



HAL
open science

Développement et validation d'un utilitaire de calcul en hydrologie urbaine

Marvin Simonet

► **To cite this version:**

Marvin Simonet. Développement et validation d'un utilitaire de calcul en hydrologie urbaine. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2021. dumas-03579861

HAL Id: dumas-03579861

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03579861>

Submitted on 18 Feb 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Développement et validation d'un utilitaire de calcul en hydrologie urbaine



Mémoire présenté pour l'obtention du « Diplôme d'Ingénieur de l'ENGEES »
Formation par apprentissage

Marvin SIMONET

Promotion Liège 2018-2021 / Voie d'approfondissement « Hydrosystèmes »

Octobre 2021

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu mon entreprise d'apprentissage, Canel Ingénierie Infrastructure (C2I) et l'ensemble des collaborateurs. Ainsi, merci à Mme Betty CANEL, présidente de C2I pour m'avoir intégré dans l'équipe. Je remercie particulièrement Arnaud BOLLERY, le directeur de C2I et mon maître d'apprentissage, qui a su m'épauler tout au long de ma formation tout en me transmettant le maximum de son savoir et l'art du travail en bureau d'études. J'adresse également mes remerciements à Simon OLIVA et Benjamin TRABICHET, mes deux collègues avec qui nous avons vécu de bons moments et qui m'ont tous les deux livré de très bons conseils. Je n'oublie pas l'ensemble de l'équipe de Canel Géomètre avec qui nous avons partagé plusieurs projets dans une bonne ambiance de travail.

La réalisation de cette étude a été rendue possible grâce à la participation du Département de Haute-Savoie ainsi que des communes de Sciez et d'Allinges ; que je remercie pour la mise à disposition d'un terrain pour l'installation du pluviomètre et pour l'autorisation d'intervenir sur leurs réseaux.

Un grand merci à Jacques TERRETTAZ pour sa collaboration et le partage des données météorologiques qu'il collecte depuis de nombreuses années sur la commune de Sciez.

Merci à Kilian GUILLOT pour ses conseils concernant la pose et la maintenance des appareils ; de la même manière, Sébastien DESGOUTE, sans qui je n'aurais pu installer les appareils de mesure.

Pour poursuivre mes remerciements je me tourne vers mon centre de formation, l'ENGEES, et tout d'abord vers l'ensemble des équipes d'encadrement et pédagogique. Nous avons été parfaitement accompagnés durant ces trois dernières années de scolarité fortement bouleversées par la crise sanitaire. Merci à Anne ROZAN, ma tutrice au sein de l'école, qui a su m'accompagner tout au long de ma formation en me divulguant de nombreux conseils. Je tiens également à exprimer toute ma reconnaissance à Sylvain PAYRAUDEAU, mon tuteur pour ce travail de fin d'étude, qui m'a encadré et apporté son expérience dans le domaine.

Merci aux personnes m'ayant encouragé à poursuivre mes études dans cette direction, en particulier Marie-Laure CHOMEL qui m'a permis de découvrir C2I, mais également toutes les personnes qui se reconnaîtront.

Je terminerai par exprimer toute ma reconnaissance pour l'ensemble de mes camarades de la promotion Liège et plus encore l'ensemble des apprentis. Merci à Hugo DEN-DRYVER, Maxime BOLLENGIER et Mathieu THIERRY pour tous ces bons moments passés à l'ENGEES et en dehors ainsi que pour leurs conseils à l'égard de ce travail.

J'exprime enfin toute ma gratitude à ma famille et mes amis pour m'avoir soutenu durant toutes ces années de formation. De la même manière, merci à l'ensemble des personnes que je ne peux citer ici mais avec qui nous avons pu échanger concernant de multiples sujets en accord avec ma formation et mon avenir.

Encadrants et contacts



- Arnaud BOLLERY : Maître d'apprentissage et Directeur de Canel Ingénierie Infrastructure
36 Avenue de Sénévulaz – 74200 THONON LES BAINS
04.50.84.57.58
contact@canel-ingenierie.com



- Sylvain PAYRAUDEAU : Tuteur Ecole et Professeur d'hydrologie et transfert de contaminants
ENGEES – 1 Quai Koch – 67000 STRASBOURG
Sylvain.payraudeau@engees.unistra.fr



- Jacques TERRETTAZ : Propriétaire d'une station météo privée sur la commune de Sciez (74200)
webmaster@meteo-sciez.fr



- Département de Haute-Savoie
1 Avenue d'Albigny – 74041 ANNECY CEDEX
04.50.33.50.00



- Commune d'Allinges
53 Route du Crêt-Baron – 74200 ALLINGES
04.50.71.21.18



- Commune de Sciez
614 Avenue de Sciez – 74140 SCIEZ
04.50.72.60.09

Résumé

Dans le cadre de la protection des biens et des personnes contre les inondations, le dimensionnement des ouvrages d'assainissement pluvial est une problématique primordiale. Auparavant réalisés sur une simple feuille Excel®, Canel Ingénierie Infrastructure a mis au point un utilitaire pour cadrer l'ensemble des calculs en hydrologie urbaine au sein du bureau. Cet outil sera utilisé pour déterminer le diamètre des canalisations via le calcul du débit de pointe pour une période de retour donnée. Le volume des ouvrages de stockage à mettre en œuvre pourra également être calculé à l'aide de la méthode des pluies. Après la phase de développement sous Visual Basics for Application®, une période de mesure sur le terrain a été réalisée afin de valider le fonctionnement des modèles dans le contexte climatique du Chablais (Haute-Savoie). La période de mesure de deux mois réalisée au printemps 2021 ne permet pas de proposer de réelles conclusions sur la fiabilité des formules de calcul développées de manière empirique. Leur validité n'est plus à démontrer mais cette étude permet plutôt de les comparer avec les mesures réalisées pour apprécier les limites de l'utilitaire.

C'est ainsi que l'utilisation de modèles globaux permet de répondre en majeure partie aux études réalisées par C2I. La méthode Rationnelle sera appliquée aux bassins versants les plus simples alors que la méthode de Caquot sera réservée aux études les plus complexes. Les mesures réalisées pour des périodes de retour inférieures à six mois montrent que la transformation pluie/débit modélisée par ces deux formules est cohérente. La méthode du réservoir linéaire, ajoutée lors de ce travail, n'apporte pas une réelle plus-value. En effet, il faudrait pousser la modélisation avec une prise en compte de plus de paramètres pour en trouver un intérêt avéré. Cela reviendrait à vouloir développer en logiciel de modélisation hydrologique tel qu'il en existe déjà de nombreux.

Abstract

Development and validation of a calculation program for urban hydrology

In the context of protecting people and property against flooding, the sizing of rainwater networks is a key issue. Previously carried out on a simple Excel® sheet, Canel Ingénierie Infrastructure has developed an utility to frame all urban hydrology calculations within the office. This tool will be used to determine the diameter of the pipes by calculating the peak flow for a given return period. The volume of storage structures to be implemented can also be calculated using the rainfall method. After the development phase using Visual Basics for Application®, a period of field measurements was carried out to validate the operation of the models in the climatic context of the Chablais (Haute-Savoie). The two-month measurement period conducted in the spring of 2021 does not allow us to propose any real conclusions on the reliability of the empirically developed calculation formulas. Their validity is no longer in question, but this study allows them to be compared with the measurements to assess the limits of the calculation program.

Thus, the use of global models makes it possible to respond to most of the studies realized by C2I. The Rational method will be applied to the simplest catchment areas while the Caquot method will be reserved for the most complex studies. Measurements carried out for return periods of less than six months show that the rainfall/flow transformation modelled by these two formulae is consistent. The linear reservoir method, added during this work, does not provide any real added value. Indeed, the modelling would have to be extended to take into account more parameters to be of any real interest. This would be tantamount to developing hydrological modelling software, of which there are already many.

Sommaire

Remerciements	3
Encadrants et contacts	4
Résumé	5
Abstract	5
Sommaire.....	6
Listes	8
Listes des figures	8
Listes des tableaux.....	10
Table des abréviations	10
Introduction	11
1 Présentation globale du projet	13
1.1 Les besoins de Canel Ingénierie Infrastructure	13
1.2 Le contexte géographique et climatique	14
1.3 Etude des données de la station météorologique privée de Sciez.....	16
2 La modélisation	18
2.1 Représentation de la pluie.....	18
2.2 La transformation pluie/débit	22
3 Validation de l'outil.....	29
3.1 La mesure de débit.....	30
3.2 La mesure de la pluie.....	37
3.3 Présentation des résultats.....	39
3.4 Calage des modèles	46
3.5 Intégration des chroniques de pluie mesurées dans la modélisation	49
3.6 Comparaisons entre prédictions du modèle et mesures	52
4 Avis sur le dimensionnement des ouvrages existants au niveau des points de mesure	57
5 Détermination des volumes de rétention	58
Discussion et Conclusion	59
Bibliographie	60
Webographie.....	61
Annexes	62
Annexe 1 - Captures d'écran de l'interface logiciel	62
Annexe 2 - Courbes IDF pour une période de retour allant de 6 mois à 1 an à Sciez	64
Annexe 3 - Méthode de construction des courbes IDF.....	65
Annexe 4 - Code VBA pour l'application de la méthode du réservoir linéaire.....	66

Annexe 5 - Photographies du BV "Rural" à Allinges.....	71
Annexe 6 - Photographies des points de mesures.....	72
Annexe 7 - Carte de situation des appareils de mesure	74
Annexe 8 - Présentation des précipitations sur la période de mesure.....	75
Annexe 9 - Données brutes BV Parking.....	76
Annexe 10 - Données brutes BV Voirie.....	76
Annexe 11 - Données brutes BV Rural	77
Annexe 12 - Réponse hydrologique sur le BV "Parking" le 03/06/2021	78
Annexe 13 - Schéma du ruissellement sur le BV "Parking".....	79
Annexe 14 - Description de la méthode des pluies.....	80

Listes

Listes des figures

Figure 1 - Plan de situation de C2I et zone du Chablais (Google Maps, le 01/07/2021)	14
Figure 2 - Répartition spatiale des précipitations sur la partie Est du Chablais au cours de l'année 1963 (B. BLAVOUX, La Houille Blanche n°1, 1969)	15
Figure 3 - Schéma expliquant la formation des nuages et des précipitations sur le Lac Léman (B. BLAVOUX, La Houille Blanche n°1, 1969).....	15
Figure 4 - Pluviométrie moyenne annuelle et mensuelle entre 2006 et 2020 à Sciez, Haute Savoie, France (Météo Sciez).....	16
Figure 5 - Courbes IDF à Sciez, Haute-Savoie, pour T < 6 mois sur la période 2006 - 2021	17
Figure 6 - Pluie de projet double triangle (La ville et son assainissement, 2003)	20
Figure 7 - Organigramme de la transformation pluie/débit	22
Figure 8 - Variabilité du coefficient de ruissellement en fonction du volume précipité (Hydrologie et hydraulique des réseaux d'assainissement, 2019)	24
Figure 9 - Représentation graphique du lag-time	25
Figure 10 - Image aérienne BV "Parking" (Géoportail - 16/04/2021)	31
Figure 11 - Image aérienne du BV "Voirie" (Géoportail - 26/04/2021).....	32
Figure 12 - Image aérienne du BV "Rural" (Géoportail - 16/04/2021).....	33
Figure 13 - Photographie de la sonde hauteur/vitesse (le 06/05/2021 à Thonon les Bains, Haute-Savoie) ..	34
Figure 14 - Photographie de la sonde de mesure de vitesse endommagée (le 07/05/2021 à Thonon-les-Bains, Haute-Savoie)	35
Figure 15 - Evolution de l'incertitude sur le débit mesuré à l'aide de débitmètre à effet Doppler.....	36
Figure 16 - Photographie de la station météorologique privée de Sciez (météo-sciez.fr)	37
Figure 17 - Photographie du mécanisme du pluviomètre à augets basculants (Thonon-les-Bains, Haute-Savoie, France - 13/04/2021).....	38
Figure 18 - Photographie du pluviomètre (Thonon-les-Bains, Haute-Savoie, France - 13/04/2021).....	38
Figure 19- Pluies mesurées à Thonon-les-Bains par rapport aux courbes IDF locales	39
Figure 20 - Pluies mesurées à Sciez par rapport aux courbes IDF locales	40
Figure 21 - Evolution du débit mesuré en fonction de l'intensité de la pluie, BV "Parking", Thonon-les-Bains, le 16/05/2021	41
Figure 22 - Evolution de la vitesse et de la hauteur d'eau mesurée, BV "Parking", Thonon-les-Bains, le 16/05/2021	42
Figure 23 - Evolution du débit mesuré en fonction de l'intensité de la pluie, BV "Voirie", Sciez, le 16/05/2021	43
Figure 24 - Evolution de la vitesse et de la hauteur d'eau mesurée, BV "Voirie", Sciez, le 16/05/2021.....	43
Figure 25 - Evolution du débit mesuré en fonction de l'intensité de la pluie, BV "Rural", Allinges, le 16/05/2021	44
Figure 26 - Evolution de la vitesse et de la hauteur d'eau mesurée, BV "Rural", Allinges, le 16/05/2021 ...	45
Figure 27 - Evolution du volume ruisselé en fonction du volume précipité sur le BV "Parking" à Thonon-les-Bains, Haute-Savoie	46
Figure 28 - Evolution du volume ruisselé en fonction du volume précipité sur le BV "Voirie" à Sciez, Haute-Savoie	47
Figure 29 - Evolution du volume ruisselé en fonction du volume précipité sur le BV "Rural" à Allinges, Haute-Savoie	47
Figure 30 - Comparaison entre le débit mesuré et le débit modélisé sur le BV "Parking" à Thonon-les-Bains, le 21/05/2021	49

Figure 31 - Comparaison entre le débit mesuré et le débit modélisé sur le BV "Voirie" à Sciez, le 21/05/2021	50
Figure 32 - Comparaison entre le débit mesuré et le débit modélisé sur le BV "Rural" à Allinges, le 21/05/2021	50
Figure 33- Comparaison entre le débit mesuré et le débit modélisé sur le BV "Parking" à Thonon-les-Bains, le 06/05/2021	51
Figure 34 - Graphique de comparaison entre le débit mesuré et le débit modélisé, BV "Parking" à Thonon-les-Bains	52
Figure 35 - Comparaison entre la méthode du réservoir linéaire et les valeurs de débit mesurées lors de l'événement du 16/05/2021, BV "Parking" à Thonon-les-Bains	53
Figure 36 - Graphique de comparaison entre le débit mesuré et le débit modélisé, BV "Voirie" à Sciez.....	54
Figure 37 - Comparaison entre la méthode du réservoir linéaire et les valeurs de débit mesurées lors de l'événement du 16/05/2021, BV "Voirie" à Sciez	54
Figure 38 - Graphique de comparaison entre le débit mesuré et le débit modélisé, BV "Rural" à Allinges	55
Figure 39 - Comparaison entre la méthode du réservoir linéaire et les valeurs de débit mesurées lors de l'événement du 16/05/2021, BV "Rural" à Allinges	56
Figure 40 - Capture d'écran de l'accueil de l'utilitaire	62
Figure 41 - Capture d'écran de l'interface pour l'application de la méthode Rationnelle	62
Figure 42 - Capture d'écran de l'interface pour l'application de la méthode du réservoir linéaire	63
Figure 43 - Exemple de fichier récapitulatif issu d'une modélisation avec la méthode du réservoir linéaire	63
Figure 44 - Courbes IDF à Sciez (Haute-Savoie), 6 mois < T < 1 an sur la période 2006 à 2021	64
Figure 45 - Photographie de la plage de dépôt dans le bassin de stockage d'Allinges (Allinges, Haute-Savoie - 07/05/2021)	71
Figure 46 - Photographies du chemin forestier et du fossé en amont du réseau (Allinges, Haute-Savoie - 07/05/2021).....	71
Figure 47 - Photographie du point de mesure BV "Parking" (Thonon les Bains, Haute-Savoie, France - 13/04/2021).....	72
Figure 48 - Photographie du point de mesure BV "Voirie" (Sciez, Haute-Savoie, France - 13/04/2021)	72
Figure 49 - Photographie du point de mesure BV "Rural" (Allinges, Haute-Savoie, France - 13/04/2021).	73
Figure 50 - Carte de l'emplacement des appareils de mesure (Géoportail, le 22/05/2021)	74
Figure 51 - Graphique présentant les précipitations cumulées à Sciez et Thonon-les-Bains	75
Figure 52 - Données brutes de mesure de débit sur le BV "Parking"	76
Figure 53 - Données brutes de mesure du débit sur le BV Voirie	76
Figure 54 - Données brutes de mesure du débit sur le BV Rural du 12/04/2021 au 06/05/2021	77
Figure 55 - Données brutes de mesure de débit sur le BV Rural du 18/04/2021 au 29/04/2021	77
Figure 56 - Données brutes de mesure du débit sur le BV Rural du 12/05/2021 au 14/06/2021	78
Figure 57 - Evolution du débit mesuré en fonction de l'intensité de la pluie sur le BV "Parking" à Thonon-les-Bains, le 03/06/2021	78
Figure 58 - Schéma et photographies présentant le ruissellement observé sur le BV "Parking" à Thonon-les-Bains (prise de vue le 02/07/2021)	79
Figure 59 - Méthodes de pluies (Memento Technique 2017, ASTEE)	80

Listes des tableaux

Tableau 1 - Intensités maximales mesurées à Sciez, Haute-Savoie, France, depuis 2006 (Météo Sciez).....	16
Tableau 2 - Coefficients de Montana à Sciez, Haute-Savoie, T < 6 mois sur la période 2006 -2021	17
Tableau 3 - Choix de la période de retour de dimensionnement selon la norme NF EN 752	18
Tableau 4 - Valeurs des coefficients d'imperméabilisation courantes	23
Tableau 5 - Coefficients de ruissellement utilisés	23
Tableau 6 - Temps de concentration sur les trois sites de mesure	25
Tableau 7 - Caractéristiques du BV "Parking"	31
Tableau 8 - Caractéristiques du réseau BV "Parking" (Plan de recollement, GROUPI TP, 16/01/2015).....	31
Tableau 9 - Caractéristiques du BV "Voirie"	32
Tableau 10 - Caractéristiques du réseau BV "Voirie" (Plan de recollement, PERRIER 74, 04/12/2014)	32
Tableau 11 - Caractéristiques du BV "Rural"	33
Tableau 12 - Caractéristiques du réseau BV "Rural" (Plan de recollement, SOCCO, 11/06/2019).....	33
Tableau 13 - Dérive de la sonde piézométrique sur le BV "Voirie"	36
Tableau 14 - Evènements pluvieux retenus pour la validation et le calage mesurés à Thonon-les-Bains.....	39
Tableau 15 - Evènements pluvieux retenus pour la validation et le calage mesurés à Sciez	40
Tableau 16 - Détermination des coefficients de ruissellement.....	48
Tableau 17 - Comparaison des diamètres de collecteurs modélisés et installés.....	57
Tableau 18 - Comparaison des volumes mesurés et déterminés avec la méthode des pluies.....	58
Tableau 19 - Intensité des précipitations (de 10 à 60 minutes) mesurées à Thonon-les-Bains	75

Table des abréviations

ASTEE : Association Scientifique et Technique pour l'Eau et l'Environnement

BV : Bassin Versant

C2I : Canel Ingénierie Infrastructure

ENGEES : Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg

IDF : Intensité Durée Fréquence

MES : Matières En Suspension

MNT : Modèle Numérique de Terrain

NGF : Nivellement Général de la France

OMM : Organisation Météorologique Mondiale

PDR : Période De Retour

PEHD : Polyéthylène Haute Densité

PVC : Polychlorure de Vinyle

VBA® : Visual Basics for Application®

VRD : Voirie et Réseaux Divers

Introduction

L'urbanisation croissante des dernières décennies entraîne une augmentation des surfaces imperméabilisées et donc des crues de plus en plus destructrices. L'étude des transferts hydrologiques et de la transformation pluie/débit à l'échelle des bassins versants est ainsi au cœur des préoccupations en matière d'aménagement urbain. En effet, toute une réflexion doit être menée pour limiter au maximum les dommages corporels et matériels liés aux phénomènes climatiques majeurs. Dans ce but, la gestion des eaux pluviales liée au ruissellement sur les surfaces imperméabilisées est au centre des récentes études hydrologiques.

Avec les progrès informatiques réalisés au cours du demi-siècle passé, les puissances de modélisation n'ont jamais été aussi élevées. De nombreux logiciels de modélisation hydrologique et hydraulique ont ainsi vu le jour. Ces logiciels utilisent tous des modèles de transformation pluie/débit plus ou moins complexes associés à des modèles de transfert en réseau. Permettant d'obtenir des résultats détaillés et complets, ces modèles nécessitent de gros moyens pour être exploités par les maîtres d'œuvre. Dans le cas d'études de bassins versants (BV) simples, des calculs plus rapides peuvent être mis en œuvre pour réaliser les dimensionnements de réseaux et d'ouvrages. De nombreux experts se sont penchés sur la question, parmi eux M. DESBORDES avec de multiples études sur les modèles hydrologiques (*Une étude générale de l'assainissement pluvial urbain*, DESBORDES, 1975 ; *Un exemple de l'intérêt des études de sensibilités des modèles hydrologiques*, DESBORDES et al. 1976), B. CHOCAT (*Etude comparative des résultats fournis par la méthode de Caquot et le modèle du réservoir linéaire*, CHOCAT et al. 1981), et plus anciennement A. CAQUOT avec la méthode qui porte son nom.

En tant que maître d'œuvre spécialisé en voirie et réseaux divers (VRD) en Haute-Savoie, Canel Ingénierie Infrastructure (C2I) intervient pour des missions de dimensionnement de réseaux humides. Notre activité, essentiellement axée autour des aménagements de voirie, est également ponctuée d'études hydrauliques plus ou moins complexes. A l'image de nombreux bureaux d'études, le dimensionnement des ouvrages hydrauliques était auparavant réalisé à l'aide de divers fichiers Excel®. En lien avec ma formation à l'ENGEES, nous avons décidé au printemps 2020 de développer un utilitaire de calcul pour réaliser le dimensionnement des réseaux et des ouvrages de rétention et/ou d'infiltration. L'objectif de ce travail et de ce mémoire est d'améliorer cet outil en proposant l'utilisation d'une méthode de calcul dynamique et plus détaillée que celles qui le composent actuellement. Il sera ensuite question dans une seconde partie de vérifier la validité des calculs dans la zone géographique majoritaire de nos études, lié au contexte climatique associé. Pour ce faire, nous avons réalisé une campagne de mesures sur sites et comparé les données réelles mesurées avec les simulations numériques. Cette validation permettra par la suite de réaliser un choix parmi les méthodes de calculs disponibles pour s'approcher au mieux de la réalité.

A notre connaissance, aucun bureau d'études VRD local ni même régional n'a appliqué un tel protocole pour s'assurer de l'efficacité de ses outils internes. En effet, les formules utilisées (développées à l'époque de manière empirique) ont déjà été testées et validées par de nombreuses études historiques. Cette phase de validation nécessite du temps et un budget conséquent pour être menée dans des conditions optimales. Le travail réalisé ici n'est qu'une prémisse et une durée d'instrumentation plus importante serait nécessaire pour assurer la robustesse des conclusions proposées. Le Memento Technique 2017 « Conception et dimensionnement des systèmes de gestion des eaux pluviales et de collecte des eaux usées » publié par l'Association Scientifique et Technique pour l'Eau et l'Environnement (ASTEE) a été un document essentiel pour la réalisation de ce travail. Ce document technique est le digne remplaçant de l'instruction technique de 1977 et fixe aujourd'hui les grands principes d'aménagement et de gestion des eaux pluviales et des eaux usées en France. Plus anciennement M. DESBORDES a réalisé plusieurs articles (*Expérimentation récente sur bassins urbains*, DESBORDES, 1980) et études qui contiennent de riches informations. Dans tous les cas,

la multiplication de ce type de travail à l'échelle internationale permettra de disposer d'une base de données de plus en plus conséquente permettant de comprendre de manière plus fine les phénomènes en jeu.

La première partie de ce mémoire présentera le contexte global de l'étude ainsi que les enjeux pour Canel Ingénierie Infrastructure. Le second chapitre permettra d'aborder le thème de la modélisation et de présenter l'ensemble des méthodes de calcul utilisées. La troisième partie sera quant à elle axée sur la phase de mesure et la validation de l'outil développé. Ces mesures nous permettront de donner un avis sur le dimensionnement des ouvrages étudiés lors d'une quatrième partie. Enfin, nous nous intéresserons dans une cinquième et dernière partie au dimensionnement d'ouvrages de stockage lors de l'urbanisation de bassins versants.

1 Présentation globale du projet

1.1 Les besoins de Canel Ingénierie Infrastructure

Pour encadrer les calculs en hydraulique urbaine et les fiabiliser, C2I a développé un utilitaire de calcul simple au printemps 2020. Cet outil permettait les calculs basiques d'hydraulique à savoir le dimensionnement de réseau pluvial et d'ouvrage de rétention et/ou infiltration. Il a depuis été amélioré avec l'ajout de calcul concernant les techniques alternatives (noue et puits perdu à ce jour). Des captures d'écran de l'interface logiciel sont disponibles en annexe n° 1.

Développé sous le logiciel Excel® avec un codage sous Visual Basics for Applications® (VBA), cet utilitaire n'a pas pour but de rivaliser avec les logiciels de modélisation qui existent sur le marché mais plutôt d'être simple d'utilisation et ne nécessiter que peu de données d'entrées. Il doit pouvoir être utilisé par des personnes peu initiées en hydrologie urbaine tout en limitant au maximum les erreurs possibles. Cet outil de dimensionnement a donc pour vocation de remplacer une simple feuille de calcul Excel® dont l'utilisation était complexe et plus difficilement compréhensible par un novice.

C2I ne réalise que peu d'études hydrauliques poussées. Dans la majorité des cas, il s'agit de bassins versants ayant un fonctionnement hydraulique relativement simple et de taille modeste, allant de quelques centaines de mètres carrés à plusieurs hectares tout au plus. Souvent fortement urbanisés, la réponse hydrologique sur ces bassins est donc peu lissée et considérée comme rapide. Du fait de la simplicité des réseaux étudiés, la modélisation du fonctionnement hydraulique n'était pas la préoccupation principale. Les modèles de transformation pluie/débit sont donc le centre de cette étude, à l'inverse des transferts en réseau. Plusieurs logiciels de modélisation numériques permettent de réaliser ce type de calcul mais leur utilisation est souvent plus complexe et nécessite de nombreuses données d'entrées. Le souhait de C2I était également de revendiquer auprès de ses clients un outil développé en interne dont le fonctionnement et les limites sont parfaitement connus. C'est pourquoi le choix a été fait de prendre le temps de développer cet utilitaire de calcul et de s'assurer de sa fiabilité.

Pour la majorité des projets, le débit de pointe est la donnée hydraulique qui conditionne l'ensemble des dimensionnements. En effet, le diamètre des collecteurs est la principale information recherchée. Les formules empiriques telles que la méthode Rationnelle ou la méthode de Caquot sont alors amplement suffisantes. Pour apporter de la robustesse aux résultats mais également pour aller plus loin lors des projets d'hydraulique urbaine, l'utilitaire de calcul initial a été amélioré en y intégrant une méthode de calcul dynamique. Cela permettra d'obtenir un hydrogramme à l'exutoire du bassin versant modélisé pour une pluie de projet donnée. Il sera également possible de se pencher sur des bassins versants plus complexes et peut-être d'avoir la possibilité de travailler sur des études hydrauliques de plus grande envergure.

Concernant le dimensionnement d'ouvrage de stockage et/ou d'infiltration, l'outil précédemment développé proposait l'utilisation de la méthode des pluies (Memento Technique, 2017, ASTEE). La responsabilité du dimensionnement de ce type d'ouvrage est souvent confiée aux géotechniciens et non pas aux maîtres d'œuvre VRD. La méthode des pluies, simple mais robuste sur des bassins versants de petites tailles et ne contenant pas d'ouvrage de stockage ou de régulation (autre que celui à dimensionner) est donc amplement suffisante. Ce document ne vise pas directement à valider l'utilisation de cette formule mais nous profiterons des mesures réalisées pour les comparer aux volumes calculés avec cette méthode.

Etant implanté dans une région géographique particulière (§1.2), nous avons souhaité valider l'outil dans le contexte géographique du Chablais (cf. figure n° 1). Pour ce faire, une phase de mesure de deux mois sur trois collecteurs d'eau pluviale a été réalisée. Cette phase de mesure et de test permettra par la suite de montrer la fiabilité des calculs mais également d'être conscient des limites d'usage de chacune des méthodes disponibles. D'une durée limitée, la période d'instrumentation a néanmoins permis d'enregistrer suffisamment de données pour débiter la phase de validation de l'outil ; mais devra être reconduite et prolongée pour assurer la robustesse des méthodes utilisées à l'aide de chronique plus longues.



Figure 1 - Plan de situation de C2I et zone du Chablais (Google Maps, le 01/07/2021)

1.2 Le contexte géographique et climatique

Le secteur d'étude de C2I est situé en Haute Savoie et plus précisément dans le Chablais. Il s'étend ainsi sur la rive méridionale du lac Léman, de Saint-Gingolph à Veigy-Foncenex pour les bords de lac en allant plus haut en altitude, dans la vallée d'Abondance ou bien dans le Haut Chablais. A l'origine un massif montagneux, le Chablais est situé à l'extrémité de la chaîne des Préalpes. Il est dominé par le massif de la Dent d'Oche et des Cornettes de Bises, cumulant à plus de 2 400 mètres d'altitude et marquant la frontière avec la Suisse. Le climat est impacté de manière plus ou moins locale par le relief et le lac Léman, plus grand lac alpin et subalpin d'Europe situé à environ 370 mNGF. Ce dernier influence fortement le climat dans le bas Chablais puisqu'il agit comme un volant thermique, aidé par l'orographie et le relief situé à proximité. Par exemple, alors qu'il tombe environ 1 000 millimètres d'eau à Thonon-les-Bains (385 mNGF), la pluviométrie annuelle moyenne atteint presque 1 500 millimètres à Bonneveaux (800 mNGF) ; alors que les deux stations de mesures sont situées à moins de 20 kilomètres l'une de l'autre. La carte suivante présente la répartition spatiale des précipitations en fonction de l'altitude pour l'année 1963 sur la partie Est du Chablais.

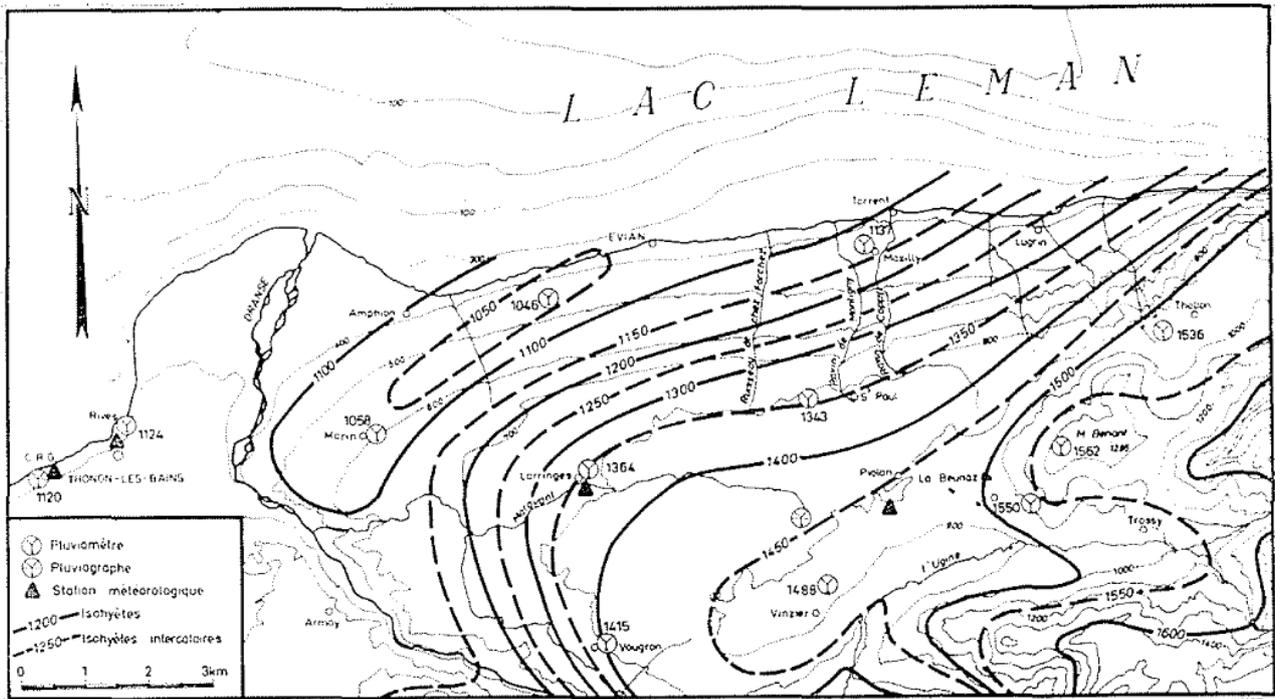


Figure 2 - Répartition spatiale des précipitations sur la partie Est du Chablais au cours de l'année 1963 (B. BLAVOUX, La Houille Blanche n°1, 1969)

La pluviométrie augmente linéairement avec l'altitude : environ 65 millimètres annuel par tranche de 100 mètres d'altitude. De plus, les précipitations sont plus abondantes à l'Ouest qu'à l'Est : le relief plus marqué à l'Est forme une cuvette. De la même manière, les versants Sud sont légèrement plus arrosés du fait de leur exposition directe aux vents de Sud-Ouest. Le schéma suivant présente la création et le déplacement des nuages aux origines des précipitations sur le Léman.

