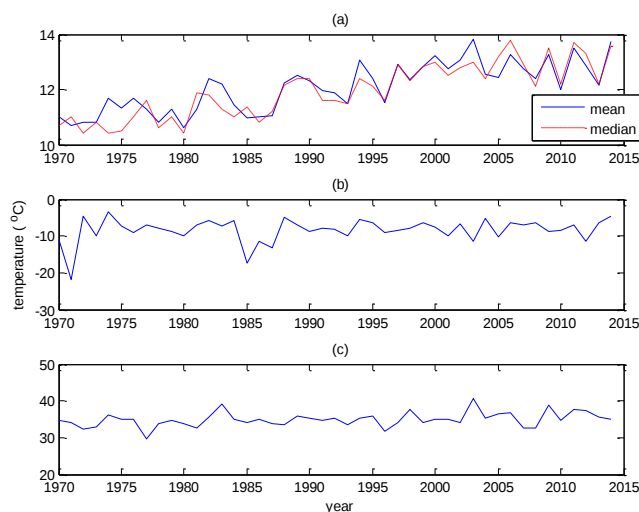


Fig. 9 Chronique des températures annuelles : (a) moyenne and médiane, (b) minimale; (c) maximale.

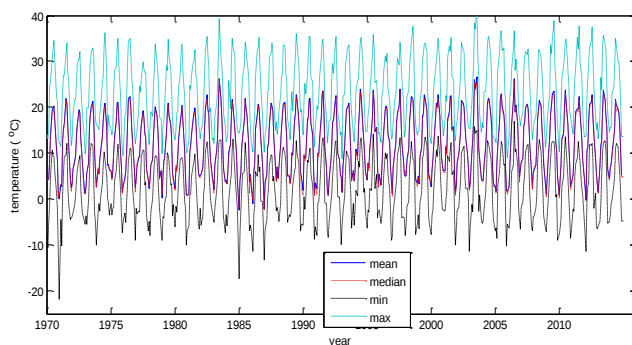


Fig. 10 Chroniques des températures d'air mensuelles (moyennes, médianes, min et max)

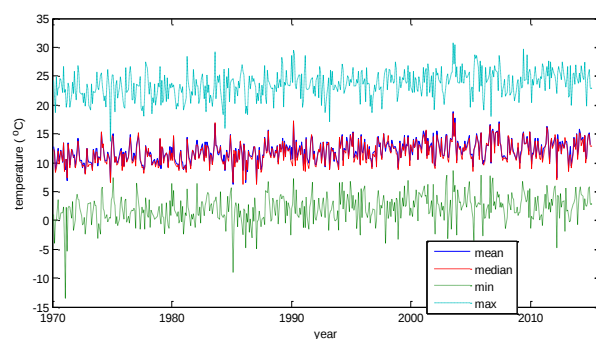


Fig. 11 Chroniques des températures d'air mensuelles désaisonnalisées (moyennes, médianes, min et max)

6.2 Analyse des tendances de température d'air – caractéristiques annuelles (1970 – 2014)

L'analyse a été menée sur différentes périodes de la plus longue ($n=45$ ans de 1970 à 2014) à de plus courtes en lien avec les observations de l'OTHU sur les températures des eaux apportées au système de

retenue / infiltration et issue du bassin versant et les températures mesurées en nappe à l'amont et l'aval de l'infiltration à Chassieu.

La Table 6 liste les résultats en termes de détection de tendance.

Sur 45 ans (1970-2014), une tendance à la hausse est détectée avec un accroissement de l'ordre 0.05 °C/an (pente de Sen) pour les valeurs moyennes et maximales et de 0.07 °C/an pour les valeurs médianes. Les températures minimales sont cependant stationnaires sur la période.

Sur la même période que l'analyse de pluie (1986-2013), alors que la pluie ne montre pas d'évolution, les températures de l'air moyennes et médianes quant à elles se sont accrues (respectivement de 0.043 à 0.06°C/an). Sur de plus courtes périodes l'évolution n'est pas sensible.

Table 6 Détection de tendance sur les chroniques annuelles de températures d'air

Période	Variable	Test pratiqué	P-value (%)	Présence de tendance	Tendance (°C/an)
1970-2014	moyenne	Mann-Kendall adapté	0.00	Oui	0.052
	médiane	Mann-Kendall adapté	0.00	Oui	0.071
	min	Régression linéaire	17.2	Non	-
		Mann-Kendall	36.3	Non	-
	max	Régression linéaire	1.74	Oui	0.053
		Mann-Kendall	1.94	Oui	0.047
1986-2013	moyenne	Mann-Kendall	0.86	Oui	0.043
	médiane	Mann-Kendall adapté	0.08	Oui	0.060
	min	Mann-Kendall	62.1	Non	-
	max	Mann-Kendall	12.8	Non	-
2003-2013	moyenne	Régression linéaire	35.4	Non	-
		Mann-Kendall	35.0	Non	-
	médiane	Régression linéaire	83.3	Non	-
		Mann-Kendall	93.8	Non	-
	min	Régression linéaire	87.8	Non	-
		Mann-Kendall	100	Non	-
	max	Régression linéaire	69.7	Non	-
		Mann-Kendall	87.6	Non	-
2003-2013	moyenne	Régression linéaire	35.4	Non	-
		Mann-Kendall	35.0	Non	-
	médiane	Régression linéaire	83.3	Non	-
		Mann-Kendall	93.8	Non	-
	min	Régression linéaire	87.8	Non	-
		Mann-Kendall	100	Non	-
	max	Régression linéaire	69.7	Non	-
		Mann-Kendall	87.6	Non	-
2001-2011	moyenne	Régression linéaire	70.8	Non	-
		Mann-Kendall	64.0	Non	-
	médiane	Régression linéaire	52.5	Non	-
		Mann-Kendall	62.3	Non	-
	min	Régression linéaire	45.4	Non	-
		Mann-Kendall	69.7	Non	-
	max	Régression linéaire	98.6	Non	-
		Mann-Kendall	87.6	Non	-

6.3 Analyse des tendances de température d'air – caractéristiques mensuelles (1970 – 2014)

L'analyse a été sur les mêmes périodes mais en considérant les caractéristiques mensuelles. Les séries ont été désaisonnalisées. Les tendances sont données au tableau ci-dessous (Table 7) et conduisent globalement aux mêmes conclusions que pour les caractéristiques annuelles. Ici même les températures minimales présentent une tendance sur la chronique de 45 ans.

Table 7 Détection de tendance sur les chroniques mensuelles de températures d'air désaisonnalisées

Période	Variable	Test pratiqué	P-value (%)	Présence de tendance	Tendance (°C/an)
1970-2014	moyenne	Mann-Kendall adapté	0.00	Oui	0.046
	médiane	Mann-Kendall adapté	0.00	Oui	0.049
	min	Mann-Kendall adapté	0.00	Oui	0.042
	max	Mann-Kendall adapté	0.00	Oui	0.054
1986-2013	moyenne	Mann-Kendall adapté	0.00	Oui	0.038
	médiane	Mann-Kendall adapté	0.08	Oui	0.043
	min	Mann-Kendall adapté	3.5	Oui	0.033
	max	Mann-Kendall adapté	0.06	Oui	0.050
2003-2013	moyenne	Mann-Kendall adapté	85.2	Non	-
	médiane	Mann-Kendall adapté	77.5	Non	-
	min	Régression linéaire	62.7	Non	-
		Mann-Kendall	62.3	Non	-
	max	Régression linéaire	42.6	Non	-
		Mann-Kendall	55.1	Non	-
2001-2011	moyenne	Mann-Kendall adapté	95.9	Non	-
	médiane	Mann-Kendall adapté	30.2	Non	-
	min	Régression linéaire	85	Non	-
		Mann-Kendall	71.7	Non	-
	max	Régression linéaire	71.2	Non	-
		Mann-Kendall	74.4	Non	-

6.4 Conclusion sur les tendances en matière de températures d'air sur la période 1970-2014



La tendance dépend naturellement de la longueur des chroniques.

Sur 45 ans le réchauffement de l'air sur la zone urbaine est avéré aussi bien pour les températures moyennes, médianes que maximales sur les séries mensuelles comme annuelles avec une pente de 0.05 à 0.07 °C/an (soit entre +2 à +3°C en 45 ans). Pour les séries mensuelles, les températures minimales ont également évoluées.

Sur 28 ans (1986-2013), le réchauffement est également avéré pour les températures moyennes, médianes à l'échelle annuelle et pour toutes les caractéristiques (moyennes, médianes, minimales, maximales) à l'échelle mensuelle avec le même ordre de grandeur de taux de croissance.

Si à des échelles de plusieurs décennies (30 ans environ) on ne décèle pas d'évolution de la pluie, il n'en est pas de même pour les températures d'air pour lesquelles des augmentations sont perceptibles. Pour les gestionnaires, souvent enclins à considérer la modification des régimes de pluies comme facteur majeur du changement climatique, on peut voir que l'évolution des températures est également à considérer notamment vis-à-vis de la réflexion à mener pour le développement de nouvelles techniques (techniques alternatives par exemple).

La réflexion vis-à-vis de ces systèmes est double. Comme ils font appel pour beaucoup au Génie Végétal (i) prendre en compte ces inflexions de température dans la conception peut-être judicieux, (ii) s'en saisir pour lutter contre ce réchauffement pourrait être encore plus judicieux.

Encore faudra-t-il savoir si les effets de ces techniques sont suffisants pour améliorer les conditions climatiques en milieu anthropisé.

Notons que notre étude ne permet pas de conclure sur les causes exactes du réchauffement.

7 Tendance d'évolution de la température d'eau en entrée du bassin (en sortie du réseau drainant le bassin versant) (2004-2011) – site Chassieu

7.1 Données et pré-traitement des données

Les températures exploitées sont celles acquises en continu à Chassieu en entrée du bassin de retenue (à la sortie du bassin versant) de 2004 à 2011 avec un pas de temps de 2 min et transformées en données journalières.

Une température journalière est prise égale à la médiane des températures de la journée calculée à partir des données au pas de temps de 2 min de la série originelle.

Les données annuelles et mensuelles c'est-à-dire les moyennes, médianes, minimales et maximales annuelles et mensuelles sont calculées à partir des données journalières. Les chroniques sont représentées aux figures ci-dessous (Fig. 12 et Fig. 13). Les données mensuelles présentent une forte saisonnalité.

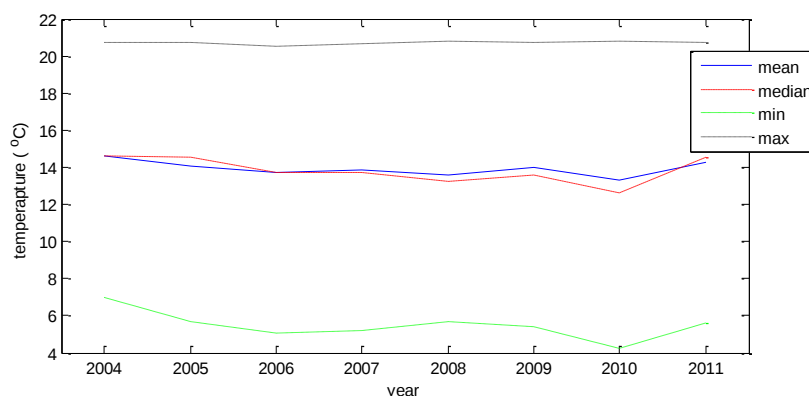


Fig. 12 Chronique des températures annuelles d'eau en entrée du bassin de retenue : (a) moyenne et médiane, (b) minimale; (c) maximale. (Chassieu)

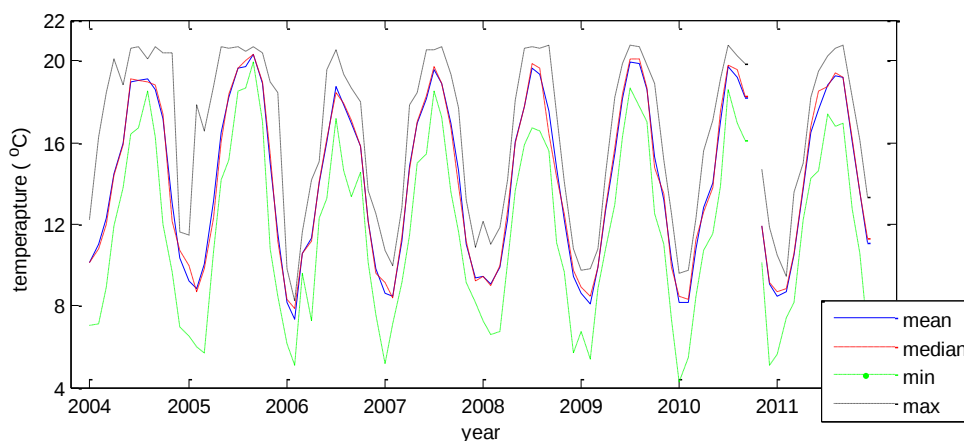


Fig. 13 Chronique des températures mensuelles d'eau en entrée du bassin de retenue: (a) moyenne et médiane, (b) minimale; (c) maximale. (Chassieu)

7.2 Analyse des tendances à l'échelle annuelle de la température d'eau en entrée du bassin de retenue (en sortie du réseau drainant le bassin versant de Chassieu) (2004-2011)

Les résultats en termes de détection de tendance sont donnés au tableau ci-dessous (Cf. Table 8). Il n'existe de tendance pour aucune des variables annuelles étudiées (moyenne, médiane, min et max).

Table 8 Trend detection results for annual basin water temperature time series

Variable	Méthode	P-value (%)	Présence de tendance	pente (°C/an)
Moyenne	Mann-Kendall	38.7	Non	-
	Régression linéaire	28.9	Non	-
Médiane	Mann-Kendall	10.8	Non	-
	Régression linéaire	26.2	Non	-
Min	Mann-Kendall	38.7	Non	-
	Régression linéaire	12.9	Non	-
Max	Mann-Kendall	13.8	Non	-
	Régression linéaire	25.5	Non	-

7.3 Analyse des tendances à l'échelle mensuelle de la température d'eau en entrée du bassin de retenue (en sortie du réseau drainant le bassin versant de Chassieu) (2004-2011)

Les résultats en termes de détection de tendance sont donnés au tableau ci-dessous (Cf. Table 8). Les tests ont été réalisés sur données désaisonnalisées dont une représentation est donnée à la Fig. 14.

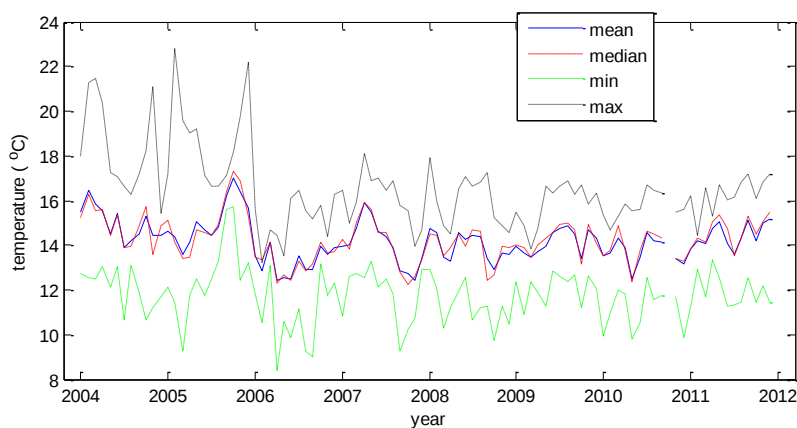


Fig. 14 Evolution temporelle des températures mensuelles d'eau moyennes médianes, min et max en entrée du bassin de retenue après désaisonnalisation

Pour les variables mensuelles, là encore aucune évolution n'est détectée.

Table 9 Détection de tendance sur les chroniques mensuelles
de températures désaisonnalisées (en entrée du bassin de retenue)

Variable	Test name	P-value (%)	Présence de tendance	Pente de Sen (°C/an)
moyenne	Mann-Kendall adapté	93.1	Non	-
médiane	Mann-Kendall adapté	90.5	Non	-
min	Mann-Kendall adapté	43.7	Non	-
max	Mann-Kendall adapté	9.8	Non	-

7.4 Conclusion sur les tendances en matière de températures d'eau en sortie de bassin versant sur la période 2004-2011



Sur la période 2004-2011 (8 ans) et sur le même site, les caractéristiques de la température d'eau sortant du bassin versant de Chassieu, aussi bien pour les séries mensuelles qu'annuelles, ne montrent pas d'inflexion dans le temps. La période est relativement courte, et rappelons que sur cette même période ni la pluie, ni la température d'air ne montrait de modification.

Selon nos analyses, sur la période et le site étudié l'eau qui transite ne se réchauffe pas ni ne se refroidit, ce qui n'est pas le cas pour la température de nappe comme nous allons le voir.

8 Tendance d'évolution du niveau de nappe (2003-2014) - Chassieu

Nous examinons ici par des mesures en amont et en aval, si d'une part la nappe voit globalement son niveau piézométrique évoluer (amont), ce qui pourrait être lié aux activités anthropiques ou climatiques et si, d'autre part, les rejets liés au bassin d'infiltration sont de nature à faire évoluer le niveau aval de la nappe sur le long terme. Nous ne nous intéressons pas aux modifications locales dans le temps de fluctuations suite aux événements pluvieux mais aux évolutions à long terme de 2003 à 2014 soit sur 12 ans.

8.1 Données et pré-traitement des données

Les données disponibles dans l'OTHU sont des mesures amont et aval du niveau de nappe acquises via un réseau de piézomètres. Les données sont acquises au pas de temps horaire. La Fig. 15 montre l'évolution de 2003 à 2014 de la hauteur amont et aval. Ces deux séries sont logiquement très corrélées (avec un coefficient de corrélation de 0.99). Le niveau aval est plus haut en moyenne de 0.4 m.

Les séries mensuelles des moyennes, médianes, minimales et maximales sont représentées à la

Fig. 16. L'analyse de détection de tendance est faite sur cette base.

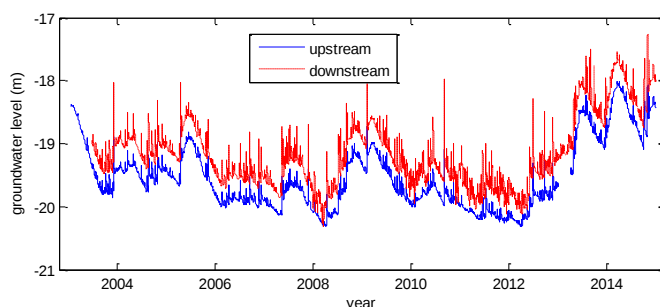


Fig. 15 Chronique horaire du niveau de nappe en amont (upstream) et à l'aval (downstream) direct du bassin d'infiltration (2003-2014)

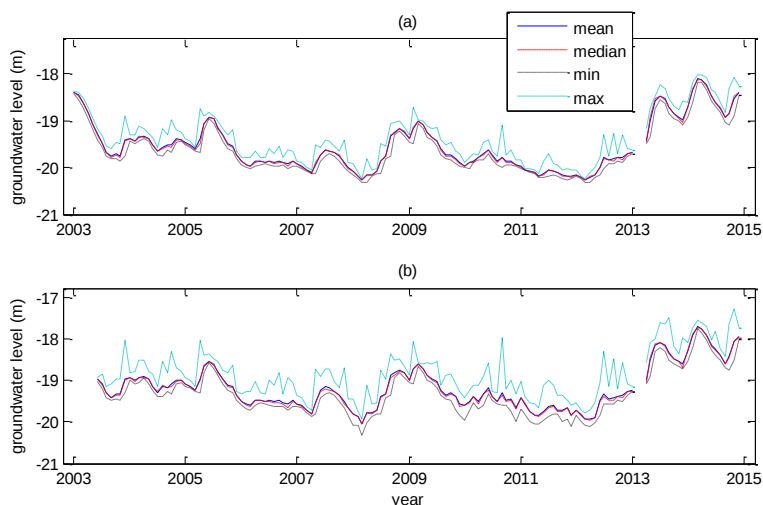


Fig. 16 Niveau mensuel de nappe : (a) en amont (b) en aval du bassin d'infiltration (2003-2014)

8.2 Analyse des tendances d'évolution des hauteurs de nappe à l'échelle mensuelle

La saisonnalité sur les séries mensuelles n'a pas été détectée comme significative sur la période. En revanche l'autocorrélation à un pas est très significative. Le tableau ci-dessous (Table 10) donne les résultats en termes de tendance. Nous avons indiqué dans le tableau les résultats des deux tests de Mann-Kendall avec et sans adaptation au cas de l'autocorrélation.

Les caractéristiques mensuelles aval ne présentent pas de tendance d'évolution. Les infiltrations liées au bassin n'impactent pas durablement la hauteur de nappe sur une douzaine d'années.

Les caractéristiques mensuelles amont présentent une légère tendance à la baisse (Mann-Kendall adapté) avec des *P*-values proches de 5% alors que la méthode de base ne détecte pas de tendance (Cf. Table 9). Généralement une autocorrélation positive comme c'est ici le cas devrait conduire à un taux de fausses détections plus fort pour la méthode classique que pour Mann-Kendall dans sa version adaptée. Cela est probablement dû à une sur-estimation de l'autocorrélation. La tendance n'est donc, selon nous, pas probante si elle existe.