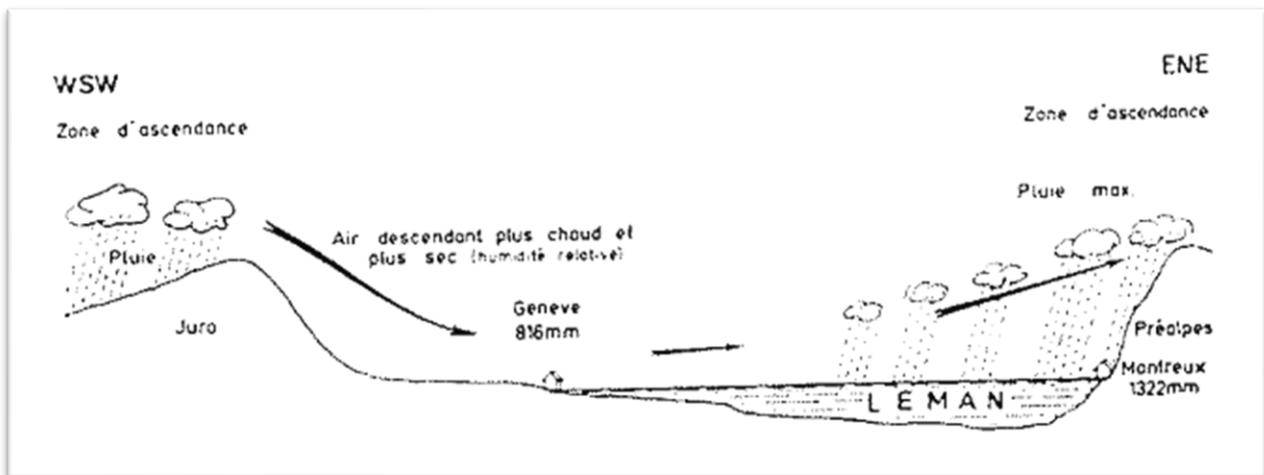


Figure 3 - Schéma expliquant la formation des nuages et des précipitations sur le Lac Léman (B. BLAVOUX, La Houille Blanche n°1, 1969)

Les précipitations sont majoritaires en été avec un climat semi-continental à influence montagnarde. Le nombre d'événements pluvieux ne varie pas avec l'altitude à l'inverse de l'intensité des précipitations. En hiver, le gradient de température joue un rôle majeur dans la nature des précipitations. Si les études portaient sur les cours d'eau en fond de vallée, la nivologie et la fonte des neiges aux printemps seraient des phénomènes à prendre en compte. De la même manière que pour les précipitations, l'altitude exerce une influence directe sur la température : environ 0,7 °C de moins tous les 100 mètres d'altitude supplémentaires. Rappelons que le lac Léman joue un rôle majeur et limite la température à de basses altitudes (son effet se fait ressentir jusqu'à environ 700 mNGF) de presque 1° C de moins dans le cas des mois les plus chaud et de 2° C supérieur que dans d'autres vallées savoyardes pour les jours les plus froids, ce qui joue sur le niveau de la limite pluie/neige.

1.3 Etude des données de la station météorologique privée de Sciez

1.3.1 Généralités

Les mesures des précipitations à un pas de temps de 10 minutes depuis 2006 ont été obtenues grâce à la collaboration de Mr TERRETTAZ, propriétaire d'une station météorologique privée (§3.2.1). Les graphiques et tableaux ci-après présentent la pluviométrie générale mesurée depuis le 1^{er} janvier 2006. Ces données sont présentées à titre indicatif puisque la donnée essentielle en hydrologie urbaine est l'intensité maximale observée sur des périodes de faible durée, classiquement de cinq à trente minutes, rarement au-delà d'une heure.

Les précipitations observées durant la période de mesure (du 12 Avril 2021 au 14 juin 2021) ont été au-dessus des normales avec plus de 160 millimètres durant le mois de mai. La variabilité interannuelle est importante avec une pluviométrie totale allant parfois du simple au double d'une année sur l'autre.

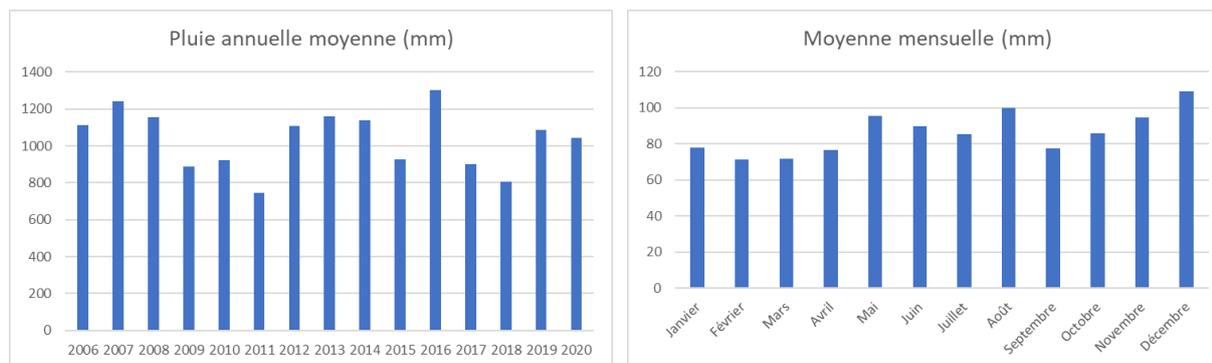


Figure 4 - Pluviométrie moyenne annuelle et mensuelle entre 2006 et 2020 à Sciez, Haute Savoie, France (Météo Sciez)

Pas de temps	Intensité de la pluie (mm/h)
10 minutes	79,2
30 minutes	43,6
1 heure	28,0
6 heures	12,3
24 heures	3,2

Tableau 1 - Intensités maximales mesurées à Sciez, Haute-Savoie, France, depuis 2006 (Météo Sciez)

1.3.2 Courbes Intensité – Durée – Fréquence

La suite de l'analyse des données de pluies a été réalisée en traçant les courbes Intensité/Durée/Fréquence (IDF), pour de faibles périodes de retour (entre 3 mois et 1 an). A partir des 15 années de données récoltées, il serait néanmoins possible de travailler sur des événements pluvieux ayant une période de retour (PDR) d'au plus de 30 à 40 ans pour assurer une certaine fiabilité. Il est admis de manière empirique qu'avec T années de mesures, il est possible d'estimer des événements ayant une période de retour de 2 à 3 fois T années.

Comme leur nom l'indique, ces courbes représentent l'évolution de l'intensité de la pluie en fonction de la durée de l'évènement et de son occurrence. La période de retour des évènements observés durant la phase de mesure pourra alors être déterminée. Le graphique ci-après présente les courbes IDF pour des occurrences inférieures à 6 mois. Un second graphique est disponible en annexe n° 2 pour les occurrences allant de 6 mois à 1 an. La méthode de construction des courbes IDF est détaillée en annexe n° 3.

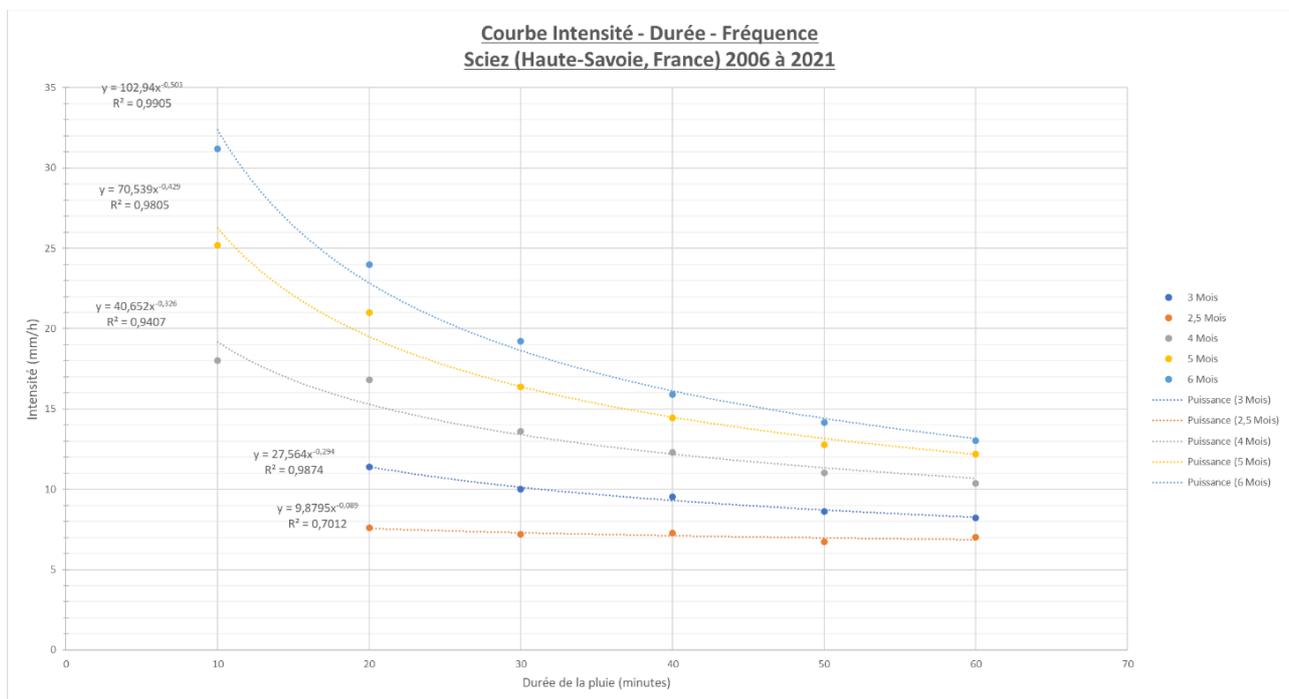


Figure 5 - Courbes IDF à Sciez, Haute-Savoie, pour $T < 6$ mois sur la période 2006 - 2021

A ces courbes IDF peuvent être associés les coefficients de Montana (cf. § 2.1) présentés dans le tableau ci-dessous en réalisant un ajustement sous la forme d'une courbe de tendance de puissance.

Période de retour (mois)	a	b
2.5	0,165	- 0,089
3	0,459	-0,294
4	0,678	-0,326
5	1,176	-0,429
6	1,716	-0,503

Tableau 2 - Coefficients de Montana à Sciez, Haute-Savoie, $T < 6$ mois sur la période 2006 - 2021

2 La modélisation

En hydrologie, l'utilisation de modèles numériques permet de représenter de manière mathématique les transferts d'eau pour mieux comprendre le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant et ainsi anticiper de futures évolutions en termes d'urbanisation. Ces modèles sont dits prédictifs, c'est-à-dire permettant de déterminer le fonctionnement d'un système et son état final à partir des données de base. Il existe deux principaux types de modèles prédictifs : les modèles dit globaux et les modèles spatialisés. Les premiers sont les plus simples. Ils ont pour la plupart été créés de manière empirique et représentent le bassin versant comme un seul et unique objet. Ils permettent par exemple de déterminer le débit de pointe généré par un bassin versant ou bien le volume maximal à stocker dans un ouvrage de régulation. Bien que ces modèles soient pour la plupart simples à utiliser et ne nécessitant que peu de données d'entrée, ils doivent être utilisés avec précaution puisqu'ils sont très sensibles aux quelques paramètres utilisés. Nous pouvons ainsi évoquer leur sensibilité au coefficient de ruissellement, paramètre majeur dans la transformation pluie/débit mais qui est souvent difficile à estimer de manière correcte, en plus de sa variabilité temporelle. Les modèles spatialisés, comme leur nom l'indique, ne traitent plus le problème de manière macroscopique mais microscopique. Le système global est décomposé en une multitude de sous-systèmes, par exemple sous la forme d'un maillage.

Comme évoqué précédemment, l'utilitaire de calcul a pour but de réaliser le dimensionnement d'ouvrages d'assainissement pluvial en utilisant des méthodes simples à mettre en œuvre. Jusqu'alors, cet outil ne disposait que de méthodes empiriques. L'implémentation d'une méthode plus dynamique a été retenue pour aller plus loin lors des études hydrauliques. Trois méthodes de détermination de débit sont maintenant disponibles ; à savoir la méthode Rationnelle et la méthode de Caquot permettant de déterminer uniquement le débit de pointe, ainsi que la méthode du réservoir linéaire permettant d'obtenir un hydrogramme détaillé. Quelle que soit la méthode employée, une modélisation des phénomènes hydrologiques peut être scindée en deux grandes parties détaillées ci-après : la modélisation de la pluie et la transformation pluie/débit.

2.1 Représentation de la pluie

Il existe deux grandes manières de représenter l'apport d'eau par les précipitations dans un modèle : l'utilisation d'événements synthétiques associés à une période de retour donnée ou l'utilisation de chroniques de mesures ou d'événements historiques observés. Chaque modèle de transformation pluie/débit possède sa propre modélisation de la pluie. Tous se basent néanmoins sur la même donnée : l'intensité de la pluie. Les deux méthodes empiriques utilisées prennent en compte l'intensité moyenne maximale. C'est l'intensité maximale qui permet de dimensionner les ouvrages sur la base d'une période de retour. En effet, le dimensionnement des ouvrages hydrauliques est aujourd'hui réalisé sur une fréquence de dépassement : il est admis que chaque année, il existe un risque sur T que les ouvrages soient sous dimensionnés (pour un dimensionnement réalisé sur une période de retour de T années). Ainsi la norme NF EN 752 propose, pour les maîtres d'ouvrages qui prennent la responsabilité du choix du dimensionnement, les ordres de grandeur dans le tableau suivant.

Zone	Période de retour de dimensionnement
Zone rurale	10 ans
Zone résidentielle	20 ans
Centre-ville, zone industrielle ou commerciale	30 ans
Passages souterrains routier ou ferrés	50 ans

Tableau 3 - Choix de la période de retour de dimensionnement selon la norme NF EN 752

L'intensité moyenne maximale est déterminée à partir des courbes IDF : Intensité-Durée-Fréquence. Elles sont établies sur la base de données pluviométriques. Dans notre cas et pour l'utilisation de l'outil, les

données utilisées sont fournies par Météo France (Station météorologique de Chamonix, Haute-Savoie, France) et Météo Suisse (Station météorologique de Genève-Cointrin, Genève, Suisse) pour estimer les intensités des phénomènes pluvieux pour des périodes de retour allant de 1 à 20 ans. C'est plus précisément la station météorologique de l'aéroport de Genève-Cointrin qui fournit les données nécessaires se trouvant sous la forme de deux coefficients : a et b, appelés coefficients de Montana. Ces deux valeurs sont liées au site de mesure et associées à une période de retour donnée. Il est ensuite simple de retrouver l'intensité moyenne maximale avec la formule de Montana :

$$I(T, d) = a \cdot d^b \quad (1)$$

Avec :

I : Intensité de la pluie (mm/min)

d : Durée de la pluie (min)

a et b : Coefficients de Montana

Il s'agit de la seule méthode permettant d'associer un risque chiffré à un événement météorologique pluvieux en lui associant une période de retour ; ce qui en fait la méthode privilégiée pour de nombreuses études hydrologiques.

2.1.1 Pour les méthodes empiriques

La méthode Rationnelle intègre l'intensité de la pluie sur une durée égale au temps de concentration du bassin (§ 2.2.1.4). Cette intensité maximale est calculée avec la formule de Montana vue précédemment.

La méthode de Caquot utilise directement les coefficients de Montana, sans passer par une valeur d'intensité. Cette dernière n'est pas donc pas connue par le modélisateur.

2.1.2 Pour le modèle dynamique

A l'inverse des deux modèles précédents, la méthode du réservoir linéaire nécessite l'emploi d'un hyétogramme complet : on parle de pluie de projet. Il s'agit d'une pluie fictive représentée par un hyétogramme simplifié mais équivalent statistiquement à une pluie réelle. Chaque pluie de projet est affectée à une période de retour donnée. Il existe différentes formes de pluie de projet mais seule la forme type double triangles a été retenue. Ce type de pluie de projet développé par Michel DESBORDES dans les années 70 provient d'une analyse statistique de pluies réelles basée sur deux constats. Le premier est que la majorité des événements pluvieux qui entraînent des dysfonctionnements en réseau sont constitués d'une période de pluie intense et courte située au sein d'un événement pluvieux plus long. Cela est dû au fait que le sol soit en partie saturé et les microporosités déjà comblées au plus fort de la pluie. Le second constat est que la distribution de l'intensité d'une pluie n'est régie par aucune loi, il n'est donc pas impossible d'observer un jour une pluie particulière avec la forme d'une pluie double triangle. L'intérêt de cette forme de pluie de projet est qu'elle a été construite dans le but de rendre le modèle de ruissellement peu sensible aux erreurs commises sur les paramètres principaux du modèle. Dans notre cas, il s'agit du lag-time (Cf. §2.2.1.5), noté K, qui correspond au décalage entre les précipitations et le débit à l'exutoire. DESBORDES (*Une étude générale de l'assainissement pluvial urbain*, 1975) et DESBORDES et al. (*Un exemple de l'intérêt des études de sensibilités des modèles hydrologiques*, 1976) annoncent une faible variation du débit de pointe malgré une forte variation de la durée K. En effet, un écart relatif de 40% sur le lag-time génèrerait une modification du débit de pointe à plus ou moins 20%. Cet écart est intéressant quand nous connaissons la difficulté

d'évaluer le paramètre K. Encore plus intéressant, d'après la formule de Manning-Strickler (§ 4), une erreur de 20% sur le débit entraîne une incertitude de l'ordre de 8% sur le diamètre retenu. Cela permet de conclure que malgré la difficulté à estimer le lag-time d'un bassin versant, l'incertitude finale sur le diamètre à mettre en œuvre reste faible.

Sur le schéma ci-dessous, nous pouvons identifier cinq paramètres différents :

- t_3 : Durée totale de l'évènement pluvieux
- t_1 : Durée de la pluie intense
- t_2 : Position de la pluie intense par rapport au début de l'évènement
- i_{max} : Intensité maximale de l'évènement
- i_2 : Intensité au temps t_2

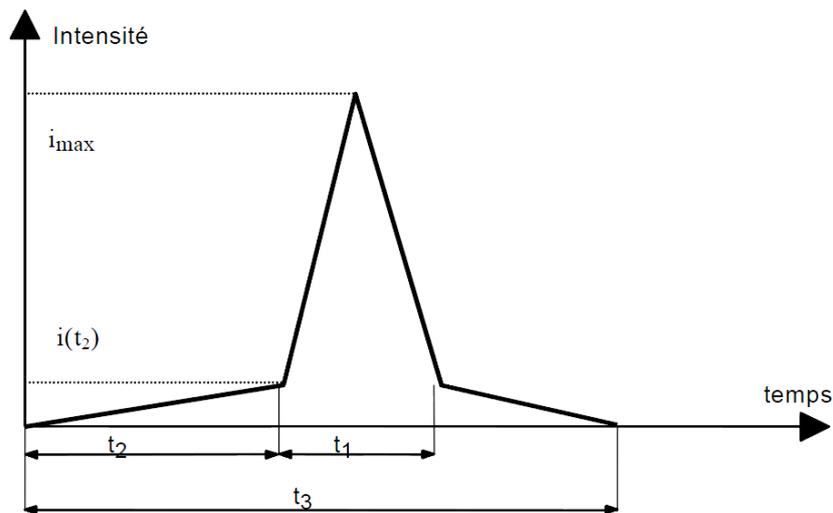


Figure 6 - Pluie de projet double triangle (*La ville et son assainissement*, 2003)

En utilisant la méthode mise au point par CHOCAT et al. (1981), il est simple de construire une pluie de ce type en utilisant directement les valeurs des coefficients de Montana a et b présentés plus haut.

$$t_1 = 0,5 \cdot K \quad (2)$$

$$t_2 = 2,25 \cdot K \quad (3)$$

$$t_3 = 5 \cdot K \quad (4)$$

$$i(t_2) = (0,25 K)^b \cdot \frac{1 - 0,1^{b+1}}{0,9 \cdot 0,1^b} \cdot 120 \cdot a \cdot 2^b \quad (5)$$

$$i_{max} = (0,25K)^b \cdot \frac{0,1^b - 1}{0,9 \cdot 0,1^b} \cdot 120 \cdot a \cdot 2^b \quad (6)$$

Avec :

- t_1 : Durée totale de l'évènement pluvieux (min)
- t_2 : Position de la pluie intense par rapport au début de l'évènement (min)
- t_3 : Durée totale de l'évènement pluvieux (min)
- $i(t_2)$: Intensité de la pluie à t_2 (mm/h)

- i_{max} : Intensité maximale de la pluie (mm/h)
- a et b : Coefficients de Montana
- K : Lagtime (min)

Considérant la forme de la pluie double triangles présentée en figure n° 6, nous pouvons en déduire simplement les quatre équations suivantes qui représentent graphiquement le hétérogramme :

- Pour $0 < t < t_2$:

$$i(t) = t \cdot \frac{i_2}{t_2} \quad (7)$$

- Pour $t_2 < t < t_2 + 0,5t_1$:

$$i(t) = t \cdot \frac{i_{max} - i_2}{0,5 t_2} + i_2 - \frac{t_2 \cdot (i_{max} - i_2)}{0,5 t_1} \quad (8)$$

- Pour $t_2 + 0,5t_1 < t < t_2 + t_1$:

$$i(t) = t \cdot \frac{i_2 - i_{max}}{0,5 t_1} + i_2 - \frac{(i_2 - i_{max})}{0,5 t_1} \cdot (t_2 + t_1) \quad (9)$$

- Pour $t_2 + t_1 < t < t_3$:

$$i(t) = t \cdot \frac{-i_2}{t_3 - t_2 - t_1} - t_3 \cdot \frac{-i_2}{t_3 - t_2 - t_1} \quad (10)$$

La codification de cette étape est disponible, comme l'ensemble du code VBA pour la modélisation du réservoir linéaire, en annexe n° 4.

L'utilisation d'une pluie de projet a été contrebalancée par Bernard CHOCAT lui-même dès 1978 puisque ce dernier expliquait qu'il était « *utopique de vouloir représenter la pluviométrie d'une région par une unique pluie* » alors qu'il proposait d'utiliser à la place « *une série d'événements pluvieux caractérisant effectivement la pluviométrie locale* ». Ce type de données nécessiteraient une grande période de mesure ce qui n'est pas toujours réalisable mais retenons l'hypothèse réalisée en considérant une seule et même averse lors de nos modélisations.

Pour clore cette partie concernant la représentation de la pluie dans l'utilitaire, rappelons que la répartition spatiale des précipitations ne sera pas prise en compte. En effet, sur des surfaces importantes (supérieures à une dizaine de km²), il peut être intéressant d'utiliser un réseau de pluviomètres pour apprécier la variabilité spatiale des précipitations en appliquant la méthode des polygones de Thiessen ou encore en étudiant la des précipitations en fonction de l'altitude. Ce problème pourrait néanmoins être rencontré lors de la phase de validation de l'outil puisque l'un des trois bassins versants étudiés est relativement vallonné. Pour s'affranchir au maximum de ce phénomène, les données de pluie pour le bassin versant le plus éloigné de notre pluviomètre proviendront d'une station météorologique privée située à proximité directe du site de mesure.

2.2 La transformation pluie/débit

Après avoir modélisé l'apport d'eau généré par les précipitations, la seconde partie de calcul du modèle consiste à déterminer le débit à l'exutoire du bassin versant généré par l'évènement météorologique en question. Cette étape peut être représentée par de multiples paramètres qui permettent d'intégrer dans le modèle trois grands phénomènes : l'interception, l'infiltration et le ruissellement. Ces trois composantes permettent d'évaluer les pertes initiales, les pertes au ruissellement et de déterminer ainsi la pluie nette (pluie participant au ruissellement) à partir de la pluie brute (précipitations totales) puis le débit à l'exutoire. Le diagramme ci-après représente ces transferts.

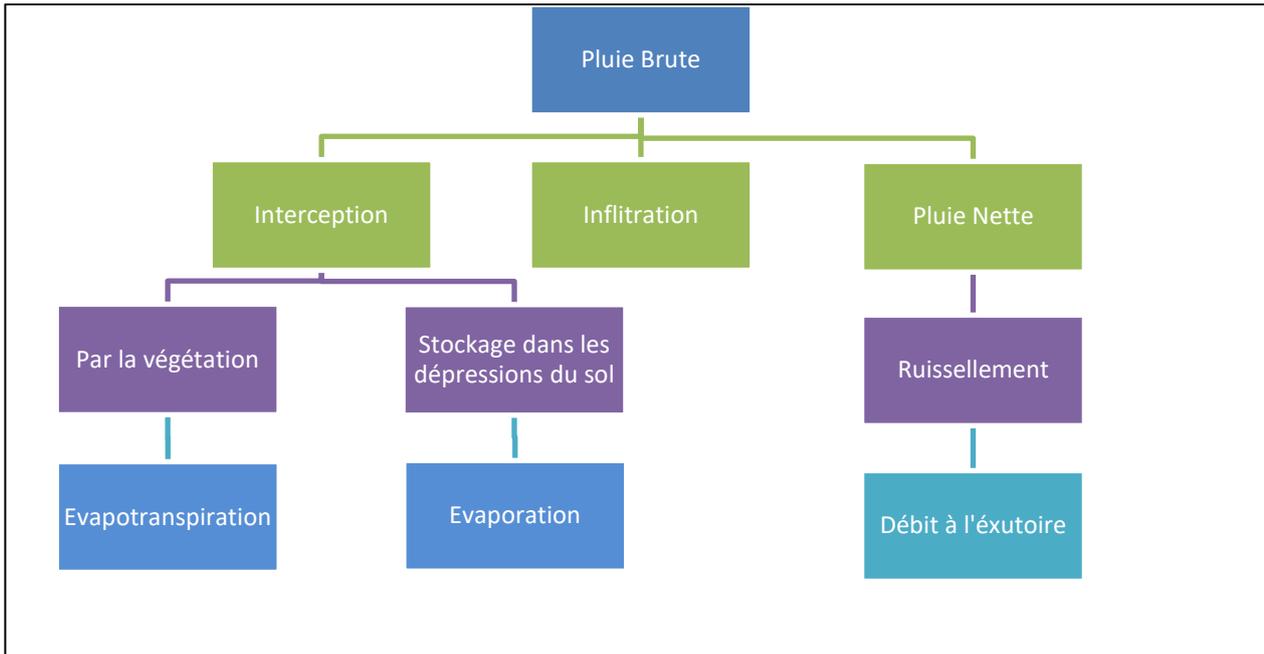


Figure 7 - Organigramme de la transformation pluie/débit

En hydrologie urbaine, le phénomène d'évaporation est très souvent négligé. En effet, lors d'un épisode pluvieux l'air est très vite saturée en eau et la capacité d'évaporation est très limitée : Chocat et al. (1982) annoncent un taux d'évaporation de l'ordre de quelques dixièmes de millimètre par heure lors d'une pluie. Les durées des événements pluvieux modélisés permettent donc de négliger ce facteur de perte. De la même manière les pertes par interception de la végétation peuvent être négligées dans le cas de bassins versants fortement urbanisés. Si elles devaient être prises en compte, leur détermination est très complexe du fait de leur dépendance à de nombreux facteurs : état de la végétation, vent, conditions climatiques des jours voir des semaines précédant l'évènement étudié, etc. Pour information, Desbordes (1974) cite un stockage de l'ordre de 0,2 à 1,5 millimètres d'eau. Le stockage dans les dépressions du sol peut être plus conséquent. Ces pertes ont lieu au début du phénomène pluvieux, le temps que les micro-dépressions du sol se remplissent d'eau et forment des flaques. Il n'est cependant pas facile à évaluer ; retenons pour le moment une valeur allant de trois à une quinzaine de millimètres. Cette valeur sera affinée lors de la phase de calage et de validation. L'infiltration peut également être un phénomène important dans le cas de bassins versants peu urbanisés. Selon l'état du sol, elle peut atteindre plusieurs millimètres par heure. Dans notre cas, l'utilitaire n'intègre pas de modélisation des pertes initiales. Cela aura pour conséquence de générer une réponse hydrologique au début de l'évènement alors que ce n'est pas le cas en réalité.

Les paramètres détaillés ci-après vont alors permettre de modéliser la fonction de transfert au travers des phénomènes de ruissellement.

2.2.1 Les paramètres qui entrent en jeu

2.2.1.1 Le coefficient d'imperméabilisation

Ce coefficient représente le taux d'imperméabilisation du bassin versant. Il correspond au rapport entre la surface imperméabilisée raccordée au réseau et la surface totale du bassin versant étudié. Le tableau suivant présente des valeurs couramment utilisées.

Type d'habitat	Coefficient d'imperméabilisation
Habitations très denses, centre-ville et parking	0,8 à 1
Habitations denses, zones industrielles et commerciales	0,6 à 0,8
Habitats collectifs, quartier résidentiel	0,4 à 0,6
Habitats individuels	0,1 à 0,4

Tableau 4 - Valeurs des coefficients d'imperméabilisation courantes

Considérant que nos études se réalisent en majeure partie sur des bassins versants fortement urbanisés, le coefficient d'imperméabilisation sera assimilé au coefficient de ruissellement.

2.2.1.2 Le coefficient de ruissellement

Le coefficient de ruissellement est le rapport entre le volume précipité et le volume ruisselé. Ce dernier est intégré dans l'outil via la notion de surface active. A chaque type de revêtement est associé un coefficient de ruissellement correspondant. La surface active est définie par la somme des produits du coefficient de ruissellement propre à chaque surface multiplié par la superficie de la surface en question.

Type de surface	Coefficient de ruissellement
Toiture	0,95
Enrobé	0,90
Béton	0,85
Stabilisé	0,4
Gazon	0,2
Prairie haute	0,15
Forêt	0,1

Tableau 5 - Coefficients de ruissellement utilisés

Les valeurs présentées dans le tableau précédent sont préentrées dans l'utilitaire ; il s'agit donc des valeurs que nous utilisons par défaut. L'utilisateur expérimenté a néanmoins la possibilité de les modifier directement dans le logiciel lorsque cela s'avère nécessaire et justifié ; tout en sachant qu'il s'agit du paramètre essentiel de la fonction de transfert et que l'ensemble des modèles y sont très sensibles.

Pour un même bassin versant, le coefficient de ruissellement évolue en fonction des saisons, de l'état de la végétation et de la climatologie avant l'évènement pluvieux. En plus de cela et pour des conditions identiques, le coefficient de ruissellement peut varier en fonction des évènements pluvieux suivant ses caractéristiques (intensité, durée, etc.). La figure suivante présente cette variabilité en fonction de l'intensité de la pluie (étude réalisée sur 850 événements sur un bassin versant de 13 hectares en habitats individuels à Nantes).

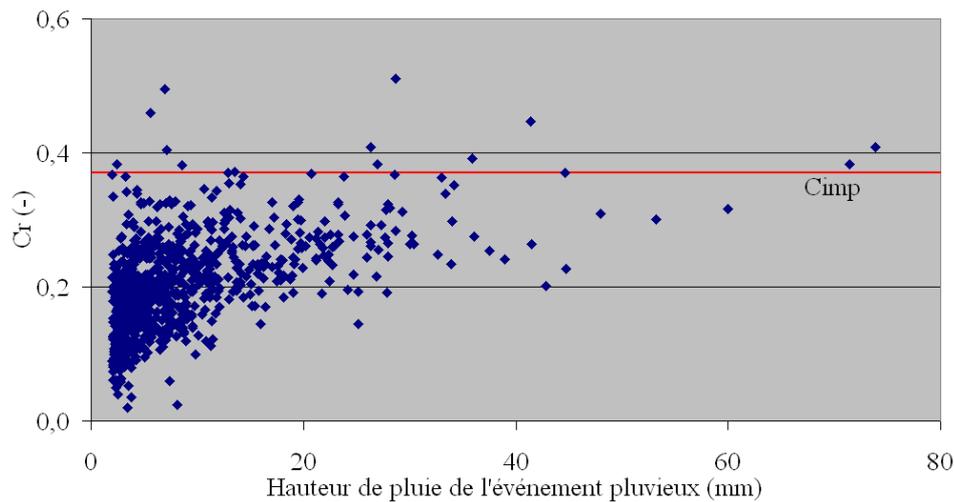


Figure 8 - Variabilité du coefficient de ruissellement en fonction du volume précipité (*Hydrologie et hydraulique des réseaux d'assainissement*, 2019)

Comme le montre ce graphique, pour des événements de faible occurrence, la valeur du coefficient de ruissellement est très variable et parfois largement inférieure au coefficient d'imperméabilisation. A l'inverse, plus la période de retour est élevée, plus le coefficient de ruissellement se rapproche de la valeur du taux d'imperméabilisation en le dépassant parfois. Dans ce cas, cela signifie que même les zones perméables participent au ruissellement. En effet, lorsque l'intensité des précipitations est supérieure à la conductivité hydraulique du sol à saturation, l'eau ne pouvant s'infiltrer ruissèle alors.

Dans l'outil, le coefficient de ruissellement ne sera pas considéré variable puisque cette variabilité est très difficile à évaluer.

2.2.1.3 La longueur et la pente du bassin versant

La longueur utilisée est la longueur hydraulique : elle correspond au plus long parcours possible qu'une goutte de pluie devrait emprunter pour aller à l'exutoire du bassin versant. La pente du bassin versant considérée est la pente suivant la longueur hydraulique. Ces deux données permettent de calculer le temps de concentration et le temps de réponse (lag-time, cf. §2.2.1.5).

2.2.1.4 Le temps de concentration

Le temps de concentration correspond à la durée nécessaire à une goutte d'eau pour transiter le long du parcours hydraulique.