Table 10 Détection de tendance sur les chroniques mensuelles de hauteurs de nappe

Niveau de Nappe	Variable hauteur	<i>P</i> -value (%) Mann-Kendall adapté	<i>P</i> -value (%) Mann-Kendall	Présence de tendance	Pente de Sen (m/an)
Amont	Moyenne	3.5	34.3	Non / Oui	- / -0.014
	Médiane	3.0	30.6	Non / Oui	- / -0.015
	Min	1.1	23.7	Non / Oui	- / -0.015
	Max	14.4	61.3	Non	-
Aval	Moyenne	30.8	61.9	Non	-
	Médiane	30.6	69.6	Non	-
	Min	30.4	92.9	Non	-
	Max	21.6	14.0	Non	-

8.3 Corrélation temporelle des hauteurs de pluie et des hauteurs de nappe sur la période d'étude

Les coefficients de corrélation ont été calculés pour différents décalages de temps et sur la base de séries horaires (Cf. Fig. 17).

La plus forte corrélation entre pluie et hauteur de nappe amont s'observe pour un décalage de 27 heures alors qu'il est de 20 h entre la pluie et hauteur de nappe à l'aval. Très logiquement la pluie a un effet plus rapide sur la fluctuation de nappe à l'aval de l'infiltration qu'en amont, les échanges étant plus directs et plus marqués (les eaux de 65 ha_{actifs} infiltrés sur moins d'un hectare).

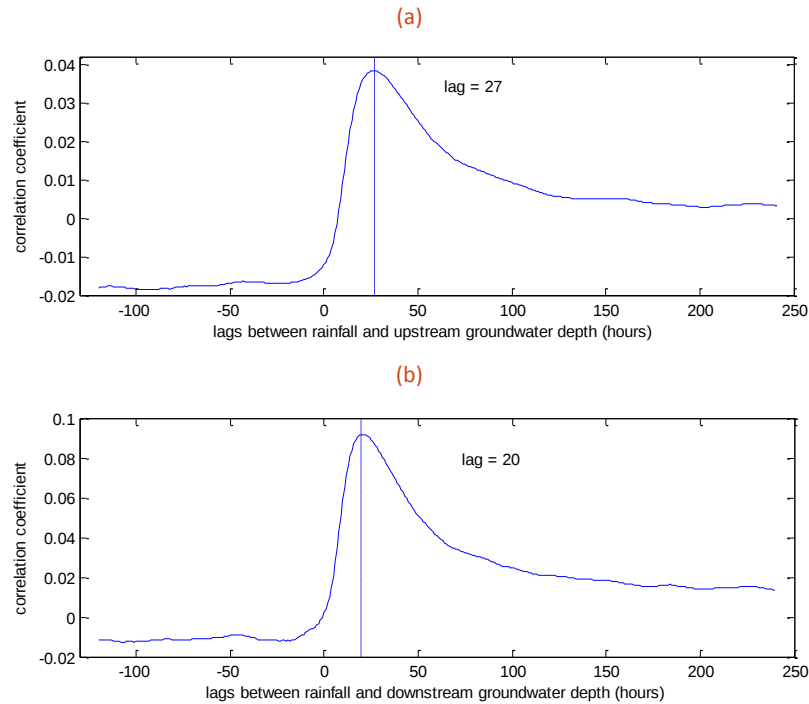
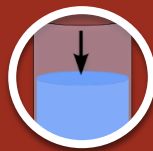


Fig. 17 Coefficients de corrélation entre intensités de pluies et niveau de nappe

8.4 Conclusion sur les tendances en matière de modification de hauteurs de nappe sur la période 2003-2014



Sur la période 2003-2014 (12 ans) les variations de hauteurs de nappe n'ont pas évolué en aval du bassin d'infiltration. Les fluctuations sont très importantes comme l'avait montré Foulquier et al (2009).

En amont la tendance est beaucoup moins claire. Si elle existe, elle est encore faiblement perceptible et irait plutôt dans le sens d'une baisse. Cela pourrait être expliqué par l'imperméabilisation qui augmente sur le bassin versant mais est-elle suffisante pour expliquer une baisse de niveau de nappe ? Rien ne le prouve. Les résultats restent à confirmer sur la longueur.

9 Tendance d'évolution des températures d'eau dans la nappe (2003-2013) en amont et en aval d'un bassin d'infiltration (Chassieu)

Si des impacts thermiques sur de courtes périodes (pendant et après les épisodes pluvieux) ont été mis en évidence (Foulquier et al., 2009) les évolutions globales sur le long terme n'ont pas été examinées.

Nous examinons ici les chroniques acquises en amont et aval du bassin d'infiltration Django Reinhardt à Chassieu pour analyser si des évolutions (de 2003 à 2013) sont observables et si l'infiltration induit un changement particulier sur le long terme.

9.1 Données et pré-traitement des données

Des thermomètres sont placés dans les piézométriques en amont et aval du bassin d'infiltration. L'analyse de la température en amont signe potentiellement des évolutions de la nappe en générale, l'analyse en aval signe l'effet sur le long terme de l'infiltration du bassin.

En amont et aval du bassin un système de piézomètres en flute de Pan permet d'intercepter les caractéristiques (dont la température) à différentes profondeurs dans la nappe. Nous avons considéré les effets dans les eaux superficielles de la nappe. Comme les chroniques souffrent de lacunes, nous avons utilisé les corrélations entre différentes profondeurs et comblé ainsi les données manquantes.

Table 11 Chroniques utilisées pour la température d'eau de nappe en amont et en aval

Piézomètre	Localisation	Period of recorded data
SC5	Amont de l'infiltration. Mesure la température approximativement à 1 m sous la surface libre de la nappe.	10/01/2007 01:00 - 31/12/2013 23:00
SC6	Amont de l'infiltration. Mesure la température approximativement à 2 m sous la surface libre de la nappe.	13/01/2003 16:00 - 10/04/2012 07:00
SC11	Aval de l'infiltration. Mesure la température approximativement à 2 m sous la surface libre de la nappe.	13/01/2003 16:00 - 22/04/2011 18:00
SC26	Aval de l'infiltration. Mesure la température approximativement à 2 m sous la surface libre de la nappe.	30/10/2006 11:00 - 31/12/2012 23:00

9.1.1 Données de température en amont (capteurs SC5 et SC6)

SC5 et SC6 sont des piézomètres localisés en amont de l'infiltration du bassin Django Reinhardt dont les eaux ne sont pas soumises à l'influence des infiltrations de ce bassin. Les températures prennent donc en compte l'état de la nappe soumis à l'urbanisation.

Sur les périodes où les séries de mesures de températures ont été conjointes (de octobre 2007 à mi avril 2012) les données ont montré une bonne corrélation (coefficient de corrélation de 0.88) (Cf. Fig. 18). Ainsi une régression linéaire a-t-elle été utilisée pour combler les lacunes de SC6 de manière à travailler sur des séries les plus complètes possibles.

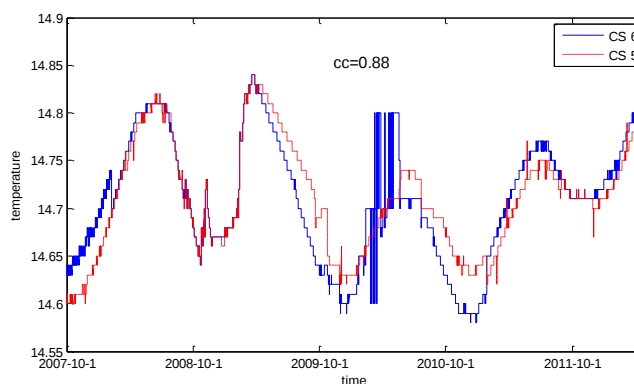


Fig. 18 Températures de nappe en amont de l'infiltration sur les deux piézomètres SC5 et SC6

De même que précédemment, les séries annuelles et mensuelles basées sur les moyennes, les médianes, les minimales et maximales sont analysées. Leur évolution temporelle est donnée ci-dessous respectivement à la Fig. 19 et Fig. 20. Nous avons ajouté également une variable d'écart de température entre la maximale et la minimale de températures dont la représentation est donnée à la Fig. 21 pour les écarts annuels.

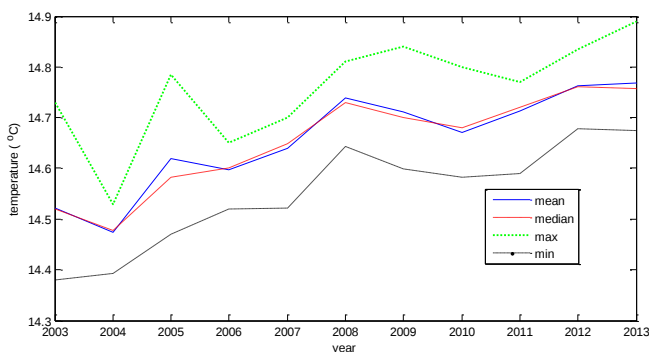


Fig. 19 Chronique des températures annuelles moyennes, médianes, minimales et maximales à l'amont du bassin d'infiltration

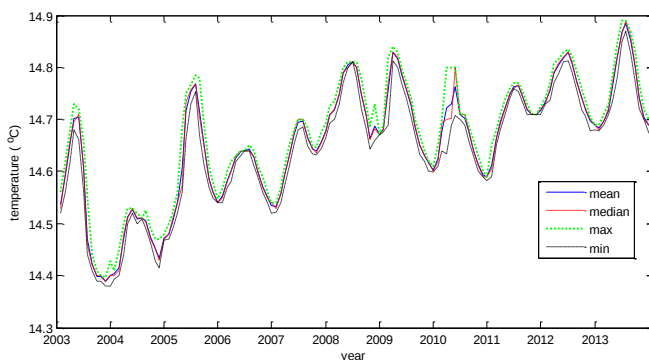


Fig. 20 Chronique des températures mensuelles moyennes, médianes, minimales et maximales à l'amont du bassin d'infiltration

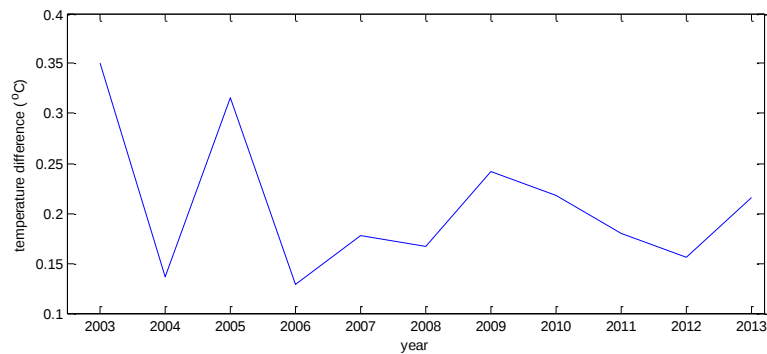


Fig. 21 Chronique des écarts annuels de températures entre les maximales et minimales à l'amont du bassin d'infiltration

9.1.2 Données de température en nappe à l'aval du bassin d'infiltration (SC11 et SC26)

SC11 et SC26 sont des piézomètres situés à l'aval. De même que précédemment la corrélation entre SC11 et SC26 ont permis de combler les lacunes de SC11 (Cf. Fig. 17). Notons que la corrélation est cependant moins bonne que pour les mesures amont (coefficient de corrélation de 0.62 sur des périodes communes).

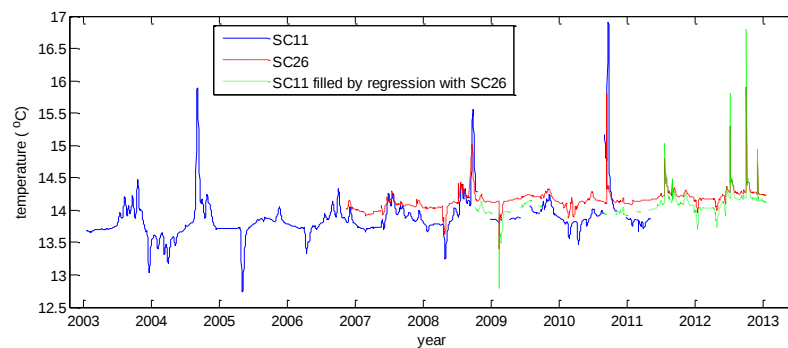


Fig. 22 Température de nappe en aval du bassin d'infiltration

Les séries annuelles et mensuelles basées sur les moyennes, les médianes, les minimales et maximales ont été analysées. Leur évolution temporelle est donnée ci-dessous respectivement à la Fig. 23 et Fig. 24. Nous avons ajouté également une variable d'écart de température entre la maximale et la minimale de températures dont la représentation est donnée à la Fig. 25 pour les valeurs annuelles.

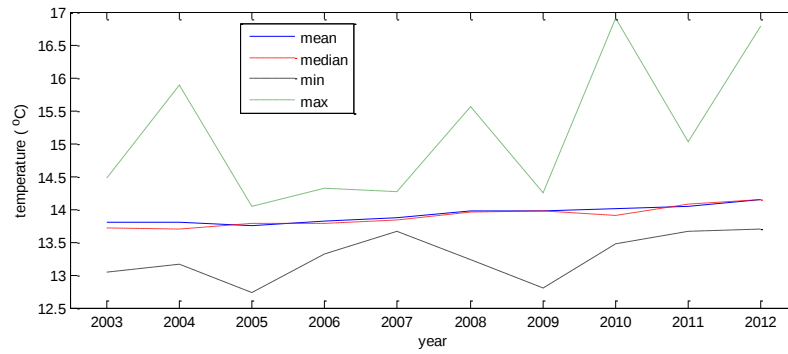


Fig. 23 Chronique des températures annuelles moyennes, médianes, minimales et maximales à l'aval du bassin d'infiltration

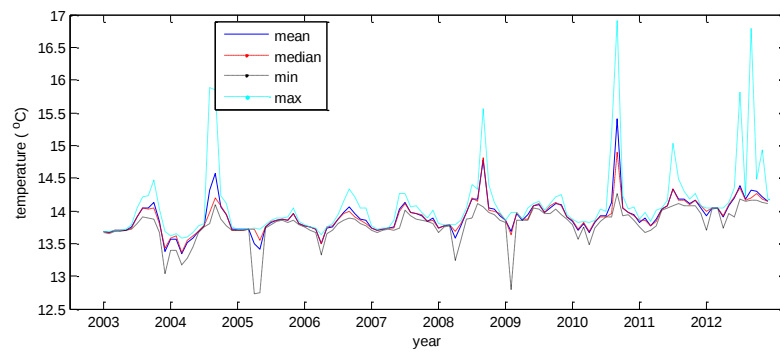


Fig. 24 Chronique des températures mensuelles moyennes, médianes, minimales et maximales à l'aval du bassin d'infiltration

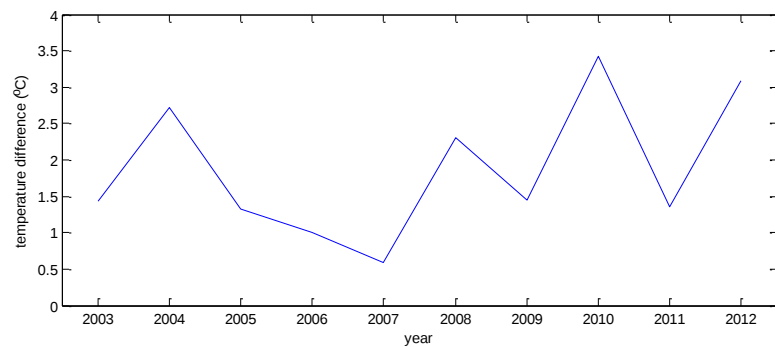


Fig. 25 Chronique des écarts annuels de températures entre les maximales et minimales à l'aval du bassin d'infiltration

9.2 Analyse des tendances d'évolution des températures de nappe (series annuelles et mensuelles)

9.2.1 Températures de nappe en amont

Les résultats sont donnés ci-dessous pour les caractéristiques annuelles (Table 12) et mensuelles (Table 13).

Les caractéristiques annuelles présentent quasiment toutes de l'autocorrélation sauf la température maximale. Les résultats (Table 12) indiquent une tendance à la hausse pour toutes les variables sauf pour les écarts de températures avec une augmentation de l'ordre de $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{an}$, ce qui est loin d'être négligeable.

Table 12 Détection de tendance sur les chroniques annuelles de températures de nappe amont

Variable	Method	P-value (%)	Présence de tendance	Pente de Sen ($^{\circ}\text{C}/\text{an}$)
Moyenne	Mann-Kendall adapté	0.24	Oui	0.025
Médiane	Mann-Kendall adapté	0.42	Oui	0.019
Min	Mann-Kendall adapté	0.42	Oui	0.020
Max	Régression linéaire	1.48	Oui	0.022
	Mann-Kendall	1.95	Oui	0.018
Différence	Mann-Kendall adapté	75.6	Non	-

Les caractéristiques mensuelles montrent une forte saisonnalité. La Fig. 26 donne cette saisonnalité avec les températures les plus hautes entre mai et juin alors que les températures d'air sont les plus élevées en juillet. Sur la période d'Avril à Aout, les températures mensuelles sont quasiment du même ordre de grandeur.

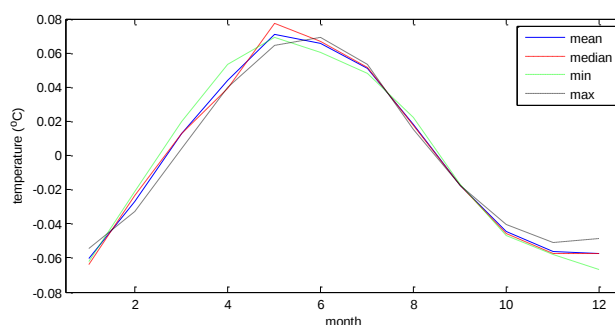


Fig. 26 Saisonnalité des températures de nappe en amont (écart aux moyennes mensuelles)

Les résultats (Table 13) montrent là encore une tendance à la hausse de même ordre de grandeur que les variables annuelles.

Table 13 Détection de tendance sur les chroniques mensuelles de températures de nappe amont (dessaisonnalisées)

Variable	Method	P-value (%)	Présence de tendance	Pente de Sen (°C/an)
Moyenne	Mann-Kendall adapté	0.10	Oui	0.021
Médiane	Mann-Kendall adapté	0.00	Oui	0.021
Min	Mann-Kendall adapté	0.02	Oui	0.021
Max	Mann-Kendall adapté	0.02	Oui	0.020

9.2.2 Températures de nappe en aval

Les résultats sont donnés ci-dessous pour les caractéristiques annuelles (Table 14) et mensuelles (Table 14).

Sur les caractéristiques annuelles une tendance à la hausse est également constatée (Table 14) sur les températures moyennes et médianes. La tendance est relativement plus marquée (presque deux fois plus qu'en amont si l'on raisonne sur la pente de Sen obtenue). Sur les températures maximales on n'observe pas de tendance. En fonction de la méthode (régression linéaire ou Mann-Kendall) les températures minimales suivent ou non une évolution avec une *P*-value qui n'est pas très éloignée du seuil de 5%. Sur les écarts de températures, comme en amont on n'observe pas de tendance. Il est intéressant de constater que s'il n'y a pas d'évolution sur les 11 ans les différences entre les min et les max de températures sont bien plus importants à l'aval qu'en amont. Ces différences sont en moyennes de 0.2 °C en amont et 1.8°C en aval confirmant les observations de A. Foulquier et al (2009) qui avaient pointé le fait que les infiltrations des EP exacerbaient les écarts de températures à l'échelle d'un événement.

Table 14 Détection de tendance sur les chroniques annuelles de températures de nappe aval

Variable	Method	P-value (%)	Présence de tendance	Pente de Sen (°C/an)
Moyenne	Mann-Kendall adapté	0.12	Oui	0.039
Médiane	Régression linéaire	0.00	Oui	0.047
	Mann-Kendall	0.07	Oui	0.048
Min	Régression linéaire	8.31	Non	-
	Mann-Kendall	4.91	Oui	0.071
Max	Régression linéaire	12.9	Non	-
	Mann-Kendall	37.1	Non	-
Différence	Régression linéaire	29.6	Non	-
	Mann-Kendall	71.6	Non	-

Sur les caractéristiques mensuelles la saisonnalité est marquée. Elle fait apparaître (Cf. Fig. 27) des températures les plus élevées en septembre plutôt décalée par rapport à celles de l'amont. Elles sont aussi

plus importantes qu'en amont. Les températures maximales sont en moyennes de 14.1°C en amont à 14.7°C en aval.

Les tendances (Table 15) sont également présentes sur les séries mensuelles.

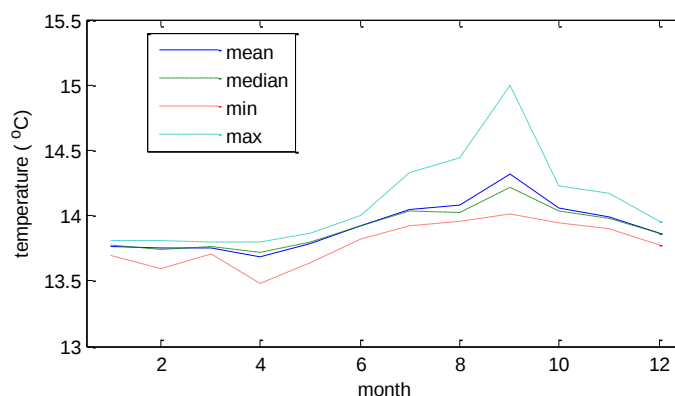


Fig. 27 Saisonnalité des température de nappe en aval du bassin d'infiltration.

Table 15 Détection de tendance sur les chroniques mensuelles de températures de nappe aval (dessaisonnalisées)

Variable		P-value (%)	Présence de tendance	Pente de Sen (°C/an)
Moyenne	Mann-Kendall adapté	0.00	Oui	0.032
Médiane	Mann-Kendall adapté	0.00	Oui	0.031
Min	Mann-Kendall adapté	0.00	Oui	0.026
Max	Mann-Kendall adapté	0.00	Oui	0.038

9.3 Corrélation des températures de nappe amont / aval avec d'autres variables climatiques et avec l'eau d'alimentation du bassin d'infiltration

Nous avons tenté d'examiner des corrélations temporelles entre les températures de nappe (amont /aval), puis de ces températures avec les variables climatiques (températures d'air et pluviométrie) et entre la température de l'eau (eau d'apport) et températures de nappe à l'aval.