Il existe une multitude de formules permettant d'estimer le temps de concentration. La méthode retenue est la méthode des services routiers californiens dans le cas de l'application de la méthode Rationnelle. En effet, son utilisation sera limitée à de l'assainissement routier donc cette formulation est parfaitement adaptée.

$$T_c = 0,0195 \cdot L^{0,77} \cdot I^{-0,385} \quad (11)$$

Avec :

- T_c : Temps de concentration (min)
- L : Longueur hydraulique (m)
- I : Pente le long du cheminement hydraulique (m/m)

Dans le cas de la méthode de Caquot, le temps de concentration n'est pas directement calculé puisque les coefficients de Montana sont injectés dans la formule de calcul du débit de pointe, sans passer par une valeur d'intensité de pluie. Si une estimation de ce temps est nécessaire, il peut néanmoins être exprimé comme suit :

$$Tc = 0,28 \cdot M^{0,84} \cdot I^{-0,41} \cdot S^{0,507} \cdot Q^{-0,287} \quad (12)$$

Avec :

- Tc : Temps de concentration (min)
- M : Coefficient d'allongement ($M = L / 100 / S^{0,5}$), avec 0,8 comme limite inférieure
- L : Longueur hydraulique (m)
- I : Pente suivant le parcours hydraulique (m/m)
- S : Superficie du bassin versant (ha)
- Q : Débit de pointe généré par le bassin versant (m^3/s)

Le principal intérêt de cette formulation est que le temps de concentration est fonction du débit de pointe, ce qui permet de prendre en compte la variabilité de cette durée en fonction des évènements pluvieux.

Le tableau ci-après, présentant les temps de concentration des trois sites retenus, permet d'apprécier la variabilité des résultats en fonction de la formule retenue.

Bassin versant	Services routier Californien	Shaake et Geyer	Desbordes	Observations terrain
1 – Thonon-les-Bains	2,3 min	9,2 min	2,4 min	< 3 min
2 – Sciez	9,8 min	14,9 min	5,9 min	~ 8 min
3 - Allinges	19,0 min	28,0 min	28,5 min	20 à 30 min

Tableau 6 - Temps de concentration sur les trois sites de mesure

Comme évoqué ci-dessus, nous avons retenu la méthode des services routier californiens pour l'application de la méthode Rationnelle.

2.2.1.5 Le temps de réponse ou lag-time

Cette seconde durée caractéristique correspond au décalage entre les précipitations et le débit à l'exutoire, soit entre le centre de gravité du hétérogramme et celui de l'hydrogramme. Elle n'est utilisée que pour l'application de la méthode du réservoir linéaire.

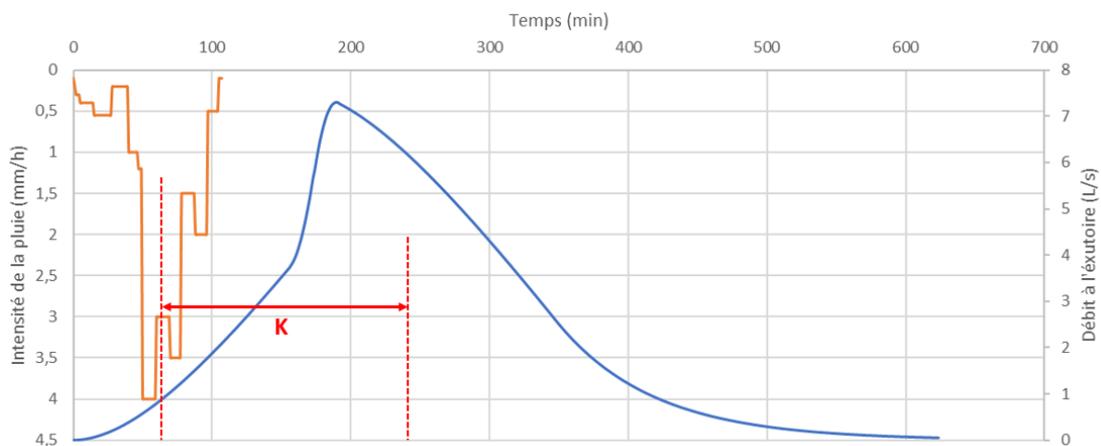


Figure 9 - Représentation graphique du lag-time

Plusieurs propositions ont été faites pour la détermination du temps de réponse. Seul l'ajustement de Desbordes (équation n° 13) proposé en 1974 et largement répandu depuis sera utilisé. Il est à noter que comme d'autres paramètres présentés ci-dessus, le lag-time est dépendant de l'événement pluvieux et de l'état du bassin versant à un instant donné mais cette variabilité n'est que très rarement prise en compte.

$$K = 0,254 \cdot S^{-0,0076} \cdot C_{imp}^{-0,512} \cdot I^{-0,401} \cdot L^{0,6} \quad (13)$$

Avec :

- K : Lag-time (min)
- S : Surface du bassin versant (ha)
- C_{imp} : Coefficient d'imperméabilisation (entre 0 et 100)
- I : Pente suivant le parcours hydraulique (m/m)
- L : Longueur hydraulique (m)

2.2.2 Les approches empiriques

Les modèles globaux sont les modèles qui apparaissent comme les plus simples à utiliser. Ces derniers ne permettent pas une discrétisation spatiale mais étudient le bassin versant dans son ensemble. La transformation pluie/débit n'est pas détaillée et les phénomènes de transfert et de stockage hydrologique ne sont pas pris en compte. Ces modèles ne permettent de déterminer qu'une seule donnée, ici le débit de pointe. La simplicité d'utilisation ne doit pas masquer la sensibilité de ces modèles aux quelques paramètres pris en compte.

2.2.2.1 Méthode Rationnelle

La première méthode intégrée est la méthode Rationnelle. C'est la formule de calcul hydrologique la plus élémentaire pour déterminer un débit de pointe. Elle se présente sous la forme :

$$Q_{bv} = 2.78 \cdot Cr_{BV} \cdot S_{BV} \cdot i(T, d) \quad (14)$$

Avec :

- Q_{BV} : Débit produit par le bassin versant (l/s)
- Cr_{BV} : Coefficient de ruissellement du bassin versant
- $i(T, d)$: Intensité de la pluie en fonction de la période de retour et de la durée de la pluie (mm/h)
- S_{BV} : Surface totale du bassin versant (ha)

Ne nécessitant que peu de données d'entrées, il s'agit d'un moyen simple et rapide de disposer d'une première valeur de débit maximal mais cette méthode ne doit pas être utilisée dans le cas de bassin versant complexe (Memento technique, 2017, ASTEE). Même si son utilisation est envisageable sur des bassins versants fortement urbanisés de quelques dizaines d'hectares tout au plus, son usage sera limité à de l'assainissement routier puisque ses limites d'application ne sont pas clairement définies. Les projets d'assainissement routier que réalise C2I paraissent donc compatibles avec cette méthode : bassin versant homogène, de petite taille et avec un coefficient de ruissellement très important mais surtout un fonctionnement hydraulique simple.

L'indépendance entre le coefficient de ruissellement du bassin versant et l'intensité de pluie est l'hypothèse forte de cette méthode. Or plus l'intensité de la pluie est élevée, plus le coefficient de ruissellement sera important. En effet, l'infiltration et l'interception de la pluie diminue avec l'augmentation de l'intensité des précipitations. Malgré cela, la variabilité du coefficient de ruissellement n'est que rarement prise en compte puisqu'il s'agit d'une donnée difficile à apprécier.

2.2.2.2 Méthode de Caquot

La seconde méthode empirique ajoutée à l'utilitaire est la méthode de Caquot dans sa forme la plus simple, c'est-à-dire sans possibilité d'assembler des bassins versants en série ou parallèle. Cette possibilité est complexe à mettre en œuvre et peut parfois donner lieu à des résultats aberrants. Formule historique la plus utilisée en France depuis sa préconisation dans l'instruction technique de 1997, la méthode de Caquot ne permet d'obtenir que le débit de pointe généré par un bassin versant en fonction d'une période de retour. Sa formulation est la suivante :

$$Q = \alpha \cdot Cr^\gamma \cdot I^\beta \cdot S^\delta \quad (15)$$

Avec :

- Q : Débit de pointe produit (l/s)
- Cr : Coefficient de ruissellement du bassin versant
- I : Pente de la canalisation (m/m)
- S : Surface du bassin versant (ha)
- α , β , γ et δ : Coefficients de formule :

- $\gamma = 1 / (1 + 0,287 \cdot b)$
- $\alpha = 1000 \cdot [a \cdot 0,5^b \cdot (M/2)^{0,84b} / 6,6]^\gamma$
- $\beta = -0,41 \cdot b \cdot \gamma$
- $\delta = (0,507 \cdot b + 1 - 0,05) \cdot \gamma$

Avec :

- M : Coefficient d'allongement ($M = L / 100 / S^{0,5}$), avec 0,8 comme limite inférieure
- L : Longueur hydraulique (m)
- a et b : Coefficients de Montana

Ayant un fort intérêt historique en France, cette méthode est adaptée à des bassins versants plutôt urbanisés et homogènes. Ses limites d'applications avérées sont une surface de moins de 20 hectares, un coefficient d'imperméabilisation supérieur à 20% et une pente de l'ordre de 0,2 à 5%. Bien qu'étant un modèle global, la formule de Caquot permettrait de prendre en compte le transfert dans le réseau et un certain effet de stockage sur le bassin versant. Comme l'ensemble des modèles hydrologiques, cette formule reste très sensible vis-à-vis du coefficient de ruissellement retenu.

2.2.3 Le modèle dynamique : modèle du réservoir linéaire

Comme nous l'avons vu plus haut, nous avons souhaité compléter l'outil en intégrant une méthode dynamique permettant de disposer d'une vision plus fine du transfert de l'eau au cours d'un épisode pluvieux. Une formulation simple parmi les plus utilisées pour l'étude des bassins urbains a été retenue : le modèle du réservoir linéaire. Ce modèle représente le bassin versant tel un réservoir (ou plusieurs réservoirs en cascade dans le cas d'un assemblage de sous bassins versants ; ce qui n'est pas encore possible dans l'outil) avec une loi de vidange. En plus d'être facilement transposable mathématiquement, ce modèle a l'avantage de permettre à l'utilisateur de comprendre les phénomènes en jeu puisque la visualisation des phénomènes est aisée, à l'image d'une baignoire qui se viderait.

Deux équations mathématiques permettent de représenter ce modèle impliquant une relation proportionnelle entre le volume stocké et le débit rejeté par le bassin. Une équation de stockage (16) et une équation de continuité représentant la conservation de la masse (17).

$$S(t) = K \cdot Q(t) \quad (16)$$

$$\frac{dS(t)}{dt} + Q(t) = 2,78 \cdot C_r \cdot A \cdot i(t) \quad (17)$$

Il faut ensuite intégrer ces deux relations et les discrétiser au pas de temps Δt . Nous obtenons l'équation suivante, en considérant l'intensité de la pluie constante sur Δt .

$$Q(t) = Q(t-1) \cdot e^{-\frac{\Delta t}{K}} + 2,78 \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{K}}\right) \cdot C_r \cdot A \cdot i(t) \quad (18)$$

Avec :

- $Q(t)$: Débit au pas de temps t (l/s)
- K : Lag-time (min)
- A : Surface du bassin versant (ha)
- C_r : Coefficient de ruissellement du bassin versant
- $i(t)$: Intensité de la pluie au pas de temps t (mm/h)

Comme nous pouvons le voir, ce modèle est régi par deux paramètres : K , le lag-time et C_r , le coefficient de ruissellement. Pour rappel, le modèle intègre une pluie de projet de type double triangles ce qui permet de limiter la sensibilité du modèle du réservoir linéaire vis-à-vis du lag-time. De multiples études appuyées sur des mesures (NORMAND, 1971 ; SARAM et al., 1973 ; DESBORDES, 1974) montrent que la valeur du lag-time est variable pour un même bassin versant en fonction d'un épisode à l'autre. Cette variation ne sera pas prise en compte et le temps de réponse K sera calculé comme vu dans la partie précédente. Le modèle reste donc, comme tous les modèles hydrologiques, fortement sensible à la valeur du coefficient de ruissellement retenue.

Pour terminer sur le modèle du réservoir linéaire, malgré son apparente simplicité, ce dernier permet de modéliser des bassins versants urbains de petite taille mais aussi des bassins versants ruraux de plusieurs centaines d'hectares. Ce modèle a pour effet de lisser les fortes intensités de pluie, et ce de manière croissante avec l'augmentation du lag-time tout en assurant une réponse hydrologique cohérente et proche de la réalité.

3 Validation de l'outil

Dans le but de valider l'outil et de disposer d'une base de comparaison entre les modélisations et la réalité du terrain, nous avons souhaité réaliser une campagne de mesure en réseau pluvial. Les données recueillies sont donc le débit d'eau ruisselé et la pluviométrie. Avant de rentrer dans le détail de cette campagne, il est important d'en préciser les limites que nous avons rapidement pu identifier.

La première, et l'une des plus importantes, est le temps et le budget à disposition. Instrumenter et suivre plusieurs sites de mesure durant des mois demande du temps et un budget conséquent. Ces deux composantes sont le facteur limitant de la plupart des campagnes de mesure en hydraulique urbaine, auxquelles il faut ajouter la variabilité météorologique. Réalisant des mesures en réseau pluvial, la météorologie était le facteur clé de la réussite des mesures. Mises bout à bout, ces contraintes ont permis de réaliser 9 semaines de mesures et d'observer au total 7 événements pluvieux intéressants. Cela implique donc que la phase de validation ne sera réalisée que sur un faible nombre de valeurs et que les conclusions qui en découlent seront spécifiques à la période d'observation et devront être vérifiées sur des périodes de mesures plus longues.

Disposer d'une durée d'instrumentation courte ne permet statistiquement pas d'observer des événements météorologiques de faible occurrence. Cela amène donc la seconde limite de cette phase de validation : l'outil a été testé et validé pour des événements allant jusqu'à des périodes de retour d'environ 6 mois mais il sera par la suite utilisé pour dimensionner des ouvrages d'assainissement pluvial pour des occurrences supérieures à la décennale. Nous devons donc faire l'hypothèse que les phénomènes de transfert ayant lieu lors d'épisode de faible intensité sont les mêmes que pour des pluies historiques.

La deuxième contrainte de la campagne de mesure est sa précision. En effet, obtenir une valeur de débit à plus ou moins 20% de la réalité est aujourd'hui qualifiée de mesure correcte en débitmétrie. La comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs modélisées devra donc tenir compte des incertitudes élevées.

De la même manière, la mesure de la pluviométrie est entachée d'incertitude. Il avait tout d'abord été convenu d'utiliser une station météorologique privée comme référence pour mesurer la pluviométrie. Le pas de temps de mesure de cette station, fixé à 10 minutes, n'aurait pas permis d'obtenir un hyétogramme suffisamment détaillé pour l'étude d'un bassin versant de petite taille. Nous avons donc choisi de mettre en place un pluviomètre à auget basculant pour améliorer le niveau de détail de la mesure. Cela étant, la variabilité spatiale des phénomènes météorologiques est telle que ces deux appareils ne permettront pas de disposer de données parfaitement cohérentes avec l'ensemble des sites de mesure. Il aurait fallu pour cela disposer d'un réseau de pluviomètres plus important et de réaliser un abatement spatial, en fonction de l'altitude ou de la position géographique des sites. Pour prendre en compte une certaine répartition spatiale des pluies, la station privée alimentera le modèle du BV le plus proche alors que les données issues du pluviomètre permettront de modéliser les deux autres BV, plus proches du site d'implantation du pluviomètre (cf. carte en annexe n° 7).

La dernière contrainte est la connaissance des sites de mesures. Certains sont relativement simples et donc faciles à comprendre mais le plus grand des trois secteurs retenus dispose d'un fonctionnement hydraulique complexe. Il est donc difficile de comprendre l'ensemble des phénomènes hydrologiques en jeu sur une période d'instrumentation si courte.

Après avoir présenté le matériel utilisé pour les mesures et caler les modèles, la validation de l'outil sera scindée en deux étapes. La première consiste en la vérification de la transformation pluie/débit avec la méthode du réservoir linéaire en injectant directement les mesures pluviométriques dans le modèle. La

seconde phase sera la comparaison des événements mesurés avec des pluies de projet de période de retour similaires. Cette étape sera primordiale puisqu'elle correspond à l'utilisation future des modèles.

3.1 La mesure de débit

3.1.1 Les sites de mesures de débits

Trois sites distincts ont été retenus : cela permet d'étudier trois bassins versants aux caractéristiques différentes tout en ne multipliant pas les points de mesure et les contraintes qui en découlent (temps nécessaire, budget, suivi et contrôle des installations, etc.).

Les bassins versants retenus devaient respecter deux points :

- Proximité avec nos locaux : Il était important que les trois sites se trouvent dans un rayon proche de nos bureaux pour limiter le temps nécessaire pour s'y rendre lors des étapes de maintenance et de surveillance des appareils ainsi que pour la collecte des données ;
- Caractéristiques des bassins versants différentes : Nous voulions équiper trois sites au fonctionnement différent pour avoir une vision globale des capacités de modélisation de l'outil. Ce choix ne permettait donc pas de valider réellement les résultats obtenus sur un type de bassin versant en particulier.

Trois zones ont finalement été retenues :

- Le parking de nos locaux : de très petite taille et très fortement imperméabilisé, ce premier site d'étude permet de tester la limite basse de notre outil avec une réponse hydrologique extrêmement rapide et de faibles débits.
- Un bassin versant routier : captant les eaux de ruissellement de la voirie, ce second secteur est adapté à la vérification du dimensionnement des collecteurs dans le cas de projet de voirie et d'assainissement routier.
- Un grand bassin versant rural : ayant une surface de collecte d'une centaine d'hectares, ce troisième et dernier bassin versant est également le plus complexe. C2I ne réalise que peu d'étude hydraulique sur des sites de ce type mais il paraissait intéressant de comprendre le fonctionnement de l'outil dans ces conditions et d'en apprécier les limites.

Après avoir identifié ces trois sites d'études, l'implantation précise des points de mesures devait être définit à l'aide des plans de recollement à disposition. Ces derniers devaient être facilement accessibles : réseau peu profond et si possible sous espaces verts et non pas sous voirie pour des raisons de sécurité. Pour fiabiliser la mesure au maximum, l'écoulement au niveau du point de mesure ne devait pas subir une influence amont ou aval. Il était nécessaire que l'écoulement soit stabilisé et le moins perturbé possible. Une distance minimale de toute singularité (coude, convergence, chute, etc.) de plus de dix fois le diamètre de la canalisation, comme préconisé par le constructeur permet de s'affranchir des perturbations de l'écoulement. LARRARTE et al. (*Fiabiliser les mesures de vitesse – Représentativité spatiale des mesures en continu de vitesse et incertitude sur les mesures de débit*, LARRARTE et al., 2016) préconisaient un éloignement de l'ordre de 6 à 10 fois la hauteur d'eau maximale admissible dans le collecteur ce qui est en accord avec la valeur retenue.

3.1.1.1 Bassin versant n° 1 : BV "Parking"

Situé sur la commune de Thonon-les-Bains, le parking extérieur de nos locaux répond à tous les critères précédemment évoqués. Implanté dans une zone urbaine à une altitude d'environ 460 mNGF, ce bassin versant sera appelé BV " parking" dans la suite de l'étude. Ses caractéristiques principales (Cf. § 2.2.1) sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Surface	Longueur hydraulique	Pente suivant le parcours hydraulique	Coefficient de ruissellement moyen
0,105 ha	84 m	2,9 %	0,90

Tableau 7 - Caractéristiques du BV "Parking"



Figure 10 - Image aérienne BV "Parking" (Géoportail - 16/04/2021)

Matériau du collecteur	Diamètre du collecteur	Pente moyenne	Pente sur le tronçon aval du point de mesure	Longueur alignement droit amont point de mesure
PVC	180 mm	2,7 %	2,6 %	44 m

Tableau 8 - Caractéristiques du réseau BV "Parking" (Plan de recellement, GROUPI TP, 16/01/2015)

3.1.1.2 Bassin versant n° 2 : BV "Voirie"

Pour ce second bassin versant nous avons retenu une portion de route départementale sur la commune de Sciez, située à moins de 10 kilomètres de nos bureaux et à proximité d'une station météorologique privée. Ayant une altitude proche de 400 mNGF, cette deuxième zone d'étude correspond uniquement à de la collecte des eaux de ruissellement de voirie et de cheminements piétons. Il sera nommé BV "Voirie" pour la suite du mémoire.

Surface	Longueur hydraulique	Pente suivant le parcours hydraulique	Coefficient de ruissellement moyen
1,22 ha	445 m	1,9 %	0,85

Tableau 9 - Caractéristiques du BV "Voirie"



Figure 11 - Image aérienne du BV "Voirie" (Géoportail - 26/04/2021)

Matériau du collecteur	Diamètre du collecteur	Pente moyenne	Pente sur le tronçon aval du point de mesure	Longueur alignement droit amont point de mesure
PEHD	850 mm	1,8 %	0,5 %	21 m

Tableau 10 - Caractéristiques du réseau BV "Voirie" (Plan de recollement, PERRIER 74, 04/12/2014)

3.1.1.3 Bassin versant n° 3 : BV "Rural"

Le troisième et dernier bassin versant est entièrement situé sur la commune d'Allinges, à proximité de nos locaux. L'altitude de la zone de collecte varie de 501 à 754 mNGF et le secteur est rural à faiblement urbanisé. Ce dernier site sera appelé BV "Rural" dans la suite du texte.

Surface	Longueur hydraulique	Pente suivant le parcours hydraulique	Coefficient de ruissellement moyen
95,0 ha	2 250 m	8,75 %	0,13

Tableau 11 - Caractéristiques du BV "Rural"

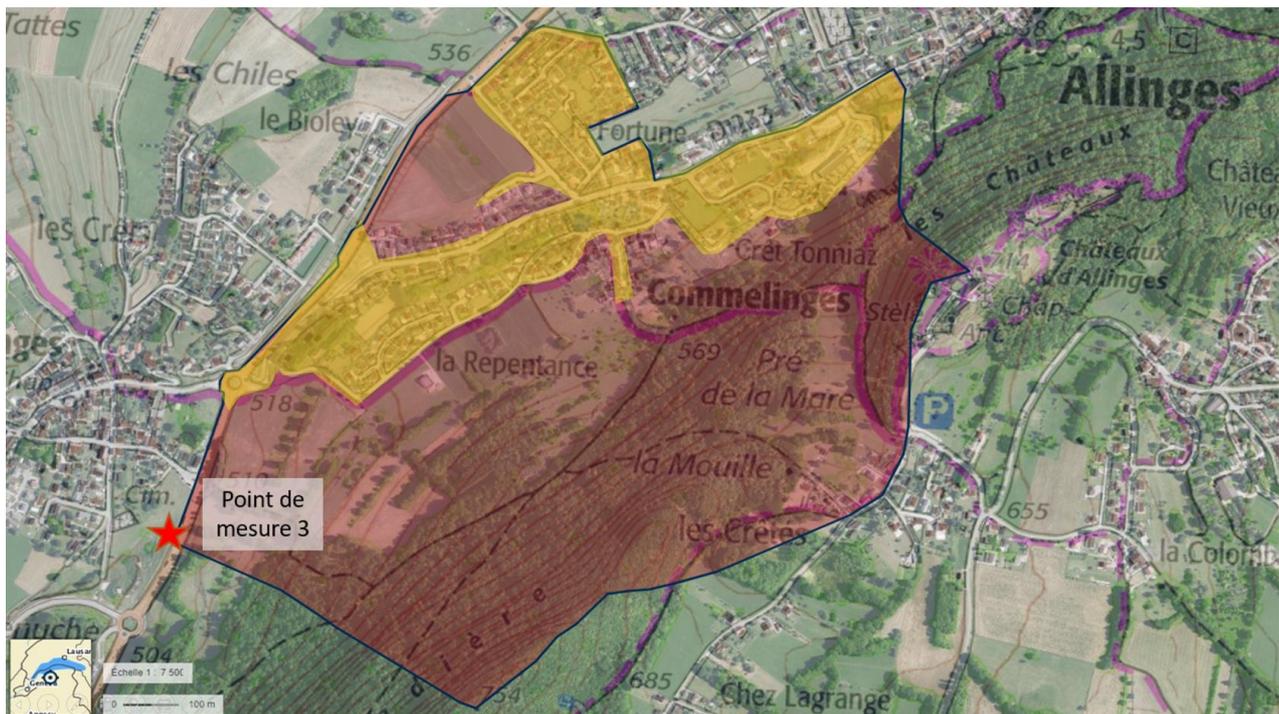


Figure 12 - Image aérienne du BV "Rural" (Géoportail - 16/04/2021)

Matériau du collecteur	Diamètre du collecteur	Pente moyenne	Pente sur le tronçon aval du point de mesure	Longueur alignement droit amont point de mesure
Béton	1 000 mm	2,2 %	3,7 %	75 m

Tableau 12 - Caractéristiques du réseau BV "Rural" (Plan de recollement, SOCCO, 11/06/2019)

Comme le montre l'image aérienne en figure n° 12, le bassin versant draine en majorité une zone de forêt et de prairie (en rouge). La zone contribuant en premier lieu au ruissellement est la voirie présente sur la partie inférieure du bassin versant (en jaune). Viennent ensuite les eaux de ruissellement provenant de la seconde zone, mais de manière réduite puisque le coefficient de ruissellement est très faible

3.1.2 Les débitmètres utilisés

3.1.2.1 Généralités

L'utilisation de débitmètres hauteur/vitesse a été choisie pour plusieurs raisons. Tout d'abord leur facilité d'installation. En effet, il s'agit d'une plaque sur laquelle sont fixées une sonde de mesure de hauteur et une sonde de mesure de vitesse (cf. figure n° 13).

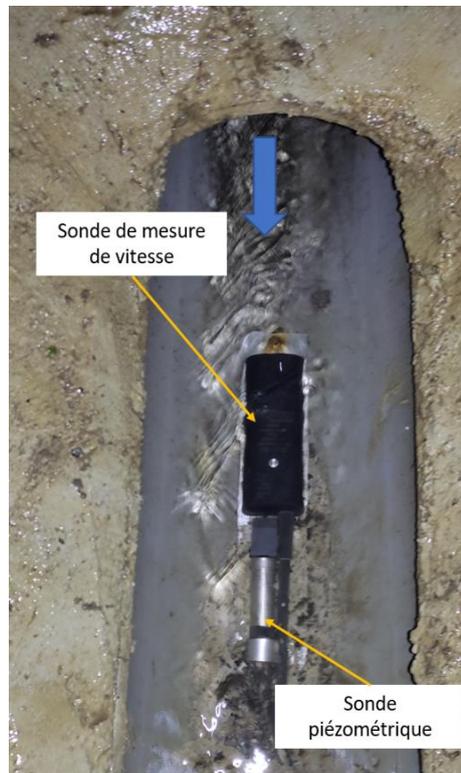


Figure 13 - Photographie de la sonde hauteur/vitesse (le 06/05/2021 à Thonon les Bains, Haute-Savoie)

Il suffit donc de fixer l'ensemble au niveau du radier de la canalisation et de relier les deux sondes à un enregistreur. Nous avons utilisé l'ensemble MainFlo® Portable loué par la société Hydreka®. Il était alors possible de disposer d'une autonomie de plus de 2 mois avec un pas de temps d'enregistrement d'une minute, ce qui semblait adapté à l'ensemble des trois sites d'études retenus. De plus, en comparaison avec des appareils de mesure type Radar, le prix de location restait intéressant. Les contraintes d'installation de capteur hauteur/vitesse permettaient d'équiper les 3 points de mesures identifiés : pour une installation à l'amont d'une chute, il faut respecter une distance minimale de 5 fois le niveau d'eau maximum, ce qui a bien été le cas. L'ensemble des autres contraintes (présence de seuil, confluence, coude, etc.) n'a pas été rencontré.

Les sondes de mesure de vitesse utilisent la technologie Doppler : une onde ultrasons est émise par la sonde et réfléchiée par les particules en suspension dans l'eau avant d'être captée par un récepteur situé à côté de l'émetteur à ultra-sons. Dans le cas d'eau claire la qualité du signal est très variable ce qui explique l'irrégularité de la valeur de débit calculée. Le logiciel permet ensuite de déterminer la vitesse moyenne à partir de la mesure de la vitesse maximale calculée grâce à l'effet Doppler.

3.1.2.2 *Dysfonctionnement rencontré*

Lors de la pluie du 06 mai, la sonde de mesure de vitesse a été endommagée (figure n° 14) rendant impossible la mesure du débit sur le BV "Rural" durant une semaine (du 06 au 12 mai), le temps de remplacer la sonde.

L'usure prématurée de la sonde est liée à un transport solide très important en provenance de la partie supérieure du bassin versant, d'un fossé et d'un chemin forestier sur lequel ruissellent les eaux pluviales lors des phénomènes les plus intenses. Combinés à des vitesses très élevées (jusqu'à 3 m/s avant le



dysfonctionnement de la sonde, et également constaté avec la seconde sonde lors d'un autre évènement), ces sables et graviers ont usé la face avant de la sonde. Les images en annexes n° 5 (ainsi que la photo de la page de garde) montrent l'importance du transport solide et ses origines. Le point de mesure est situé à une dizaine de mètres en amont d'un bassin de régulation crée en 2017. La quantité de dépôts qui se sont accumulés depuis 4 ans nous montre que le transport solide est élevé sur ce réseau. Pour éviter d'endommager une seconde sonde, le nouvel appareil a été installé dans le sens inverse du débit, de sorte à effectuer une lecture de vitesse négative. La sonde n'était donc pas directement exposée aux sables et graviers transportés.

Figure 14 - Photographie de la sonde de mesure de vitesse endommagée (le 07/05/2021 à Thonon-les-Bains, Haute-Savoie)

3.1.2.3 Incertitudes sur la mesure de débit

La plage de mesure de la sonde de vitesse est de 1 cm/s à 5 m/s pour une précision (vitesse moyenne) de $\pm 2\%$ de la lecture si $V \geq 0,5$ m/s ou $\pm 0,01$ m/s si $V < 0,5$ m/s.

La sonde de mesure de hauteur mesure la pression exercée par l'eau avec une précision de 0,1% de la pleine échelle.

A l'aide d'une table hauteur/surface et de la mesure de vitesse, le calcul de débit est automatisé.

Nous pouvons déterminer l'incertitude de la mesure de débit à l'aide de la formule de propagation des incertitudes (Loi de Gum), (Equation 19), en considérant que le débit est égal au produit de la vitesse et de la surface mouillée.

$$u(X) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial X_1}\right)^2 \cdot (X_1)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial X_2}\right)^2 \cdot (X_2)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial X_n}\right)^2 \cdot (X_n)^2} \quad (19)$$

Avec :

- $U(X)$: Incertitude sur la variable X avec un intervalle de confiance à 68%
- X_n : Variable en jeu dans le calcul de la grandeur X

Nous obtenons le graphique suivant, présentant l'évolution de l'incertitude relative sur la mesure de débit, dans la plage de mesure de la sonde de vitesse et de pression qui composent MainFlo®.

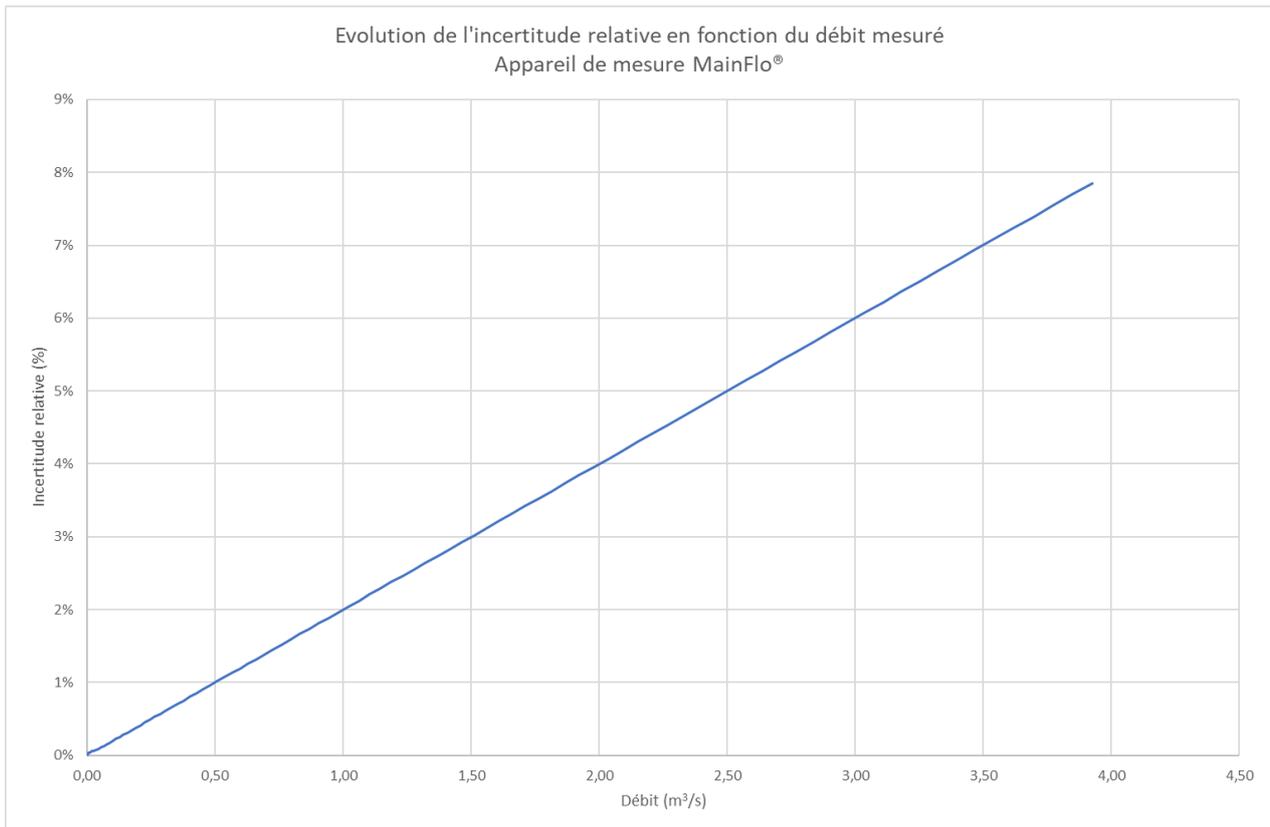


Figure 15 - Evolution de l'incertitude sur le débit mesuré à l'aide de débitmètre à effet Doppler

L'incertitude de mesure serait alors comprise entre environ 0 et 8% de la valeur mesurée dans des conditions optimales. Nous savons que les mesures en réseau ne sont que très rarement d'une telle précision et nous pouvons plutôt considérer une valeur de l'ordre de 20% sur la mesure de débit finale comme étant une mesure correcte (CERTU, La ville et son assainissement, 2003). De plus, et comme évoqué plus haut, réalisant des mesures en réseau pluvial, les eaux transitant sont faiblement chargées (malgré un transport en particules très grossières parfois important) et donc claires. Cela limite la réflexion des ondes sur les matières en suspensions (MES) et donc la qualité du signal obtenu (de l'ordre de 40 à 70% suivant les sites et les pluies). La qualité finale de la mesure de débit est liée à la qualité du signal : plus cette dernière valeur est élevée, plus la valeur de débit mesurée est fiable. Les valeurs débits obtenues durant la campagne de mesure devront donc être utilisées avec précaution en prenant en compte les incertitudes liées.

Nous nous sommes rendus sur chacun des sites à plusieurs reprises durant un événement pluvieux pour mesurer la hauteur d'eau réelle et corriger la hauteur mesurée par le capteur le cas échéant. Seul une des trois sondes de mesure de pression a dérivé, sur le BV "Voirie". Les corrections suivantes ont été réalisées, en insérant dans le logiciel de calcul la valeur de la hauteur mesurée réellement en remplacement de la hauteur mesurée par la sonde.

Date et heure	Hauteur mesurée par la sonde (mm)	Hauteur réelle (mm)
13/04/2021 15:42	0	0
19/05/2021 07:49	24	30
04/06/2021 17:13	19	26
14/06/2021 09:55	-8	0

Tableau 13 - Dérive de la sonde piézométrique sur le BV "Voirie"

3.2 La mesure de la pluie

Pour pouvoir valider l'ensemble des modélisations, il était nécessaire de disposer de mesures de pluie en même temps que celle de débit. Nous avons, dans un premier temps, pris contact avec le propriétaire d'une station météorologique privée située sur la commune de Sciez, à 9 kilomètres de nos locaux et à proximité du BV "Voirie", disposant de mesure de la pluviométrie à un pas de temps de 10 minutes. Mesurées depuis le 1^{er} janvier 2006, ces données ont permis de réaliser une étude statistique concernant l'occurrence des événements pluvieux dans le secteur pour de faibles périodes de retour (§1.2). Concernant la phase de validation, il était nécessaire de disposer d'un pas de temps de mesure plus fin. Cela a donc demandé la location d'un pluviomètre à augets basculants ; permettant ainsi de disposer de mesures plus locales et de pouvoir apprécier la répartition spatiale.

Avant de présenter les deux points de mesures, il est important de rappeler les limites et la précision de la mesure de la pluie et de son intensité. L'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) annonce une précision de la mesure de la pluie de l'ordre de 2% liée aux conditions de mesures (vent en particulier) et au matériel utilisé ; alors que Météo France propose de retenir une valeur de 5%. De nombreuses études (*Accuracy of rainfall measurement for scales of hydrological interest*, WOOD et al., 2000 ; *La précision des mesures pluviométriques*, SERRA ; *Validation de mesures en pluviométrie*, MOUROT et al., 2001 ; *Nouvelles techniques de mesure des pluies, des débits liquides et solides sur parcelles agronomiques*, LAMACHERE et al., 1996) annoncent des incertitudes plus élevées. Ainsi la précision des mesures pourrait varier de 10 à 20% suivant les mesures et les événements pluvieux. La pluviométrie au sol ne serait pas la même que celle mesurée à 1,0 mètre du sol, lié au mouvement instable de la masse d'air à proximité du sol. La mesure de l'intensité de la pluie ne sera pas totalement fiable et devra être utilisée avec précaution. En plus des erreurs liées à la mesure, la répartition spatio-temporelle des précipitations est très hétérogène suivant les événements et les conditions climatiques.

3.2.1 La station météorologique privée de Sciez



De plus en plus de particuliers s'intéressent à la météorologie et à la climatologie ce qui permet de disposer d'un réseau de points de mesure de plus en plus développé mais de qualité parfois médiocre. Nous avons pu entrer en contact avec un propriétaire d'une station de type Davis Vantage Pro 2[®] dont la qualité de mise en œuvre respecte un protocole strict. La figure n° 16 présente le matériel en place : un pluviomètre (1), des capteurs de température et d'humidité (2) - abrité avec ventilation active diurne -, capteurs solaires et ultraviolet à 1,60 mètre du sol (3) ainsi qu'un anémomètre à 1,6 mètre du sol (4) et un second à 3 mètres au-dessus du faitage du toit de l'habitation du propriétaire. Le pluviomètre est chauffé et permet donc d'enregistrer les précipitations solides mais nous n'en avons pas rencontré durant la période de mesure.

Figure 16 - Photographie de la station météorologique privée de Sciez (météo-sciez.fr)

3.2.2 Le pluviomètre à auget basculant



En complément des mesures de la station privée de Sciez, nous avons mis en place un pluviomètre à auget basculant à proximité des BV "Parking" et BV "Rural", sur la commune de Thonon-les-Bains (cf. plan de situation en annexe n° 7). Cela permet de disposer de mesures plus locales et à un pas temps plus faible.

Le fonctionnement d'un pluviomètre à auget basculant est simple et rustique : un auget bascule (figure n° 17) une fois rempli par une masse d'eau correspondant à 0,2 millimètre. L'heure exacte du basculement est enregistrée ce qui permet de connaître l'intensité de la pluie en complément de la hauteur d'eau précipitée.

Figure 17 - Photographie du mécanisme du pluviomètre à augets basculants (Thonon-les-Bains, Haute-Savoie, France - 13/04/2021)

Il a fallu trouver un site pour son installation répondant à plusieurs caractéristiques :

- Protection contre le vandalisme (donc dans une zone grillagée si possible) ;
- Proximité avec les sites de mesure ;
- Eloignement par rapport à la végétation et aux bâtiments pour éviter l'interception et les perturbations ;

Le département de Haute-Savoie a autorisé et donné l'accès à un site clos sur lequel nous avons pu installer le pluviomètre. La norme de l'OMM (1996) préconise de placer le pluviomètre à une hauteur de 1 à 1,5 mètres de hauteur. Le sol doit si possible être végétalisé avec une hauteur maximale de 30 centimètres. Le plus important reste l'éloignement avec les obstacles : il doit être quatre fois plus grand que la hauteur de l'obstacle en question. Pour finir, le pied doit être parfaitement stable et vertical. Pour ce dernier point, trois vis sont installées sur la base du pluviomètre et permettent de régler la bonne horizontalité de la base à l'aide d'un niveau à bulle.

Comme préconisé par le constructeur, une calibration a été effectuée pour s'assurer que la masse d'eau nécessaire au basculement de l'auget corresponde bien à 0,2 millimètres (soit 8 grammes d'eau puisque la surface du cône de réception est de 4 000 mm²). Cette opération a été réalisée à l'installation et au démontage de l'appareil : dans les deux cas le bon nombre de basculements a été mesuré, soit une erreur inférieure à 1%, ne nécessitant pas de réglage particulier.



La carte en annexe n° 7 présente l'emplacement géographique des appareils de mesures et des deux pluviomètres. Les deux dispositifs de mesure de pluie sont éloignés d'environ 8 kilomètres : nous savons d'ores et déjà que la pluviométrie ne sera pas la même, et ce de manière croissante avec l'avancée dans la période de mesure. En effet, les épisodes orageux du début de l'été sont très localisés, à l'inverse des pluies printanières de plus faible intensité.

Figure 18 - Photographie du pluviomètre (Thonon-les-Bains, Haute-Savoie, France - 13/04/2021)

3.3 Présentation des résultats

3.3.1 Les événements pluvieux observés

Avec plus de 200 millimètres de pluie entre le 22 avril et le 06 juin, la période durant laquelle ont été réalisées les mesures a été particulièrement pluvieuse en comparaison avec les données mesurées par la station météorologique privée de Sciez depuis 2006. Au total, 25 événements pluvieux ont été identifiés (cf. annexe n° 8) et seulement 7 retenus pour la phase de calage et de validation. La sélection a été réalisée sur les événements les plus intenses, avec une période de retour significative (soit supérieure à environ 2 mois) et une réponse des bassins versants suffisamment marquée. En effet, les précipitations de faible durée et/ou intensité n'engendrent pas suffisamment de ruissellement pour être prise en compte.

Les deux tableaux ci-après présentent les 7 événements retenus, suivis par leurs intégrations sur les courbes IDF locales réalisées avec les données de Sciez (§ 1.3.2).

Pluies retenues mesurées à THONON-LES-BAINS								
Date	Intensité en mm/h						Période de retour (mois)	
	Durée (min)						Sur 10 minutes	Sur 30 minutes
	10	20	30	40	50	60		
06/05/2021	19,1	14,7	11,3	9,0	7,6	6,6	4	3 - 4
11/05/2021	12,1	8,2	6,1	5,1	4,8	3,3	< 4	< 3
16/05/2021	19,2	17,0	14,4	14,3	14,2	13,0	4 - 5	4 - 5
21/05/2021	16,3	10,8	9,1	7,4	7,3	6,7	< 4	< 3
24/05/2021	12,8	-	-	-	-	-	< 4	-
03/06/2021	19,8	12,1	8,2	6,0	-	-	4 - 5	< 3
04/06/2021	10,8	7,5	5,6	3,6	3,8	3,4	< 4	< 3

Tableau 14 - Evènements pluvieux retenus pour la validation et le calage mesurés à Thonon-les-Bains

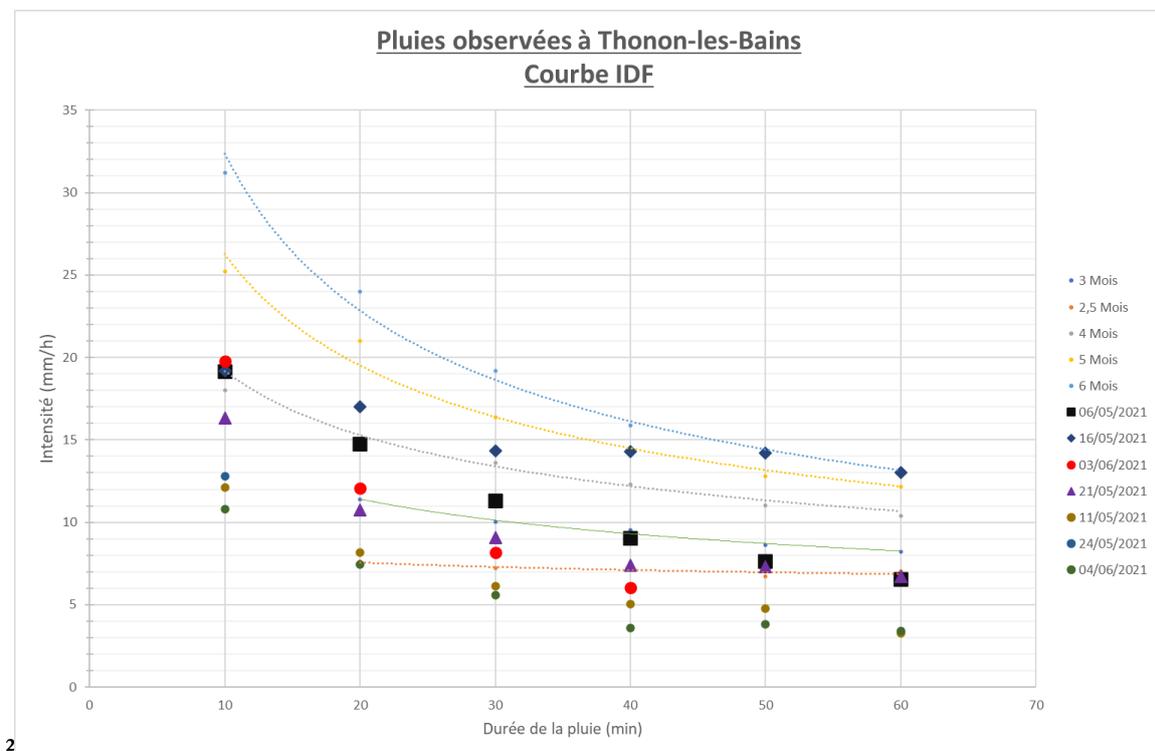


Figure 19- Pluies mesurées à Thonon-les-Bains par rapport aux courbes IDF locales

Pluies retenues mesurées à SCIEZ								
Date	Intensité en mm/h						Période de retour (mois)	
	Durée (min)						Sur 10 minutes	Sur 30 minutes
	10	20	30	40	50	60		
06/05/2021	9,6	8,4	6,4	5,4	4,8	4,4	< 3	< 3
11/05/2021	20,4	13,8	9,6	7,5	6,5	5,4	4 - 5	< 3
16/05/2021	30,0	24,6	20,4	16,8	14,6	13,2	5 - 6	6
21/05/2021	9,6	7,8	6,4	5,7	5,5	5,4	< 3	< 3
24/05/2021	14,4	10,2	6,8	5,1	4,1	3,4	< 4	< 3
03/06/2021	Pas de pluie à Sciez - Orage localisé sur Thonon-les-Bains							
04/06/2021	2,4	1,8	1,6	1,2	1,2	1,0	<< 3	<< 3

Tableau 15 - Evènements pluvieux retenus pour la validation et le calage mesurés à Sciez



Figure 20 - Pluies mesurées à Sciez par rapport aux courbes IDF locales

3.3.2 La réponse des bassins versants

Pour mieux comprendre la transformation pluie/débit sur les différents bassins versants, sont présentés ci-après les hydrogrammes et graphiques hauteur/vitesse pour l'évènement le plus violent observé le 16 mai. Il s'agit d'une pluie particulièrement intéressante : sa forme est proche d'une pluie double triangle symétrique. Cela signifie que la période la plus intense de l'évènement intervient après saturation du sol et des micro-dépressions (flaques) mais aussi des différents éléments du réseau. La réponse des différents bassins est donc particulièrement importante.

Il n'y a pas eu de précipitation entre le 13 et le 16 mai, les bassins versants urbains étaient donc en conditions sèches mais le BV "Rural" était encore humide (zone de forêt).

Présentées en annexes n° 9 à n° 11, l'ensemble des valeurs de débit, le tout sur la durée des mesures.

3.3.2.1 BV "Parking" à Thonon-les-Bains

Ce premier graphique montre la rapidité du transfert pluie/débit sur le plus petit des trois bassins versants étudiés. Le temps de concentration calculé de 2 à 3 minutes correspond bien aux observations terrain. Une très faible variation de l'intensité de la pluie peut engendrer une forte variation du débit puisque le phénomène de lissage au cours du ruissellement et du transport est presque inexistant.

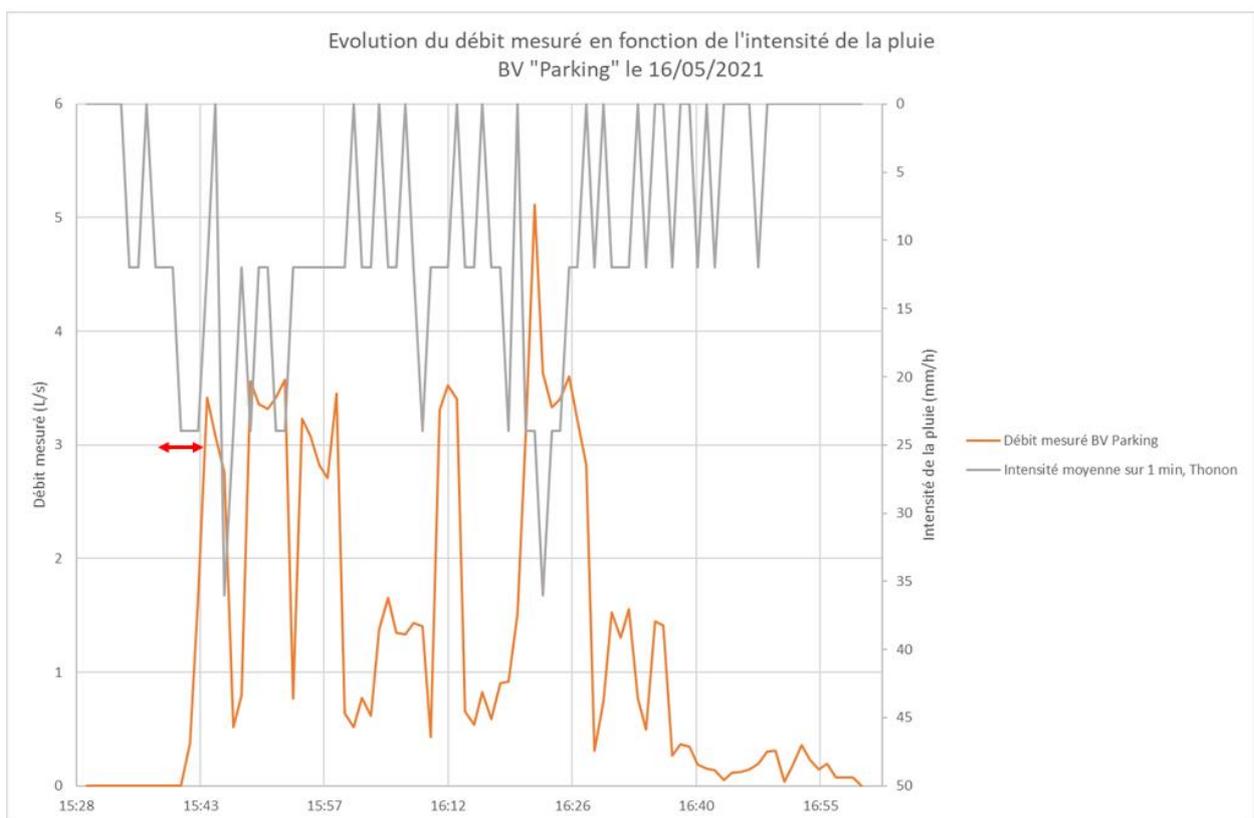


Figure 21 - Evolution du débit mesuré en fonction de l'intensité de la pluie, BV "Parking", Thonon-les-Bains, le 16/05/2021

Il ne s'agit pas du débit de pointe le plus important mesuré sur le BV "Parking" (11,6 L/s le 03/06/2021 – Cf. annexe n° 12). Sur ce bassin de petite taille, l'intensité la plus défavorable n'est pas sur 5 minutes mais sur la durée du temps de concentration, soit environ 2 minutes. Le 03 juin, l'intensité maximale a atteint plus de 40 mm/h durant 2 minutes et 36 mm/h durant 3 minutes à Thonon-les-Bains. Nous pouvons introduire ici un

premier biais : sur les petits bassins versants, l'intensité joue un rôle extrêmement important et ce à des échelles de temps très réduites, au point d'être difficile à mesurer et à exploiter.

Le graphique suivant nous montre l'importance de la hauteur d'eau et de la vitesse d'écoulement dans la construction du débit. Nous pouvons également apprécier la quasi-instantanéité du transfert. Les nombreuses variations de vitesse sont expliquées par une mesure en eaux très claires et donc une qualité de signal limitée.

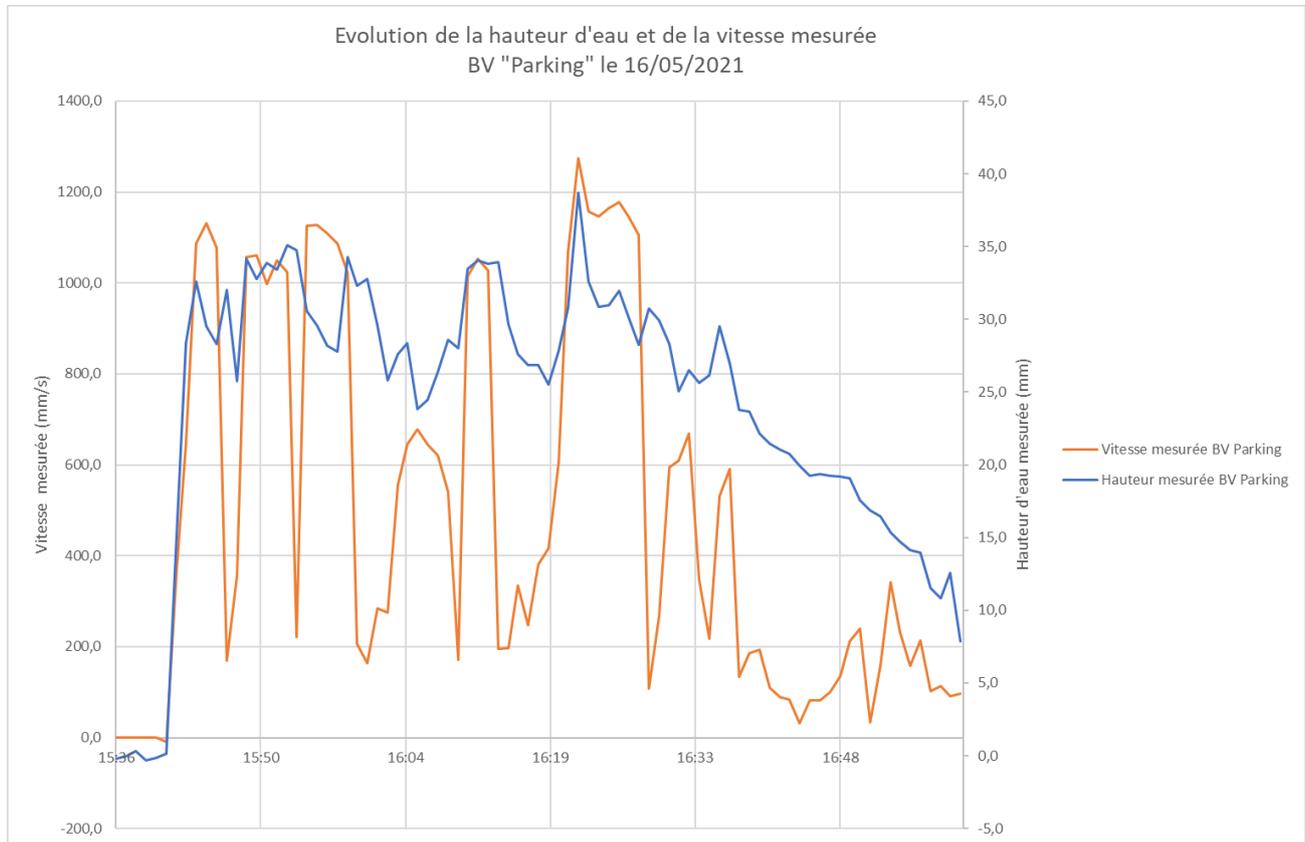


Figure 22 - Evolution de la vitesse et de la hauteur d'eau mesurée, BV "Parking", Thonon-les-Bains, le 16/05/2021

3.3.2.2 BV "Voirie" à Sciez

La figure n° 23 permet de constater que le réseau du BV "Voirie" revient rapidement à son état initial après une précipitation et que le transfert pluie/débit est également rapide. Les mesures de vitesses (graphique n° 24) sont plus propres que sur le BV "Parking" car le BV "Voirie" est de taille plus élevée et une partie des espaces verts est drainée et dirigée vers le réseau. L'eau est donc plus chargée en MES et la qualité du signal meilleure.

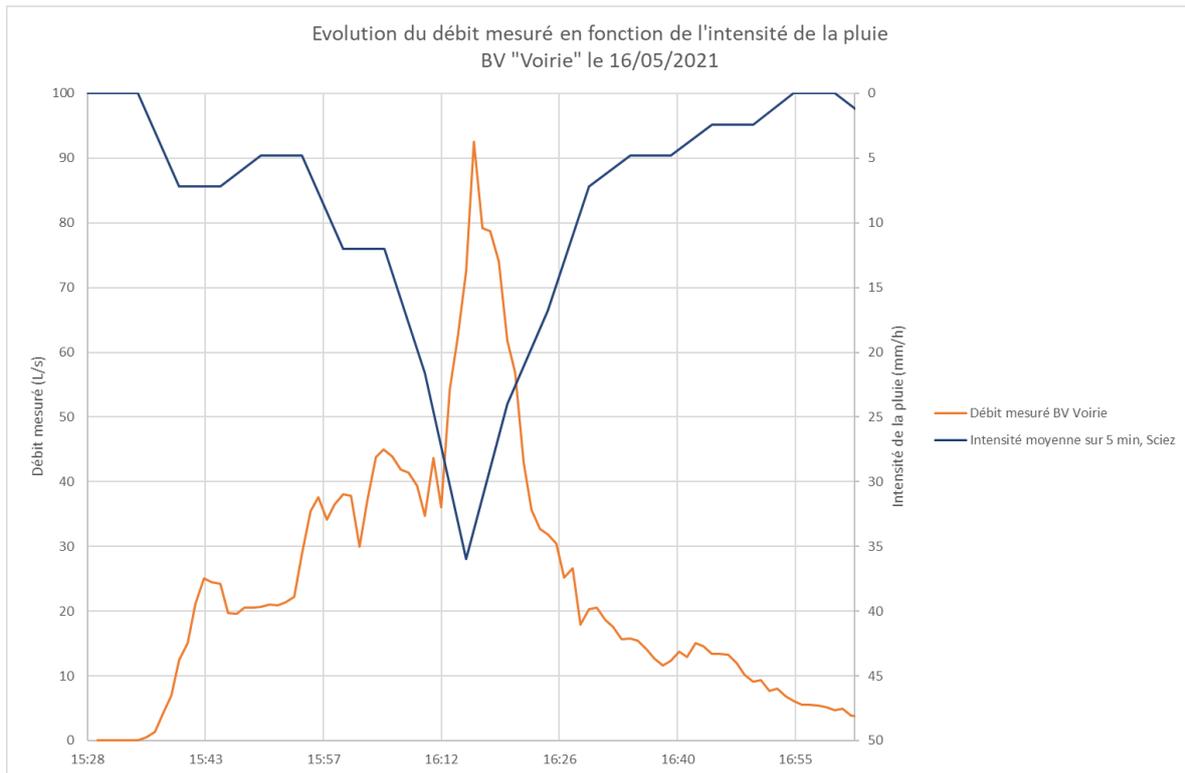


Figure 23 - Evolution du débit mesuré en fonction de l'intensité de la pluie, BV "Voirie", Sciez, le 16/05/2021

Nous pouvons observer une première « vague » avec une augmentation brutale de la vitesse liée au début du transfert des précipitations. La pointe de débit est essentiellement engendrée par une augmentation de la hauteur d'eau dans le collecteur et des vitesses relativement faibles.

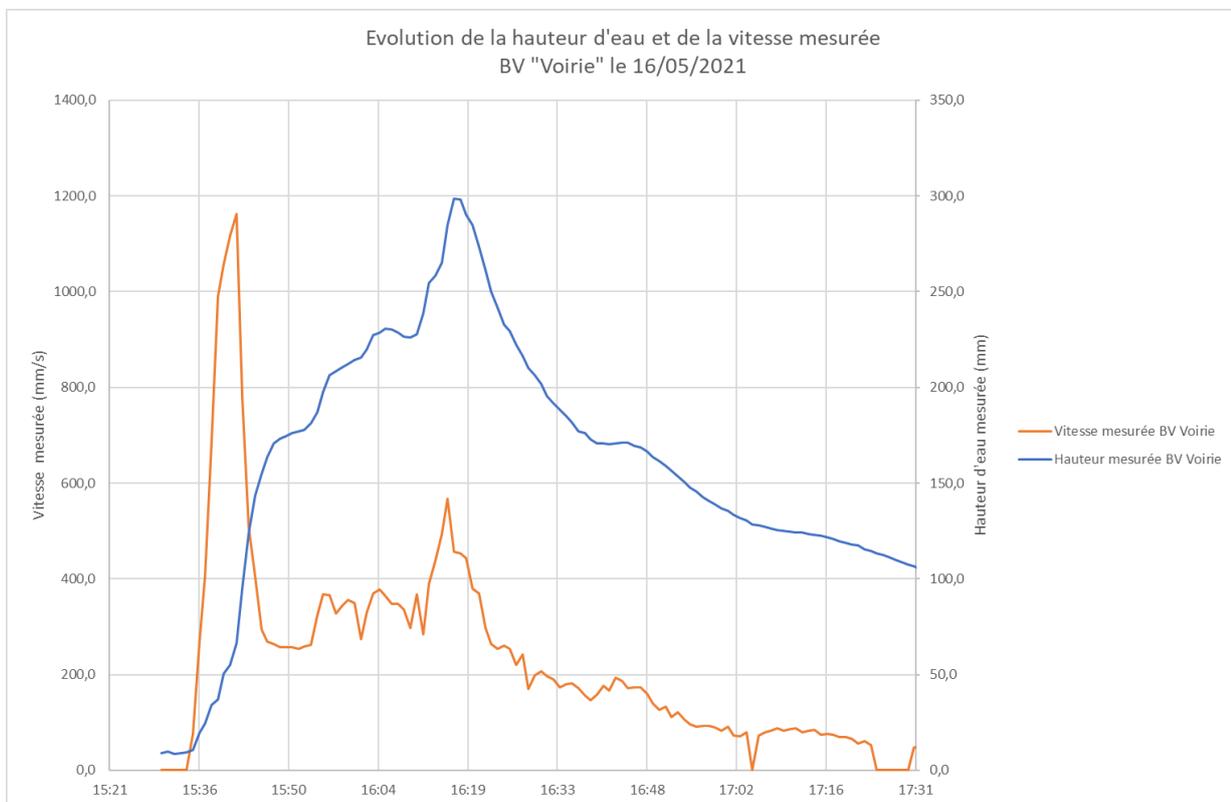


Figure 24 - Evolution de la vitesse et de la hauteur d'eau mesurée, BV "Voirie", Sciez, le 16/05/2021

3.3.2.3 BV "Rural" à Allinges

L'analyse de la réponse hydrologique sur le BV "Rural" est plus complexe que sur les deux autres sites de mesure. En effet, le BV "Rural" draine une grande zone forestière en terrain vallonné. Cette surface participe peu au ruissellement lors des événements fréquents mais plusieurs sources génèrent un débit continu à l'exutoire. Ce débit est fonction de la saison et des précipitations. Le graphique n° 57 en annexe n° 11 présente l'évolution du débit continu sur une période sans pluie de quelques jours. Pour l'étude de l'ensemble des événements sur ce BV, les débits moyens sur la demi-journée précédant l'événement étudié a été retiré pour l'analyse de la transformation pluie/débit de sorte à ne pas prendre en compte ces captages de source.

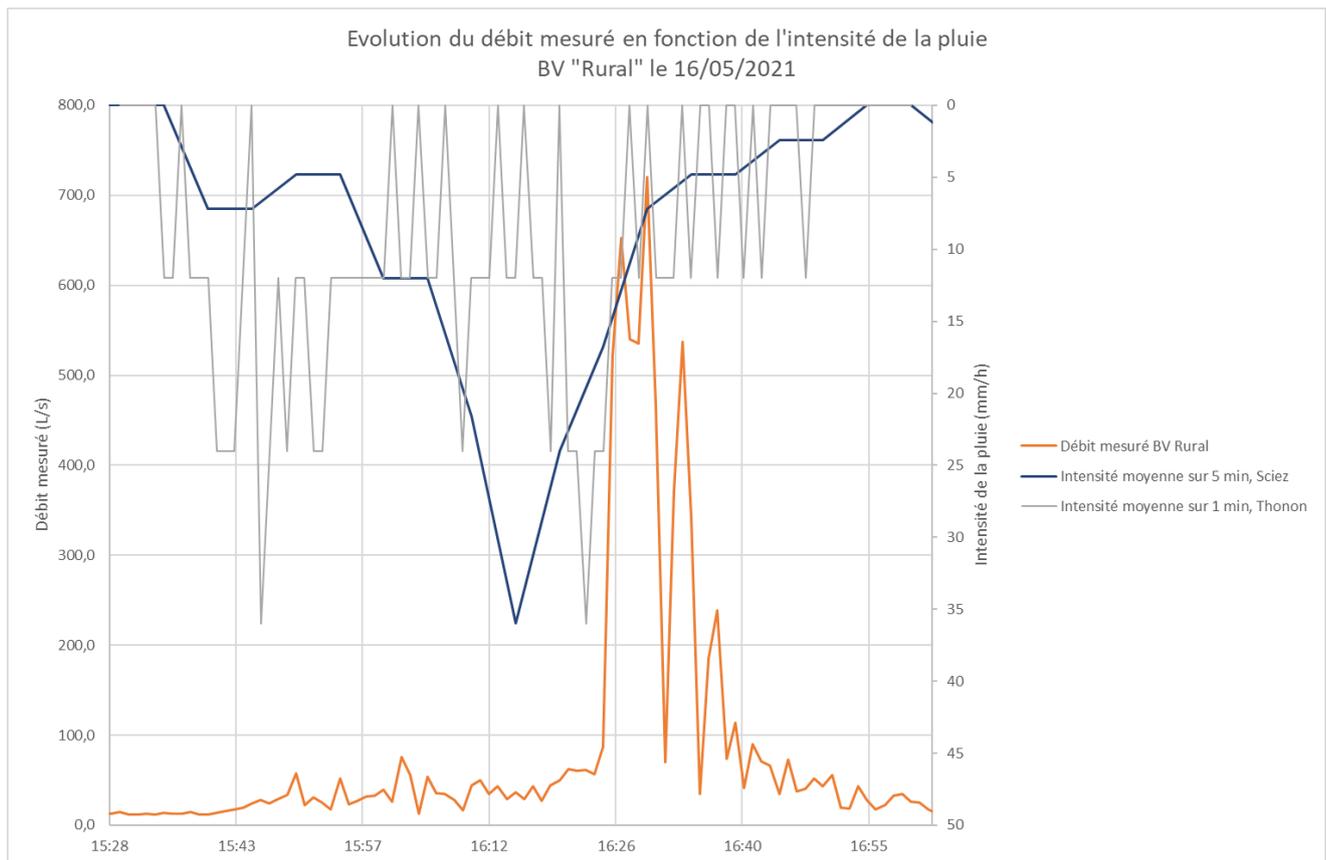


Figure 25 - Evolution du débit mesuré en fonction de l'intensité de la pluie, BV "Rural", Allinges, le 16/05/2021

Sur ce troisième bassin versant, nous pouvons constater l'intensité de l'événement enregistré le 16 mai : le débit augmente d'environ 600 L/s en quelques minutes. Le graphique ci-après montre les très fortes vitesses (plus de 3 m/s) atteintes dans cette portion de collecteur en béton. Nous avons été surpris par ces vitesses (ayant participé à la destruction de la sonde) dans une zone où la pente n'est pas très élevée et où le collecteur en béton est plus rugueux qu'une matière plastique.