Ces corrélations entre séries temporelles pour différents déphasages sont données à l'annexe 3. Globalement les corrélations ne sont pas très élevées (coefficient de corrélation inférieur à 0.6) avec des décalages pour lesquels la corrélation est maximum qui ne sont pas très exploitables. Ceci est probablement lié au fait que les séries de température en particulier les températures amont ne sont pas très contrastées.

9.4 Conclusion sur les tendances en matière de températures d'eau de nappe sur la période 2003-2013



Eau nappe

Sur la période 2003-2013 (11 ans), les caractéristiques (moyennes, médianes, min et max) de la température d'eau de nappe en amont du dispositif d'infiltration, que ce soit sur les séries annuelles ou mensuelles ont subi une augmentation de l'ordre de entre $+0.2$ et $+0.3^{\circ}\text{C}$ sur les 11 ans. L'écart entre min et max à l'échelle annuelle, quant à lui, n'évolue pas.

En aval il en va de même pour les caractéristiques observées sur les séries mensuelles. Sur les séries annuelles les températures moyennes, médianes ont augmenté mais pas les min ni les max. Les différences min-max restent également sans tendance d'évolution.

Il est intéressant de rappeler que s'il n'y a pas d'évolution sur les 11 ans pour les différences entre les min et les max, ces différences de températures sont bien plus importantes à l'aval qu'en amont (en moyennes de 0.2°C en amont et de 1.8°C en aval) confirmant les observations de A. Foulquier et al (2009) qui avaient pointé le fait que les infiltrations des eaux pluviales issues du bassin d'infiltration exacerbent les écarts de températures à l'échelle d'un évènement.

Alors que sur des périodes similaires, on ne constate pas d'évolution de température d'air ni de température d'eau d'alimentation, la température de la nappe en amont du bassin d'infiltration subit une augmentation d'origine probablement anthropique (e.g. développement des pompes à chaleur). En aval immédiat il y a également une augmentation de température moyenne et médiane au cours du temps qui est plus importante qu'en amont (la pente de Sen est entre 1.5 et plus de 2 fois plus importante). L'effet du bassin d'infiltration sur le régime thermique à long terme n'est pas à écarter. Foulquier et al (2009) avaient expliqué par comparaison avec d'autres bassins d'infiltration que le rapport surface active / surface d'infiltration jouait un rôle majeur dans la perturbation du régime thermique des eaux en aval de bassins d'infiltration. Cette perturbation s'observe également sur le long terme. Ces résultats renforcent l'intérêt des techniques de gestion des eaux pluviales à la source qui présentent des rapports surface active / surface d'infiltration bien plus équilibrés.

10 Tendance d'évolution des quantités d'eau issues des bassins versants

L'idée dans ce chapitre est d'étudier les quantités d'eau et leur possible évolution à long terme. Nous avons vu que la pluviométrie aux échelles de temps étudiées était stationnaire, la question est donc de savoir si l'anthropisation permet d'observer des tendances à la hausse.

Pour cela nous avons exploité trois bassins versants de l'OTHU : deux urbanisés qui ne sont pas identifiés par le Grand Lyon comme des bassins en développement et un bassin versant peri-urbain (La Léchère) qui est en cours d'urbanisation.

On se réfèrera aux caractéristiques décrites au paragraphe 3 pour rappel de la typologie des bassins versants.

10.1 Tendance d'évolution des quantités d'eau issues du bassin versant de Chassieu

10.1.1 Données et prétraitement des données sur le site de Chassieu (2004-2011)

A l'exutoire du bassin versant de Chassieu, le débit est acquis en continu au pas de temps 2 min. Les données sont estimées avec leurs incertitudes et sont jugées exploitables depuis 2004. Compte tenu du vieillissement des stations, nous avons choisi de nous arrêter à l'année 2011. La chronique de débits étudiée s'étale donc de 2004 à 2011 (8 ans). Sur cette période 3.44% de valeurs sont manquantes.

Ce bassin reçoit des eaux d'un système séparatif pluvial mais il reçoit également de manière sporadique des eaux de temps sec venant principalement d'eaux de refroidissement industrielles supposées propres. Les valeurs de débits de temps sec ne suivent pas des fluctuations régulières. La plupart du temps les débits sont faibles par rapport aux débits d'eaux pluviales. Il y a cependant parfois des pointes très courtes dans le temps qui n'excèdent jamais 60L/s. La Fig. 28 montre quelques journées de temps sec typiques.

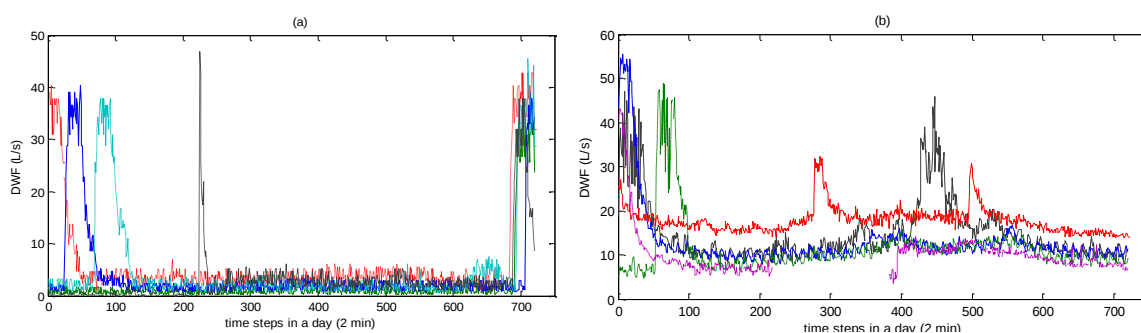


Fig. 28 Quelques journées de temps sec typiques sur Chassieu

Entre octobre 2010 et mai 2011 les débits observés tant par temps sec qu'en temps de pluie ont présentés des anomalies. Nous avons considéré les données sur cette période comme étant non disponibles.

a) Sur une base mensuelle

Les chroniques mensuelles déduites des chroniques au pas de temps de 2 min sont présentées à la Fig. 29. Compte tenu de ces lacunes les variables mensuelles étudiées sont celles des centiles (Cf. Table 16). Le tableau donne également les ordres de grandeurs de ces variables.

Notons que nous ne nous intéressons pas aux petits débits mais plutôt aux débits importants qui pourraient avoir évolué avec l'anthropisation.

Notons aussi que nous n'avons pas exploité les données annuelles en raison du faible nombre d'années complètes.

Table 16 Caractéristiques statistiques des variables mensuelles étudiées pour l'estimation des tendances en termes de flux d'eau à Chassieu

Variables	Moyenne (L/s)	Médiane [min - max] (L/s)	Ecart type (L/s)
Moyenne	19.7	17.3 [5.1- 43.3]	10.3
Médiane	5.4	3.4 [0.1-18.2]	4.6
75 ^{eme} centile	10.3	9.9 [0.5- 24.3]	6.3
90 ^{eme} centile	28.1	25.1 [2.3- 63.9]	14.9
95 ^{eme} centile	56.8	47.4 [14.9-232.4]	40.0
99 ^{eme} centile	340.3	265.5 [43.5-1108.4]	245.5
99.5 ^{eme} centile	557.4	460.2 [96.3- 1871.1]	390.9
99.9 ^{eme} centile	1197.5	986.7 [176.9- 4247.3]	878.9

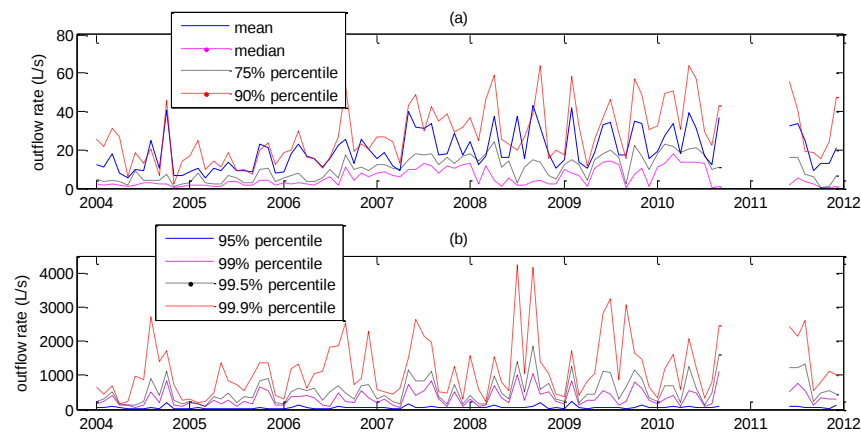


Fig. 29 Séries mensuelles des débits à l'exutoire du bassin versant de Chassieu: (a) débits moyens, 50^{eme}, 75^{eme} and 90^{eme} centiles; (b) 95^{eme}, 99^{eme}, 99.5^{eme} and 99.9^{eme} centiles.

b) Sur une base évènementielle

Les données de débits ont été également exploitées sur une base évènementielle. Les évènements sont définis en cohérence avec les données de pluie. Deux pluies étant séparées d'au moins 4h de temps sec, un évènement issu du ruissellement sera identifié comme commençant en même temps que la pluie correspondante et finissant dans les 4h après la pluie. Il ne sera pris en compte que s'il est complet (pas de données manquantes au sein de son hydrogramme).

Au total 716 évènements ont été identifiés entre 2004 et 2011 dont 521 évènements présentant un hydrogramme complet.

Le tableau ci-dessous (

Table 17) résume les caractéristiques statistiques de ces évènements. La Fig. 30 donne les chroniques de pluies et de débits à l'exutoire de 2004 à 2011.

La Fig. 31 donne pour les 521 évènements les hauteurs de pluie en fonction des volumes à l'exutoire pour ces mêmes pluies. On peut remarquer que ces points sont assez bien repartis autour d'une droite, ce qui est typique d'un bassin versant urbanisé.

La Fig. 32 représente, quant à elle, l'évolution des coefficients volumétriques de ruissellement pour ces mêmes évènements. Le coefficient volumétrique de ruissellement est ici le rapport entre le volume de ruissellement global à l'exutoire sur le volume de pluie précipitée. On peut constater que sur la période il est de l'ordre de 0.35. On constate aussi que certains coefficients sont supérieurs à 1. Cela est dû à la concomitance d'un petit évènement pluvieux et d'un rejet de temps sec.

Table 17 Caractéristiques statistiques des évènements pluvieux et de ruissellement à Chassieu entre 2004 et 2011 (521 évènements)

	Variables	Moyenne	Médiane [max-min]	Ecart type
Pluie	Hauteur précipitée (mm)	9.0	4.6 [1.0-134.6]	12.3
	Intensité moyenne (mm/h)	1.6	1.0 [0.1 – 23.1]	2.1
	Durée (h)	7.1	5.1 [0.6 - 42.6]	6.5
	Intensité moyenne-max en 6 min (mm/h)	11.0	6.0 [0.7- 94.0]	13.1
Ruissellement	Volume total ($\times 10^3 \text{ m}^3$)	4.5	2.2 [0.19- 61.9]	6.7
	Débit moyen (L/s)	102.9	62.7 [4.6 -813.1]	111.6
	Débit max en 2 minutes (L/s)	666.7	365.8 [18.0- 5115.7]	813.8

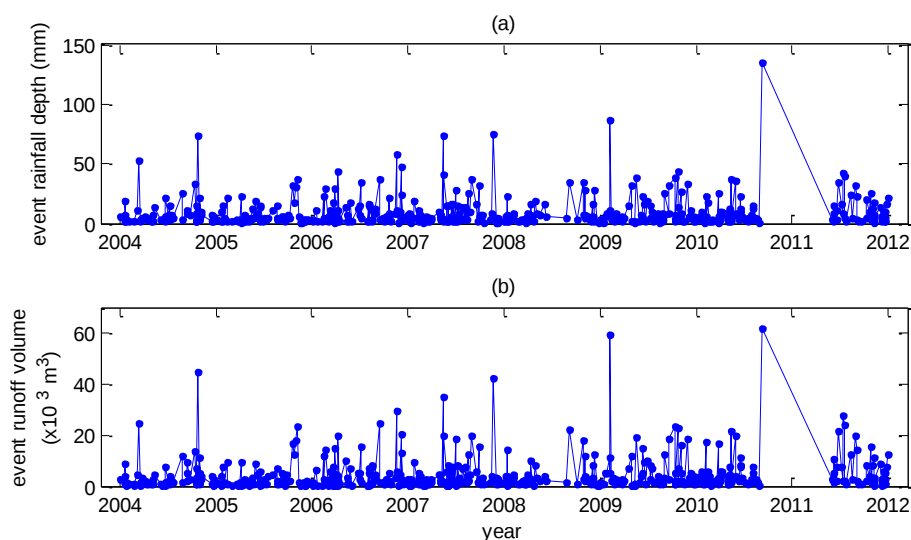


Fig. 30 Chroniques de pluies et de débits à l'exutoire de Chassieu entre 2004 à 2011.

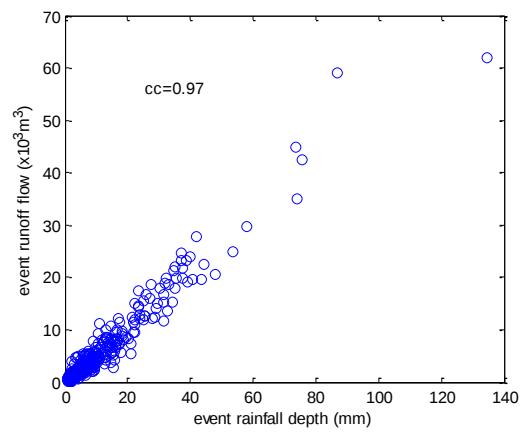


Fig. 31 Hauteurs de pluie vs volumes de ruissellement à l'exutoire entre 2004 et 2011 à Chassieu (521 évènements)

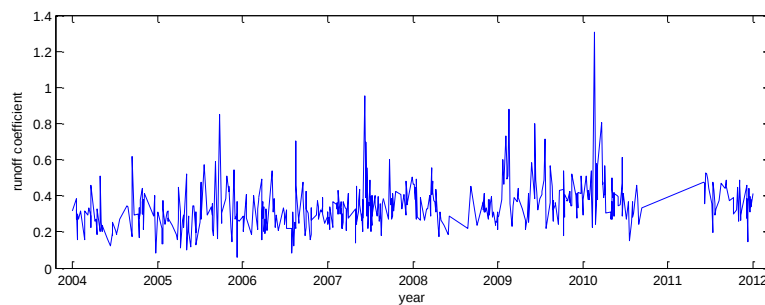


Fig. 32 Evolution du coefficient de ruissellement entre 2004 et 2011 à Chassieu (521 évènements)

10.1.2 Analyse des tendances d'évolution des quantités d'eau sur le site de Chassieu

a) Analyse des séries mensuelles

L'effet d'autocorrélation est significatif pour les variables moyennes, médianes et centiles à moins de 90%. Pour les centiles (95, 99, 99.5, 99%) l'autocorrélation est négligeable. Les plus faibles débits sont donc davantage auto-corrélés.

Le tableau ci-dessous (

Table 18) donne les tendances d'évolution des séries mensuelles de débits à l'exutoire du bassin versant de Chassieu (2004-2011). On constate que quelles que soient les variables une tendance à la hausse est systématiquement présente alors que sur la même période le régime des pluies ne semble pas avoir subi de modification. Ceci ne peut être lié qu'à une évolution de l'urbanisation sur le bassin versant, ce que nous analyserons ultérieurement.

Table 18 Détection de tendance sur les chroniques mensuelles de débits à l'exutoire du bassin versant de Chassieu (2004-2011)

Variable	Méthode	P-value (%)	Présence de tendance	Pente de Sen (L/s/an)
Moyenne	Mann-Kendall adapté	0.0	Oui	1.7
Médiane	Mann-Kendall adapté	3.2	Oui	0.4
75 ^{eme} centile	Mann-Kendall adapté	0.2	Oui	0.8
90 ^{eme} centile	Mann-Kendall adapté	0.0	Oui	2.7
95 ^{eme} centile	Régression linéaire	2.5	Oui	4.3
	Mann-Kendall	0.0	Oui	4.4
99 ^{eme} centile	Régression linéaire	1.4	Oui	28.8
	Mann-Kendall	0.9	Oui	22.5
99.5 ^{eme} centile	Régression linéaire	0.1	Oui	62.3
	Mann-Kendall	0.1	Oui	50.3
99.9 ^{eme} centile	Régression linéaire	1.4	Oui	103.4
	Mann-Kendall	1.2	Oui	82.5

b) Analyse sur les variables évènementielles

Le tableau ci-dessous (Table 19) présente les résultats de l'analyse de tendance sur les variables évènementielles liées aux débits. La période est relativement courte (8 ans de 2004-2011) mais là encore, les tendances à la hausse sont claires pour les débits moyens et le coefficient de ruissellement alors que la pluie ne montre pas d'évolution sur la période. L'évolution des débits max ponctuels en 2min est en revanche moins nette (*P-Value* = 4.05 proche de 5%).

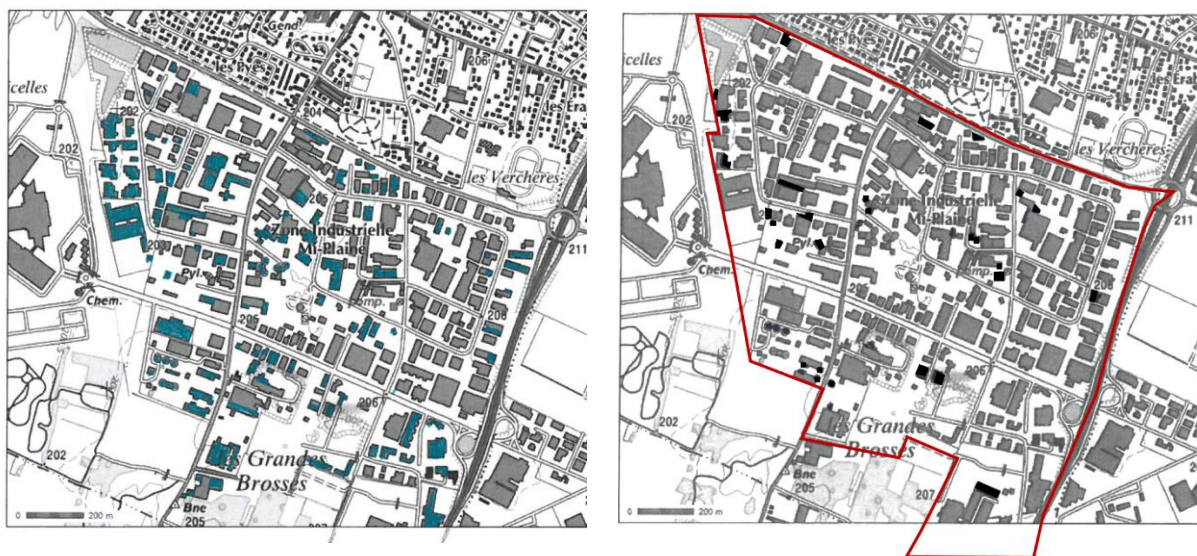
Table 19 Détection de tendance sur la pluie et les débits à l'exutoire du bassin versant de Chassieu de (2004-2011) (521 évènements)

Variable type	Variable	Méthode	P-value (%)	Présence de tendance	Pente de Sen (-/an)
Pluie	Hauteur précipitée (mm)	Mann-Kendall	19.6	Non	-
	Intensité moyenne (mm/h)	Mann-Kendall	9.5	Non	-
	Durée (h)	Mann-Kendall	93.0	Non	-
	Intensité moyenne-max en 6 min (mm/h)	Mann-Kendall adapté	89.7	Non	-
Ruisselleme nt	Volume total ($\times 10^3 \text{ m}^3$)	Mann-Kendall	0.00	Oui	156.5
	Débit moyen (L/s)	Mann-Kendall adapté	0.01	Oui	4.04
	Débit max en 2 minutes (L/s)	Mann-Kendall adapté	4.05	Oui	14.1
Pluie/Débit	Coefficient volumétrique de ruissellement (-)	Mann-Kendall adapté	0.00	Oui	0.018

c) Conclusions

Il paraît assez net que les flux d'eau ont évolué sur une période relativement courte (8 ans) alors que les variables caractéristiques des pluies n'ont pas évolué sur la même période. L'urbanisation semble donc naturellement la cause première. Il aurait pu y avoir également une évolution des quantités d'eaux de temps secs liés aux industries présentes sur la zone mais l'analyse des débits de temps sec et les observations montrent exactement le contraire : une baisse des flux d'eau probablement issue de l'étude diagnostic et de la sensibilisation des industriels qui ont été menées par le Grand Lyon sur le site.

Une analyse sommaire de l'évolution du bâti issue de photos aériennes ou plans cadastraux prises en 1992, 2003 et 2015 montre une évolution effective de l'urbanisation (Cf. Fig. 33).



Urbanisation entre 1992 et 2015

Urbanisation entre 2003 et 2015

Fig. 33 Evaluation sommaire de l'urbanisation sur le secteur

Les modifications du bâti sont en bleu pour la période 1992-2015 et en noir sur la période 2003-2015.

Cette évolution est sommaire et ne prend pas en compte ou mal en compte les évolutions d'autres surfaces comme les parkings par exemple, difficilement discernables à l'œil nu.