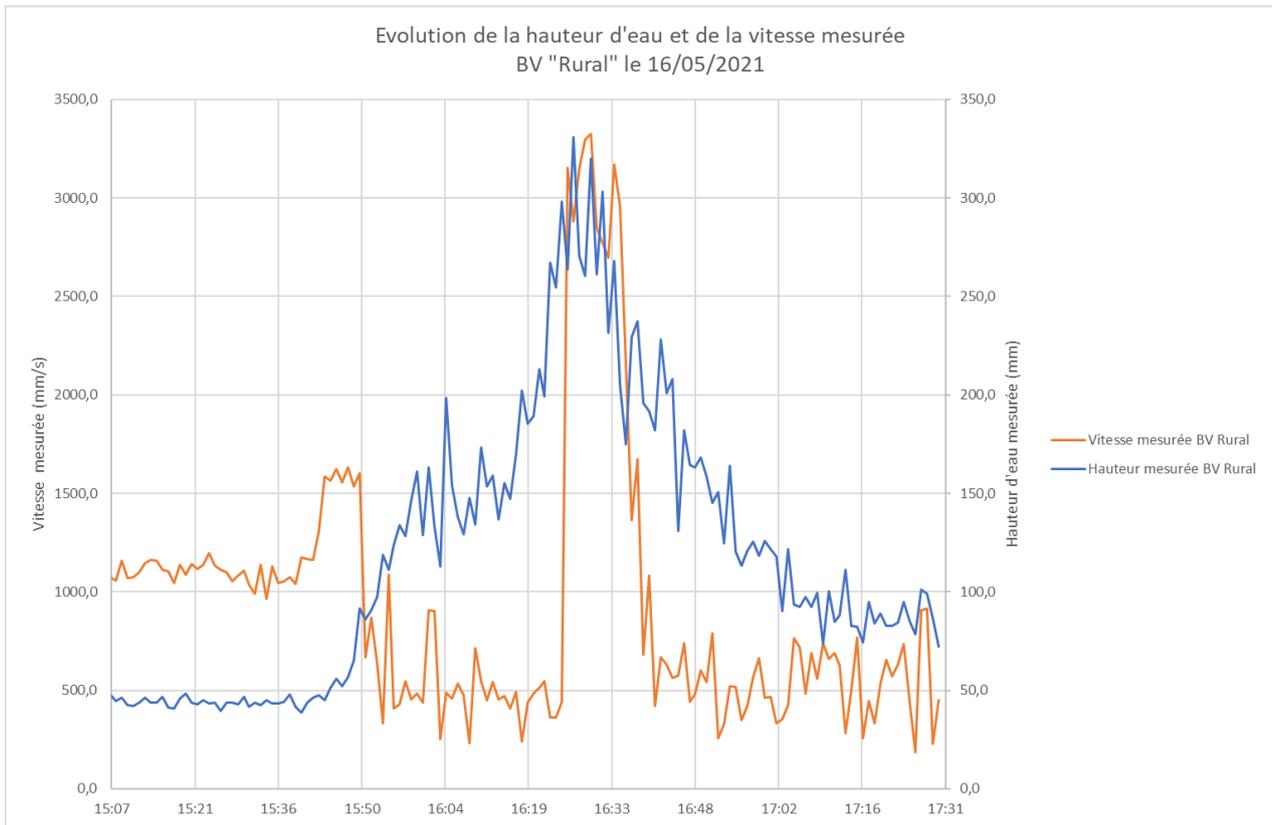


Figure 26 - Evolution de la vitesse et de la hauteur d'eau mesurée, BV "Rural", Allinges, le 16/05/2021

3.4 Calage des modèles

Une phase de calage précède la phase de validation du modèle. Cette première étape permet de disposer de paramètres représentant les bassins versants au plus proche de la réalité. Un calage en volume est réalisé : cela permet de définir le coefficient de ruissellement des bassins versants ainsi que les pertes initiales.

Les graphiques ci-après présentent l'évolution du volume précipité en fonction du volume ruisselé (issu de nos mesures) sur les 7 événements pluvieux retenus.

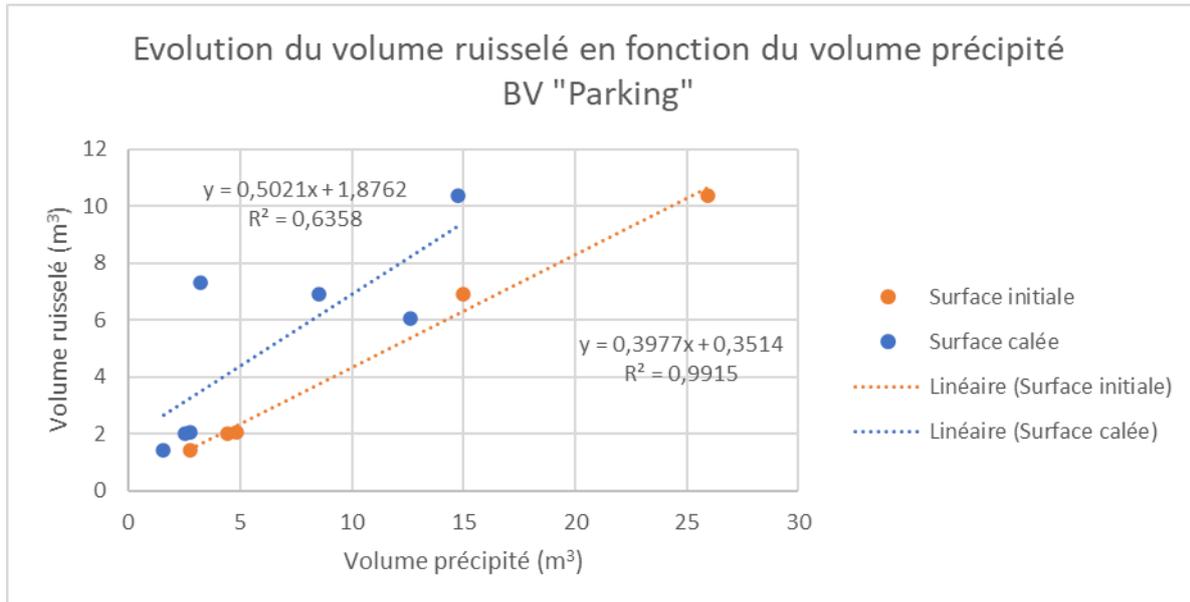


Figure 27 - Evolution du volume ruisselé en fonction du volume précipité sur le BV "Parking" à Thonon-les-Bains, Haute-Savoie

Sur la figure n° 27, nous pouvons voir que le coefficient de ruissellement du BV "Parking" est de l'ordre de 40 % avec la surface initialement considérée. Pour rappel, ce BV est un parking en enrobé d'environ 1 000 m² ; le coefficient de ruissellement estimé initialement était de 90 %. Cet écart peut être expliqué pour trois raisons (illustrations en annexe n° 13) : le revêtement présente de grandes fissures ce qui engendre une perte d'eau ruisselée ; une partie des eaux de ruissellement transite via un espace vert avant d'être collectée dans le réseau ; et enfin une partie des eaux est dirigée vers une rampe d'accès au parking souterrain car la pente des enrobés n'a pas été réalisée de manière à envoyer les eaux vers les grilles de collecte. Pour garder une certaine cohérence dans la validation de l'outil, la valeur du coefficient de ruissellement initialement retenue de 90% n'a pas été modifiée mais la surface de collecte du bassin versant a été diminuée (passant ainsi de 1055 m² à 600 m²). En l'effet, le but de l'étude est de valider l'outil sur un certain type de surface : il est donc incohérent d'abaisser la valeur du coefficient de ruissellement à 0,6 sur une zone de type parking, imperméabilisée à environ 90%. Comme nous le verrons plus tard, les valeurs de débits obtenues sont plus proches de nos observations.

La valeur du coefficient de corrélation R² proche de 0,65 obtenue suite à l'ajustement de la surface du bassin versant montre une forte variabilité de la valeur du coefficient de ruissellement en fonction de la pluie. Cette variabilité est expliquée par le fonctionnement du bassin versant : plus l'intensité de la pluie est élevée, plus une quantité importante d'eau est dirigée vers la rampe du garage souterrain, donc la surface contributive au ruissellement vers le point de mesure faible.

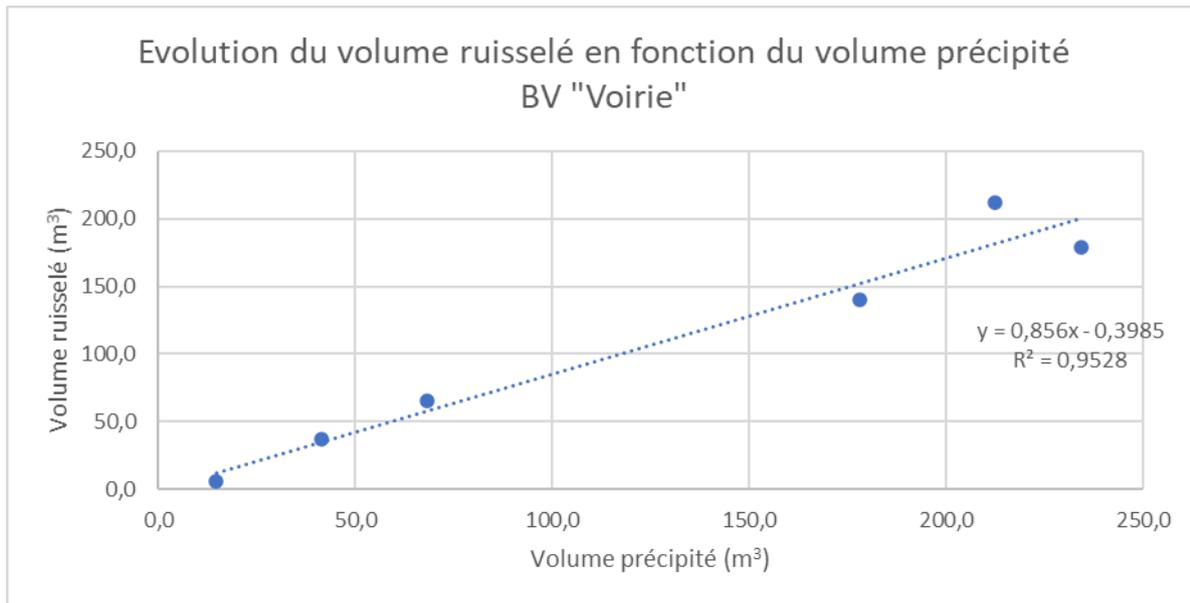


Figure 28 - Evolution du volume ruisselé en fonction du volume précipité sur le BV "Voirie" à Sciez, Haute-Savoie

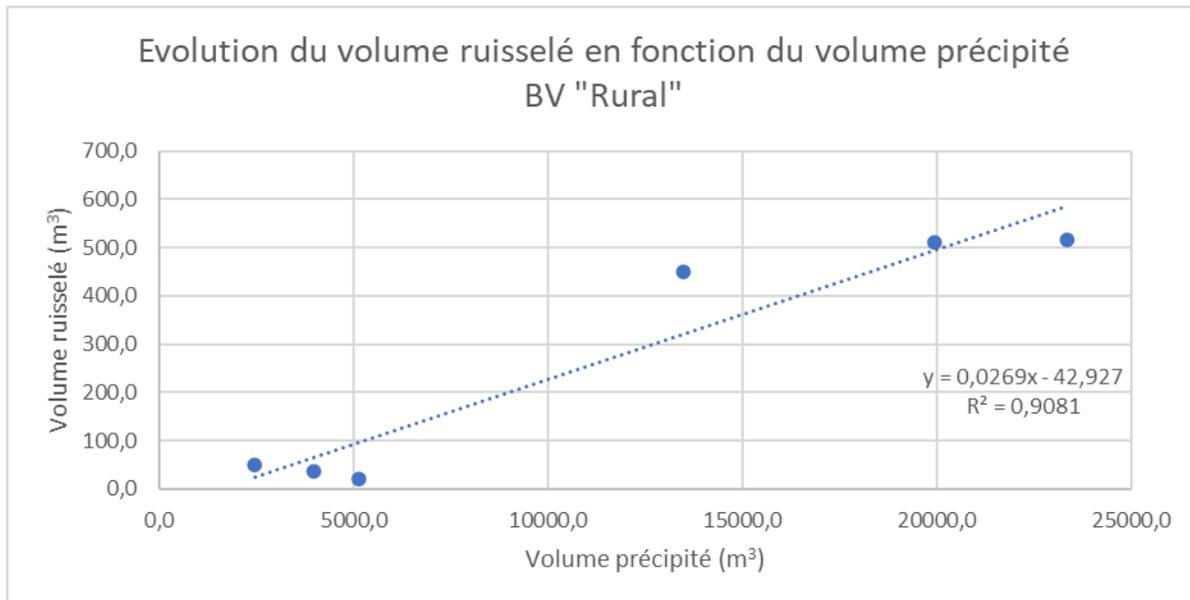


Figure 29 - Evolution du volume ruisselé en fonction du volume précipité sur le BV "Rural" à Allinges, Haute-Savoie

3.4.1 Détermination des pertes initiales

Les pertes initiales ont été évaluées à l'aide de deux méthodes. La première est l'étude de l'ensemble des mesures récoltées sur le terrain en déterminant à partir de quel volume de précipitation le bassin versant génère du ruissellement. La seconde est l'utilisation du rapport volume ruisselé sur volume précipité avec l'étude des courbes de tendance linéaire (graphique n° 26 à n° 28). La résolution des équations de droites pour un volume ruisselé nul (valeur de x pour y = 0) permet d'obtenir la valeur de pertes initiales en millimètres.

Comme présenté ci-dessous et quel que soit le lieu étudié, les valeurs calculées sont inférieures aux valeurs moyennes annoncées par Desbordes (1974) : de 3 à 15 millimètres en conditions normales.

3.4.1.1 BV "Parking" à Thonon-les-Bains

Concernant le premier site d'étude sur la commune de Thonon-les-Bains, la seconde technique ne fonctionne pas à la vue des données collectées. Il est néanmoins possible d'estimer ces pertes avec le pluviomètre à proximité immédiate et la rapidité de la réponse hydrologique du bassin versant. Selon l'état du bassin versant et plus précisément selon les précipitations antérieures, le ruissellement commence à partir d'environ 0,6 millimètre si les deux jours précédents ont été pluvieux. Des pertes initiales de plus de 1,2 millimètre après 8 jours sans précipitation ont été mesurées. Sur ce bassin versant très fortement imperméabilisé, seul le niveau d'eau dans les dépressions du sol et dans le réseau (regard, canalisation) entre en jeu. La valeur de pertes initiales de 0,6 millimètre sera conservée pour se placer dans la situation la plus défavorable.

3.4.1.2 BV "Voirie" à Sciez

Sur le deuxième bassin versant étudié, à Sciez, le ruissellement est constaté à partir de 0,4 à 0,6 millimètre précipité suivant l'état du bassin versant. Ces données sont cohérentes avec les pertes initiales mesurées sur le BV "Parking" puisque ces deux bassins de collecte ont des caractéristiques similaires. De plus, en utilisant la courbe de tendance linéaire tracée (figure n° 28), la valeur des pertes initiales est de 0,5 millimètre, valeur qui sera retenue pour ce site.

3.4.1.3 BV "Rural" à Allinges

Concernant le troisième et dernier site d'étude, l'évaluation des pertes initiales est plus complexe. En effet, le bassin versant est composé d'une zone fortement drainée (réseau de collecte des eaux de voiries), et d'une zone très peu drainée mais connectée au réseau, qui ne produit du ruissellement que lorsque les sols sont suffisamment saturés. C'est ainsi que le 09 juin après seulement 1,0 millimètre de pluie une réponse nette à l'exutoire du BV a été enregistrée. A l'inverse, d'autres événements de plus de 1,0 millimètre n'ont engendrés aucun débit. La méthode graphique permet d'obtenir une valeur de 1,7 millimètre qui ne paraît pas incohérente au vu des valeurs mesurées. L'état hydrique de ce bassin versant est très fortement impacté par les conditions météorologiques antérieures (précipitations, température, humidité, vent, etc.) mais aussi en grande partie par l'état de développement de la végétation, couvrant une majeure partie de la zone de collecte. Nous retiendrons une valeur de l'ordre de 1,7 millimètre, valable dans les conditions où ont été réalisées ces mesures mais qu'il faudrait confirmer par une étude plus poussée.

3.4.2 Détermination des coefficients de ruissellement

Le tableau ci-après présente les coefficients de ruissellement estimés avant l'étude et ceux obtenus graphiquement grâce aux mesures récoltées. Ces derniers correspondent à la pente de la droite du volume ruisselé en fonction du volume précipité.

En rouge les coefficients retenus.

Bassin versant	Coefficient de ruissellement estimé	Coefficient de ruissellement ajusté
BV "Parking"	0,90	0,6 ¹
BV "Voirie"	0,85	0,86
BV "Rural" ²	0,13	0,03

Tableau 16 - Détermination des coefficients de ruissellement

¹ Valeur expliquée par le fonctionnement du bassin et les fissures sur les enrobés (cf. annexe n° 13)

² Deux coefficients de ruissellement ont été retenus pour prendre en compte l'état du BV

En observant les trois graphiques ci-dessus, nous pouvons constater une variabilité plus ou moins conséquente des coefficients de ruissellement en fonction des événements pluvieux. Comme nous l'avons évoqué, cette évolution peut être liée à l'intensité de la pluie mais également à l'état hydrique du bassin versant. Dans le cas d'un modèle plus spatialisé, il pourrait ainsi être intéressant d'utiliser un modèle à coefficient variable sur le bassin versant le plus naturel, à savoir le BV "Rural" situé sur la commune d'Allinges. Dans notre cas, seul l'événement du 16 mai 2021 sera modélisé avec un coefficient de ruissellement de 0,13 ce qui permet de prendre en compte l'état du bassin versant au moment de la pluie intense mesurée ce jour-là, lorsque les sols étaient saturés.

3.5 Intégration des chroniques de pluie mesurées dans la modélisation

La phase de validation a débuté par l'intégration des chroniques de pluie mesurées directement dans l'outil pour évaluer l'aptitude du modèle du réservoir linéaire à représenter la transformation pluie/débit.

L'événement pluvieux le mieux modélisé est celui du 21 mai 2021. Les trois graphiques ci-après présentent les résultats avec des barres d'incertitudes de 20% sur la valeur de débit mesurée.

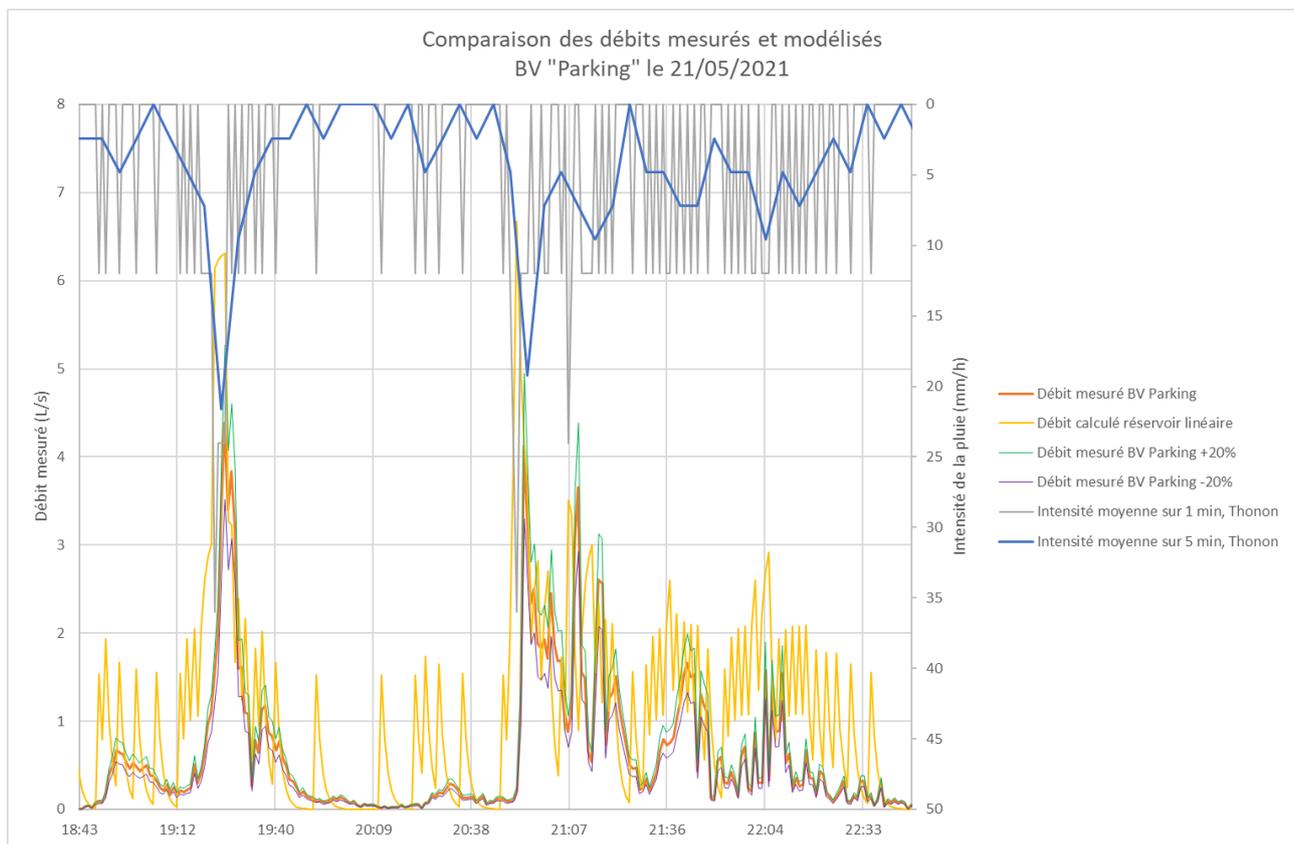


Figure 30 - Comparaison entre le débit mesuré et le débit modélisé sur le BV "Parking" à Thonon-les-Bains, le 21/05/2021

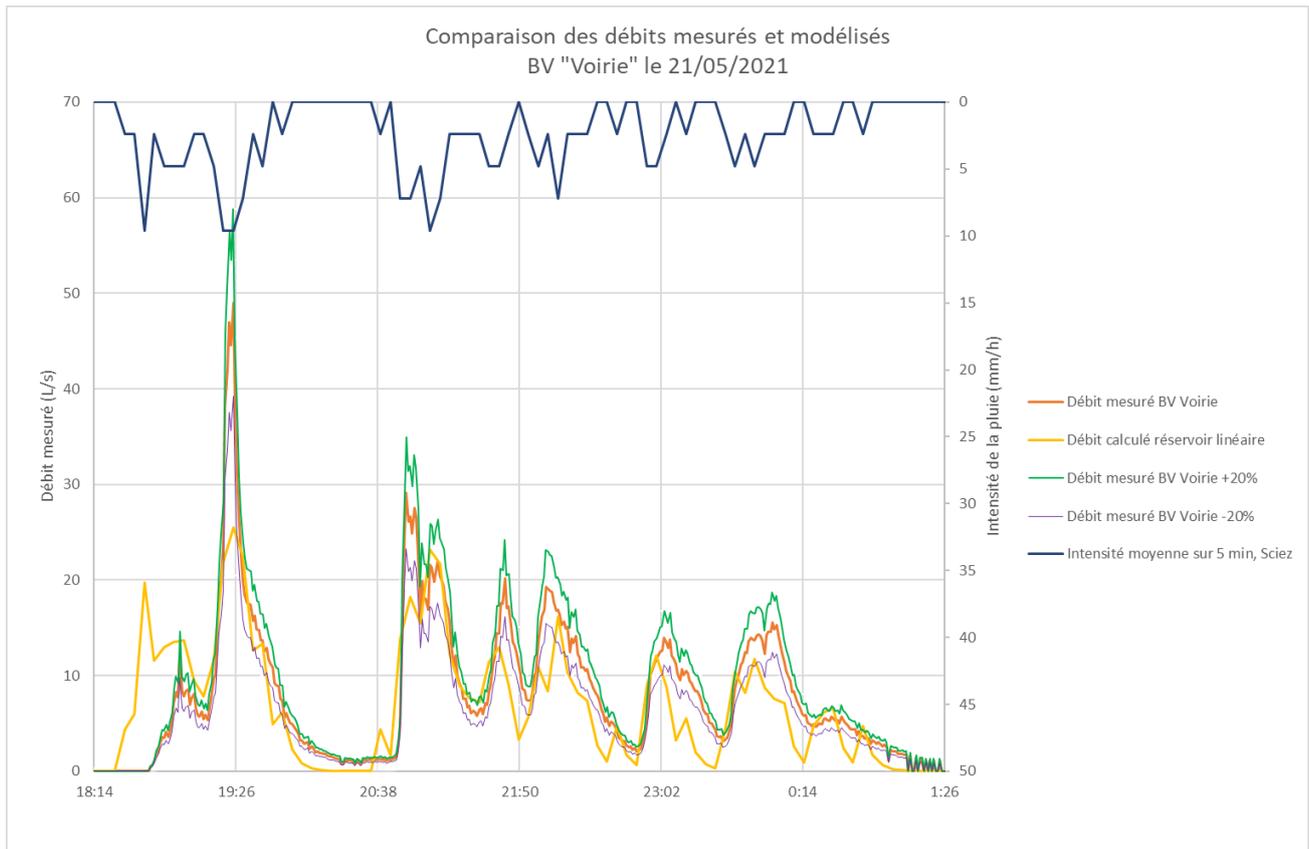


Figure 31 - Comparaison entre le débit mesuré et le débit modélisé sur le BV "Voirie" à Sciez, le 21/05/2021

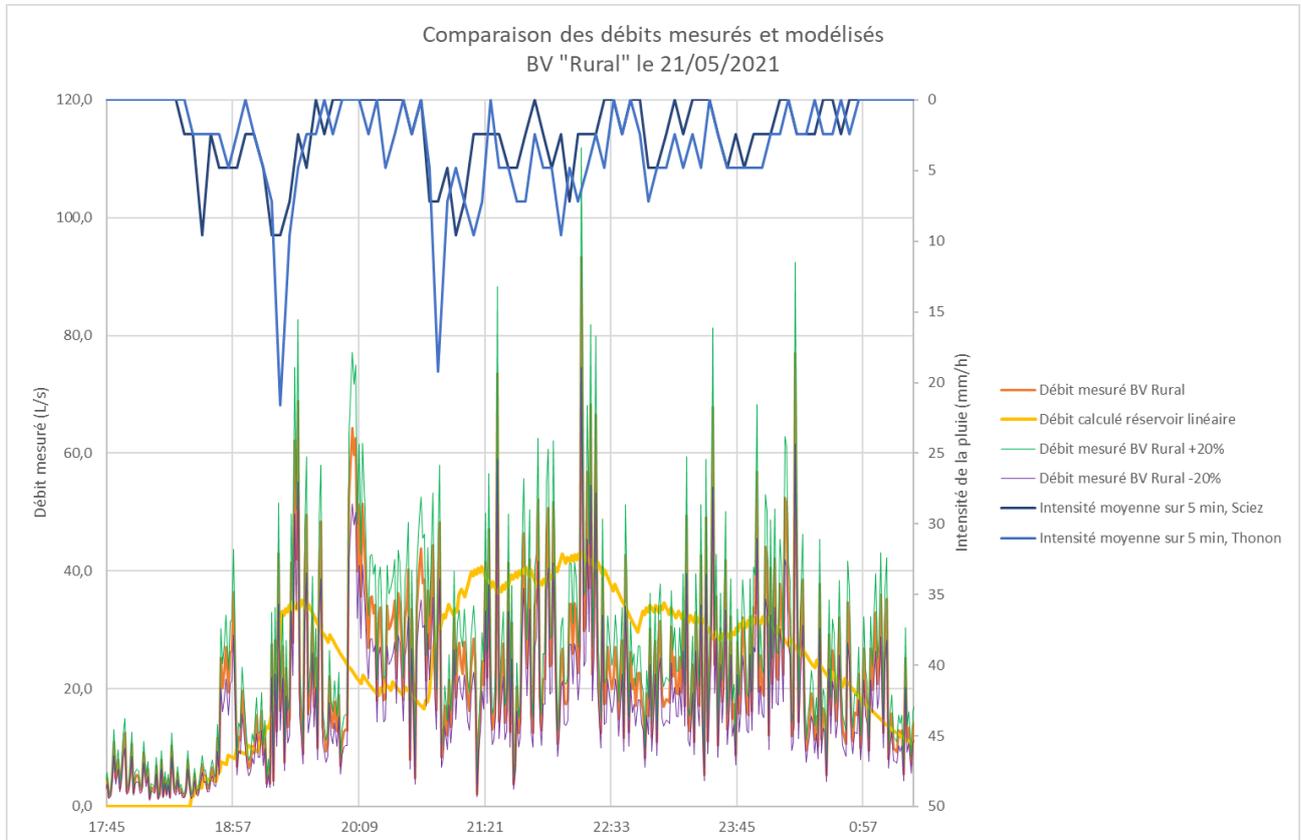


Figure 32 - Comparaison entre le débit mesuré et le débit modélisé sur le BV "Rural" à Allinges, le 21/05/2021

La dynamique de la transformation pluie/débit réalisée par le modèle est globalement cohérente avec les mesures réalisées sur l'ensemble des bassins versants. Nous pouvons cependant noter quelques points :

- Les pertes initiales ne sont pas prises en compte : le ruissellement généré par le modèle au début de l'évènement n'est pas observé en réalité ;
- La première pointe de débit est souvent trop élevée, en lien avec la non prise en compte des pertes initiales ;
- Le calcul du lag-time et du temps de concentration paraît cohérent puisque les pointes de débits ont lieu aux mêmes moments ;
- Sur le plus petit des trois BV, les précipitations de faible intensité (1 à 3 mm/h sur 5 minutes) génèrent du débit alors que ce n'est pas le cas dans la réalité ;
- La réponse hydrologique du troisième BV est fortement lissée par le modèle. Cela est en partie dû à la taille du bassin versant modélisé (95 hectares) alors que pour des pluies de ce type, les zones de voirie sont les plus productrices de débit, donc avec une réponse hydrologique plus rapide et plus forte que le reste du BV faiblement imperméabilisé.