10.2 Tendance d'évolution des quantités d'eau issues du bassin versant d'Ecully

10.2.1 Données et prétraitement des données sur le site de Chassieu (2004-2011)

Sur le même principe, les données de débits sont acquises au pas de temps de 2 min. Les données ont été exploitées sur la même période que Chassieu, de 2004 à 2011. Sur la période d'étude, 13,4 % de valeurs de débits sont manquantes.

Le bassin versant est drainé par un réseau unitaire recevant donc des eaux pluviales et des eaux usées domestiques. L'évolution des débits de temps sec comme ceux de temps de pluie nous intéressent pour

connaître une possible évolution. La liste des variables étudiées est la même qu'à Chassieu à laquelle nous avons rajouté des caractéristiques de petits débits (25^{ème} centile).

a) Débits unitaires (Ecully)

La Fig. 34 montre les chroniques mensuelles des débits totaux observés à l'exutoire du bassin versant d'Ecully déduites des chroniques au pas de temps de 2 min. Le tableau ci-dessous (Table 20) donne les ordres de grandeur des variables retenues sur Ecully.

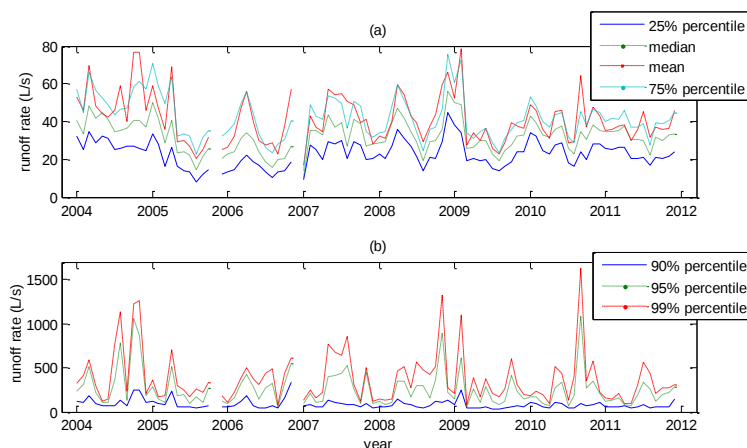


Fig. 34 Séries mensuelles des débits à l'exutoire du bassin versant d'Ecully : (a) débits moyens, 25^{ème}, 50^{ème}, 75^{ème}; (b) 90^{ème}, 95^{ème}, 99^{ème} centiles.

Table 20 Caractéristiques statistiques des variables mensuelles étudiées pour l'estimation des tendances en termes de flux d'eau à Ecully

Variables	Moyenne (L/s)	Médiane [min - max] (L/s)	Ecart type (L/s)
Moyenne	41.4	38.8 [17.0- 78.2]	13.0
25 ^{ème} centile	22.9	22.4 [8.3- 44.5]	6.9
Médiane	32.3	32.5 [10.7-56.3]	8.6
75 ^{ème} centile	42.4	40.7 [14.1- 75.8]	11.6
90 ^{ème} centile	87.5	67.3.1 [35.3- 334.8]	53.7
95 ^{ème} centile	263.2	203.2.4 [59.1-1091]	205.8
99 ^{ème} centile	382.6	298.0 [78.9-1630]	297.3

b) Débits de temps sec (Ecully)

Nous avons étudié également la possible évolution du temps sec constitué des eaux domestiques et de possibles eaux parasites. Après examen empirique des chroniques sur le site, nous avons considéré comme périodes de temps sec les périodes pendant lesquelles (i) le pluviomètre n'indique pas de pluie, (ii) le débit maximum sur la période reste inférieur à 100 L/s et (iii) le débit moyen inférieur à 60 L/s. Comme le pluviomètre est ponctuel pour un bassin de plusieurs centaines d'hectares nous avons également considéré

comme faisant partie du temps sec les périodes pendant lesquelles le débit max restait inférieur à 60 L/s et débit moyen inférieur à 30 L/s faisant implicitement l'hypothèse que la pluie même si elle est détectée était négligeable par rapport aux apports de temps secs. Sur ces considérations nous avons pu analyser 1516 périodes de temps sec entre 2004 et 2011.

La Fig. 35 montre le profil journalier de ces périodes de temps sec. On y voit clairement et sans surprise deux pics : l'un autour de 7 h du matin, le second autour de 19 h, typiques des usages domestiques.

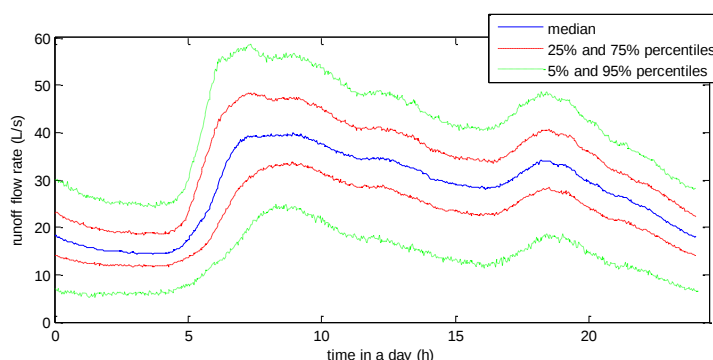


Fig. 35 Profil journalier des débits médians et des 5^{ème}, 25^{ème}, 75^{ème} et 95^{ème} centiles à l'exutoire du bassin versant d'Ecully (2004-2011) – 1516 périodes de temps sec

Les représentations des séries annuelles et mensuelles relatives à la moyenne, la médianes et aux 75^{ème} et 95^{ème} centiles sont données ci-dessous (respectivement aux Fig. 36 et Fig. 37).

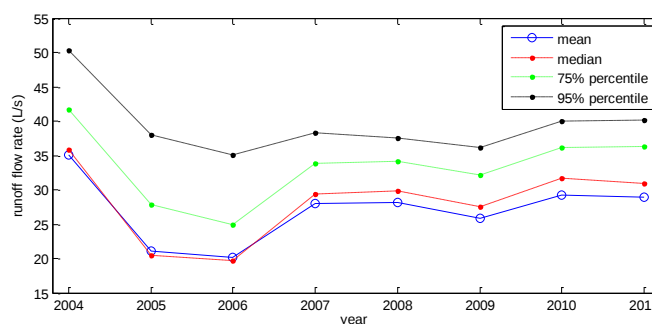


Fig. 36 Caractéristiques annuelles relatives aux débits moyens, médians et aux centiles à 75^{ème} et 95^{ème} à Ecully (2004-2011) – 1516 périodes de temps sec

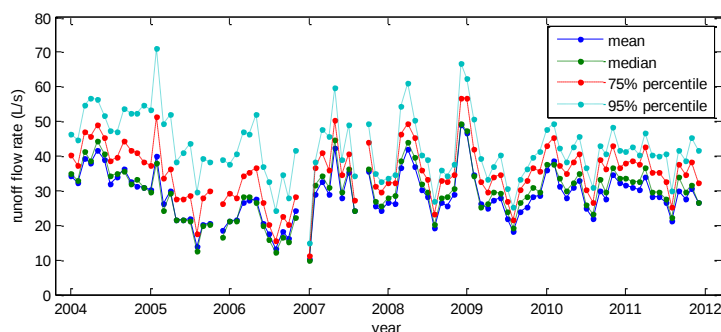


Fig. 37 Caractéristiques annuelles relatives aux débits moyens, médians et aux centiles à 75^{ème} et 95^{ème} à Ecully (2004-2011) – 1516 périodes de temps sec

c) Débits de temps de pluie sur une base évènementielle (Ecully)

Sur la même base que Chassieu les chroniques de débits par temps de pluie ont été délimitées. Deux évènements sont séparés d'une durée au moins égale à 4h avec une hauteur précipitée supérieure à 1mm pendant au moins 30 min. Le temps sec a été déduit par simple soustraction du profil médian journalier. Au total 704 évènements ont pu être identifiés sur la période dont 625 présentent des données complètes.

Le tableau ci-dessous (Table 21) résume les caractéristiques de ces évènements. Le coefficient volumétrique de ruissellement pour chaque évènement est défini comme un coefficient d'apport c'est-à-dire le rapport entre volume total d'eau à l'exutoire sur le volume de pluie précipitée pour cet évènement. On peut constater que pour certains évènements (assez rares Cf. Fig. 38(d)) le coefficient est bien supérieur à 1 pour le temps de pluie. Cela est dû probablement à des apports d'eau parasites non déduites et qu'il est difficile de déduire si elles ne sont pas régulières.

La Fig. 38 représente les séries chronologiques sur Ecully relatives aux intensités de pluie, aux débits unitaires à l'exutoire, aux débits par temps ainsi que les coefficients de ruissellement par temps de pluie.

Table 21 Caractéristiques statistiques des évènements relatifs aux apports d'eau à l'exutoire du bassin versant d'Ecully (2004-2011) - (625 évènements)

	Variables	Moyenne	Médiane [min-max]	Ecart type
Pluie	Hauteur totale précipitée (mm)	7.9	4.2 [1.0- 145.3]	11.5
	Intensité moyenne (mm/h)	1.2	0.7 [0.05-10.2]	1.3
	Durée (h)	8.5	6.8 [0.5-60.4]	7.5
	Intensité moy-max sur 1min (mm/h)	13.3	6.0 [0.8-172]	19.9
Apports à l'exutoire	Volume total ($\times 10^3 \text{ m}^3$)	4.55	2.47 [0.41-75.8]	6.63
	Débit moyen (L/s)	92.8	65.8 [14.2-815.7]	87.0
	Max flow in 2 minutes (L/s)	486.7	236.5 [38.3-4180]	678.8
Apports par temps de pluie	Volume total ($\times 10^3 \text{ m}^3$)	3.31	1.33 [0.001-73.3]	6.24
	Débit moyen (L/s)	64.9	37.6 [0.02-788.8]	86.7
	Débit max en 2 minutes (L/s)	457.0	205.6 [2.43-4147]	678.5
Coefficient volumétrique de ruissellement (coefficient d'apport)	Par temps de pluie	0.36	0.33 [0.0-3.0]	0.24
	Par temps sec et temps de pluie	0.67	0.59 [0.1- 4.1]	0.33

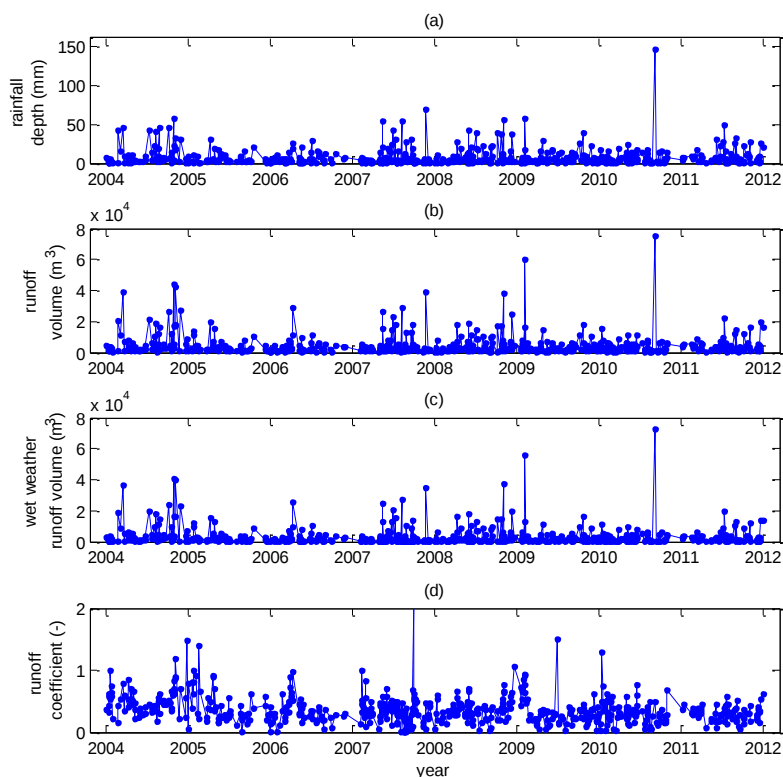


Fig. 38 Série chronologique sur Ecully (pluie, débit total à l'exutoire, débit de temps de pluie, coefficient de ruissellement par temps de pluie) (2004-2011)

10.2.2 Analyse des tendances d'évolution des quantités d'eau sur le site d'Ecully

d) Tendance d'évolution des débits unitaires à partir des séries mensuelles

Le tableau ci-dessous (Table 22) fait état des tendances en matière de débits unitaires sur la base de séries mensuelles à Ecully (Fig. 34). Aucune tendance n'est présente. Le bassin versant semble assez stable en termes d'évolution de l'urbanisation.

Table 22 Détection de tendance pour les séries mensuelles relatives aux débits unitaires à l'exutoire du bassin versant d'Ecully (2004-2011)

Variable mensuelle	Test	P-value (%)	Présence de tendance	Pente de Sen (L/s/an)
Moyenne	Mann-Kendall adapté	45.5	Non	-
25 ^{ème} centile	Mann-Kendall adapté	51.5	Non	-
Médiane	Mann-Kendall adapté	100	Non	-
75 ^{ème} centile	Mann-Kendall adapté	28.8	Non	-
90 ^{ème} centile	Mann-Kendall adapté	9.8	Non	-
95 ^{ème} centile	Mann-Kendall test	22.9	Non	-
99 ^{ème} centile	Mann-Kendall test	33.7	Non	-

e) Tendance d'évolution des débits de temps sec

Les tableaux ci-dessous donnent les tendances d'évolution pour les séries annuelles et mensuelles de temps sec (Cf. Table 23). Globalement on ne détecte pas de tendance d'évolution. Seul le 95^{ème} centile montre une tendance à la baisse sur la série mensuelle mais avec une P-value proche de 5%.

Table 23 Détection de tendance pour les débits de temps sec à l'exutoire du bassin versant d'Ecully (2004-2011)

Variable type	Variable	Méthode	P-value (%)	Présence de tendance	Pente de Sen (-/an)
Séries annuelles	Moyenne	Mann-Kendall	53.6	Non	-
	Médiane	Mann-Kendall	53.6	Non	-
	75 ^{ème} centile	Mann-Kendall	38.7	Non	-
	95 ^{ème} centile	Mann-Kendall	90.2	Non	-
Séries mensuelles	Moyenne	Mann-Kendall adapté	87.3	Non	-
	Médiane	Mann-Kendall adapté	80.1	Non	-
	75 ^{ème} centile	Mann-Kendall adapté	77.4	Non	-
	95 ^{ème} centile	Mann-Kendall adapté	4.1	Oui	-0.72

f) Tendance d'évolution des débits de temps de pluie à une échelle événementielle

Le tableau ci-dessous (Table 24) donne les résultats pour l'analyse sur les événements.

Alors qu'il n'y a pas de tendance détectée sur les pluies et les volumes, une décroissance est détectée sur les coefficients d'apport aussi bien globalement (apports globaux unitaires) que pour le temps de pluie.

Cependant la *P-value* est proche de 5% pour les apports globaux ce qui peut faire douter d'une réelle tendance. Comme les apports par temps de pluie sont calculés de manière simplifiée la tendance à la baisse du coefficient en temps de pluie reste sujette à caution. Enfin, si elle était avérée, la décroissance sur la période est très faible (-0.006 et -0.009/an). Nous concluons donc que la tendance n'est pas avérée sur Ecully.

Contrairement à Chassieu, il n'a pas été possible de récupérer des photos aériennes qui auraient pu donner une idée de l'évolution de l'urbanisation sur la zone.

Table 24 Détection de tendance pour les quantités d'eau de temps de pluie - Ecully (2004-2011)

Variable	Méthode	<i>P-value</i> (%)	Présence de tendance	Pente de Sen (-/an)
Hauteur de pluie	Mann-Kendall test	29.2	Non	-
Volume de ruissellement total unitaire	Mann-Kendall test	78.1	Non	-
Volume de temps de pluie	Mann-Kendall test	23.9	Non	-
Coefficient de ruissellement global	Mann-Kendall adapté	4.1	Oui	-0.006
Coefficient de ruissellement lié au temps de pluie	Mann-Kendall adapté	2.8	Oui	-0.009

g) Conclusion

Contrairement au site de Chassieu, les caractéristiques étudiées quant à une possible évolution des quantités d'eau sur le site d'Ecully ne montrent pas de tendance d'évolution avérée ni pour le temps sec, ni pour le temps de pluie. Pour ce site qui est un point caractéristique d'autosurveillance pour la métropole du Grand Lyon, on ne constate pas de changement sur la période

10.3 Tendance d'évolution des quantités d'eau issues du bassin versant de La Léchère (juin 2005-décembre 2014)

10.3.1 Données et pré-traitement des données

Sur le site de La Léchère un traitement des données a été opéré avant analyse de tendance. Ce bassin versant reçoit des eaux de parties rurales et de parties plus urbanisées (toujours en cours d'urbanisation). Nous voulions examiner l'évolution de la partie urbaine conduisant à des écoulements rapides du bassin versant. Pour cela nous avons exploité les mesures acquises de débits en continu à l'exutoire du bassin versant (Cf. 3.3) et avons soustrait les flux issus de la partie rurale (Cf. (Siao et al, en préparation) pour plus de détail).

Sur la période, 2.8% des données de débits sont manquantes. La Fig. 39 et la Fig. 40 montrent respectivement les caractéristiques des pluies retenues pour ce qui est de la hauteur totale précipitée et de la durée et les séries temporelles des débits de base, des coefficients de ruissellement et du lag-time. Le tableau ci-dessous donne les caractéristiques des 394 évènements retenus sur la période de 9.5 ans ainsi que les variables dont on a étudié les tendances d'évolution.

Table 25 Caractéristiques des évènements sur le site de La Lechere (394 évènements)

Variables	Caractéristiques	Médiane [min-max]	Moyenne (écart type)
Pluie	Hauteur précipitée (mm)	7.4 [2.0-91.4]	10.3 (10.7)
	Durée (h)	5.8 [0.5-33.8]	7.6 (6.0)
	Intensité moyenne (mm/h)	1.4 [0.3-16.3]	2.0 (2.1)
Ruissellement (Débit de base déduit)	Volume (m ³)	0.89 [0.10-28.0]	1.96 (3.07)
	Débit moyen (L/s)	41.4 [5.0- 472.9]	59.9 (59.9)
Débit de base	Débit (L/s)	7.2 [0-317.6]	15.8 (25.6)
Pluie/Débit	Coefficient de ruissellement volumétrique moyen (-)	0.12 [0.02- 0.73]	0.13 (0.09)
	Lag time (min)	110.6 [-49.6-358.1]	118.7 (53.3)

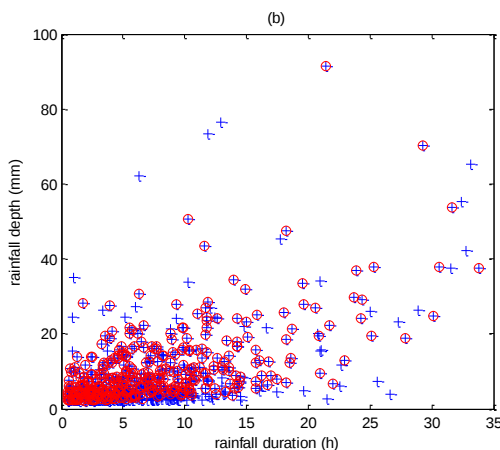


Fig. 39 Caractéristiques des évènements pluvieux : hauteur précipitée vs durée
(Les + indiquent tous les évènements les points entourés sont les évènements retenus)

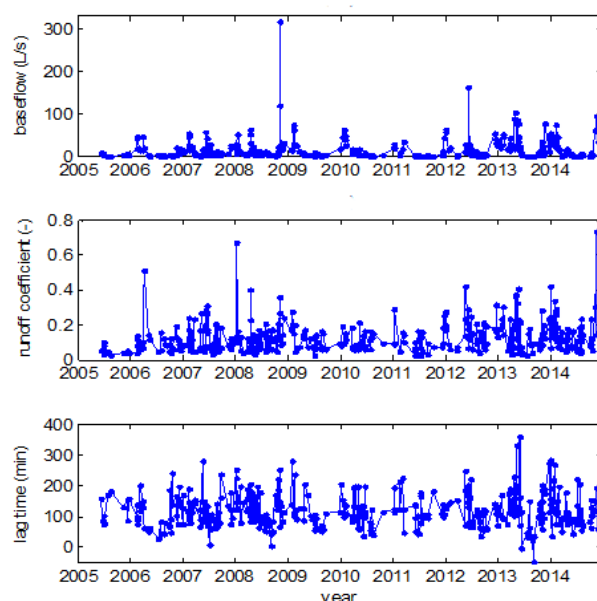


Fig. 40 Séries temporelles des débits de base, des coefficients de ruissellement et du lag-time (La Léchère) sur les 394 évènements

10.3.1 Analyse des tendances d'évolution des hauteurs de nappe à l'échelle annuelle et mensuelle

Les résultats donnant les tendances sont reporté ci-dessous (Cf. Table 26). Sans surprise alors que la pluie reste stationnaire sur la période (hormis pour la durée dont la tendance n'est pas très marquée (*P-value* de 3.6), les quantités d'eau (volume, débit moyen) subissent une augmentation dans le temps liée aux processus d'urbanisation. Par ailleurs, les réponses en termes de lag-time ne diminuent pas.