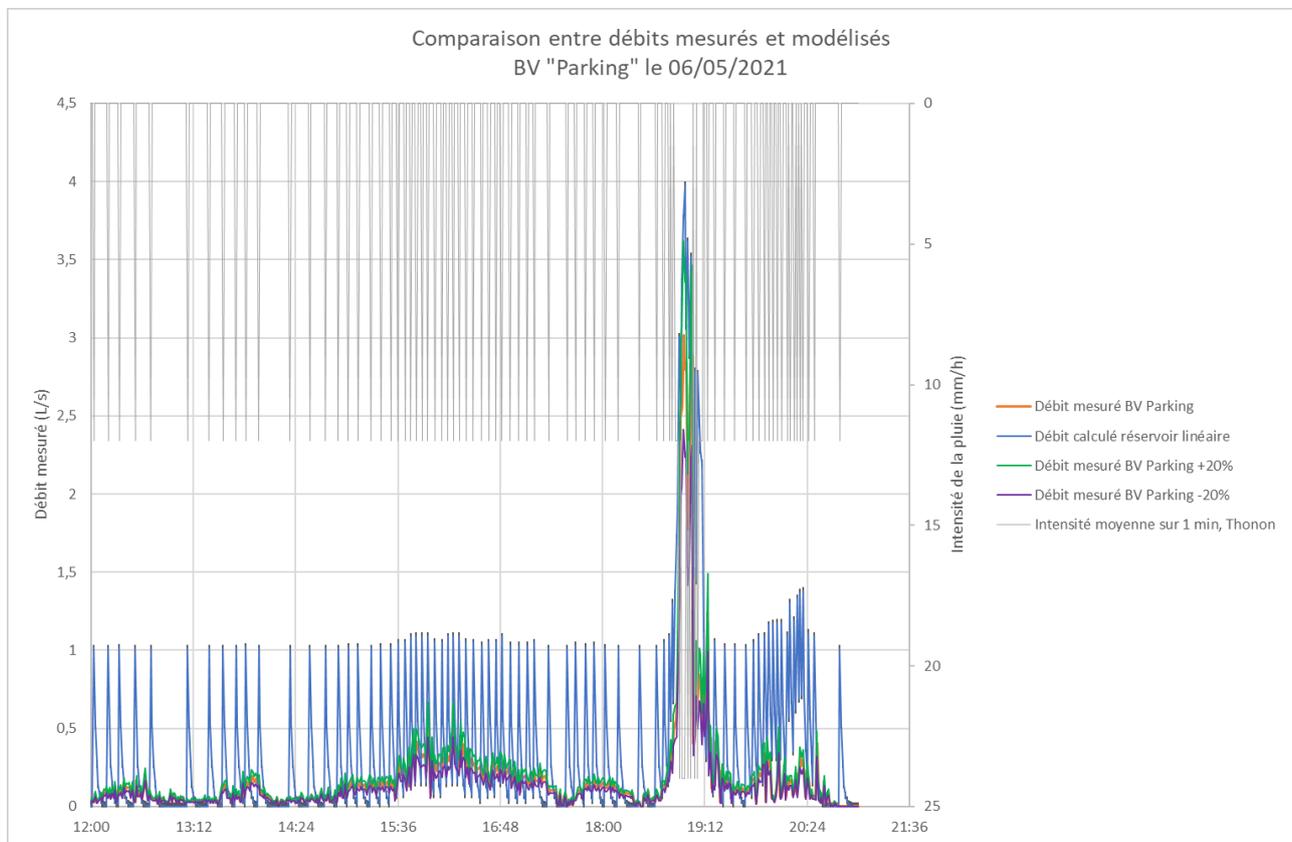


Figure 33- Comparaison entre le débit mesuré et le débit modélisé sur le BV "Parking" à Thonon-les-Bains, le 06/05/2021

Ce dernier graphique (figure n° 33) nous montre encore l'importance des pertes initiales sur le plus petit site d'étude mais aussi la capacité du modèle à transformer immédiatement les précipitations entrantes en débit à l'exutoire. La valeur du débit de pointe et sa position temporelle sont néanmoins cohérentes et proche des mesures.

Pour conclure sur cette première phase, nous pouvons dire que le modèle du réservoir linéaire permet de représenter de manière cohérente et juste la fonction de transfert et de ruissellement sur les trois bassins versants étudiés. Une attention plus importante doit être portée lorsque la surface de collecte est élevée et

que le fonctionnement de la transformation pluie/débit est influencé par de nombreux paramètres. La phase suivante consiste à vérifier si l'utilisation d'une pluie de projet permet d'obtenir un débit de pointe cohérent.

3.6 Comparaisons entre prédictions du modèle et mesures

La dernière étape de validation de l'outil est la modélisation des phénomènes observés en utilisant des pluies de projet. Nous avons pu mesurer plusieurs événements (cf. § 3.3.1) dont nous pouvons encadrer la période de retour grâce aux courbes IDF locales (§ 1.3.2). Le but de cette partie est alors de comparer la réponse hydrologique des bassins versants à des pluies de projet construites à partir des coefficients de Montana locaux. L'hydrogramme observé sera alors encadré par deux hydrogrammes modélisés.

Les courbes enveloppes ont été modélisées avec des pluies ayant des périodes de retour proche de l'événement mesuré. Par exemple, la pluie observée le 21 mai a une période de retour située entre 4 et 5 mois ; deux hydrogrammes sont générés : l'un pour $T = 4$ mois et le second pour $T = 5$ mois.

3.6.1 BV "Parking" à Thonon-les-Bains

Les valeurs de débit de pointe modélisées par la méthode Rationnelle et la méthode du réservoir linéaire sont proches de la réalité alors que la méthode Caquot surestime le débit de point sur le BV "Parking". Seule la pluie du 03 juin n'est pas modélisée de manière correcte : cela est expliqué par l'intensité élevée de la pluie ce jour sur 2 à 3 minutes, alors que les courbes IDF ont été tracées sur des durées allant de 10 à 60 minutes.

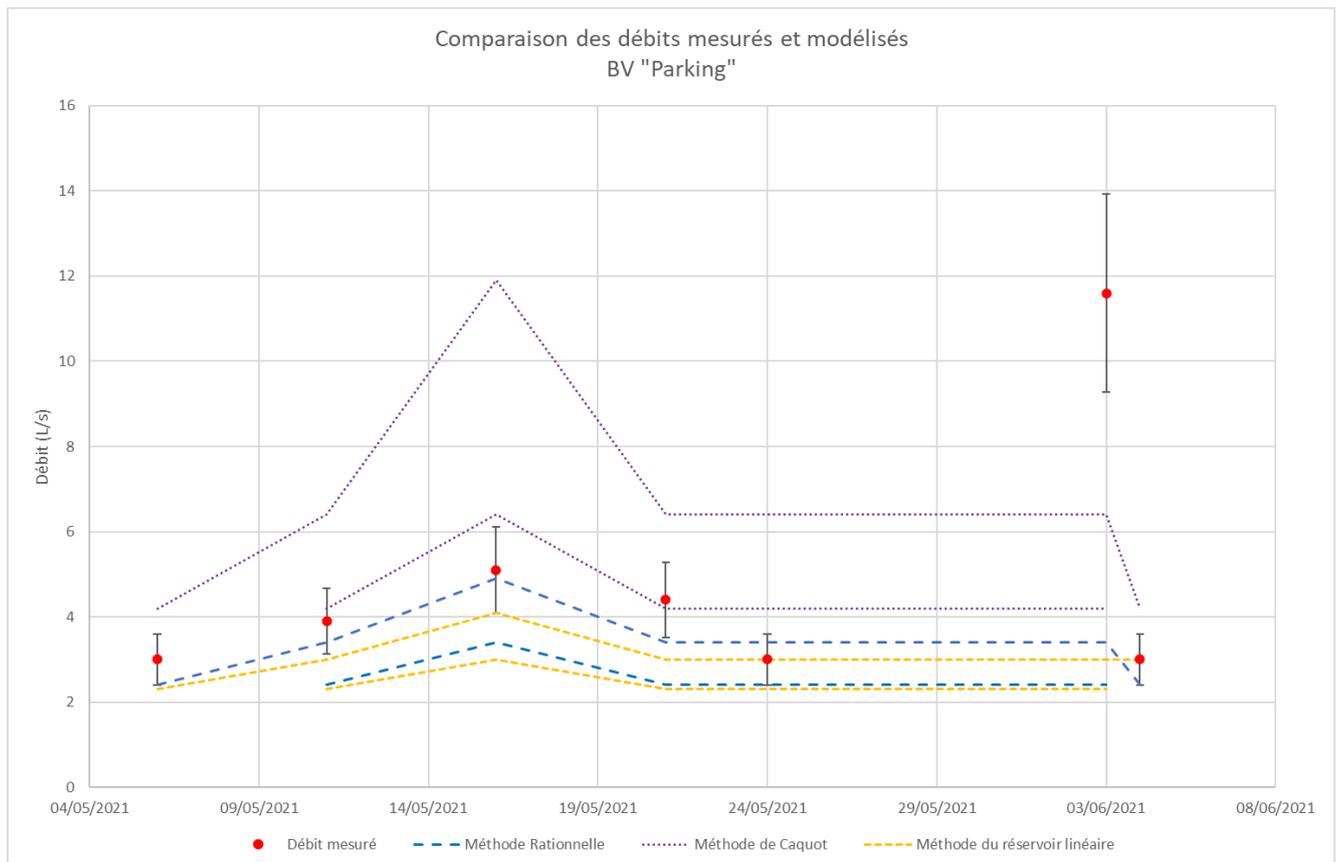


Figure 34 - Graphique de comparaison entre le débit mesuré et le débit modélisé, BV "Parking" à Thonon-les-Bains

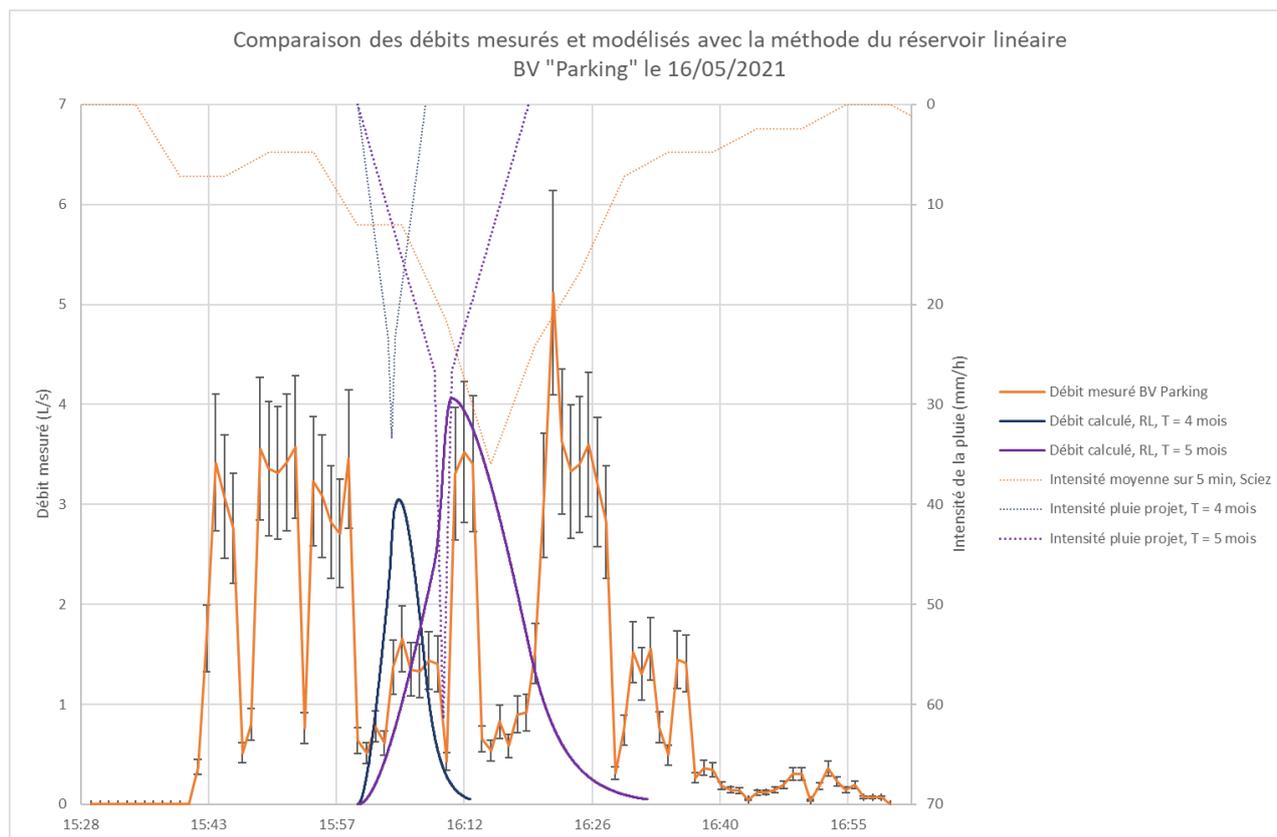


Figure 35 - Comparaison entre la méthode du réservoir linéaire et les valeurs de débit mesurées lors de l'événement du 16/05/2021, BV "Parking" à Thonon-les-Bains

La figure n° 35 présente la modélisation avec la méthode du réservoir linéaire pour la pluie du 16 mai sur le BV "Parking". La forme de la pluie observée ce jour est proche d'une pluie double triangle. Les intensités modélisées encadrent parfaitement les intensités mesurées. Concernant le débit de pointe, ce dernier est sous-évalué et la réponse hydrologique du BV est très simplifiée par rapport à la réalité. Cela est dû à la petite taille du BV très imperméabilisé qui génère une transformation pluie/débit quasi immédiate lorsque les pertes initiales ont déjà eu lieu.

3.6.2 BV "Voirie" à Sciez

Sur l'ensemble des pluies modélisées, la méthode de Caquot paraît être la plus adaptée pour estimer le débit de pointe sur le deuxième bassin versant. En prenant en compte les incertitudes liées à la mesure de débit (barre d'erreur à $\pm 20\%$), les deux autres méthodes proposent des résultats qui restent cohérents. En analysant le graphique suivant, la dynamique de l'hydrogramme modélisé avec la méthode du réservoir linéaire est proche de l'évolution du débit observé pour la pluie particulière du 16 mai. A la vue de l'ensemble des incertitudes, l'utilisation du modèle du réservoir linéaire et de la méthode Rationnelle reste possible sur ce type de BV.

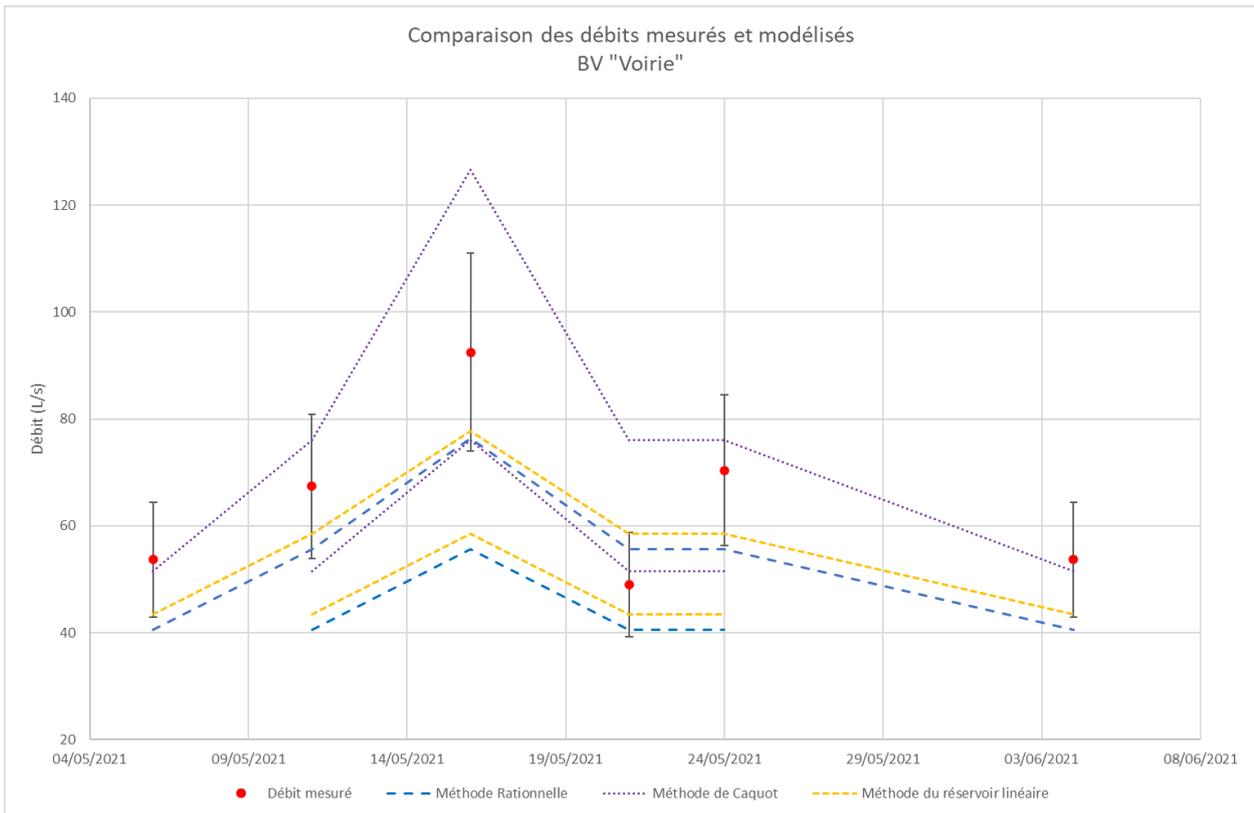


Figure 36 - Graphique de comparaison entre le débit mesuré et le débit modélisé, BV "Voirie" à Sciez

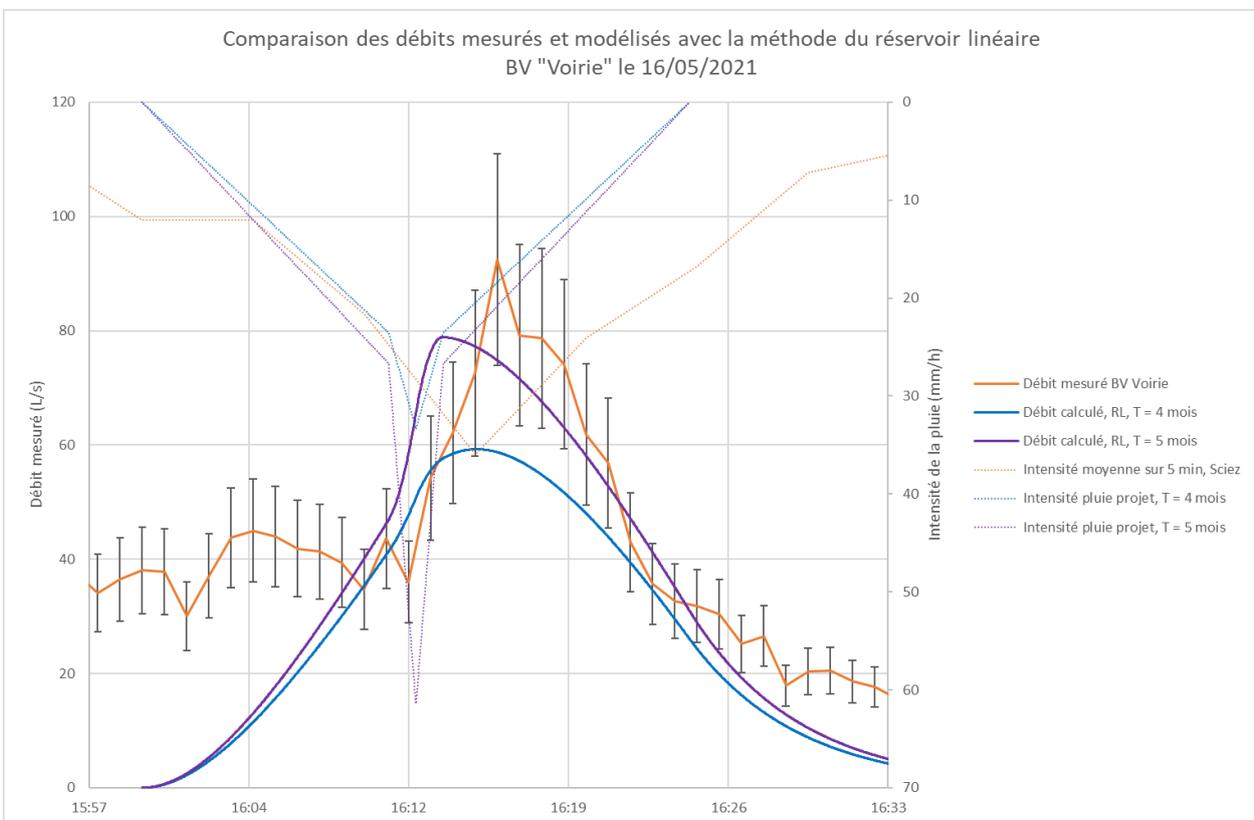


Figure 37 - Comparaison entre la méthode du réservoir linéaire et les valeurs de débit mesurées lors de l'événement du 16/05/2021, BV "Voirie" à Sciez

3.6.3 BV "Rural" à Allinges

Sur ce troisième et dernier site d'étude, la modélisation du débit de pointe est beaucoup plus hétérogène. Cela est dû aux caractéristiques du bassin versant et à la difficulté de prise en compte de l'état initial qui influent de manière importante sur la transformation pluie/débit. L'étude de ce type de BV doit donc être réalisée avec précaution et dans le cas le plus défavorable. Ici, il s'agit de considérer le sol du bassin versant saturé en période hivernal (végétation peu développée et évapotranspiration faible) pour assurer un dimensionnement suffisant. La modélisation de bassins versants aux caractéristiques similaires n'est pas adaptée au modèle même si la figure n° 38 montre que lors de certains événements pluvieux l'hydrogramme modélisé avec la méthode du réservoir linéaire, et surtout la valeur du débit de pointe, sont cohérents.

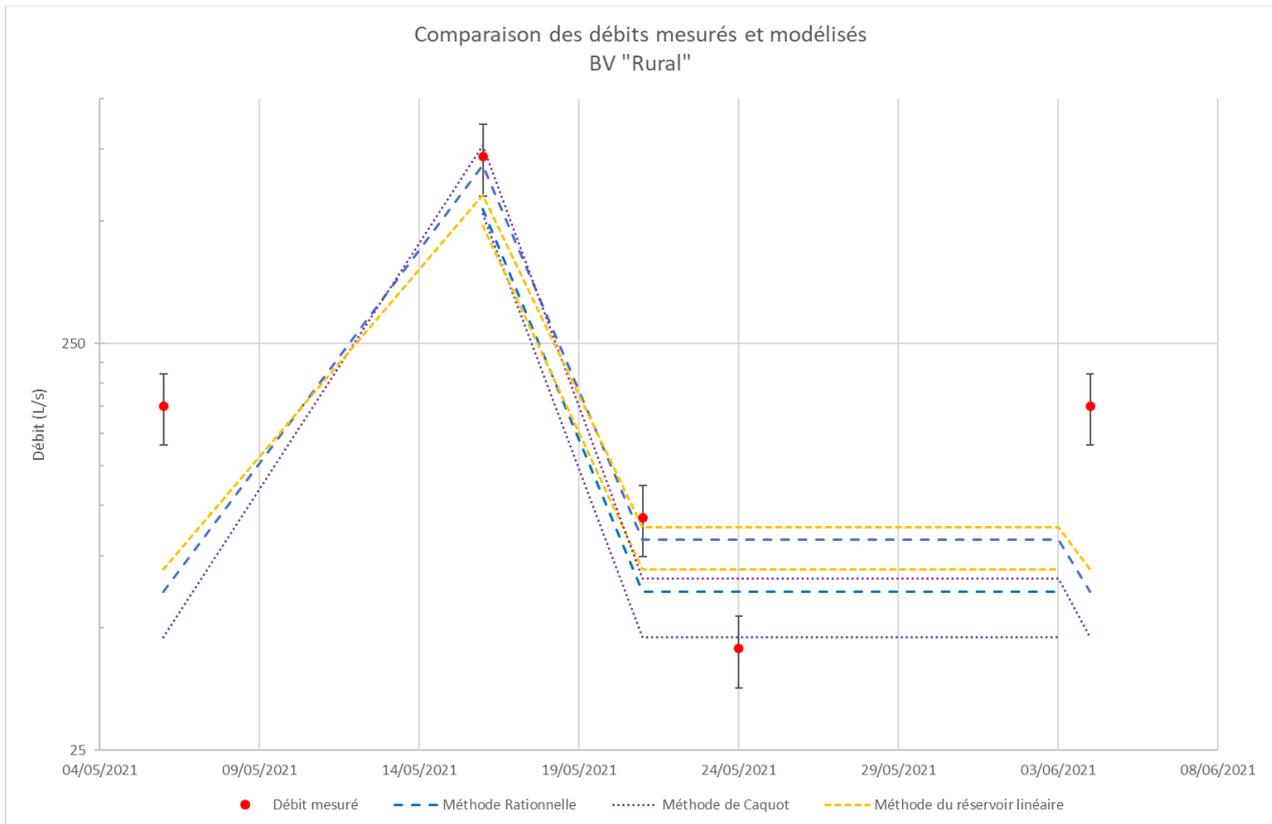


Figure 38 - Graphique de comparaison entre le débit mesuré et le débit modélisé, BV "Rural" à Allinges

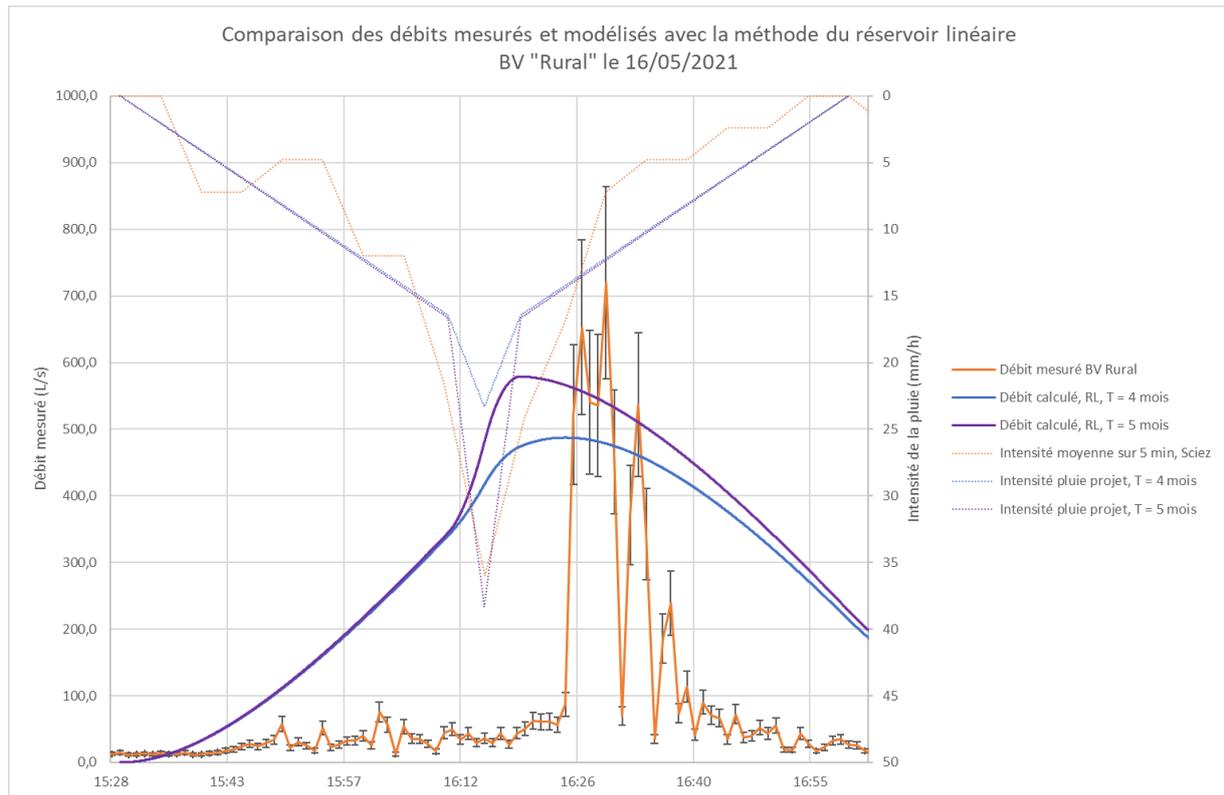


Figure 39 - Comparaison entre la méthode du réservoir linéaire et les valeurs de débit mesurées lors de l'évènement du 16/05/2021, BV "Rural" à Allinges

3.6.4 Bilan entre mesures et prédiction du modèle à l'aide de pluies de projet

A l'aide des données présentées ci-dessus, nous pouvons apporter la conclusion suivante :

- La méthode Rationnelle et la méthode du réservoir linéaire fournissent des résultats semblables en termes de débit de maximal. La fonction de transfert est en effet la même pour les deux modèles : la méthode spatialisée prend en compte un effet de stockage du bassin versant qui semble négligeable dans notre cas. Cela peut être expliqué par la faible intensité des évènements modélisés et donc des débits plutôt faibles ;
- Sur le bassin versant de petite taille, la méthode Rationnelle paraît être la plus adaptée. Comme énoncé plus haut, son utilisation sera limitée au dimensionnement de réseau d'assainissement routier ;
- Sur le bassin versant d'environ un hectare, la méthode de Caquot fournit les débits de pointe les plus proches de ceux observés. Cela correspond bien au domaine d'emploi préconisé ;
- Bien que permettant d'obtenir un hydrogramme, la méthode du réservoir linéaire n'est pas optimale dans notre cas. La pluie de projet ayant toujours une forme double triangle, l'hydrogramme résultant aura toujours la même forme.

Ces observations doivent être nuancées par le faible nombre de mesures qui ne permettent pas d'assurer la fiabilité et répétabilité des phénomènes observés.

4 Avis sur le dimensionnement des ouvrages existants au niveau des points de mesure

Pour finaliser cette étude, le dimensionnement des ouvrages existants sur lesquels ont été réalisées les mesures a été comparé avec le dimensionnement issu d'une modélisation pour un événement décennal. Cette pluie de période de retour égale à 10 ans sera représentée à l'aide des coefficients de Montana de la station de l'aéroport de Genève-Cointrin, station la plus proche et la plus fiable à la vue de son historique important.

Le diamètre de la canalisation est déterminé par une formule approchée de la relation de Manning-Strickler (équation n° 20), considérant un débit à pleine section. L'utilisateur doit donc arrondir le diamètre obtenu au diamètre commercial le plus proche (en prenant une certaine marge de sécurité en considération).

$$Q = 0,312 \cdot K_s \cdot \sqrt{i} \cdot D^{8/3} \quad (20)$$

Avec :

- Q : Débit à pleine section (m^3/s)
- K_s : Coefficient de Manning-Strickler
- i : Pente du collecteur (m/m)
- D : Diamètre collecteur (m)

Les résultats obtenus sur les trois sites de mesure sont présentés dans la tableau suivant :

	BV "Parking" Thonon-les-Bains	BV "Voirie" Sciez	BV "Rural" Allinges
Méthode Rationnelle	173 mm	376 mm	691 mm
Méthode de Caquot	293 mm	651 mm	924 mm
Méthode du réservoir linéaire	120 mm	395 mm	647 mm
Ks retenu	100	100	85
Collecteur en place	180 mm PVC	850 mm PEHD	1 000 mm Béton

Tableau 17 - Comparaison des diamètres de collecteurs modélisés et installés

Comme nous pouvons le voir, la méthode de Caquot est la formule générant le plus gros débit de pointe sur l'ensemble des bassins versants. Concernant le plus petit bassin versant, un DN 180 millimètres paraît adapté pour évacuer une pluie décennale, de même qu'un DN 1000 millimètres pour l'exutoire du BV "Rural" sur la commune d'Allinges. Concernant le BV "Voirie", le diamètre retenu paraît surdimensionné pour une pluie décennale. Il reste tout de même cohérent puisqu'un futur projet d'urbanisation devrait voir le jour dans les prochaines années et se raccorder en amont du réseau, donc transiter par ce tronçon.

5 Détermination des volumes de rétention

Comme évoqué lors de l'introduction, C2I réalise des études de réseau mais également des projets de terrassement pour la construction de bâtiments. Dans le but de limiter les pointes de débit dans les milieux naturels lors de pluies intenses, les promoteurs immobiliers ou les particuliers se doivent de limiter le débit de rejet des eaux pluviales au réseau collectif ou au milieu naturel. Sur l'agglomération de Thonon-les-Bains, le débit de rejet est fixé à 3 L/s si la surface aménagée est inférieure à un hectare, sinon 3 L/s/ha. Dans ce cadre, C2I réalise les études de prédimensionnement des ouvrages de rétention et/ou infiltration. La responsabilité du dimensionnement final est souvent confiée aux géotechniciens. Nous avons choisi d'utiliser une méthode simple et rapide à mettre en œuvre, permettant une première approche du volume à stocker dans le cadre de projet de construction sur des surfaces inférieures à un hectare. Il s'agit de la méthode des pluies dont les détails se trouvent en annexe n° 14. Le but principal de la présente étude n'est pas de tester cette méthode mais les données collectées ont permis de réaliser une première approche sur la modélisation des volumes de stockage.

Aux vues des limites d'application de la méthode, la vérification n'a été réalisée que sur le plus petit des trois bassins versants, le BV "Parking" situé à Thonon-les-Bains. Sur le BV "Voirie", le temps de vidange de l'ouvrage était largement supérieur à 24h ce qui conduisait à des résultats incohérents (hors des limites d'application de la méthode) et le BV "Rural" avec ses 95 hectares ne permet d'appliquer une méthode aussi simpliste.³

Le tableau ci-dessous présente les résultats obtenus à Thonon-les-Bains, pour un débit de fuite de 3 L/s.

	Volume calculé (m³) PDR inférieure	Volume mesuré (m³)	Volume calculé (m³) PDR supérieure
11/05/2021	0,1	0,1	0,2
16/05/2021	0,2	0,3	0,7
21/05/2021	0,1	0,2	0,2
03/06/2021	0,1	3,0	0,2
04/06/2021	0,1	0,2	0,2

Tableau 18 - Comparaison des volumes mesurés et déterminés avec la méthode des pluies

Comme le montre ces résultats, la méthode des pluies permet d'obtenir des volumes cohérents par rapport aux mesures. Notons que l'estimation du volume lors de la pluie du 03 juin n'est pas en accord avec nos mesures. Comme nous l'avons déjà évoqué, l'intensité de la pluie a été très élevée sur 2 à 3 minutes et nos coefficients de Montana ne prennent en compte l'intensité que sur 10 à 60 minutes.

L'incertitude sur la mesure de débit est décuplée puisque le débit est considéré constant à un pas de temps d'une minute pour calculer le volume ruisselé. Néanmoins et malgré les faibles périodes de retour testées (maximum 6 mois), la méthode des pluies paraît cohérente sur des bassins versants de petite taille. Il faudrait réaliser des mesures à l'amont et à l'aval de bassin de stockage existant pour en comprendre le fonctionnement et vérifier le dimensionnement, et ce sur des ouvrages et des bassins versants aux différentes caractéristiques.