Table 26 Résultats en termes de tendance sur les flux d'eau sur le site de La Léchère

	Variables	Méthode	<i>P</i> -value (%)	Présence de tendance	Pente de Sen (-/an)
Pluie	Hauteur précipitée (mm)	Mann-Kendall	37.3	Non	-
	Durée (h)	Mann-Kendall	3.6	Oui	0.17
	Intensité moyenne (mm/h)	Mann-Kendall	7	Non	-
Ruissellement	Volume (m ³)	Mann-Kendall	1	Oui	33
	débit moyen (L/s)	Mann-Kendall modifié	0.62	Oui	1.7
Pluie/Débit	coefficient de ruissellement volumétrique moyen (-)	Mann-Kendall modifié	6.3×10^{-2}	Oui	4.4×10^{-3}
	Lag time (min)	Mann-Kendall modifié	65.3	Non	-
Autre	Débit de base (L/s)	Mann-Kendall modifié	20.6	Non	-



10.4 Conclusion sur les tendances d'évolution des quantités d'eau issues de bassins versants urbains ou péri-urbains



Sur des périodes de même ordre de longueur (8 ans de 2004 à 2011 (pour Chassieu et Ecully) et 9.5 ans pour La Léchère), les pluies n'ont pas évolué. Une augmentation des quantités d'eau est sensible sur Chassieu et La Léchère. Le premier n'est pas connu pour son développement urbain mais on constate qu'il a tout de même eu lieu. Le développement du deuxième est logique puisque le bassin versant est en cours d'urbanisation. Le site d'Ecully n'évolue pas. L'urbanisation y est stable.

Notons que les évolutions sur le long terme liées à l'urbanisation et leurs impacts potentiels sur les flux d'eau et de polluants ne sont généralement pas suivis ni par la collectivité ni par les chercheurs.

L'augmentation des volumes et débits peuvent pourtant avoir des conséquences sur les flux de polluants et c'est ce que nous constatons sur Chassieu par exemple comme nous allons l'étudier dans la suite.

11 Tendance d'évolution des quantités de matières en suspension (MES) dans les eaux pluviales issues des bassins versants urbains

Les matières en suspension (MES) dans les eaux urbaines sont communément étudiées car une bonne partie des polluants y sont associés comme par exemple certains métaux et hydrocarbures. L'évolution des concentrations est la plupart du temps suivie en continu via la mesure de la turbidité (e.g., Langeveld et al., 2005; Lacour et al., 2009; Métadier and Bertrand-Krajewski, 2012).

11.1 Données et prétraitement des données sur les sites de Chassieu et d'Ecully (2004-2011)

Les données de turbidités ont été exploitées sur les sites de Chassieu et Ecully de 2004 à 2011.

11.1.1 Site de Chassieu

La turbidité acquise au pas de temps de 2 min a été convertie en MES selon la méthode développée dans le cadre de l'OTHU et détaillée encore récemment dans Métadier and Bertrand-Krajewski, 2011, 2012.

A Chassieu, comme les débits de temps sec sont très faibles, nous avons travaillé exclusivement sur le temps de pluie contrairement à Ecully. Nous avons également travaillé sur une base événementielle plus appropriée à la problématique de la pollution par temps de pluie. La série temporelle liée au temps de pluie présente 30.2% de lacunes de mesures de turbidité et donc de MES. Tous les évènements n'ont donc pas pu être exploités.

Sur un total de 716 évènements pluvieux identifiés sur la période d'étude (2004-2011), 521 ont présenté un hydrogramme complet, 162 un pollutogramme en MES complet (concentration en MES au cours du temps) et 403 un pollutogramme complet à plus de 50%.

La Fig. 41 donne les chroniques de concentrations moyennes événementielles (EMC) et les masses (EL) sur les 162 évènements "complets" ainsi que celles des 403 connues à plus de 50%.

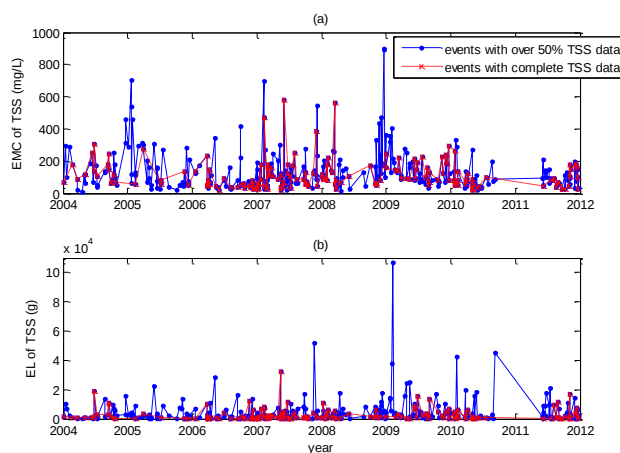


Fig. 41 Séries chronologiques donnant sur une base événementielle : (a) les concentrations moyennes par évènement (EMC) (b) et les masses associées (EL) à Chassieu –temps de pluie (2004-2011)

11.1.2 Site d'Ecully

A Ecully, les concentrations en MES ont été étudiées tant en temps sec qu'en temps de pluie.

a) Temps sec (rejets domestiques)

L'évolution des quantités de MES par temps sec à Ecully ont été étudiées sur une base mensuelle et annuelle. Des mesures sur 1516 jours comme déjà évoqué pour les flux d'eau ont servi de base à l'étude en temps sec. Les figures Fig. 42 et Fig. 43 Fig. 36 montrent respectivement les valeurs médianes, les 75^{ème} et 95^{ème} centiles de ces concentrations pour les séries annuelles et mensuelles.

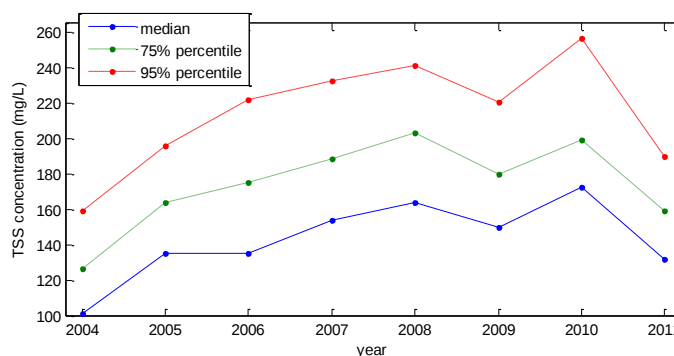


Fig. 42 Valeurs annuelles des médianes, 75^{ème} et 95^{ème} centiles des concentrations en MES – temps sec – Ecully (2004-2011)

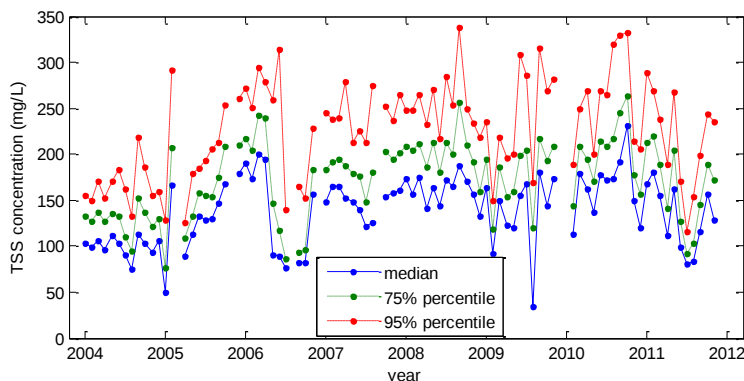


Fig. 43 Valeurs mensuelles des médianes, 75^{ème} et 95^{ème} centiles des concentrations en MES – temps sec – Ecully (2004-2011)

b) Temps de pluie (rejet unitaire)

L'évolution des quantités de MES sur Ecully par temps de pluie a été abordée sur une base événementielle. Sur 625 événements pluvieux présentant un hydrogramme complet, 148 seulement présentaient un pollutogramme complet en MES et 410 un pollutogramme complet à plus de 50%.

La Fig. 44 donne les concentrations moyennes événementielles et les masses sur les 148 événements "complets" ainsi que celles des 410 connues « presque complètement » sur la période.

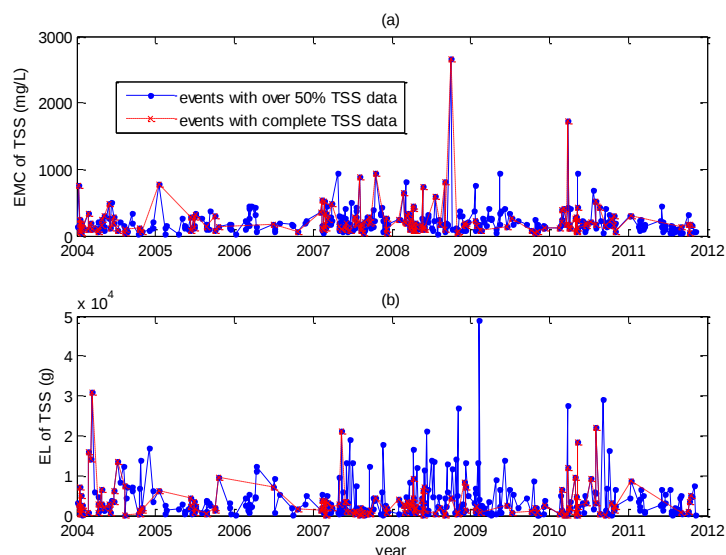


Fig. 44 Séries chronologiques donnant sur une base évènementielle (a) les concentrations moyennes par évènement (b) et les masses associées à Ecully – rejet unitaire de temps de pluie (2004-2011)

11.2 Analyse des tendances d'évolution des quantités de MES (2004-2011)

11.2.1 Site de Chassieu

a) Analyse des distributions de concentrations de MES (Chassieu)

Les distributions de concentrations moyennes (EMC) et les masses évènementielles (EL) ont été étudiées sur l'échantillon des 162 valeurs pour lesquelles hydrogrammes et pollutogrammes en MES étaient complets et l'échantillon des 403 valeurs pour lesquelles hydrogrammes sont complets et pollutogrammes en MES « presque complets ».

Un premier test a été réalisé pour savoir si, du point de vue de la variable EMC, les deux échantillons (celui des 162 et celui des 403 valeurs) provenaient d'une même loi. Selon le test de Kolmogorov- Smirnov (P -value of 62.8%) les deux échantillons proviennent bien d'une même distribution.

Un deuxième test (test Lilliefors, paramètres estimés par maximum de vraisemblance, P -value de 50.0% pour l'échantillon de 162 évènements et de 15.5% pour celui de 403 évènements) a montré que les concentrations moyennes évènementielles suivaient une distribution log-normale, ce qui a été trouvé dans d'autres études (e.g., Mourad et al., 2005; Métadier, Bertrand-Krajewski, 2012). La Fig. 45 donne la superposition de la distribution théorique et de l'histogramme de la variable (EMC).

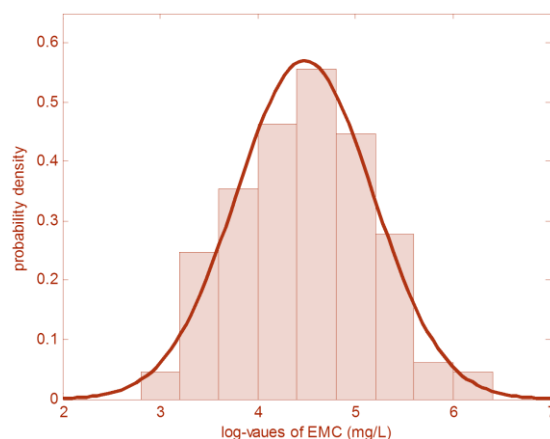


Fig. 45 Histogramme du log des concentrations moyennes évènementielles de MES sur 162 évènements et la densité de probabilité normale ajustée – Chassieu (moyenne 4.48, écart type 0.70)

La Fig. 46 donne la répartition des volumes d'eau évènementiels en fonction des concentrations moyennes de MES sur chaque évènement. Cette représentation montre que l'échantillon des 162 valeurs d'EMC semble assez représentatif tant en termes de volumes que de concentrations moyennes. Elle montre également qu'il n'y a pas de corrélation entre volumes et concentrations moyennes évènementiels (le coefficient de corrélation étant proche de zéro) quelle que soit la taille de l'échantillon.

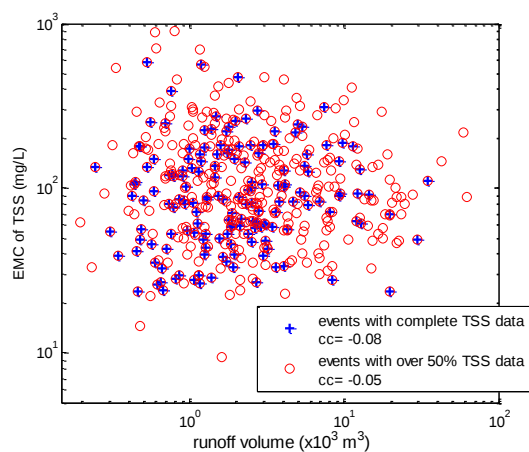


Fig. 46 Représentation des volumes d'eau vs les concentrations moyennes de MES sur chaque évènement – Chassieu

b) Analyse des tendances en matière de quantité de MES (Chassieu)

Le tableau ci-dessous (Table 27) donne les tendances d'évolution pour les variables liées aux MES.

On constate que la concentration en MES n'évolue pas au cours du temps sur la période d'étude. Le volume, quant à lui, évolue. Nous l'avons déjà identifié précédemment et imputé à l'augmentation de l'urbanisation, la pluviométrie n'ayant pas subi d'inflexion sur la même période.

La masse suit une croissance pour l'échantillon le plus grand ($n=403$). On peut logiquement penser que cette accroissement est liée à l'augmentation des volumes au cours du temps qui eux-mêmes sont probablement liés à la croissance de l'urbanisation.

En revanche, on constate que pour l'échantillon le plus faible ($n=162$) l'évolution n'est pas détectable. Cela nous incite à analyser la fiabilité des détections en fonction de la taille de l'échantillon. C'est ce que nous analysons dans le paragraphe suivant.

Table 27 Détection de tendance pour les quantités de MES par temps de pluie - Chassieu (2004-2011)

	Variable (unité)	<i>P-value</i> (%)	Présence de tendance	Pente de Sen (-/an)
Sur les 162 évènements complets	Volume (m ³)	2.3	Oui	118
	Concentration moyenne événementielle en MES - EMC (mg/L)	85.3	Non	-
	Masse de MES - EL (kg)	9.6	Non	-
Sur les 403 évènements présentant un pollutogramme complet à plus de 50%	Volume (m ³)	0.01	Oui	177.7
	Concentration moyenne événementielle en MES - EMC (mg/L)	89.2	Non	-
	Masse de MES - EL (kg)	0.6	Oui	14.7

c) Incertitudes et détection de tendance en fonction de la taille de l'échantillon

Impact des incertitudes de mesures et de l'incomplétude de la série temporelle sur la détection de tendance sur les volumes

Nous avons évalué l'impact des incertitudes liées au mesurage des volumes événementiels puis l'impact d'un nombre plus restreint d'évènements dans les échantillons pour l'analyse des tendances. Rappelons que la détection ou non d'une tendance dans notre approche est réalisée selon la méthodologie synthétisée à la Fig 1 avec un indicateur de décision qui est la *P-value*. L'impact des incertitudes comme de l'incomplétude de la série temporelle sur l'analyse de tendance a été évalué en utilisant la méthode de Monte Carlo.

L'incertitude liée à la mesure du volume événementiel a été calculée dans un premier temps pour toutes les valeurs de l'échantillon (521 évènements). Nous avons ensuite construit 10 000 échantillons des 521 évènements. Pour chacun des 521 évènements le volume événementiel a été tiré au hasard dans une loi normale de moyenne égale à la valeur mesurée et d'écart type égal à l'incertitude. Pour chacun des 10 000 échantillons des 521 évènements pris chronologiquement, la tendance a été évaluée selon la méthodologie habituelle. Une tendance à la hausse a été systématiquement détectée sur les 10 000 échantillons formés

avec une P -value de l'ordre de 1×10^{-5} . L'incertitude de mesure est donc négligeable du point de vue de la détection de tendance puisque l'on obtient toujours la même.

Pour l'incertitude liée à l'incomplétude de la série des volumes, nous avons considéré les 521 évènements comme échantillon de référence. Nous avons ensuite pour différentes tailles n_1 d'échantillons ($n_1 \leq 521$) tiré au hasard chronologiquement n_1 évènements associés à leur volume. Nous avons appliqué à cette sous-série la méthodologie de détection de tendance habituelle et calculé la P -value correspondante. Cette opération pour un n_1 donné a été reproduite 10 000 fois là encore. Un intervalle de confiance à 90% en a été déduit sur la P -value. Ainsi pour chaque taille n_1 d'échantillons de volumes événementiels, nous disposons d'un intervalle de confiance de la P -value et donc d'un intervalle de l'indicateur de détection de tendance (Cf. Fig. 47 (a))

L'examen de la Fig. 47 (a) :

- met en évidence qu'il y a une forte décroissance de la P -value avec la taille de l'échantillon des évènements (l'axe des ordonnées est en échelle log). La taille joue donc un rôle majeur.
- montre qu'en dessous de 300 évènements environ la tendance peut changer suivant l'échantillon avec une forte probabilité. Par exemple pour 100 évènements, la méthode indiquera probablement une absence de tendance (avec une probabilité de 60%) alors que sur la série complète des 521 évènements une tendance claire est détectée.

Les masses dépendent des concentrations en MES ainsi que des volumes. Pour ce qui est des concentrations en MES seules 162 évènements sont disponibles sur les 521 pour lesquels le volume est complet.

Comme pour le volume, l'incertitude liée à la mesure sur les concentrations événementielles a été explorée sur l'échantillon de 162 évènements associés au volume pour former les masses événementielles. « Aucune tendance » est systématiquement détectée (la médiane des P -value est de 9.5 % avec un intervalle de confiance à 90% de [8.4%, 10.5%] supérieure à 5%. Là encore l'incertitude de mesure n'est pas prépondérante dans l'évaluation des tendances.

L'impact de l'incomplétude de l'échantillon des concentrations sur les masses événementielles de MES a été ensuite abordé. De la même manière que précédemment nous avons pour différentes tailles d'échantillons ($n_1 \leq 521$) tirés au hasard n_1 évènements associés à leur volume et pris dans l'ordre chronologique. Pour chaque volume tiré au hasard dans la série chronologique de 521 valeurs, nous avons tiré au hasard une concentration dans la loi de probabilité log-normale dont les paramètres ont été définis précédemment à partir des 162 évènements complets (Cf. a)). Nous avons calculé la masse de MES comme le produit de cette concentration par le volume.

Nous avons appliqué à la sous-série de n_1 valeurs de masses événementielles la méthodologie de détection de tendance habituelle et calculé la P -value correspondante. Cette opération pour un n_1 donné a été reproduite 10 000 fois. Un intervalle de confiance à 90% en a été déduit sur la P -value. Ainsi pour chaque taille n_1 d'échantillons de masses événementielles, nous disposons d'un intervalle de confiance de la P -value et donc d'un intervalle de l'indicateur de détection de tendance (Cf. Fig. 47 (b))

L'examen de la Fig. 47 (b) montre :

- qu'il faut environ 420 évènements pour obtenir une tendance univoque dans un intervalle de confiance à 90% (en l'occurrence une tendance d'évolution) ;
- qu'avec les 162 évènements, la P -value présente un intervalle de confiance à 90% de [0.1%, 70%] ne permettant pas d'indiquer une tendance unique. L'intervalle de confiance est par ailleurs bien plus large que celui lié aux incertitudes de mesures. Là encore le manque de données est une source d'incertitude majeure. Mieux vaut plus de données incertaines que peu de données de très bonne qualité.
- Ici, et c'est ce qui s'est produit durant les tests de tendance (Cf. Table 27), la méthode n'a pas détectée de tendance sur le petit échantillon des 162 évènements complets alors qu'elle a détectée une tendance à la hausse avec les 403 complètes à 50%. Nous accorderons donc davantage de crédits à la hausse des masses de MES.

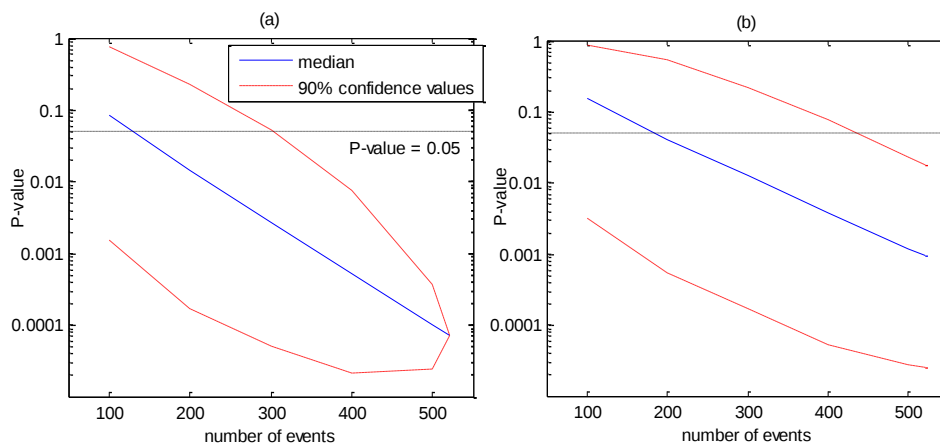


Fig. 47. Détection de tendance (P -values) en fonction du nombre d'évènements dans l'échantillon pour (a) les volumes d'eau événementiels; (b) les masses événementielles de MES

d) Analyse de l'évolution des distributions intra-événementielles de MES (Chassieu) – (répartition des flux de MES au sein d'un évènement)

L'examen intra- événementiel des pollutogrammes de MES permet d'analyser s'il existe au sein de chaque évènement des tendances particulières (position du maximum de concentration par exemple) et si celles-ci évoluent.

L'approche traditionnelle consiste à travailler à partir de courbes adimensionnelle $M(V)$ qui permet de représenter pour un évènement donné la fraction de masse de MES (M) en fonction de la fraction de volume écoulé (V).

Très souvent, plusieurs indicateurs sont utilisés pour rechercher un possible premier flot. Il s'agit de : (i) la charge relative de MES pour 20 % du volume noté V_{20} , (ii) la charge relative de MES pour 30 % du volume noté V_{30} , (iii) la différence maximale noté Max-MV entre la courbe $M(V)$ et la première bissectrice comme utilisée dans Gupta et Saul 1996, Saget et al., 1996 et (iv) le coefficient b dans la loi puissance approximant la loi $M(V)$ sous la forme $M = V^b$, comme utilisé dans Bertrand-Krajewski et al., 1998 ou encore Lacour, 2009.

La Fig. 48 donne pour les 162 évènements complets l'ensemble des courbes $M(V)$. Elle fait apparaître une grande variabilité de ces courbes présentes de part et d'autre de la première bissectrice confirmant ainsi une absence d'effet de premier flot systématique.

La Fig. 49 présente les séries chronologiques des 4 indicateurs (V_{20} , V_{30} , Max-MV et le coefficient b) tirés des 162 évènements complets. Ces quatre indicateurs sont très corrélés (entre 0.5 et 0.9) indiquant qu'ils donnent bien les mêmes types d'informations.

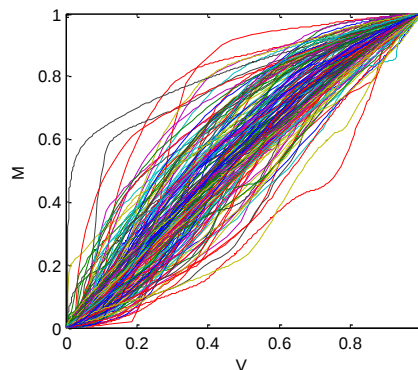


Fig. 48. Courbes $M(V)$ des 162 évènements aux données complètes à Chassieu

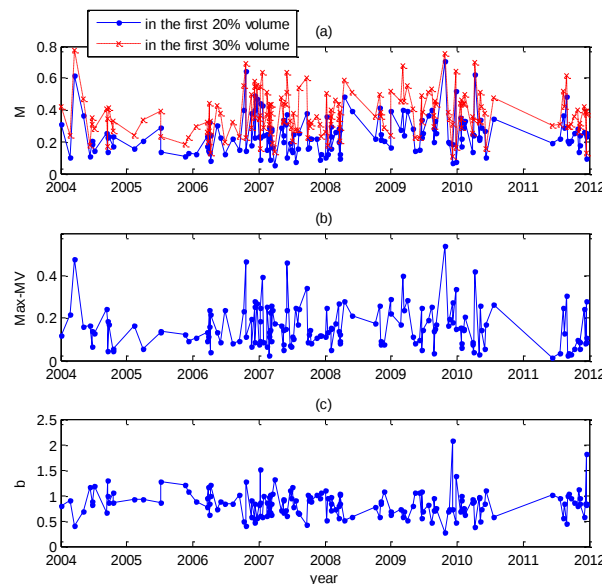


Fig. 49. Séries chronologiques relatives aux quatre indicateurs calculés à partir des 162 évènements complets : (a) V_{20} , V_{30} ; (b) Max-MV ; (c) coefficient b .

Les résultats en termes d'évolution sont donnés ci-dessous (Cf. Table 28). Aucune tendance n'est visible sur la période 2004 à 2011.

Table 28 Détection de tendance sur les paramètres caractérisant la distribution intra-événementielle des MES à Chassieu (2004-2011)

	Paramètres	P-value (%)	Présence de tendance	Pente de Sen (-/an)
Courbes M(V)	V20	6.3	Non	-
	V30	12.7	Non	-
	Max-MV	38.8	Non	-
	b	24.5	Non	-

11.2.2 Site d'Ecully

a) Analyse des MES par temps sec (Ecully)

La Fig. 50 donne les profils journaliers des concentrations en MES par temps sec (i.e. le 5^{ème} et 95^{ème} centile ainsi que le 25^{ème} et 75^{ème} centile). La Fig. 51 montre le profil journalier médian de concentrations en MES superposé à celui des débits. Ils laissent voir deux pics correspondant aux pics de débits de temps sec. Comme il s'agit de rejets domestiques, cette concomitance est tout à fait logique.

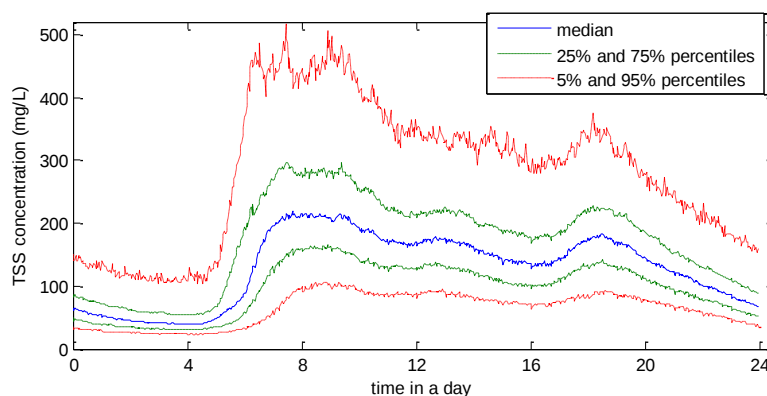


Fig. 50 Profils journaliers des concentrations en MES à Ecully

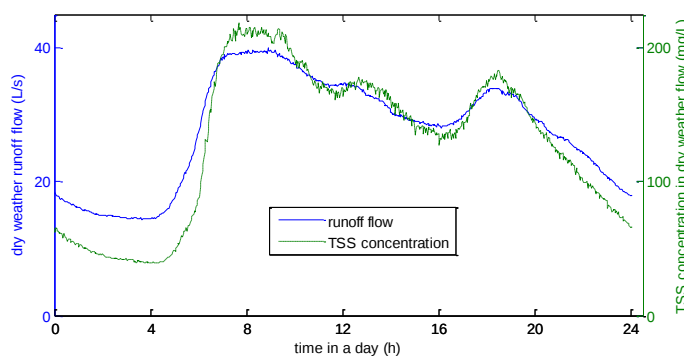


Fig. 51 Profil journalier de concentrations médianes en MES et des débits médians de temps sec (Ecully)

Les résultats en termes de tendance d'évolution des principaux paramètres liés aux apports de MES sur les séries annuelles et mensuelles en temps sec sur la période 2004-2011 sont donnés ci-dessous (Cf. Table 29 - Fig. 44). Aucune tendance n'est détectée à l'échelle annuelle. Une très légère évolution est détectée à l'échelle mensuelle mais les P -values sont proches de 5%. Le bassin versant d'Ecully, pour ce qui est des apports en MES reste relativement stable sur la période 2004-2011.

Table 29 Détection de tendance en matière de concentrations en MES par temps sec à Ecully (2004-2011)

		Test	P -value (%)	Présence de tendance	Pente de Sen (mg/L/an)
Série annuelle	Médiane	Mann-Kendall	17.4	Non	-
	75 ^{ème} centile	Mann-Kendall	26.6	Non	-
	95 ^{ème} centile	Mann-Kendall	26.6	Non	-
Série Mensuelle	Médiane	Mann-Kendall adapté	4.4	Oui	3.6
	75 ^{ème} centile	Mann-Kendall adapté	4.9	Oui	3.8
	95 ^{ème} centile	Mann-Kendall adapté	3.2	Oui	5.5

b) Analyse des quantités de MES par temps de pluie (rejet unitaire) (Ecully)

La Fig. 52 compare les caractéristiques des profils journaliers par temps sec et temps de pluie. Les concentrations de MES sont généralement plus faibles par temps de pluie que par temps sec. Cependant les débits étant plus forts par temps de pluie les rejets de MES sont globalement plus élevés.

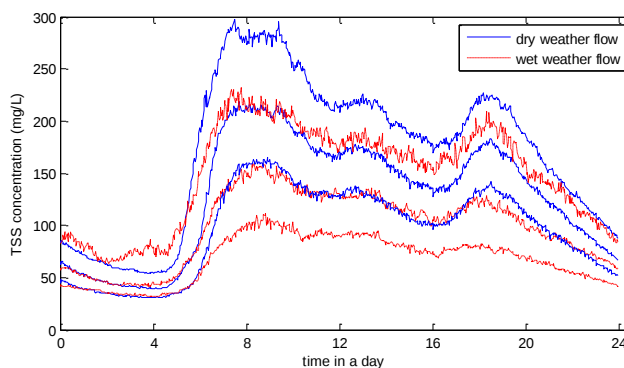


Fig. 52 Comparaison des profils journaliers (25^{ème}, 50^{ème} et 75^{ème} centile) des concentrations en MES par temps sec (1124 jours) et temps de pluie (734 jours) à Ecully

De même qu'à Chassieu la concentration moyenne événementielle en MES (EMC) est log_normalement distribuée (Test Lilliefors - P -value of 50 % pour l'échantillon des 148 événements complets et P -value of 29 % pour les 410 - Cf. Fig. 53).

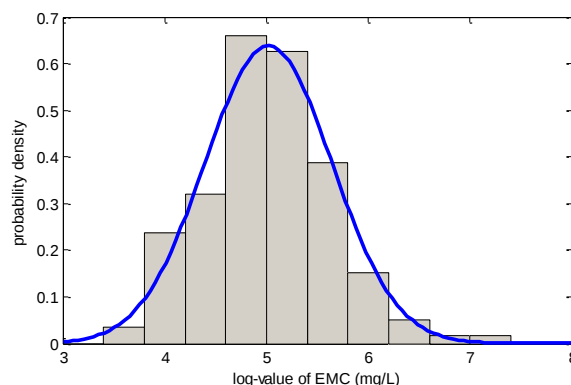


Fig. 53 Histogramme du log des concentrations moyennes évènementielles de MES sur 148 évènements et la densité de probabilité normale ajustée – Ecully (Moyenne 5.02 , écart type 0.625)

La Fig. 54 donne la répartition des volumes d'eau évènementiels en fonction des concentrations moyennes de MES sur chaque évènement. Cette représentation montre là encore que l'échantillon des 148 valeurs d'EMC semble assez représentatif en termes de volumes et de concentrations moyennes. Elle montre également qu'il n'y a toujours pas de corrélation entre volumes et concentrations moyennes évènementiels quelle que soit la taille de l'échantillon.

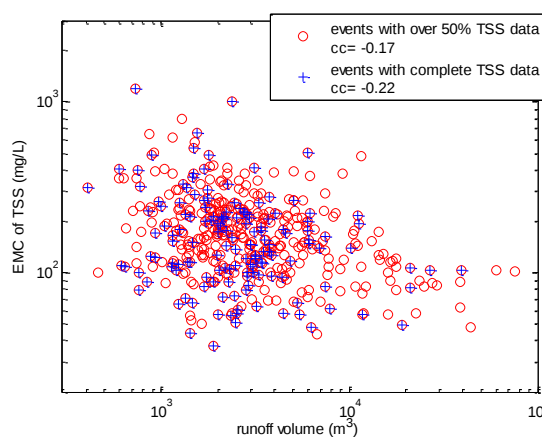


Fig. 54 Représentation des volumes d'eau vs les concentrations moyennes de MES sur chaque évènement – Ecully

Les résultats en termes de tendance d'évolution des volumes, des concentrations moyennes évènementielles ainsi que des masses par temps de pluie sont donnés ci-dessous (Cf. Table 30). Aucune tendance n'est détectée ni en concentration, ni en masse ni en débit. Le bassin versant d'Ecully, pour ce qui est des apports en MES par temps de pluie comme en temps sec est stable sur la période 2004-2011.

Table 30 Détection de tendance en matière de concentrations en MES par temps sec à Ecully (2004-2011)

	Méthode	Variable	P-value (%)	Présence de tendance	Pente de Sen (-/an)
Sur les 148 évènements complets	Mann-Kendall	Volume (m ³)	91.9	Non	-
	Mann-Kendall	Concentration moyenne événementielle en MES - EMC (mg/L)	53.0	Non	-
	Mann-Kendall	Masse de MES - EL (kg)	81.0	Non	-
Sur les 410 évènements complets à plus de 50%	Mann-Kendall	Volume (m ³)	47.9	Non	-
	Mann-Kendall	Concentration moyenne événementielle en MES - EMC (mg/L)	56.1	Non	-
	Mann-Kendall	Masse de MES - EL (kg)	53.0	Non	-

c) Distribution Intra-évènementielle de MES

La Fig. 55 donne pour les 148 évènements complets l'ensemble des courbes M(V). Elle fait apparaître comme pour Chassieu une grande variabilité des ces courbes présentes de part et d'autre de la première bissectrice confirmant aussi une absence d'effet de premier flot systématique.

La Fig. 56 présente les séries chronologiques des 4 indicateurs (V20, V30, Max-MV et coefficient b) tirés des 148 évènements complets. Ces quatre indicateurs sont très corrélés une fois de plus (avec des coefficients de corrélation supérieurs à 0.58).

Les résultats en termes d'évolution sont donnés ci-dessous (Cf. Table 31). Aucune tendance n'est visible sur la période 2004 à 2011. Non seulement il n'y a pas d'effet de premier flot au sens des courbes M(V) mais il n'y a pas de tendance d'évolution.

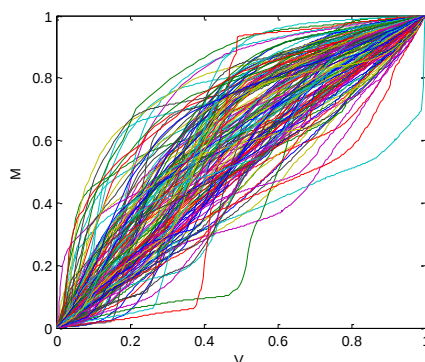


Fig. 55 Courbes M(V) pour les 148 évènements avec données complètes sur Ecully

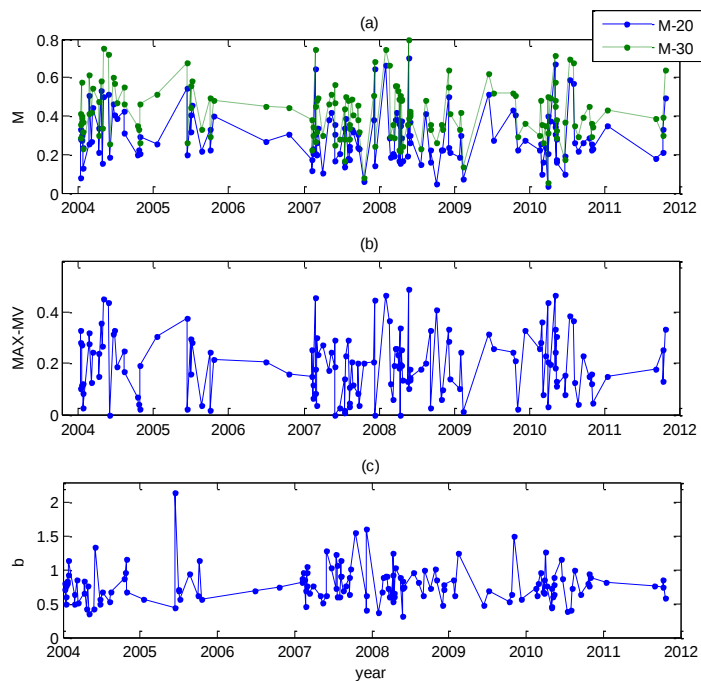


Fig. 56. Variables caractérisant la distribution intra-événementielle des MES à Ecully

Table 31 Détection de tendance sur les variables caractérisant la distribution intra-événementielle des MES à Ecully (2004-2011)

Variables	Méthode	P -value (%)	Présence de tendance	Pente de Sen (-/an)
M_20	Mann Kendall	28.3	Non	-
M_30	Mann Kendall	35.4	Non	-
MAX-MV	Mann Kendall	81.3	Non	-
b	Mann Kendall	45.7	Non	-

11.3 Conclusion sur les tendances d'évolution des quantités de polluants sur les sites de Chassieu et d'Ecully (2004-2011)



L'analyse des chroniques évènementielles de MES sur les deux sites permettent de tirer les conclusions suivantes.

En termes méthodologiques, l'analyse des incertitudes sur les mesures des différentes grandeurs (Volumes à partir des hydrogrammes et concentrations à partir des pollutogrammes pour les masses) montre qu'elles ne sont pas déterminantes sur l'évaluation de la tendance à long terme. L'incomplétude des séries dans le temps est bien plus importante. Caricaturalement, il vaut donc mieux mesurer plus d'évènements de manière moins précise que peu d'évènements de manière précise. L'étude montre qu'à Chassieu par exemple, sur les 8 années, il faut plus de 420 évènements pour obtenir une tendance unique (à 90%).

En termes de rejets polluants par temps de pluie, sur les deux sites et sur la période, les concentrations en MES ne montrent pas de tendance d'évolution.

L'augmentation des charges polluantes, quand elle existe (à Chassieu par exemple) est uniquement due à l'augmentation des volumes d'eau qui eux mêmes ne dépendent que de l'évolution de l'urbanisation (la pluie n'ayant pas montré de tendance d'évolution).

Ecully ne présente aucune tendance d'évolution en termes de MES, ne présente pas d'évolution en termes de débits et de volumes. Les flux de MES ne montrent donc pas d'évolution sur ce site.

Au vu de nos analyses, il est intéressant de constater que pour maîtriser la pollution particulière il est primordial de bien maîtriser les flux d'eau, les niveaux de rejet de MES restants stationnaires. Les solutions de type infiltration sont donc très adaptées pour limiter les rejets polluants des bassins versants urbains du type de ceux étudiés.

Pour ce qui est de la distribution intra-évènementielle (répartition des flux de MES au sein d'un évènement), non seulement il n'y a pas d'effet de premier flot au sens des courbes M(V) (fraction de masse en fonction de la fraction du volume) mais il n'y a pas de tendance d'évolution.

12 Analyse des tendances en termes de concentrations en polluants

Les concentrations en polluants n'étant pas acquises en continu ou de manière intensive en raison des coûts induits, il en ressort que les campagnes de mesure restent en plus faible nombre.

12.1 Données et prétraitement des données sur le site de Chassieu (2004-2013)

L'analyse des évolutions temporelles des séries demandent des campagnes nombreuses et réparties au cours du temps. Parmi ces séries de polluants figurent les HAPs et les métaux lourds sur Chassieu que sur Ecully.

Six HAPs (i.e., Benzo (b) fluoranthène (BbF), Benzo (k) fluoranthène (BkF), Benzo (a) pyrène (BaP), Benzo (g. h. i) pérylène (Bper), Indéno (1, 2,3-c, d) pyrène (IP) and fluoranthène (Flh) ont été analysées et quantifiées sur un nombre acceptable de campagnes (23 à Chassieu). On trouvera à la Fig. 57 les chroniques de ces concentrations. Quand une concentration est en dessous de la limite de quantification, la concentration a été prise égale à la limite.

Quatre métaux sont plus particulièrement (Cd, Cu, Pb, Zn). Les concentrations vont dans le sens : $Cd < Pb < Cu < Zn$. Notons que les concentrations en Cd, Cu and Pb ont été souvent inférieurs aux limites de détection. Ainsi seules les concentrations en Zn permettent-elles une étude de l'évolution sur 33 campagnes à Chassieu (Cf. Fig. 58).

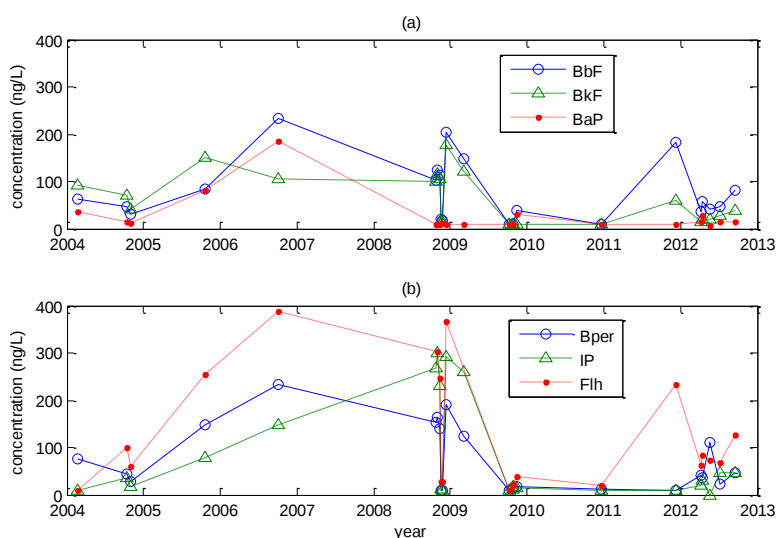


Fig. 57 Concentrations en HAPs au cours du temps à Chassieu (23 campagnes) Benzo (b) fluoranthène (BbF), Benzo (k) fluoranthène (BkF), Benzo (a) pyrène (BaP), Benzo (g. h. i) pérylène (Bper), Indéno (1, 2,3-c, d) pyrène (IP) et fluoranthène (Flh)

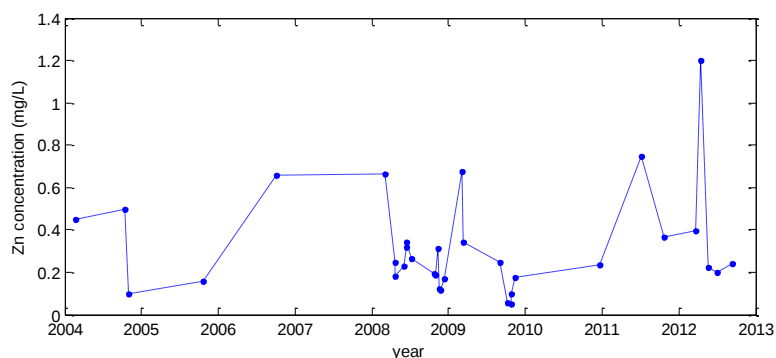


Fig. 58 Concentrations de Zn au cours du temps à Chassieu (33 campagnes)

12.2 Analyse des tendances

Les résultats en termes d'évolution sont donnés ci-dessous (Cf. Table 32). Aucune tendance n'est détectée sur la période 2004 à 2013. Cependant le nombre de campagnes reste encore faible pour ce type d'étude et compte tenu de la grande variabilité connue sur ces concentrations par temps de pluie (e.g. Ellis et al 2005, Gasperi et al, 2015). Les résultats en termes ne sont donc pas très représentatifs.