³ Projet technique 1, Développement d'un outil de calcul pour l'assainissement pluvial, M. SIMONET, 2020

Discussion et Conclusion

Canel Ingénierie Infrastructure dispose maintenant d'un outil de dimensionnement de réseau pluvial fiable s'il est utilisé en respectant ses limites d'applications. L'ajout de la méthode du réservoir linéaire le rend plus complet qu'à son origine. Nous avons néanmoins pu voir qu'en l'état actuel des choses, ce modèle ne nous apporte pas de réelle plus-value. Pour en exploiter les capacités au maximum, il faudrait intégrer un modèle de pertes initiales et dans certaines situations une modélisation de la variation du ruissellement au cours d'un même évènement pluvieux. Cela n'est pas une nécessité absolue puisque C2I réalise des études hydrauliques plutôt simples. De plus, n'utilisant pas de pluies historiques mais des pluies de projets et n'étudiant pas le transfert en réseau, les hydrogrammes résultants ont toujours la même forme.

Pour revenir sur la phase de validation réalisée, il est important de préciser à nouveau certains points. Tout d'abord concernant les périodes de retour de dimensionnement : alors que l'outil a été testé sur des évènements fréquents, il sera utilisé pour des évènements de faible occurrence. Les principes de transfert en jeu ne sont donc plus tout à fait les mêmes mais cette première phase donne une idée des capacités de l'outil. Par exemple, les pertes initiales deviendront la plupart du temps négligeables face aux débits générés. Ensuite l'incertitude sur la mesure de débit reste importante. Il faut garder en tête un ordre de grandeur de l'ordre de 20% du débit calculé. Cela va de pair avec les incertitudes dans le domaine de l'hydrologie où les paramètres sont tellement nombreux qu'il est difficile de tous les prendre en compte. Nous avons pu observer une forte variabilité entre les trois différentes formules qui ne fournissent jamais les mêmes résultats. Il est donc important de prendre du recul sur la phase de validation et sur les résultats proposés par les modèles hydrologiques en général. L'utilisateur doit garder en tête les approximations réalisées et prendre les marges de sécurité nécessaire en fonction des enjeux du projet.

En conclusion, C2I dispose aujourd'hui d'un outil de dimensionnement correspondant à ses besoins et en lequel nous pouvons avoir confiance. Cette étude pourra être valorisée auprès de nos clients. De plus, elle a permis de mieux cibler nos attentes et de nous rendre compte que l'utilisation de modèle plus complexe n'est pas toujours une nécessité. Nous continuerons d'utiliser la méthode Rationnelle sur les bassins versants les plus simples et la méthode de Caquot ou le réservoir linéaire lorsque le fonctionnement hydraulique est plus complexe. Comme nous avons pu le voir, ces deux techniques permettent d'obtenir des résultats cohérents. Si des études de plus grandes envergures venaient à nous être confiées, il pourrait alors être nécessaire d'améliorer cet outil ou de passer par des logiciels de modélisation plus poussés. Dans un futur proche, il serait intéressant de valoriser et de développer le dimensionnement de techniques alternatives qui est pour le moment limité aux noues et puits perdus. Les évolutions de cet utilitaire peuvent être nombreuses puisque nous pourrions par exemple imaginer réaliser une passerelle entre notre logiciel de dessin Autocad® et l'outil de calcul pour automatiser l'import de certaines données à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) et d'un plan de réseau. Cela est tout à fait envisageable puisque le logiciel Covadis®, directement intégré dans Autocad® permet ce type d'import/export.

Bibliographie

- ASTEE (Association Scientifique et Technique pour l'Eau et l'Environnement). « MEMENTO TECHNIQUE 2017 ». Conception et dimensionnement des systèmes de gestion des eaux pluviales et de collecte des eaux usées. 2017. 273 p.
- BLAVOUX B. Les sources minérales d'Evian. La Houille Blanche. N°1. 1969. p. 21-30.
- BRUDER S. Détermination des flux dans un système d'assainissement. Module M53 Chap. 2. 2016. 11 p.
- CERTU. « LA VILLE ET SON ASSAINISSEMENT ». Principes, méthodes et outils pour une meilleure intégration dans le cycle de l'eau. 2003. Ed. CERTU. 503 p.
- CERTU. « HYDROUTI 1.1 ». Guide utilisateur. Version 2.0. 2008. Ed. CERTU.
- CHOCAT B, THIBAUT S, ZIMMERMANN M. Étude comparative des résultats fournis par la méthode de CAQUOT et le modèle du réservoir linéaire. Techniques et sciences municipales, l'Eau, 1981, p. 417-423.
- DESBORDES M. Expérimentation récente sur bassins urbains. La Houille Blanche. N°4/5. 1980. p. 235-241.
- DESBORDES M. Une étude générale de l'assainissement pluvial urbain. La Houille Blanche. N°1. 1975. p. 37-43.
- DESBORDES M, RAOUS P. Un exemple de l'intérêt des études de sensibilité des modèles hydrologiques. La Houille Blanche. N°1. 1976. p. 37-43.
- FINAUD-GUYOT P, GARAMBOIS P. Mécanique des fluides, hydraulique en charge et hydraulique à surface libre. 2018. 154 p
- HYDREKA. DVP Capteur Vitesse Doppler, Manuel d'installation. 2019. 23p.
- HYDREKA. Pluviomètre, Manuel de l'utilisateur. 2012. 27p.
- JOLY D, BROSARD T, CARDOT H, CAVAILHES J, HILAL M. et WAVRESKY P. Les types de climats en France, une construction spatiale. Cybergeog : European Journal of Geography. 2010. 21p.
- KOCH P. La violence des orages dans ses relations avec le débit des égouts urbains. La Houille Blanche. N° SPECIAL B. 1950. p. 679-682.
- KOSKELO A, FISHER T, UTZ R, JORDAN T. A new precipitation-based method of baseflow separation and event identification for small watersheds (<50 km²). Journal of Hydrology 450-451. 2012. p. 267-278.
- LAMACHERE J, SEGUIS L. Nouvelles techniques de mesure des pluies, des débits liquides et solides sur parcelles agronomiques. Actes du colloque Erosion en Montagnes Semi-Arides et Méditerranéennes (Villeneuve de Berg (FRA), 1996/09/24-27). p. 255 – 271.
- LAPLACE D, JOANNIS C, GUIVRACH J-Y. Mesurer en réseau d'assainissement pour quoi faire ? La Houille Blanche. N°2. 2009. p. 46-51.

LARRARTE F, JOANNIS C, MIGNOT E, RIVIERE N, LIPEME KOUYI G. Fiabiliser les mesures de vitesse – Représentativité spatiale des mesures en continu de vitesse et incertitudes sur les mesures de débit. (Rapport de recherche) IFSTTAR : Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagements et des Réseaux. 2016. 28p.

LECHES G. Conseil sur l'installation de capteurs météorologiques chez des passionnés. Note technique n°39 – METEO FRANCE Direction des Systèmes d'Observation. Novembre 2011. 10p.

MAIER R, KREBS G, PICHLER M, MUSCHALLA D, GRUBER G. Spatial Rainfall Variability in Urban Environments – High-Density Precipitation Measurements on a City-Scale. Water 2020. 12,1157. 2020. 16p.

MOUROT G, MAQUIN D, RAGOT J. Validation de mesures en pluviométrie. Actes du colloque AUTOMATIQUE ET ENVIRONNEMENT (Saint-Etienne (FRA), 3-5 juillet 2001). 14p.

RANDRIANARIMANANA J-J, LARRARTE F, PONS M-N. Etude de la répartition des vitesses et des polluants particuliers en réseau d'assainissement. 6^e Journée Doctorales en Hydrologie Urbaine (Lyon (FRA), juillet 2014). 10 p.

SERRA L. La précision des mesures pluviométriques. 10p.

SIMONET M. « PROJET TECHNIQUE 1 – PROJET LIBRE ». Développement d'un outil de calcul pour l'assainissement pluvial. 2020. 31p.

SYMASOL. Méthode de calcul du volume des ouvrages de rétention ou d'infiltration. Gestion des eaux pluviales : guide pour la mise en œuvre de techniques alternatives. Juin 2016. p. 22 – 30.

VASQUEZ J, ISENMANN G. Hydrologie et hydraulique en réseau d'assainissement. 2019. 278 p.

THIBAUT S. Barycentre d'un réseau fractal, lag-time et temps de concentration. 2011. 4 p.

WOOD S.J, JONES D.A, MOORE R.J. Accuracy of rainfall measurement for scales of hydrological interest. Hydrology and Earth System Sciences 4(4). 2000. p. 531 – 543.

Webographie

GEOPORTAIL. [Consulté à de multiples reprises durant l'année 2021]. <[Géoportail \(geoportail.gouv.fr\)](http://geoportail.gouv.fr)>

GOOGLE MAPS. [Consulté à de multiples reprises durant l'année 2021]. <<https://www.google.com/maps>>

METO FRANCE. La mesure des précipitations par pluviométrie. [Consulté le 03/04/2021]. <<http://education.meteofrance.fr/dossiers-thematiques/observer-et-mesurer/les-precipitations/la-mesure-des-precipitations-par-pluviometre>>

METEOSCIEZ. [Consulté à de multiples reprises durant l'année 2021]. <<http://meteo-sciez.fr/>>

INFOCLIMAT. [Consulté à de multiples reprises durant l'année 2021]. <<https://www.infoclimat.fr/>>

Annexes

Annexe 1 - Captures d'écran de l'interface logiciel

Bienvenue dans cet utilitaire de calcul hydraulique dans le cadre d'aménagement urbain.

Le bouton "Assainissement routier" est à utiliser uniquement dans le cadre de collecte des eaux pluviales de voirie
 Domaine d'emploi : BV urbain homogène, surface < 20Ha

Le bouton "Bassin versant urbain" est à utiliser dans le cadre de bassin versant plus complexe, comprenant par exemple des bâtiments, des parcs, etc.
 Domaine d'emploi : BV urbain homogène, surface < 20Ha, pente comprise entre 0,2 et 5%
 Ce bouton applique la méthode de Caquot.

Le bouton "Générer un hydrogramme" est à utiliser dans le cas où l'utilisateur final souhaite disposer d'un graphique de l'évolution du débit à l'exutoire du BV
 Domaine d'emploi : BV urbain homogène de 0,4 à 5000 Ha
 Ce bouton applique la méthode du réservoir linéaire

Le bouton "Dimensionnement rétention/infiltration" est à utiliser dans le cadre d'un pré-dimensionnement sommaire d'ouvrage de rétention et/ou infiltration
 Domaine d'emploi : Surface de quelques dizaines d'hectares maximum, pas d'ouvrage de régulation ou de stockage sur le BV
 Ce bouton applique la méthode des Pluies

Liens vers des documents d'aides

- Memento technique de l'ASTEE - 2017
- Mémoire création de l'outil - Marvin SIMONET
- Travail de fin d'étude - Marvin SIMONET



Figure 40 - Capture d'écran de l'accueil de l'utilitaire

0,30
0,35
0,35
0,4
0,2
0,15
0,1

Figure 41 - Capture d'écran de l'interface pour l'application de la méthode Rationnelle

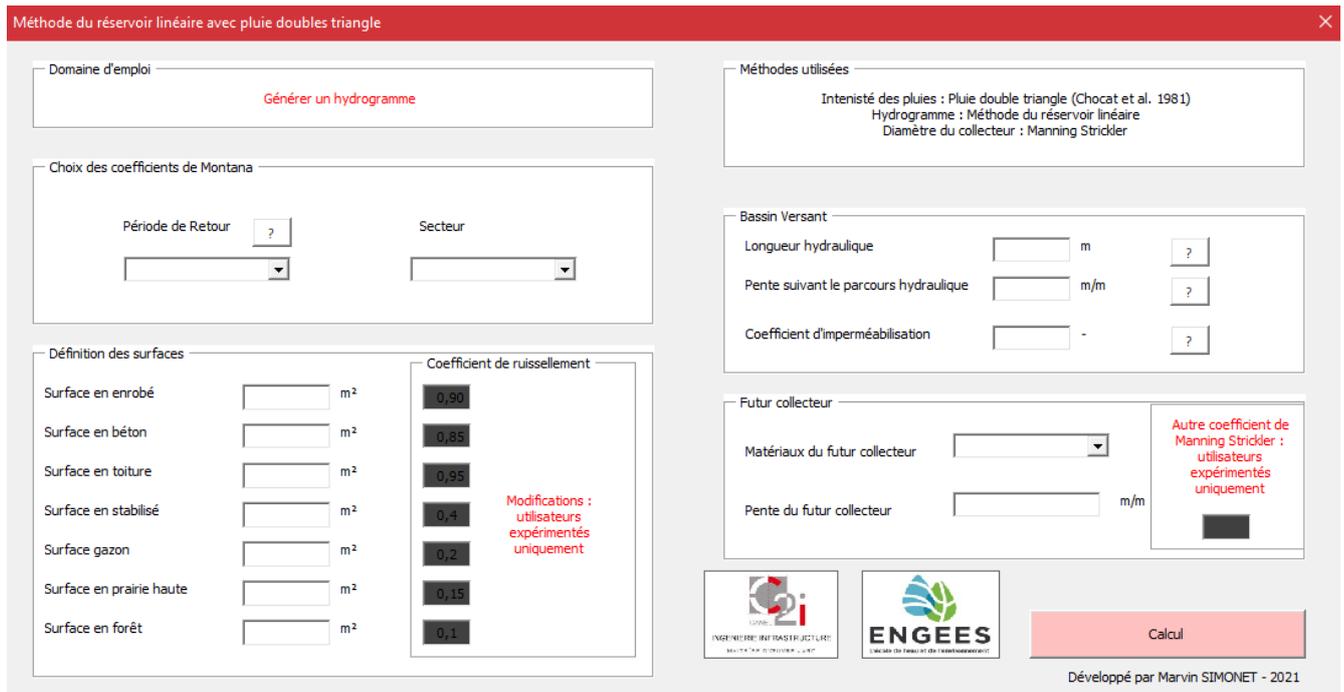


Figure 42 - Capture d'écran de l'interface pour l'application de la méthode du réservoir linéaire

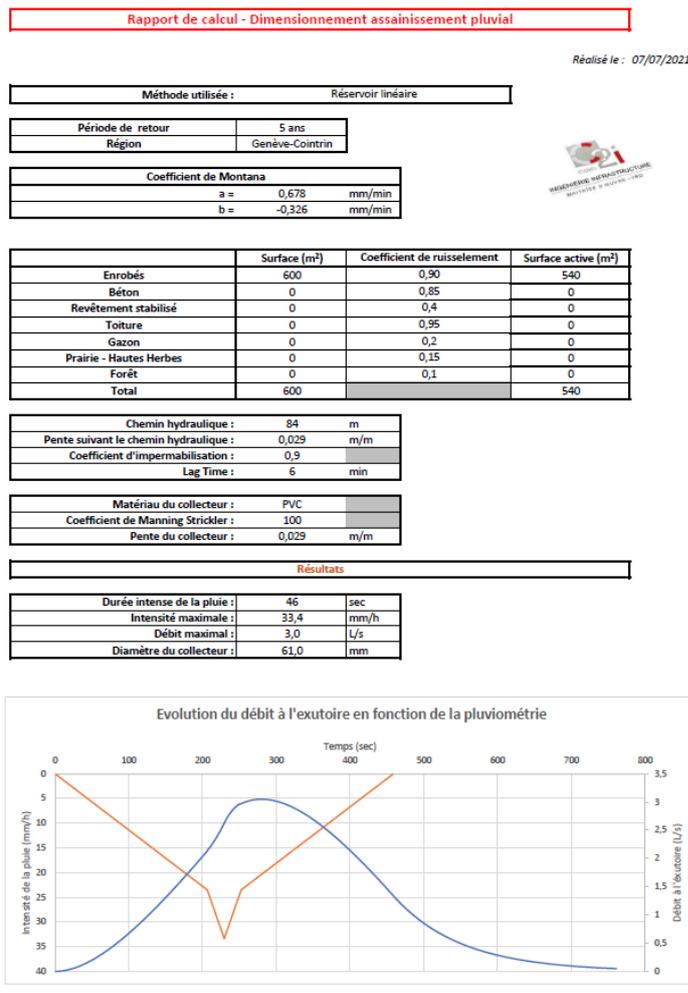


Figure 43 - Exemple de fichier récapitulatif issu d'une modélisation avec la méthode du réservoir linéaire

Annexe 2 - Courbes IDF pour une période de retour allant de 6 mois à 1 an à Sciez

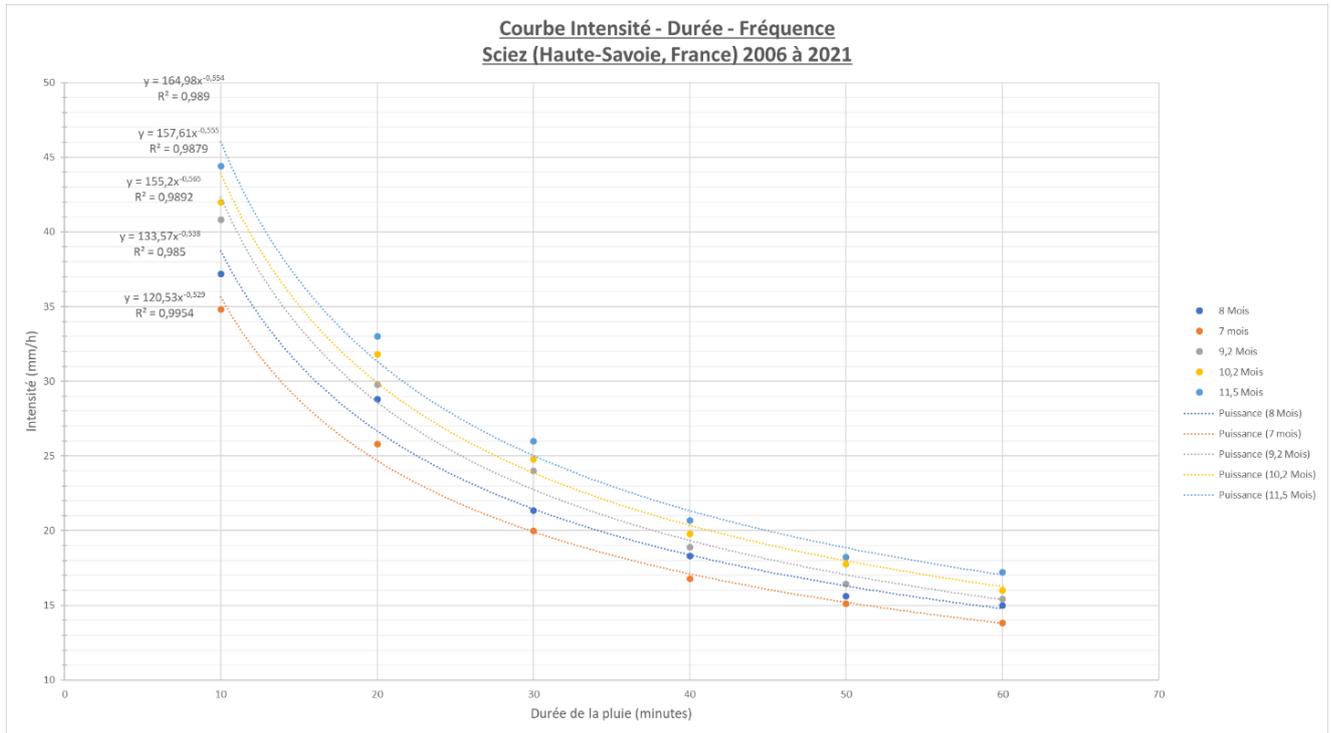


Figure 44 - Courbes IDF à Sciez (Haute-Savoie), 6 mois < T < 1 an sur la période 2006 à 2021

Annexe 3 - Méthode de construction des courbes IDF

Ci-dessous la méthode construction des courbes IDF locales avec les données issues de la station météorologique de Sciez :

- 1) **Identifier les événements pluvieux** : Nous disposons de données pluviométriques à un pas de temps de 10 minutes entre le 01/01/2006 et le 01/01/2021. Identifier l'ensemble des événements pluvieux* sur cette période. Le nombre total d'événements pluvieux étant noté N.

** Un événement pluvieux est défini par une précipitation supérieure à 0,4 millimètres en 1 heure (soit deux basculements de pluviomètre). La durée sans pluie nécessaire pour que deux événements pluvieux sont considérés comme indépendant a été fixée à 1 heure. Cette durée correspond au temps nécessaire pour que le bassin versant ayant le plus grand temps de concentration (BV "Rural" à Allinges) retrouve son état initial.*

- 2) **Recherche des intensités maximales** : Pour chaque durée D (D allant de 10 à 60 minutes avec un pas de temps de 10 minutes dans notre cas), chercher l'intensité maximale sur cette durée. Le dépouillement a été réalisé à origine variable (par exemple pour D = 20 minutes, nous avons cherché I_{\max} sur les pas de temps 0-20, 10-30, 20-40, etc.)
- 3) **Classement des événements par intensité décroissante** : Pour chaque durée D classer les événements par intensité décroissante et affecter un rang, noté R, à chaque intensité. Si l'intensité maximale est la même pour deux événements, le rang reste identique.
- 4) **Détermination des fréquences empiriques de dépassement** : Attribuer à chaque valeur d'intensité maximale la fréquence empirique de dépassement, notée F, selon la loi de Bos-Levenbach :

$$F = \frac{R - 0,3}{N + 0,4} \quad (21)$$

- 5) **Détermination de la période de retour** : A partir de la Loi de Bos-Levenbach, calculer la période de retour T avec la formule suivante :

$$T = \frac{N + 0,4}{R - 0,3} \cdot \frac{P}{N} \quad (22)$$

P : nombre d'années de mesure

T : période de retour exprimée en année

- 6) **Report des intensités maximales en fonction de la durée D et de la période de retour T sur un graphique**

Annexe 4 - Code VBA pour l'application de la méthode du réservoir linéaire

Ci-dessous le code VBA pour l'application de la méthode du réservoir linéaire. Le code ne présente que les étapes calculatoires et non pas l'ensemble des lignes de code permettant la vérification des valeurs saisies par l'utilisateur.

Le codage de l'application des autres méthodes de calcul est présenté dans le rapport « PROJET TECHNIQUE 1 – PROJET LIBRE ». Développement d'un outil de calcul pour l'assainissement pluvial. 2020.

```
Application.ScreenUpdating = False
```

```
Dim a As Double, b As Double, region As Double, occurrence As Double
```

```
Dim St As Double, Sa As Double
```

```
Dim k As Double, t1 As Double, t2 As Double, t3 As Double, i2 As Double, imax As Double, k1 As Double, k2 As Double
```

```
Dim t As Double, j As Double, t11 As Double, t22 As Double, t33 As Double
```

```
Dim tableau(1000000, 1)
```

```
Dim tableau2(1000000, 1), p As Double
```

```
Dim D As Double, ks As Double, q As Double, i As Double
```

```
'Choix de la PDR
```

```
If ComboBox1 = "1 an" Then
```

```
    occurrence = 1
```

```
End If
```

```
If ComboBox1 = "2 ans" Then
```

```
    occurrence = 2
```

```
End If
```

```
If ComboBox1 = "5 ans" Then
```

```
    occurrence = 3
```

```
End If
```

```
If ComboBox1 = "10 ans" Then
```

```
    occurrence = 4
```

```
End If
```

```
'Choix de la région
```

```
If ComboBox2 = "Genève-Cointrin" Then
```

```
    region = 1
```

```
End If
```

```
If ComboBox2 = "Chamonix" Then
```

```
    region = 2
```

```
End If
```

```
If ComboBox2 = "Autre" Then  
region = 3  
End If
```

'Recherche H

```
With Sheets("DONNEES")  
a = WorksheetFunction.HLookup(occurrence, Sheets("DONNEES").Range("E3:H6"), region + 1, True)  
End With
```

```
With Sheets("DONNEES")  
b = WorksheetFunction.HLookup(occurrence, Sheets("DONNEES").Range("E10:H13"), region + 1, True)  
End With
```

'Calcul des surfaces

```
St = CDbI(txtenrobe.Value) + CDbI(txtprairie.Value) + CDbI(txtstab.Value) + CDbI(txtgazon.Value) +  
CDbI(txtforet.Value) + CDbI(txtbeton.Value) + CDbI(txttoit.Value)  
If St = 0 Then  
    MsgBox "La surface ne peut pas être nulle", vbExclamation, "Alerte"  
    Exit Sub  
End If
```

```
Sa = CDbI(txtcenrobe.Value) * CDbI(txtenrobe.Value) + CDbI(txtcgazon.Value) * CDbI(txtgazon.Value) +  
CDbI(txtcstab.Value) * CDbI(txtstab.Value) + CDbI(txtcprairie.Value) * CDbI(txtprairie.Value) +  
CDbI(txtcforet.Value) * CDbI(txtforet.Value) + CDbI(txtcbeton.Value) * CDbI(txtbeton.Value) +  
CDbI(txtctoiture.Value) * CDbI(txttoit.Value)
```

'Calcul du lag time

```
k2 = 0.254 * (St / 10000) ^ (-0.0076) * (Me.txtcimp.Value * 100) ^ (-0.512) * Me.txtpentebv.Value ^ (-0.401)  
* Me.txtlongueurbv.Value ^ 0.6
```

```
If k2 < 6 Then  
    k1 = 6  
    Else: k1 = k2  
End If
```

```
k = k2 * 60
```

'Calcul des temps de la pluie

```
t1 = 0.5 * k
```

```
t2 = 2.25 * k
```

```
t3 = 5 * k
```

'Calcul des intensités de la pluie

$$i2 = ((0.25 * k1)^b) * (120 * a * (2^b)) * ((1 - (0.1^{(b+1)})) / (0.9 * (0.1^b)))$$

$$imax = ((0.25 * k1)^b) * (120 * a * (2^b)) * ((0.1^b) - 1) / (0.9 * (0.1^b))$$

'Création du tableau de la pluie

For t = 0 To t2

 tableau(t, 0) = t

 tableau(t, 1) = t * i2 / t2

Next t

For t = t2 To t2 + (t1 / 2)

 tableau(t, 0) = t

 tableau(t, 1) = t * ((imax - i2) / (0.5 * t1)) + (i2 - (((t2 * (imax - i2)) / (0.5 * t1))))

Next t

For t = t2 + (t1 / 2) To t2 + t1

 tableau(t, 0) = t

 tableau(t, 1) = (t * ((i2 - imax) / (0.5 * t1))) + (i2 - ((i2 - imax) / (0.5 * t1)) * (t2 + t1))

Next t

For t = t2 + t1 To t3

 tableau(t, 0) = t

 tableau(t, 1) = (t * ((-i2) / (t3 - t2 - t1))) - t3 * (-i2 / (t3 - t1 - t2))

Next t

Sheets("TEST").Select

Range("A1:Z1000000").Select

Selection.ClearContents

Sheets("TEST").Range("a1:b1000000") = tableau

tableau2(0, 0) = 0

tableau2(0, 1) = 0

For p = 1 To 1000000

 If p > t3 And tableau2(p - 1, 1) < 0.05 Then

 Exit For

 Else

 If tableau(p, 0) <> "" Then

 tableau2(p, 0) = tableau(p, 0)

 Else: tableau2(p, 0) = tableau2(p - 1, 0) + 1

 End If

 tableau2(p, 1) = tableau2(p - 1, 1) * Exp(-1 / k) + 2.78 * (1 - Exp(-1 / k)) * (Sa / St) * (St / 10000) * tableau(p, 1)

 End If

Next p

```
Sheets("TEST").Range("m1:n1000000") = tableau2
```

```
q = WorksheetFunction.Max(Sheets("TEST").Range("N1:N1000000"))
```

```
'Coefficient de Manning Strickler
```

```
If ComboBox3.ListIndex <> -1 And txtks.Value = "" Then
```

```
  If ComboBox3 = "Béton" Then
```

```
    ks = 85
```

```
  End If
```

```
  If ComboBox3 = "Fonte" Then
```

```
    ks = 95
```

```
  End If
```

```
  If ComboBox3 = "PVC" Then
```

```
    ks = 100
```

```
  End If
```

```
End If
```

```
'Pente du collecteur
```

```
i = Me.txtpentecollecteur.Value
```

```
'Calcul du diamètre
```

```
D = ((q / 1000) / (0.312 * ks * (i ^ (0.5)))) ^ (3 / 8) * 1000
```

```
Application.ScreenUpdating = True
```

```
MsgBox "Veuillez selectionner l'emplacement d'enrgistrement du rapport PDF", vbInformation,  
"Enrgistrement du rapport"
```

```
Sheets("RECAP3").Select
```

```
With Worksheets("RECAP3")
```

```
  ' Outils pour ouvrir une boite de dialogue et choisir l'emplacement voulu :
```

```
  With Application.FileDialog(msoFileDialogFolderPicker)
```

```
    .Show = -1 Then
```

```
      chemin = .SelectedItems(1) & "\"
```

```
    End If
```

```
  End With
```

```
  Date_test = Now
```

```
  X = Format(Date_test, "h\hmm'ss'")
```

```
  ' Enregistrement en PDF :
```

```
  ActiveSheet.ExportAsFixedFormat Type:=xlTypePDF, Filename:= _  
    chemin & "Recap_Calcul_" & X, Quality:= _
```

```
xlQualityStandard, IncludeDocProperties:=True, IgnorePrintAreas:=False, _  
OpenAfterPublish:=True
```

```
End With
```

```
Sheets("MENU").Select
```

```
Sheets("MENU").Range("A1").Select
```

```
End Sub
```

```
Private Sub UserForm_Initialize()
```

```
With ComboBox1
```

```
.AddItem "1 an"
```

```
.AddItem "2 ans"
```

```
.AddItem "5 ans"
```

```
.AddItem "10 ans"
```

```
End With
```

```
With ComboBox2
```

```
.AddItem "Genève-Cointrin"
```

```
.AddItem "Chamonix"
```

```
.AddItem "Autre"
```

```
End With
```

```
With ComboBox3
```

```
.AddItem "Béton"
```

```
.AddItem "Fonte"
```

```
.AddItem "PVC"
```

```
End With
```

```
End Sub
```

Annexe 5 - Photographies du BV "Rural" à Allinges



Figure 45 - Photographie de la plage de dépôt dans le bassin de stockage d'Allinges (Allinges, Haute-Savoie - 07/05/2021)



Figure 46 - Photographies du chemin forestier et du fossé en amont du réseau (Allinges, Haute-Savoie - 07/05/2021)

Annexe 6 - Photographies des points de mesures



Figure 47 - Photographie du point de mesure BV "Parking" (Thonon les Bains, Haute-Savoie, France - 13/04/2021)

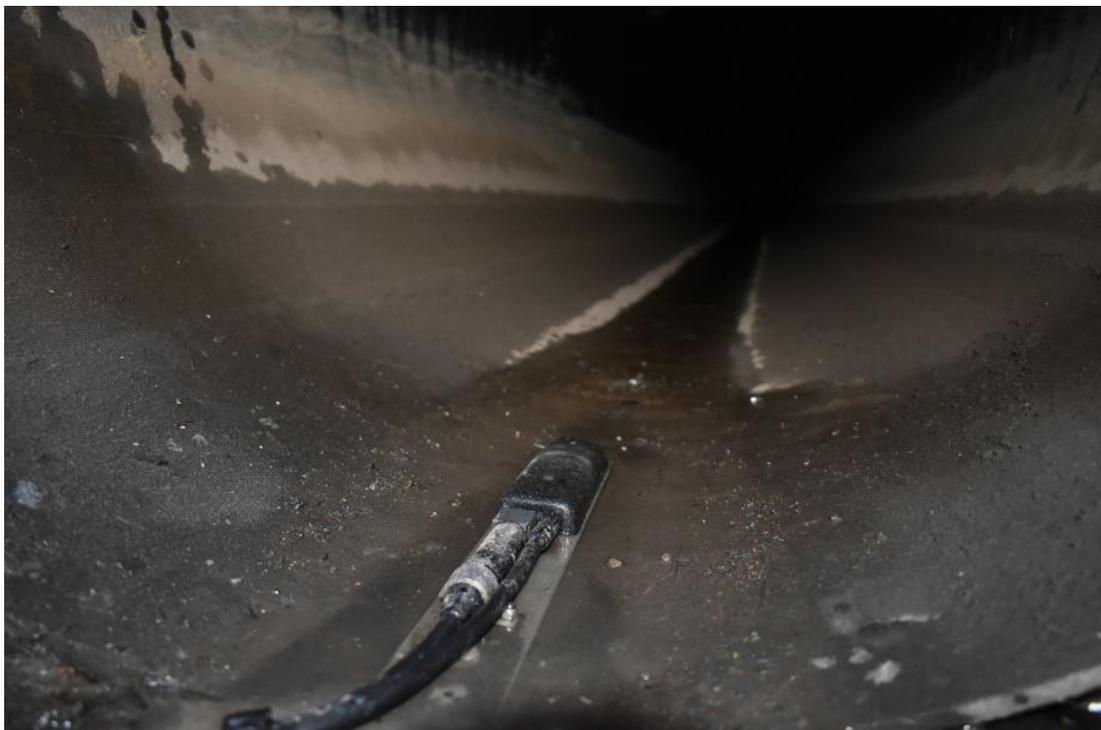


Figure 48 - Photographie du point de mesure BV "Voirie" (Sciez, Haute-Savoie, France - 13/04/2021)



Figure 49 - Photographie du point de mesure BV "Rural" (Allinges, Haute-Savoie, France - 13/04/2021)