Table 32 Détection de tendance des concentrations moyennes événementielles en métaux lourds et HAPs à Chassieu

Variable	Méthode	<i>P-value</i> (%)	Présence de tendance	Pente de Sen
Zn	Mann Kendall	86.5%	Non	-
BbF	Mann Kendall	49.2	Non	-
BkF	Mann Kendall	10.2	Non	-
BaP	Mann Kendall	31.6	Non	-
Bper	Mann Kendall	21.5	Non	-
IP	Mann Kendall	44.4	Non	-
Flh	Mann Kendall	95.2	Non	-

12.3 Conclusion sur les tendances d'évolution des concentrations en métaux et HAPs (2004-2013)

Métaux



HAP

Sur des échantillons comparables en termes de prélèvements et d'analyses, on n'observe pas de tendances d'évolution vis-à-vis des concentrations en Zn et de HAPs (Benzo (b) fluoranthène, Benzo (k) fluoranthène, Benzo (a) pyrène, Benzo (g. h. i) pérylène, Indéno (1, 2,3-c, d) pyrène et fluoranthène).

Les échantillons homogènes de 2004 à 2013 sont assez réduits en taille et ne permettent pas de tirer des conclusions fiables. Nous n'avons donc pas poussé plus avant l'analyse. Il sera nécessaire de reprendre cette étude lorsque la taille des échantillons sera plus large.

13 Synthèse & conclusions

Pour étudier l'évolution possible dans le temps de grandeurs d'intérêt (traitées en séries chronologiques annuelles, mensuelles ou évènementielles), une méthode statistique de test de tendance a été choisie et testée. Elle est basée classiquement sur le test statistique de Mann-Kendall qui a été adapté pour tenir compte de la saisonnalité et de l'autocorrélation des séries. Notons que les inflexions recherchées dans les séries sont de type monotonique (tendance à la hausse ou à la baisse), aucune rupture n'ayant été mise en évidence.

Nous avons exploité plus particulièrement les séries acquises sur 3 sites de l'OTHU : (i) Chassieu qui est un bassin versant urbanisé à plus de 70% sur 185 ha à dominante industrielle drainé par un réseau séparatif pluvial et aboutissant à un complexe composé d'un bassin de retenue et un d'infiltration ayant pour exutoire une nappe située à 13 m de profondeur, (ii) Ecully qui est un bassin versant de 245 ha urbanisé à plus de 40% à dominante résidentielle et drainé par un réseau unitaire (eaux domestiques et eaux pluviales) ; il présente à son exutoire un déversoir d'orage vers un ruisseau urbain, (iii) La Léchère est bassin versant péri-urbain en développement de 410 ha (présentant des zones rurales et urbaines équipées de réseaux unitaires).

Les grandeurs d'intérêt sont liées à des séries de questions particulières.

La première est liée à l'évolution possible du climat (pluie et température d'air) qui pourrait impacter les modes de gestion des eaux pluviales en milieu urbain. Ainsi nous sommes-nous demandé s'il y avait des modifications des caractéristiques annuelles, mensuelles, évènementielles de la pluie, en intensités, en hauteurs précipitées, en durée ou encore s'il y avait des évolutions dans les séries mensuelles, annuelles des températures moyennes, médianes, minimales, maximales.

Sur la période étudiée 1986 à 2013 (28 ans à partir de données hors OTHU), il s'est avéré que les caractéristiques de pluies, que ce soit sur des séries mensuelles, annuelles ou évènementielles n'ont montré aucune tendance d'évolution. Sur la même période en revanche un réchauffement a été détecté pour les températures moyennes, médianes annuelles et pour toutes les caractéristiques mensuelles avec le même ordre de grandeur de taux de croissance (+0.033 à 0.06°C /an).

La tendance d'évolution dépend bien évidemment de la longueur des chroniques. Sur de longues chroniques (de 28 à 45 ans) les températures d'air montrent des évolutions ; sur des périodes d'une dizaine d'années les tendances ne sont pas détectées.

Ainsi, si à des échelles de plusieurs décennies (30 ans environ) on ne décèle pas d'évolution de la pluie, il n'en est pas de même pour les températures d'air pour lesquelles des augmentations sont perceptibles. Pour les gestionnaires, souvent enclins à considérer la modification des régimes de pluies comme facteur majeur du changement climatique, on peut constater que l'évolution des températures est également à considérer notamment vis-à-vis de la réflexion à mener pour le développement de nouvelles techniques (techniques alternatives par exemple).

La réflexion vis-à-vis de ces systèmes est double. Comme ils font appel pour beaucoup à de la végétalisation (i) prendre en compte ces inflexions de température dans la conception peut-être judicieux, (ii) s'en saisir pour lutter contre ce réchauffement pourrait être encore plus judicieux. Encore faudra-t-il savoir si les effets de ces techniques sont suffisants pour améliorer les conditions climatiques en milieu anthropisé et à quelle échelle.



Notons que notre étude ne permet pas de conclure sur les causes exactes du réchauffement.

La deuxième série de questions concerne l'impact de l'urbanisation sur les nappes et l'impact de l'infiltration intentionnelle (via un bassin d'infiltration) tant en termes de niveau que de thermie.

L'impact qualitatif n'a pas été abordé car les études antérieures sur le site ne montrent pas d'effet des eaux pluviales sur la qualité de nappe du point de vue des métaux, des hydrocarbures ou des COV (e.g. Datry, 2003). Pour d'autres polluants les chroniques ne sont pas assez longues.

Sur la période 2003-2014 (12 ans) les variations de hauteurs de nappe n'ont pas évolué en aval du bassin d'infiltration. Les fluctuations locales sont très importantes.

En amont la tendance n'est pas claire. Si elle existe, elle est encore faiblement perceptible et irait plutôt dans le sens d'une baisse. Cela pourrait être expliqué par l'imperméabilisation qui augmente sur le bassin versant mais est-elle suffisante pour expliquer une baisse de niveau de nappe ? Rien ne le prouve.

Sur la période 2003-2013 (11 ans), les moyennes, médianes, min et max de la température d'eau de nappe en amont du dispositif d'infiltration, que ce soit sur les séries annuelles ou mensuelles ont subi une augmentation de l'ordre de +0.2 à + 0.3°C. L'écart entre min et max à l'échelle annuelle, quant à lui, n'évolue pas.

En aval il en va de même pour les caractéristiques observées sur les séries mensuelles. Sur les séries annuelles les températures moyennes, médianes ont augmenté mais pas les min ni les max. Les différences min-max restent également sans tendance d'évolution.

Il est intéressant de rappeler que s'il n'y a pas d'évolution sur les 11 ans pour les différences entre les min et les max, ces différences de températures sont bien plus importantes à l'aval qu'en amont (en moyennes de 0.2 °C en amont et de 1.8°C en aval) confirmant les observations de A. Foulquier et al (2009) qui avaient pointé le fait que les infiltrations des eaux pluviales issues du bassin d'infiltration exacerbaient les écarts de températures à l'échelle d'un évènement.

Alors que sur des périodes similaires, on ne constate pas d'évolution de température d'air, ni de la température d'eau d'alimentation, la température de la nappe en amont du bassin d'infiltration subit une augmentation d'origine probablement anthropique lié à des usages spécifiques (e.g. utilisation des pompes à chaleur). En aval immédiat il y a également une augmentation de température moyenne et médiane au cours du temps qui est plus importante qu'en amont (entre 1.5 et plus de 2 fois plus importante).

L'effet du bassin d'infiltration sur le régime thermique à long terme n'est pas à écarter. Foulquier et al (2009) avaient expliqué par comparaison avec d'autres bassins d'infiltration que le rapport surface active / surface d'infiltration jouait un rôle majeur dans la perturbation du régime thermique des eaux en aval de bassins d'infiltration. Cette perturbation s'observe également sur le long terme. Ces résultats renforcent l'intérêt des techniques de gestion des eaux pluviales à la source qui présentent des rapports surface active / surface d'infiltration bien plus équilibrés.

La troisième série de questions concerne l'évolution des caractéristiques des rejets des bassins versants urbains et péri-urbains

Alors que la pluviométrie est restée stationnaire, l'idée était d'examiner si les bassins versants supposés stables en termes d'urbanisation (Chassieu et Ecully) montraient une quelconque évolution en matière de rejet (évolution des quantités et/ou de la qualité). La qualité a été évaluée en première approche à l'aide

d'un indicateur de pollution particulaire suivi en continu : les MES. Une part importante des polluants est en effet portée sur les phases particulières comme certains métaux et les hydrocarbures. L'idée était également de voir si l'évolution d'un bassin péri-urbain (La Léchère) sur une période assez courte (9.5 ans) était détectable.

Les résultats sont différents en termes de quantités d'eau (débits, volumes) selon les sites. Une augmentation des quantités d'eau est décelée logiquement sur La Léchère et moins logiquement sur le bassin de Chassieu qui n'était pas censé se développer. Ecully n'évolue pas, ni sur les caractéristiques de temps sec (eaux domestiques) ni sur celles de temps de pluie. Son urbanisation est stable.

Pour Ecully et Chassieu, les concentrations en MES n'ont pas subi d'évolution, les apports sont donc assez stables de ce point de vue.

Les masses qui dépendent des volumes laissent apparaître une augmentation sur Chassieu. C'est donc bien l'augmentation de l'urbanisation et du mode de drainage centralisé qui tend à accroître les rejets des flux polluants. Une des solutions aurait été de modifier les modes de drainage notamment pour les zones qui se sont densifiées.

Pour ce qui est de la distribution intra-événementielle (répartition des flux de MES au sein d'un événement), notre étude a montré que non seulement il n'y a pas d'effet de premier flot au sens des courbes $M(V)$ (fraction de masse en fonction de la fraction du volume) mais il n'y a pas de tendance d'évolution aussi bien sur Chassieu qu'Ecully.

En termes méthodologiques pour ce qui est de l'analyse des rejets polluants et l'évaluation de la tendance à long terme, notre recherche a clairement montré que les incertitudes liées à l'incomplétude des séries (débitmétriques, ou de MES en continu) sont bien plus importantes que les incertitudes de mesures des grandeurs.

14 Références bibliographiques

- Aziz O.I.A., Burn D.H. (2006). Trends and variability in the hydrological regime of the Mackenzie river basin. *Journal of Hydrology*. 319: 282-294.
- Barraud S., Gibert J., Winiarski T., Bertrand Krajewski J.-L. (2002). Implementation of a monitoring system to measure impact of stormwater runoff infiltration. *Water Science & Technology*, 45(3): 203-210.
- Bertrand-Krajewski J.-L., Chebbo G., Saget A. (1998). Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon. *Water Research*. 32(8): 2341-2356.
- Braud I., Breil P., Thollet F., Lagouy M., Branger F., Jacqueminet C., Kermadi S., Michel K. (2013). Evidence of the impact of urbanization on the hydrological regime of a medium-sized periurban catchment in France, *Journal of Hydrology*, 485: 5-23.
- Burn D.H., Elnur M.A.H. (2002). Detection of hydrologic trends and variability. *Journal of Hydrology*. 255: 107-122.
- Cochrane D. and G.H. Orcutt (1949). Applications of least squares regression to relationships containing auto-correlated errors. *Journal of American Statistical Association*. 44, 32-61.
- Datry T., Malard F., Vitry L., Hervant F. & J. Gibert (2003). Solute dynamics in the bed sediments of a stormwater infiltration basin. *Journal of Hydrology*. 273, 217-233
- Deletic A. (1998). The first flush load of urban surface runoff. *Water Research*. 32: 2462-2470.
- Foulquier A., Malard F., Barraud S., Gibert J. (2009) Thermal influence of urban groundwater recharge from stormwater infiltration basins. *Hydrological Processes*. 23: 1701-1713.
- Ellis B., Marsalek J. & Chocat B. (2005). Article 97: Urban water quality. Encyclopedia of hydrological science. Edited by M G Anderson, John Wiley & sons.
- Gasperi J., Sebastian C., Ruban V., Delamain M., Percot S., Wiest L., Mirande C., Caupos E., Demare D., Diallo Kessoo M., Saad M., Schwartz J.-J., Dubois P., Fratta C., Wolff H., Moilleron R., Chebbo G., Cren C., Millet M., Barraud S., Gromaire M.-C. (2014) Micropollutants in urban stormwater: occurrence, concentrations and atmospheric contribution for a wide range of contaminants on three French catchments. *Environmental Science and Pollution Research*. 21(8), 5267-5281.
- Gocic M., Trajkovic S. (2013) Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. *Global and Planetary Change*. 100: 172-182.

- Gupta K., Saul A.J. (1996) Specific relationship for the first flush load in combined sewer flows. *Water research*. 30: 1244-1252.
- Hess A., Iyer H., Malm W. (2001). Linear trend analysis: a comparison of methods. *Atmospheric Environment*. 35: 5211-5222.
- Jankowfsky S., Branger F., Braud I., Rodriguez F., Debionne S., Viallet P. (2014). Assessing anthropogenic influence on the hydrology of small peri-urban catchments: development of the object-oriented PUMMA model by integrating urban and rural hydrological models, *Journal of Hydrology*, 517: 1056-1071.
- Jhajharia D., Yadav B.K., Maske S., Chattopadhyay S., Kar A.K. (2012) Identification of trends in rainfall, rainy days and 24h maximum rainfall over subtropical Assam in Northeast India. *C.R. Geoscience*. 344: 1-13.
- Lacour C., Joannis C., Chebbo G. (2009) Assessment of annual pollutant loads in combined sewers from continuous turbidity measurements: sensitivity to calibration data. *Water Research*. 43(8): 2179-2190.
- Langeveld J.G., Veldkamp R.G., Clemens F. (2005) Suspended solids transport: an analysis based on turbidity measurements and event based fully calibrated hydrodynamic models. *Water Science and Technology*. 52(3): 93-101.
- Lopez B., Leynet, Blum A., Baran N. (2011). Evaluation des tendances d'évolution des concentrations en polluants dans les eaux souterraines – Revue des méthodes statistiques existantes et recommandations pour la mise en œuvre de la DCE. Rapport ONEMA/BRGM. Accessible sur : http://www.onema.fr/IMG/pdf/2011_032.pdf (consulté 12/01/2014)
- Marmonier P., Maazouzi C., Foulquier A., Navel S., François C., Hervant F., Mermillod-Blondin F., Vieney A., Barraud S., Togola A., Piscart C. (2013). The use of crustaceans as sentinel organisms to evaluate groundwater ecological quality. *Ecological Engineering*. 57(2013), 118-132. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.04.009>.
- Métadier M., Bertrand-Krajewski J.-L. (2011). Assessing dry weather flow contribution in TSS and COD storm event loads in combined sewer systems. *Water Science and Technology*. 63(12), 2983-2991.
- Métadier M., Bertrand-Krajewski J.-L. (2012). Pollutographs, concentrations, loads and intra-event mass distributions of pollutants in urban wet weather discharges calculated from long term on line turbidity measurements. *Water Research*. 46(20): 6836-6856.
- Mourad M., Bertrand-Krajewski J.-L., Chebbo G. (2005). Calibration and validation of multiple regression models for stormwater quality prediction: data partitioning, effect of dataset size and characteristics. *Water Science and Technology*, 52(3), 45-52.

- Partal T., Kahya E. (2006). Trend analysis in Turkish precipitation data. *Hydrological processes*. 20: 2011-2026.
- Rioust E. (2012). *Gouverner l'incertain : adaptation, résilience et évolutions dans la gestion du risque d'inondation urbaine - Les services d'assainissement de la Seine-Saint-Denis et du Val-de-Marne face au changement climatique*, Thèse de Doctorat de l'ENPC / Université Paris Est. 427 p.
- Saget A. Chebbo G., Bertrand-Krajewski J.-L. (1996). The first flush in sewer systems. *Water Science and Technology*. 60(11): 2749-2757.
- Sang Y.-F., Wang Z., Liu C. (2014). Comparison of the MK test and EMD method for trend identification in hydrological time series. *Journal of Hydrology*. 510: 293-298.
- Sen P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau, *Journal of American Statistical Association*. 63, 1379-1389.
- Sun S., Barraud S., Castebrunet H., Branger F., Braud I. Urban hydrological trend analysis based on data analysis and a conceptual rainfall-runoff model, *en préparation*
- Von Storch H., Navarra A. (1995). *Analysis of climate variability- Applications of statistical techniques*. Springer-Verlag. New York.
- Yue S., Pilon P., Phinney B., Cavadias G. (2002). The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological Processes*. 16: 1807-1829.

Annexes

Annexe 1 Trend detection methods for auto-correlated data tested on synthetic data

The efficiencies of different methods for trend detection on data with different degrees of serial correlations are discussed based on synthetic data.

Synthetic time series are created to test different approaches for trend detection using the Monte Carlo method. One-lag auto-correlated time series are created with a mean of 0 and a standard deviation of 1. The length of the time series is set as 120, corresponding to the length of a monthly data series in ten ans. Different one-lag auto-correlation coefficients (0:0.2:0.8) are assumed.

After an auto-correlated time series is generated, a linear slope (0:0.05:0.2) is superimposed on the time series. In total 25 cases of synthetic time series with combinations of different autocorrelation coefficients and linear slopes are considered.

The false rejection rate (type I error) and the power (related to type II error) are estimated for each test. The false rejection rate is the probability that a given method rejects the null hypothesis when in fact the null hypothesis is true. The false rejection rate should equal the significance level (α) of a test if the test is properly set. The power is defined as the probability that a test rejects the null hypothesis when in fact the alternative hypothesis is true. A type II error is that a test accepts a null hypothesis when it is actually false. If β is the probability of a type II error, the power of a test is $1-\beta$.

The false rejection rate and the power are estimated for each trend detection test based on 10000 random samples of time series with predefined one-lag autocorrelation coefficient and linear slope. Table 33 shows the results using trend detection methods based on the linear regression method.

Table 33 Trend test results using linear regression with significance level of 5%

Autocorrelation coefficient	trend	Simple ordinary least square		Autocorrelation coefficient in linear regression		Autocorrelated noise	
		False rejection rate (%)	Power (%)	False rejection rate (%)	Power (%)	False rejection rate (%)	Power (%)
0	0	5.4	-	5.1	-	5.8	-
0.2	0	10.7	-	5.2	-	6.3	-
0.4	0	29.6	-	5.7	-	6.8	-
0.6	0	32.7	-	6.8	-	7.6	-
0.8	0	51.3	-	8.1	-	11.8	-
0	0.05	-	35.6	-	33.8	-	35.9
0.2	0.05	-	38.5	-	24.7	-	26.4
0.4	0.05	-	41.2	-	17.7	-	20.3
0.6	0.05	-	46.5	-	13.8	-	16.3
0.8	0.05	-	57.7	-	10.8	-	16.6
0	0.1	-	88.3	-	86.2	-	87.0
0.2	0.1	-	83.3	-	70.9	-	72.9
0.4	0.1	-	78.6	-	52.1	-	55.6
0.6	0.1	-	73.6	-	35.0	-	40.3
0.8	0.1	-	72.6	-	21.8	-	29.4
0	0.15	-	99.7	-	99.6	-	99.6
0.2	0.15	-	98.9	-	95.9	-	96.6
0.4	0.15	-	96.6	-	84.8	-	87.2
0.6	0.15	-	92.6	-	63.2	-	68.4
0.8	0.15	-	85.9	-	36.6	-	47.2
0	0.2	-	100.0	-	100.0	-	100.0
0.2	0.2	-	100.0	-	99.9	-	99.9
0.4	0.2	-	99.8	-	97.5	-	98.2
0.6	0.2	-	98.7	-	84.4	-	89.6
0.8	0.2	-	94.5	-	53.3	-	66.6

When tested on pure white noise time series (without autocorrelation and trend), all the three methods obtain false rejection rates very close to the significance level of 5% of the tests. This is not surprising because the linear regression based test is designed for white-noise data. However, when autocorrelation is present in a time series without a trend, the simple ordinary linear regression method wrongly rejects the null hypothesis with much higher probability in comparison to the predefined significance level of 5% and

the false rejection rate increases as the autocorrelation effect increases. This is because the autocorrelation effect somehow behaves like a trend in short periods of time and the test is unable to distinguish between the trend and the autocorrelation effect.

When a time series is composed of a linear trend and white random noises (but without autocorrelation effect), the power of the test based on the first approach varies depending on the actual slope. The test is more powerful when applied to a time series with a more significant slope. This is because the evaluated confidence interval for the slope can possibly bracket 0 when the linear slope is insignificant and the uncertainty in slope derived from a propagation of errors (the model residuals) is relatively wide. The power of a test thus depends on the actual slope and the variance of white noises from which the slope uncertainty is derived. The other two tests give similar results when applied to time series with a trend but without data autocorrelation.

The power of a test is not directly linked to the predefined significance level α of the test. Hence attention should be paid when interpreting the test results. If a test denies the existence of a slope, the probability of wrong indication of the test should be equal to the significant level. However, if a test confirms the existence of a slope, we cannot tell the confidence level of the result based on the significance level of the test.