Annexe 7 - Carte de situation des appareils de mesure

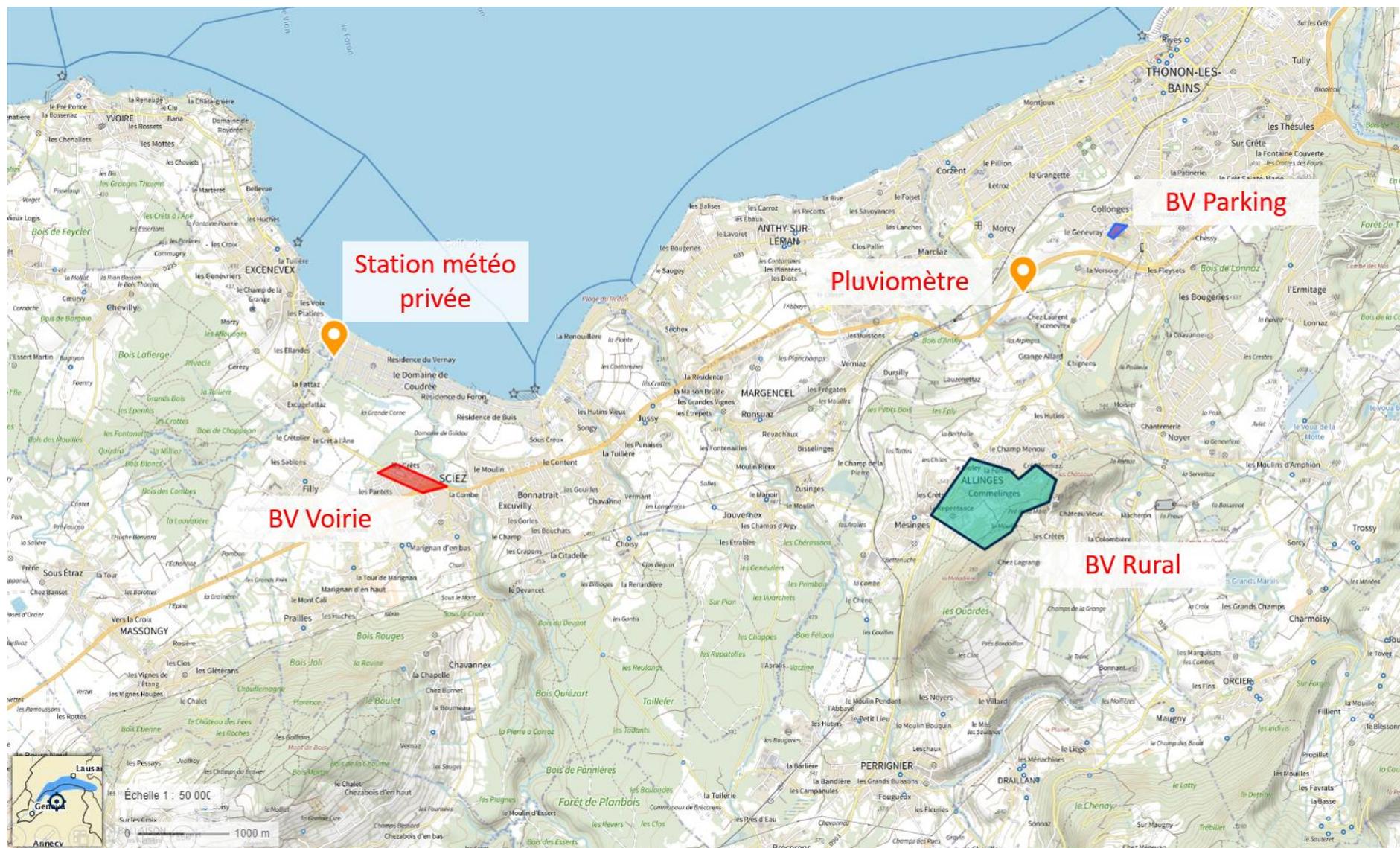


Figure 50 - Carte de l'emplacement des appareils de mesure (Géoportail, le 22/05/2021)

Annexe 8 - Présentation des précipitations sur la période de mesure

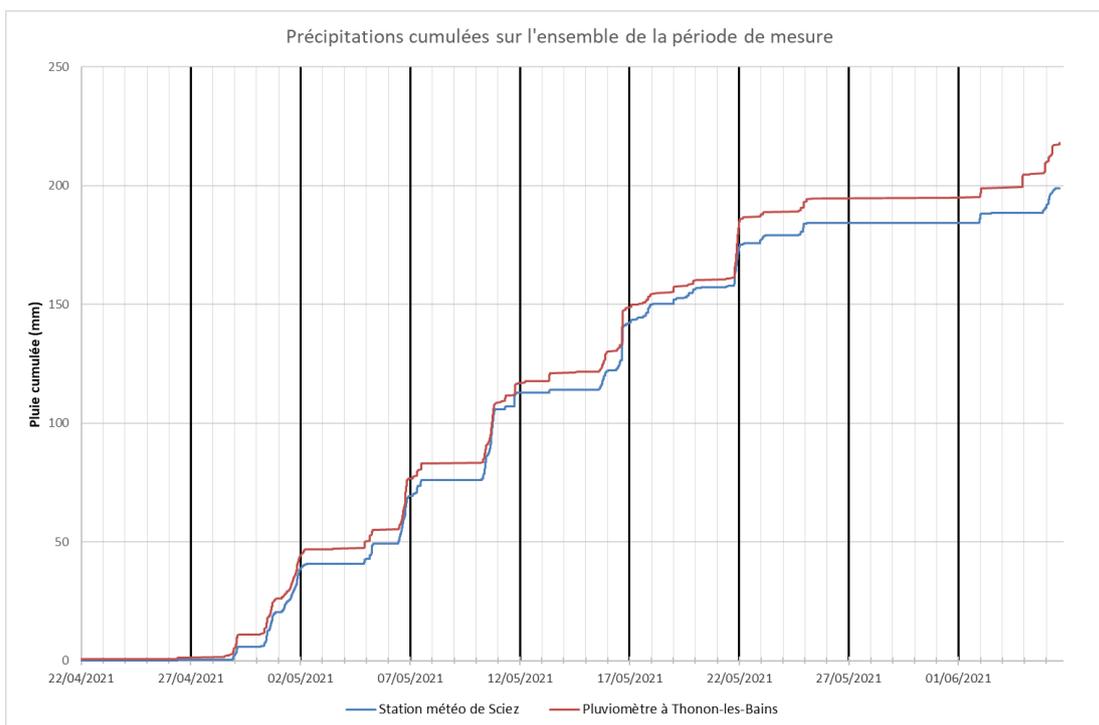


Figure 51 - Graphique présentant les précipitations cumulées à Sciez et Thonon-les-Bains

Intensité des pluies mesurées à THONON-LES-BAINS (en mm/h)						
Date	Durée (min)					
	10	20	30	40	50	60
28/04/2021	5,61	5,02	4,37	3,84	3,49	3,30
30/04/2021	5,37	4,44	3,72	3,60	3,66	3,39
04/05/2021	4,24	3,30	3,47	3,16	3,11	2,07
05/05/2021	3,55	3,53	3,19	3,00	1,57	1,57
06/05/2021	19,14	14,73	11,32	9,01	7,61	6,55
07/05/2021	1,72	1,58	1,28	-	-	-
07/05/2021	5,19	4,04	3,58	2,81	1,78	1,96
07/05/2021	9,50	7,87	-	-	-	-
10/05/2021	7,00	5,87	5,20	4,75	4,26	3,92
11/05/2021	3,18	2,72	2,63	2,56	-	-
11/05/2021	12,13	8,16	6,14	5,06	4,77	3,28
13/05/2021	5	4,1	3,52	3,4	2,79	2,79
15/05/2021	8,33	5,58	3,99	2,8	2,8	2,47
16/05/2021	19,2	16,99	14,35	14,27	14,22	13,02
17/05/2021	4,29	-	-	-	-	-
17/05/2021	4,18	-	-	-	-	-
19/05/2021	4,27	4,19	3,75	-	-	-
19/05/2021	3,54	3,04	-	-	-	-
21/05/2021	16,31	10,75	9,09	7,42	7,29	6,7
24/05/2021	12,79	-	-	-	-	-
25/05/2021	5,17	-	-	-	-	-
01/06/2021	6,06	5,82	4,66	4,19	3,76	3,19
03/06/2021	19,79	12,05	8,19	6,04	-	-
04/06/2021	10,78	7,46	5,6	3,59	3,8	3,42
05/06/2021	7,58	6,86	5,85	4,37	4,17	3,17

Tableau 19 - Intensité des précipitations (de 10 à 60 minutes) mesurées à Thonon-les-Bains

Annexe 9 - Données brutes BV Parking

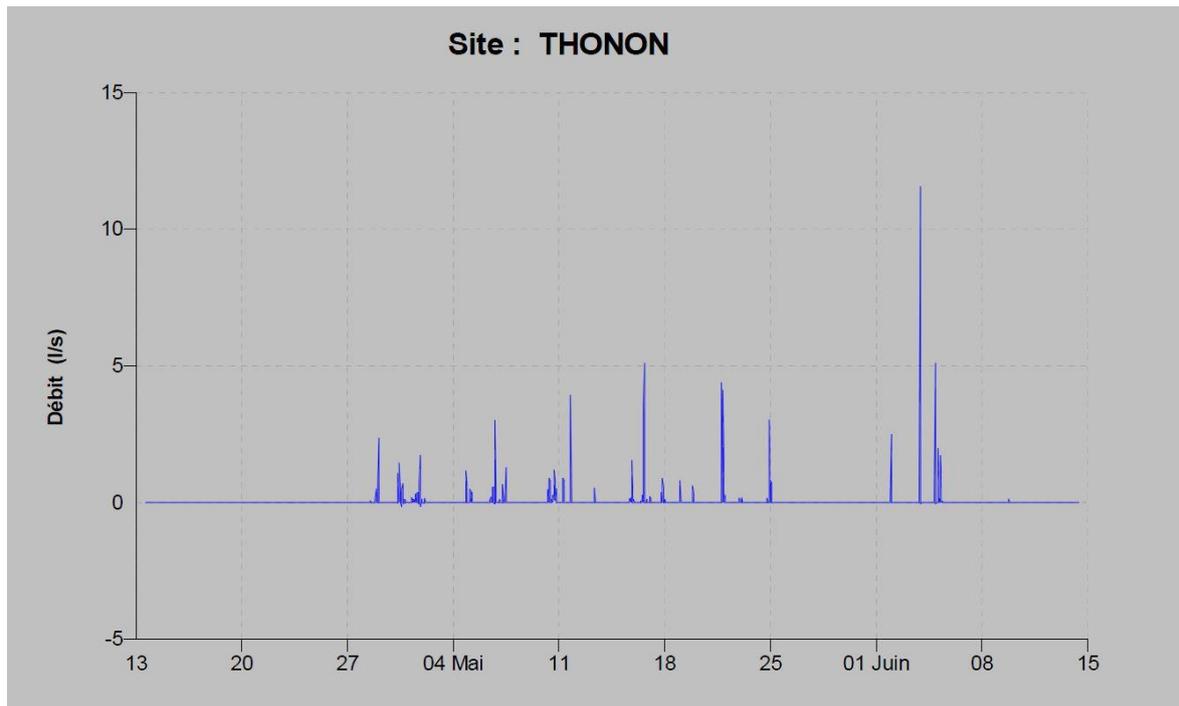


Figure 52 - Données brutes de mesure de débit sur le BV "Parking"

Annexe 10 - Données brutes BV Voirie

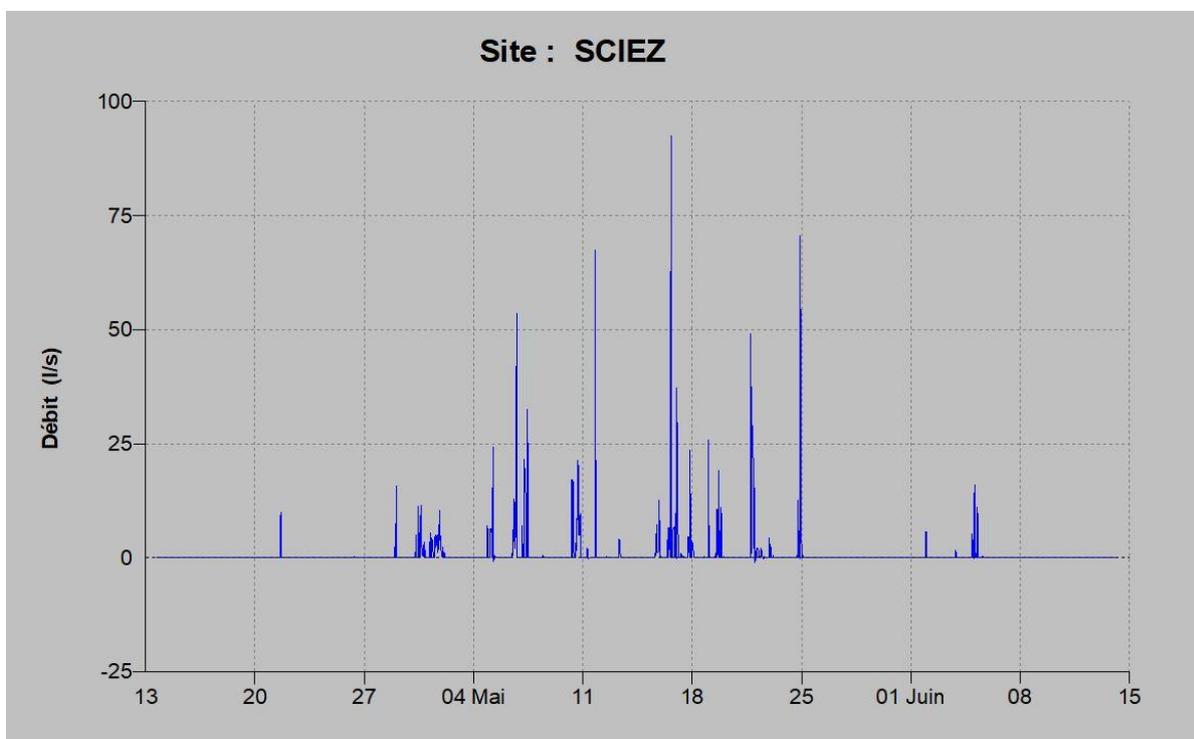


Figure 53 - Données brutes de mesure du débit sur le BV Voirie

Annexe 11 - Données brutes BV Rural

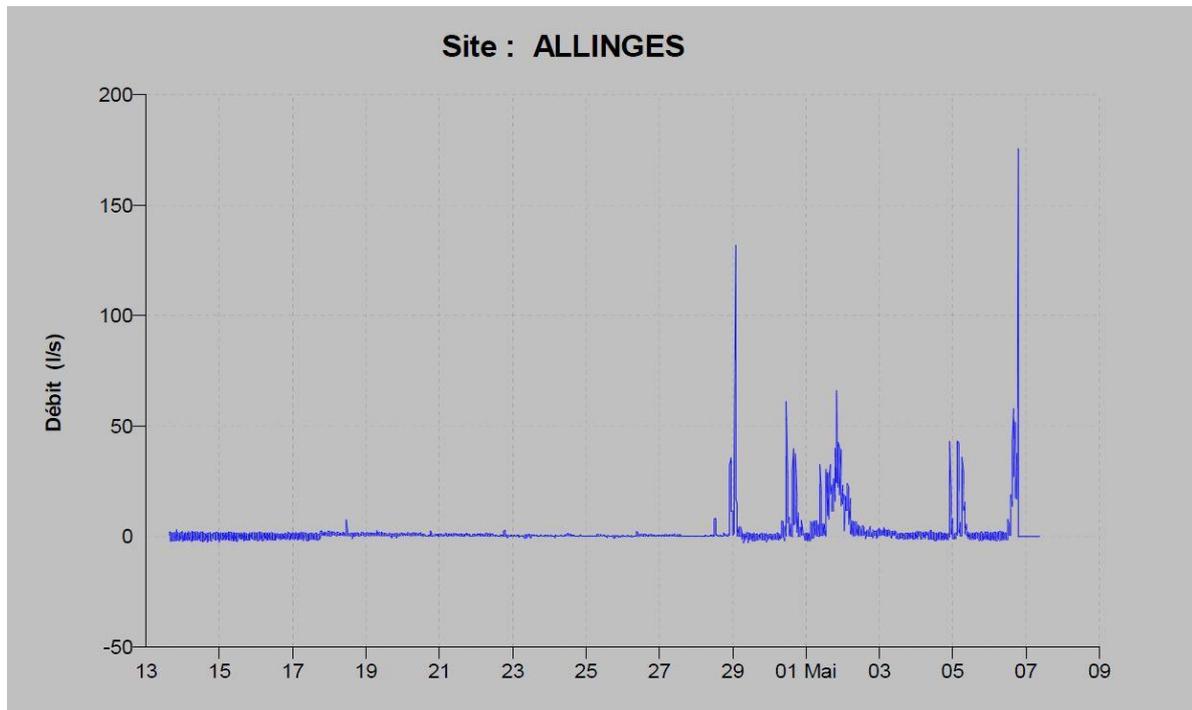


Figure 54 - Données brutes de mesure du débit sur le BV Rural du 12/04/2021 au 06/05/2021

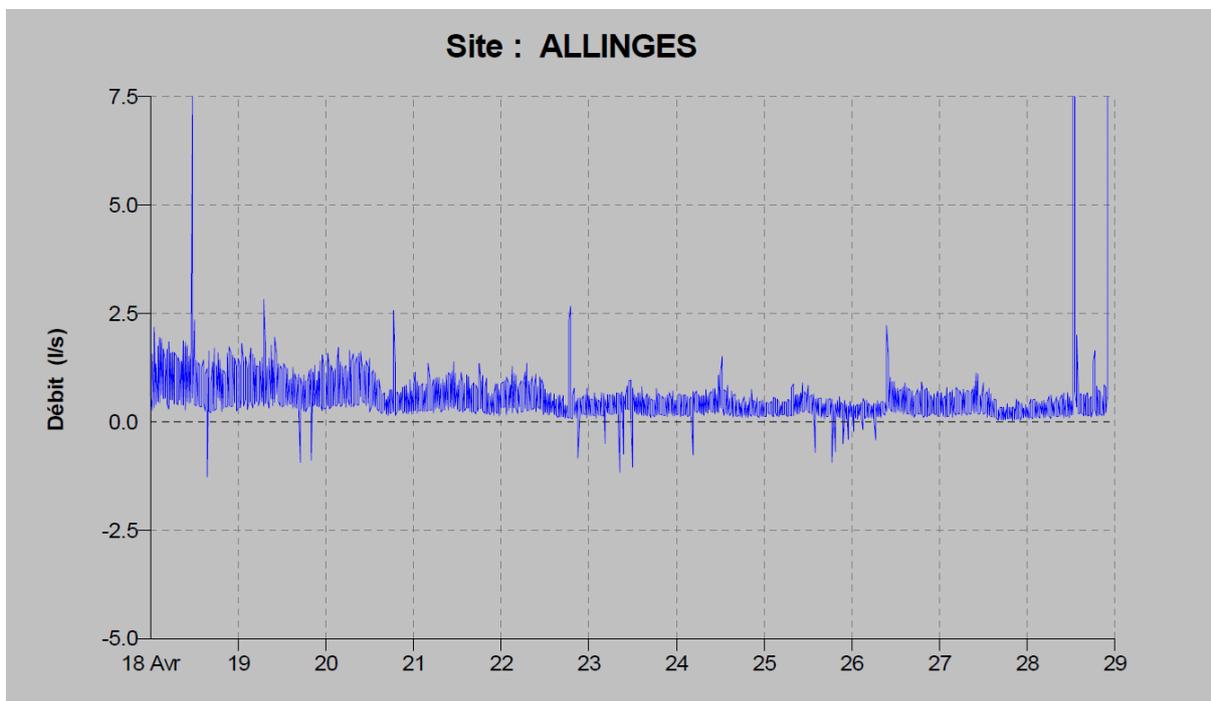


Figure 55 - Données brutes de mesure de débit sur le BV Rural du 18/04/2021 au 29/04/2021

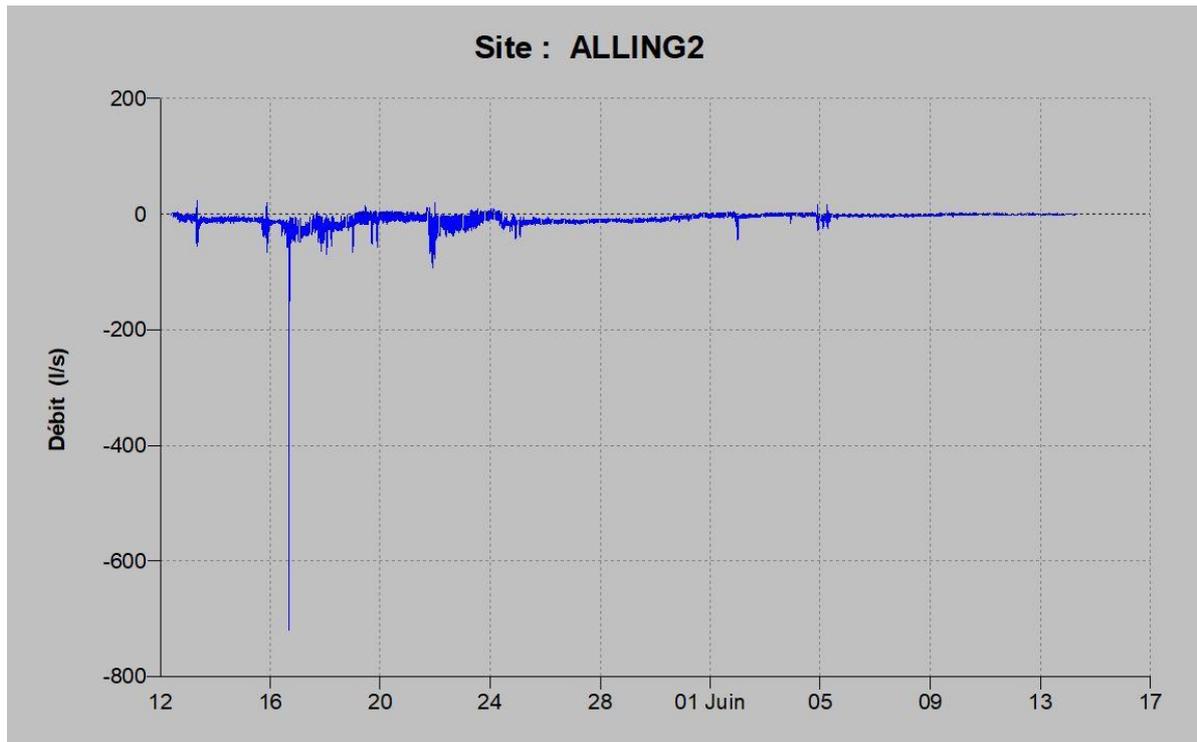


Figure 56 - Données brutes de mesure du débit sur le BV Rural du 12/05/2021 au 14/06/2021

Annexe 12 - Réponse hydrologique sur le BV "Parking" le 03/06/2021

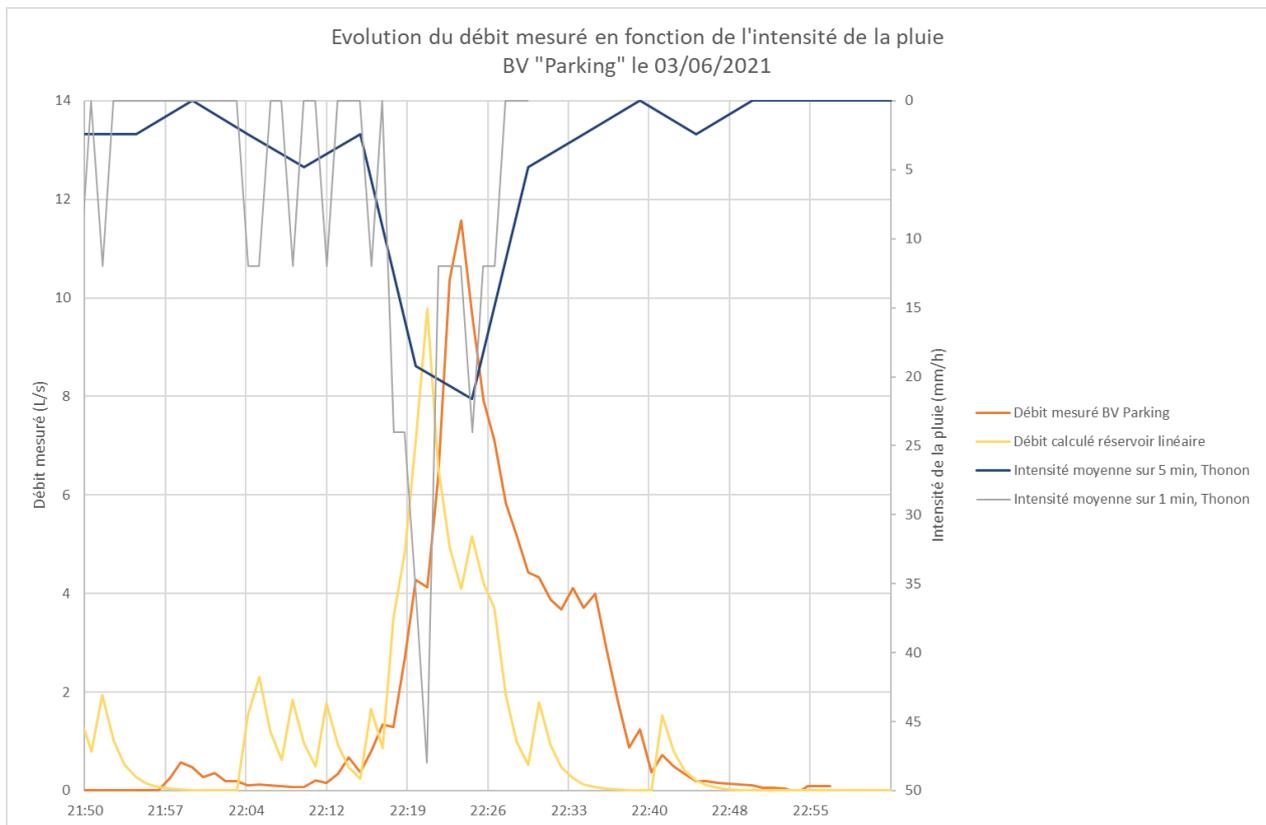


Figure 57 - Evolution du débit mesuré en fonction de l'intensité de la pluie sur le BV "Parking" à Thonon-les-Bains, le 03/06/2021

Annexe 13 - Schéma du ruissellement sur le BV "Parking"

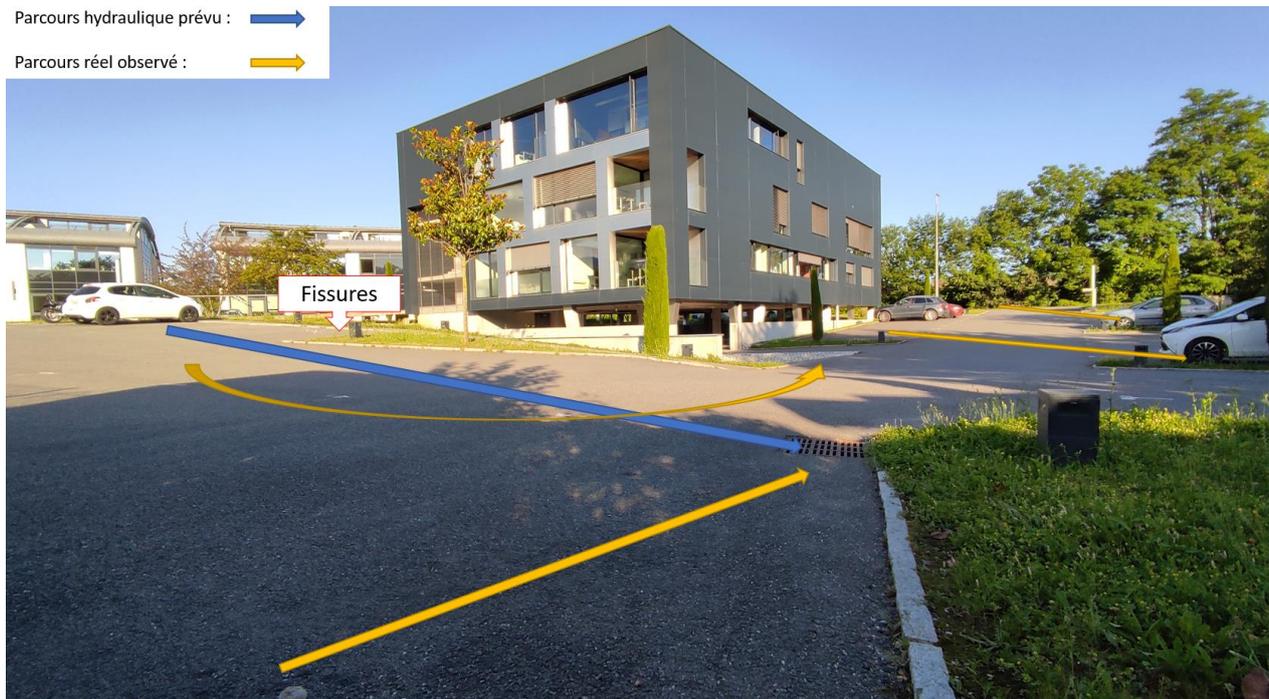


Figure 58 - Schéma et photographies présentant le ruissellement observé sur le BV "Parking" à Thonon-les-Bains (prise de vue le 02/07/2021)

Annexe 14 - Description de la méthode des pluies

La méthode des pluies permet de réaliser une première approche dans le cas de dimensionnement d'ouvrage de stockage. Elle repose sur trois grandes hypothèses :

- Le débit de fuite de l'ouvrage est considéré constant. Thonon Agglomération préconisant l'utilisation de régulateur de débit de type vortex en sortie d'ouvrage, cette hypothèse est de plus en plus souvent vérifiée ;
- Les précipitations ne subissent pas de lissage lié au ruissellement : la transformation pluie/volume est instantanée ;
- Les périodes de temps sec ne sont pas considérées lors du dimensionnement ;

De ces trois principes découlent les limites d'applications de la méthode des pluies : des bassins versants de quelques hectares ne contenant aucun autre ouvrage de régulation de débit. De plus, le temps de vidange de l'ouvrage ne doit pas excéder 24 heures.

Le graphique ci-après présente le principe de la méthode des pluies, suivit des formules de calcul (équation n° 22 et n° 23).

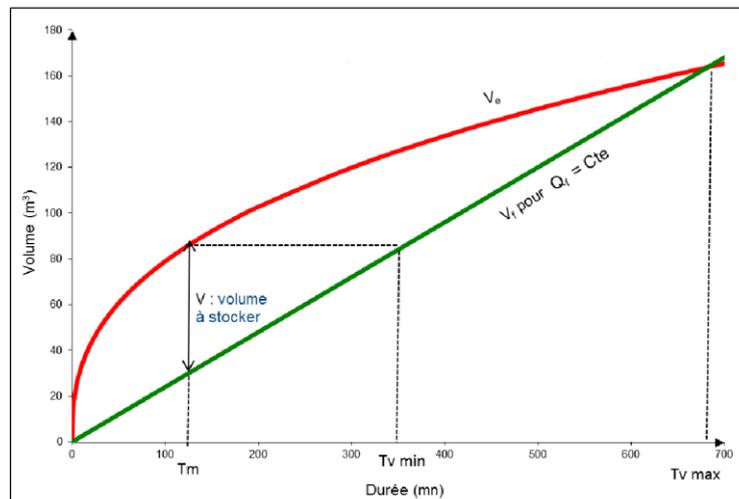


Figure 59 - Méthodes de pluies (Memento Technique 2017, ASTEE)

$$V_{max} = 10 \cdot a \cdot T^{b+1} \cdot S_a - Q_{vidange} \cdot T \quad (22)$$

Avec :

- V_{max} : Volume du bassin de stockage (m^3)
- a et b : Coefficients de Montana
- S_a : Surface active du bassin versant (ha)
- $Q_{vidange}$: Débit de fuite de l'ouvrage (m^3/min)
- T : Durée de la pluie pour laquelle le volume à stocker est maximal (min)

En dérivant l'équation n° 22 par rapport à T avec $V(T)/dt = 0$, on obtient :

$$T(hmax) = \left(\frac{Q_{vidange}}{10 \cdot S_a \cdot (b+1) \cdot a} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (23)$$

Avec les mêmes paramètres que l'équation n° 22.



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Diplôme : Diplôme D'ingénieur de l'ENGEES, Formation par apprentissage

Spécialité : Voie d'approfondissement « Hydrosystèmes »

Auteur :

Marvin SIMONET

Année :

2021

Titre

Développement et validation d'un utilitaire de calcul en hydrologie urbaine

Nombre de pages 61 texte

19 annexes

Nombre de références bibliographiques : 33

Structure d'accueil : Canel Ingénierie Infrastructure / THONON-LES-BAINS / Haute-Savoie

Maître de stage : Arnaud BOLLERY

Résumé

En tant que maître d'œuvre VRD, C2I doit disposer d'un outil de dimensionnement de réseau pluvial simple et robuste. Développé sous VBA®, sa fiabilité a été validée suite à la réalisation d'une campagne de mesure de deux mois dans le secteur du Chablais (Haute-Savoie).

Ces mesures ont permis de montrer que les modèles globaux (méthode Rationnelle ou de Caquot suivant les caractéristiques du projet) permettent de répondre aux besoins de l'entreprise dans la majeure partie des cas. Les résultats modélisés étant cohérents avec les mesures réalisées sur trois sites distincts pour des occurrences de pluie observées inférieures à six mois.

Mots-clés

Hydrologie urbaine, dimensionnement de réseau, gestion des eaux pluviales, Visual Basics for Application (VBA®), transformation pluie/débit