When a time series contains data autocorrelation together with a trend, the power of the test based on the simple linear regression is affected by the presence of data autocorrelation. The influence of the autocorrelation is uncertain, that is, the power of the test may be increased or decreased due to the presence of data autocorrelation, depending on the magnitude of the slope. When the other two methods considering autocorrelation are applied, the power of a test is generally lower than the case without autocorrelation. This is likely due to the complex interaction of the trend and the autocorrelation and the autocorrelation effect is probably overestimated in linear regression. In brief, none of the above methods gives ideal result for the false rejection rate or the power of a test for time series involving data autocorrelation. It is difficult to address the interaction between the trend and autocorrelation effects when both of them exist in a time series using linear regression.

The test results on synthetic time series using the Mann-Kendall based method are listed in Table 34.

Table 34 Trend test results using Mann-Kendall based methods with significant level of 5%

Autocorrelation	trend	Direct Mann-Kendall test		Mann-Kendall test after pre-whitening data		Mann-Kendall test after pre-whitening data	
		False reject (%)	Power (%)	False reject (%)	Power (%)	False reject (%)	Power (%)
0	0	4.7	-	4.7	-	5.7	-
0.2	0	10.6	-	5.1	-	5.5	-
0.4	0	19.1	-	4.9	-	6.4	-
0.6	0	30.1	-	5.0	-	7.3	-
0.8	0	51.2	-	4.7	-	10.9	-
0	0.05	-	34.0	-	31.1	-	34.0
0.2	0.05	-	36.7	-	21.6	-	34.3
0.4	0.05	-	38.9	-	15.2	-	33.2
0.6	0.05	-	45.4	-	10.3	-	33.1
0.8	0.05	-	55.4	-	7.3	-	34.2
0	0.1	-	86.4	-	83.2	-	85.7
0.2	0.1	-	82.5	-	65.8	-	85.3
0.4	0.1	-	77.2	-	45.9	-	85.7
0.6	0.1	-	71.7	-	26.3	-	85.8
0.8	0.1	-	70.0	-	12.2	-	85.6
0	0.15	-	99.7	-	99.3	-	99.5
0.2	0.15	-	98.5	-	94.3	-	99.4
0.4	0.15	-	95.9	-	78.1	-	99.6
0.6	0.15	-	91.9	-	51.2	-	99.5
0.8	0.15	-	83.6	-	20.2	-	99.5
0	0.2	-	100.0	-	100.0	-	100.0
0.2	0.2	-	100.0	-	99.6	-	100.0
0.4	0.2	-	99.8	-	94.8	-	100.0
0.6	0.2	-	98.6	-	72.4	-	100.0
0.8	0.2	-	93.8	-	28.2	-	100.0

In all cases, the first approach (the original Mann-Kendall test) gives similar results to those by the simple linear regression. More specifically, when tested on a white-noise time series, the test provides correct false rejection rate equal to the significance level of the test. But this test gives much higher false rejection rates when autocorrelation is present. The second approach can perfectly remove the autocorrelation effect and gives correct false rejection rate with data autocorrelation in time series while the third approach can partly remove the autocorrelation effect and provides slightly higher false rejection rate.

When a time series comprises a trend, similarly to the linear regression based tests, the power of the Mann-Kendall test based methods depends on the significance of the actual slope and the variance of the random component. The original Mann-Kendall test is seriously influenced by data autocorrelation. The second method obviously overestimates the autocorrelation effect because a trend also leads to autocorrelation and the pre-whitening process removes a part of the trend. Thus the power of this method is low when a trend exists. The third method pre-whitening the time series based on Eq. (7) seems to have equal power to when applied to time series without autocorrelation. It means that the regression based on Eq. (7) can reasonably differentiate between a trend and an autocorrelation effect.

Among all the methods being tested, the adapted Mann-Kendall after pre-whitening the data with autocorrelation coefficient evaluated based on Eq. (7) offers the most reasonable results.

Annexe 2 : Filling rainfall data gaps using the Kriging method

Greater Lyon covers an area of around 51500 ha, including the city of Lyon and surrounding suburbs. The whole area is equipped with a rain gauge network of around 30 tipping bucket rain gauges. Fig 59 shows the locations of the rain gauges in Greater Lyon. The rainfall time series are available from 1986 to 2013 with a six-minute time step. When the rain gauge does not work or when the recorded data presents an abnormal behavior, the corresponding time steps are remarked as missing data.

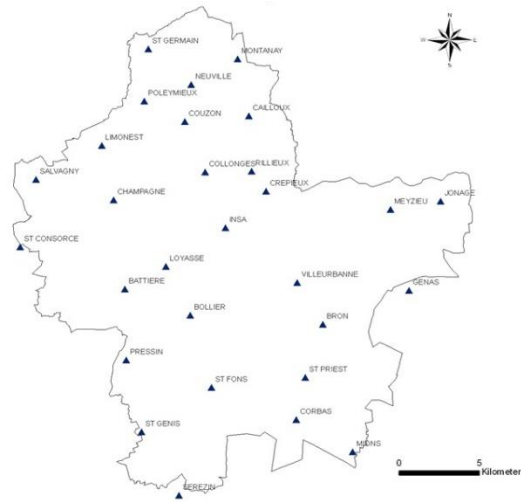


Fig 59 Rain gauges in Greater Lyon

Rainfall data at the gauge of Bron (Noted as z_0 in the following text) located in the Chassieu catchment is of interest. Around 7.4% data is missing at the gauge of Bron between 1986 and 2013. Rainfall data at three other rainfall gauges, i.e., Villeurbanne (noted as z_1), St Priest (z_2) and Genas (z_3) are used to fill the missing rainfall data at Bron. Table A shows the distances between different rain gauges.

Table A Distances between rain gauges (m)

	Bron (Chassieu) z_0	Villeurbanne z_1	St Priest z_2	Genas z_3
Bron (Chassieu) z_0	-	3156	3596	5804
Villeurbanne z_1		-	6162	6985
St Priest z_2			-	8572
Genas z_3				-

Kriging is an interpolation method based on regression using observed values of surrounding data points. The basic idea of kriging is to estimate the value of a function at a given point by computing a weighted average of the known values of the function in the neighborhood of the point. The weights of known values are determined according to spatial covariance values.

All interpolation algorithms (e.g., inverse distance squared, splines, radial basis functions, and triangulation) estimate the value at a given location as a weighted sum of data values at surrounding locations. Almost all algorithms assign weights according to functions that give a decreasing weight with a increasing separation distance. Kriging assigns weights according to a (moderately) data-driven weighting function, rather than an arbitrary function. But it is still just an interpolation algorithm and will give very similar results to others in many cases. An advantage of Kriging interpolation is that it can provide estimates of estimation errors (kriging variance).

A Kriging estimator is a linear regression estimator defined as:

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n w_i z(x_i) \quad (12)$$

Where $z^*(x_0)$ is the estimated value of the real value $z(x_0)$, x_0 and x_i indicate locations, and w_i is the kriging weight assigned to datum $z(x_i)$ for the estimation of $z^*(x_0)$. An unbiased estimation of $z^*(x_0)$ requires $\sum_{i=1}^n w_i = 1$.

For simplification, $z(x_i)$ is written as z_i in the following text. The Kriging method minimizes the variance of the estimation error $e = z^*(x_0) - z(x_0)$:

$$\begin{aligned} \sigma^2(e) &= \text{var}\left(\sum_{i=1}^n w_i z_i - z_0\right) \\ &= \text{var}\left(\sum_{i=1}^n w_i z_i\right) + \text{var}(z_0) - 2 \text{cov}\left(\sum_{i=1}^n w_i z_i, z_0\right) \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i w_j \text{cov}(z_i, z_j) + \text{var}(z_0) - 2 \sum_{i=1}^n w_i \text{cov}(z_i, z_0) \end{aligned} \quad (13)$$

In order to minimize the error variance $\sigma^2(e)$ subject to the constraint $\sum_{i=1}^n w_i = 1$, the function combining

Eq. (13) and a Lagrange multiplier is minimized with respect to the weights w_i and the Lagrangian multiplier μ :

$$L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i w_j \text{cov}(z_i, z_j) + \text{var}(z_0) - 2 \sum_{i=1}^n w_i \text{cov}(z_i, z_0) + 2\mu(1 - \sum_{i=1}^n w_i) \quad (14)$$

To minimize Eq. (14), the derivatives of the expression with respect to the kriging weights w_i and the Lagrangian multiplier μ are taken and set to zero. This leads to:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n w_i \text{COV}(z_i, z_j) - \mu = \text{COV}(z_j, z_0) & j=1,2,\dots,n \\ \sum_{i=1}^n w_i = 1 \end{cases} \quad (15)$$

Eq. (15) can be written in the matrix form:

$$\begin{bmatrix} \text{COV}(z_1, z_1) & \text{COV}(z_1, z_2) & \cdots & \text{COV}(z_1, z_n) & -1 \\ \text{COV}(z_2, z_1) & \text{COV}(z_2, z_2) & \cdots & \text{COV}(z_2, z_n) & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \text{COV}(z_n, z_1) & \text{COV}(z_n, z_2) & \cdots & \text{COV}(z_n, z_n) & -1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{COV}(z_1, z_0) \\ \text{COV}(z_2, z_0) \\ \vdots \\ \text{COV}(z_n, z_0) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Knowing the covariance of values between different sites, the kriging weights w_i can be identified by solving the linear equations Eq. (15) or Eq. (16).

Table 2 lists the covariance of six-minute rainfall depths between different gauges computed based on all available data. The variances of rainfall data from different gauges are close.

Table 2 Covariance and correlation of six-minute rainfall depths between rain gauges

Covariance/ correlation	Bron (Chassieu) z_0	Villeurbanne z_1	St Priest z_2	Genas z_3
Bron (Chassieu) z_0	0.126	0.060 (0.469)	0.068 (0.544)	0.047 (0.363)
Villeurbanne z_1		0.130	0.045 (0.354)	0.032 (0.243)
St Priest z_2			0.124	0.033 (0.257)
Genas z_3				0.133

Kriging weights for estimating z_0 when the data is missing are computed according to Eq. (15) or Eq. (16). In addition, the error variance of estimated z_0 can be evaluated using Eq. (13). Table 3 lists the Kriging weights when data from different gauges are available and corresponding estimated error variances. It is interesting to note that more available data provides more precise rainfall estimates with smaller error variances. The estimation error is the smallest when data from all the other three gauges are available. While only one gauge provides data, the estimation errors are related to the variance of this gauge and the covariance between this gauge and the gauge of Bron.

Table 3 Kriging weights for calculating rainfall depth in 6 minutes at z_0 and error variance of estimations

Gauges with available data	w_1	w_2	w_3	$\sigma^2(e)$
z_1, z_2, z_3	0.321	0.444	0.235	0.075
z_1, z_2	0.433	0.567	-	0.083
z_1, z_3	0.573	-	0.427	0.100
z_2, z_3	-	0.634	0.366	0.088
z_1	1	-	-	0.136
z_2	-	1	-	0.114
z_3	-	-	1	0.165

As an example, Fig. 60 displays accumulated annual rainfall depths. Uncorrected values in the figure are obtained by replacing missing data with zeros. Corrected values are obtained by filling data gaps with data from other gauges. The uncertainty intervals of 95% confidence are also shown based on estimated error variances using the Kriging method. The width of an uncertainty interval somehow indicates the amount of missing data for a specific an.

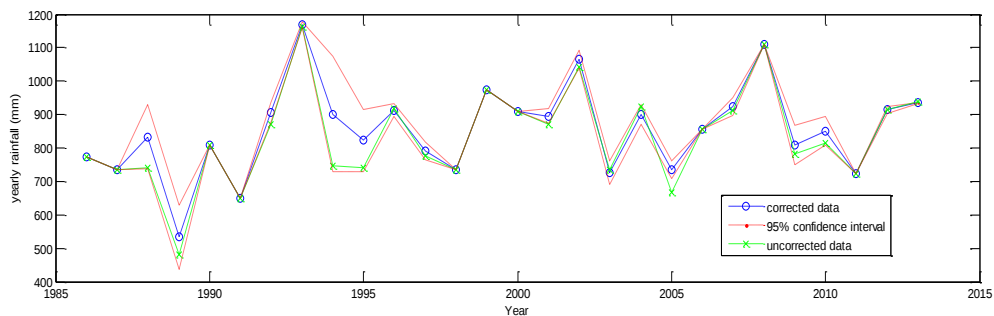


Fig. 60 Annual rainfall depths in Chassieu corrected with data from other gauges and their uncertainty intervals

Annexe 3: Correlation of groundwater temperature time series at different locations, with climatic variables, with basin water temperature

Correlation of groundwater temperature time series at different locations (upstream / downstream)

Correlation coefficients between groundwater temperature time series upstream and downstream the infiltration basin are calculated with different time lags based on daily time series (shown in Fig. 61). The correlation coefficient curves show clear periodic patterns. The first highest correlation coefficient appears at a lag of 267 days. The number of days (possibly one or two ans more) corresponds to the time delay of groundwater thermal behaviors from upstream to downstream the infiltration basin.

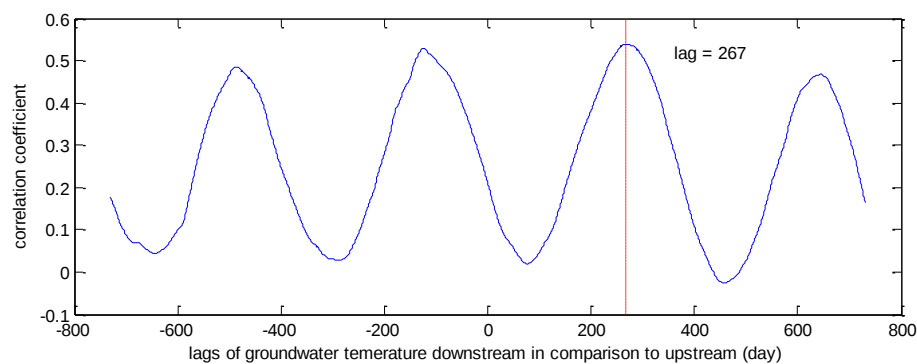


Fig. 61 Correlation coefficients between groundwater temperature upstream and downstream the infiltration basin

Correlation of groundwater temperature and climatic variables

a) Correlation of groundwater temperature and air temperature

Correlation coefficients between air and groundwater temperature at different locations are computed with different time lags based on daily time series. Fig. 62 and Fig. 63 show the correlation coefficient curves. The number of lags with the highest correlation coefficient is noted in each figure. These numbers indicate the time delays of groundwater temperature performances corresponding to air temperature changes. The time delays are respectively 49 days and 300 days for upstream and downstream groundwater temperature in comparison to air temperature.

The length of one cycle of the correlation coefficient curves is around 365 days. The time delays seem to mark the time shifts of seasonality between air and groundwater temperatures.

Trend analysis on air temperature reveals an increasing trend since 1970. However, for the more recent period since 1990s with available groundwater temperature data, air temperature is stable without any trend detected. Hence the increasing trend in groundwater temperature is unlikely due to air temperature change.

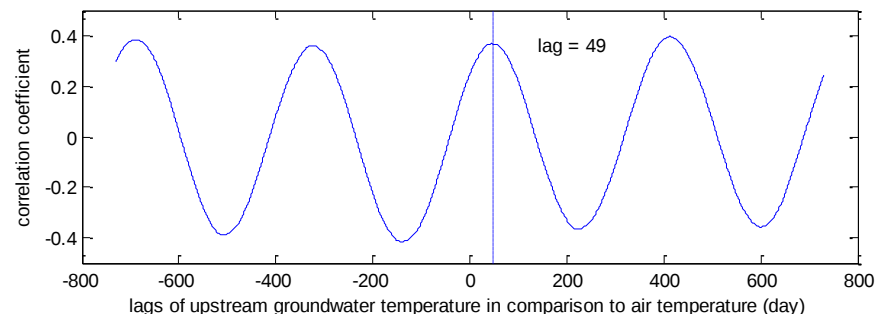


Fig. 62 Correlation coefficients between air temperature and upstream groundwater temperature

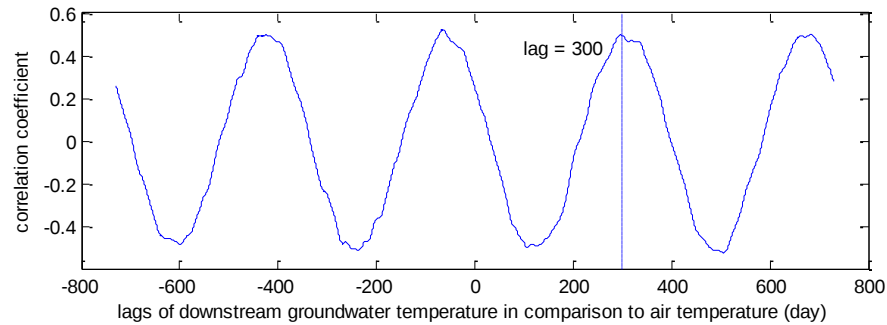


Fig. 63 Correlation coefficients between air and downstream groundwater temperature

b) Correlation of groundwater temperature and basin water temperature

The correlation between groundwater temperature and basin water temperature is also studied. The correlation coefficient curves are displayed in Fig. 64 and Fig. 65 which show a significant annual periodic pattern due to seasonality of all time series.

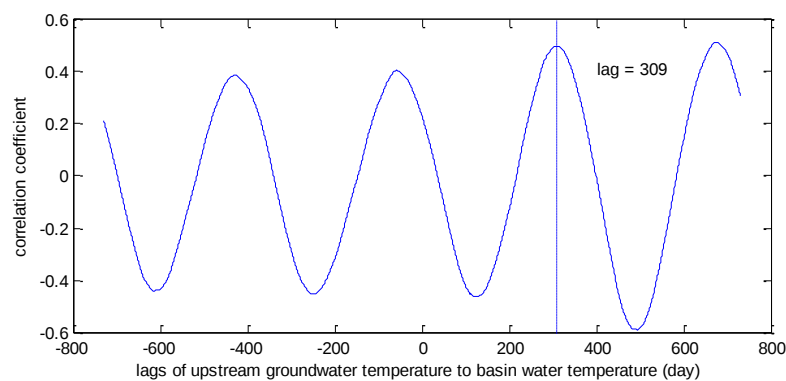


Fig. 64 Correlation coefficients between basin water temperature and upstream groundwater temperature

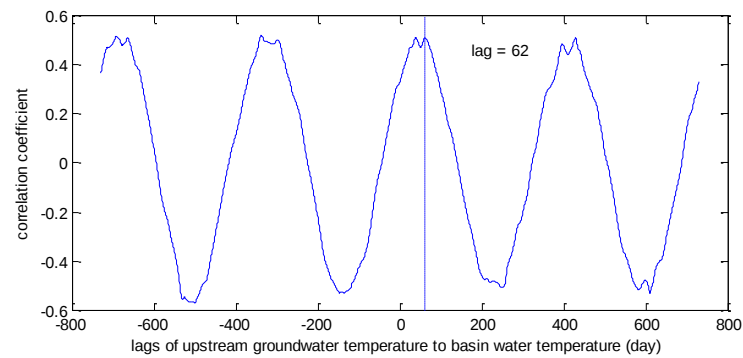


Fig. 65 Correlation coefficients between basin water temperature and downstream groundwater temperature

c) Correlation of groundwater temperature and rainfall depths

Correlation coefficients between rainfall depths and groundwater temperature data at different locations are computed with different time lags based on daily time series. Fig. 66 and Fig. 67 show the correlation coefficient curves. These curves show periodic patterns with small fluctuations. The periodic pattern originates from seasonality present in both rainfall and groundwater temperature values. The small fluctuations are due to high variations in short time periods in daily rainfall depth time series. It is difficult to draw any conclusion from the correlation analysis on the relation between the rainfall and the groundwater temperature.

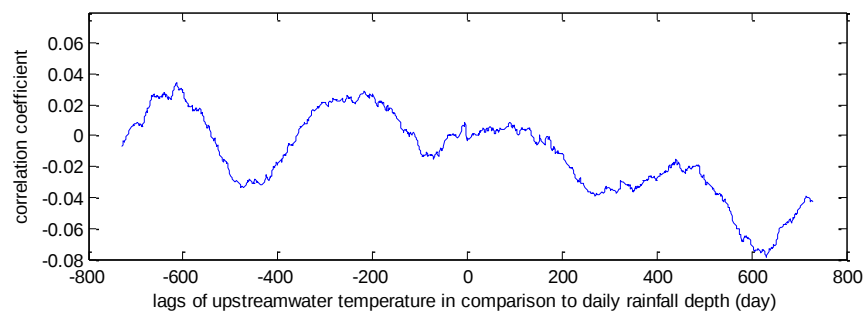


Fig. 66 Correlation coefficients between rainfall depths and upstream groundwater temperature

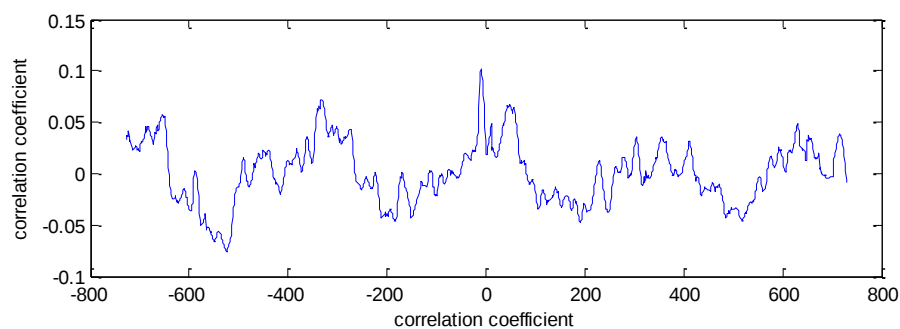


Fig. 67 Correlation coefficients between rainfall depths and downstream groundwater temperature